

SBS X 그랜드 퀘스트 2025

기술주권 확보, 그 10가지 질문

SBS X 그랜드 퀘스트 보고서

기술주권 확보, 그 10가지 질문

발행일	2025년 7월 15일
발행처	SBS
발행인	방문신 사장
총괄	정호선 보도특임국장
기획	이정애 미래부장
에디팅	미래부 우승현 정준기 박준석 류란 여현교 / 정선년 김지숙 작가 임세종 감독
디자인&편집	SBS i
홈페이지	https://grandquests.sbs.co.kr/

인사말

방문신 SBS 사장 4

축하의 말씀

유상임 과학기술정보통신부 장관 5

최태원 대한상공회의소 회장 6

최민희 국회 과학기술정보방송통신위원장 7

이철규 국회 산업통상자원중소벤처기업위원장 8

포토 스케치 9

주제영상 13

포럼 취지 및 제언

이정동 서울대 국가미래전략원 17

과학과 기술의 미래 클러스터장 19

차기 정부에 전하는 과학계와 SBS의 '기술 패권'

대응 정책 제언

여야 과학기술 경쟁력확보 위한 비전 제시

최형두 국회 과학기술정보방송통신위원회 간사 22

이한주 민주연구원 원장 24

SESSION1. 역노화의 기술

저속노화를 넘어선 역노화, 가능한가

역노화의 기술 발전과 미래 전망 26

이준호 서울대 생명과학부 교수

피부 역노화: 가능성의 눈을 뜨다 29

박원석 아모레퍼시픽 R&I 선행뷰티연구소장

표현형 항노화의 선구자 '보톨리눔 독신' 31

정현호 메디톡스 대표

패널 토크 33

SESSION 2. 신종 바이러스 예방 백신

코로나 다음 바이러스 막을 수 있나

속도, 플랫폼, 협력... 무엇이 다음 팬데믹을 바꿀 수 있을까? 39

김훈 SK바이오사이언스 Global Biz 대표

미래에 나타날 신종 바이러스 감염을 예방하는 백신을 미리 만들 수 있을까? 41

박수형 KAIST 의과대학원 교수

사회가 새로운 지식을 수용하는 방식: 면역의 사례 44

신의철 KAIST 의과대학원 교수

패널 토크 46

SESSION 3. 공간 디스플레이

현실과 화면의 경계를 허문 디스플레이

상상 속 공간 디스플레이 기술 51

홍용택 서울대 전기정보공학부 교수

미래 디스플레이는 어떤 방향으로 발전할 것인가? 53

김기홍 LG디스플레이 차세대 디스플레이 담당

윈도우 타입과 볼류메트릭 타입 공간 디스플레이 55

박재형 서울대 전기정보공학부 교수

우리 앞에 펼쳐질 공간 디스플레이의 미래 57

홍종호 삼성디스플레이 연구소 마스터

패널 토크 59

SBS문화재단 그랜드퀘스트 프라이즈 시상식 64

SESSION 4. 미생물 세포공장

온실가스로 플라스틱을 만든다?

온실가스로부터 플라스틱을 경제적으로 만들 수 있을까? 67

이상엽 KAIST 생명화학공학과 특훈교수

미생물 세포공장 기반 온실가스의 플라스틱 전환 69

서상우 서울대 화학생명공학부 교수

복극곰이 살 곳이 사라지는 것을 막을 수 있을까? 71

정준영 C.제일제당 BIO연구소 Synthetic BIO담당

패널 토크 74

SESSION 5. 효율 60% 태양전지
태양전지 효율, 60% 벽 넘을 때 벌어지는 일

60% 효율 태양전지 80

박남규 성균관대 화학공학부 종신석좌 교수

60% 태양전지를 위한 과학적 상상력 82

남기태 서울대 재료공학부 교수

페로브스카이트 탠덤 태양전지 과학의 비약적 발전에서 상업적 실행 가능성까지의 로드맵 84

문수진 한화솔루션 큐셀부문 판교R&D센터장

패널 토크 86

SESSION 6. 옹스트롬 미터 시대 반도체 기술
머리카락 100만 분의 1 반도체

와트 다이어트: 실리콘 반도체 기술의 미래 90

신창환 고려대 전기전자공학부 교수

원자 두께의 차세대 반도체는 나노를 넘어 옹스트롬 미터 시대를 열수 있는가? 92

이철호 서울대 전기정보공학부 교수

옹스트롬 시대로 접어드는 반도체 기술의 난제들 94

권석준 성균관대 화학공학부 교수

패널 토크 97

SESSION 7. 포스트 실리콘 반도체 소자
실리콘 대체할 차세대 반도체 기술은

신 컴퓨팅 아키텍처와 실리콘 플랫폼의 융합 101

최성율 KAIST 전기 및 전자공학부 교수

AI 시스템의 한계에서 찾은 실마리: 포스트 실리콘 시대, 우리는 무엇을 준비해야 하는가 103

류수정 서울대 차세대반도체 혁신융합대학사업단 교수

포스트 실리콘 소자 105

염한웅 포항공대 물리학과 교수

패널 토크 107

SESSION 8. 뉴로모픽 아키텍처
사람의 뇌처럼 효율적인 컴퓨터 만들 수 있을까?

대담 111

석민구 컬럼비아대 전기공학부 교수

전동석 서울대 융합과학기술대학원 교수

SESSION 9. 가상현실과 뇌내현실
뇌내현실이 현실화된다면?

"뇌내현실" 개념의 이해 119

백세범 KAIST 뇌인지과학과 교수

뇌내현실의 현실화 121

이대열 존스홉킨스대 신경과학과 블룸버그 특훈교수

패널 토크 123

SESSION 10. 일반인공지능과 인간의 공존
인간의 역량을 추월하는 인공지능과의 공존

일반인공지능이 인간을 넘어서는 징후를 포착할 수 있을까? 126

김건희 서울대 컴퓨터공학부 교수

패널 토크 128

대담
"기술격차 날로 심화... 추격자 아닌 선도자 돼야"

이정동 서울대 공학전문대학원 교수 136

이정애 SBS 보도본부 미래부장

참석자들의 후기 141

주요 언론보도 모음 145



SBS X 그랜드 퀘스트를 개최하며



제1회 SBS X 그랜드 퀘스트에 함께 해주신 모든 분들을 환영합니다.

방문신 SBS 대표이사 사장



영상 보러가기

어려운 발걸음해 주신 외빈 여러분, 그리고 시청자 여러분, 진심으로 감사드립니다. SBS 그랜드 퀘스트는 세상을 바꿔가고 있는 화두가 무엇인지, 그 본질적 어젠다의 해법은 무엇인지를 찾아보고자 서울대 국가미래전략원과 함께 준비한 포럼입니다.

SBS가 글로벌 지식포럼으로 20년째 운영하고 있는 SDF, SBS D 포럼에 이은 또 다른 국가 어젠다 프로젝트입니다. 올해 제1회의 주제는 '기술주권 확보, 그 10가지 질문'입니다 AI, 초미세 반도체, 태양전지, 미래의 신종 바이러스와 예방백신, 인간의 역노화 등 미래 기술 최고 학자들의 연구와 여기에 덧붙여 삼성, LG, SK, 한화, CJ, KT, 네이버, 아모레퍼시픽, 메디톡스 같은 관련 기업을 매칭해 토론하는 새로운 방식을 도입했습니다. 학자들의 연구와 기업들의 사업 전략이 동시에 논

의될때 현실성 있는 기술주권의 해법이 탄생할 것이라고 판단했기 때문입니다. 이런 새로운 방식이 학계와 기업의 공동 참여를 확대시키고 실용적 논의를 진전시켜 나갈 것으로 믿습니다. 실질적인 산-학 연계의 성과가 이번 SBS 그랜드 퀘스트에서 더 빛을 발하기를 기대합니다. 기술주권 확보를 위한 비전과 공약을 전달해 주신 각 당의 대통령 경선 후보님들과 정책 제언자님들께 존경과 감사의 인사 드립니다.

오늘 포럼은 취지에 공감해 주시고 도움을 주신 파트너들의 협력 덕분에 가능했습니다. 지원해 주신 기업과 관계자분들께 감사드립니다. 제1회 SBS 그랜드 퀘스트가 던지는 깊이 있는 질문과 세상을 바꾸는 어젠다들이 우리 사회에 폭넓게 확산되고 정부 정책으로 반영돼 더 나은 대한민국의 미래로 연결되기를 희망합니다.

SBS X 그랜드 퀘스트

과학기술의 질문과 답으로 여는 미래

유상임 과학기술정보통신부 장관

‘제1회 SBS 그랜드 퀘스트’ 개최를 축하드립니다. 과학 기술은 언제나 ‘질문’을 통해 해답을 찾고, 그 해답은 세상을 변화시켜 왔습니다. ‘인공지능이 인간의 사고를 닮을 수 있을까?’라는 질문은 챗GPT와 같은 혁신을 낳았습니다. 이제 AI는 단순 도구를 넘어, 스스로 사고하는 AI 에이전트, 로봇과 결합한 피지컬 AI, 즉 실체형 AI로 진화하고 있으며, AI와 생명과학이 결합된 디지털바이오, 합성생물학에 이르기까지, 모든 산업의 지도를 새롭게 그리고 있습니다.

또한, ‘얼마나 더 빠르게 계산할 수 있는가?’라는 질문은 DRAM, HBM과 같은 반도체 개발로 이어졌으며, 이제 인류는 양자컴퓨팅까지 도전하고 있습니다. 오늘 이 자리도 질문과 해답, 그리고 변화로 이어지는 과학 기술의 가치를 보여주는 뜻깊은 자리입니다.

최근 세계는 기술패권 전쟁이 격화되고 있습니다. 우리 정부도 이에 대응하여, 올해 역대 최대 규모의 연구개발 예산을 편성하고, 공급망, 신산업, 외교안보 관점에서 12대 국가전략기술을 선정하여 역량을 집중하고 있습니다. 이 중 AI-반도체, 첨단바이오, 양자는 ‘3대 게임체인저’ 기술로 명명하고, 특별법 제정, 국가 이니셔티브 전략 마련, 민관합동 위원회 발족 등 국가적 역량을 총동원할 수 있는 체계를 마련하였습니다. 특히, 우리나라에 부족한 AI 컴퓨팅인프라를 확충하기 위해 올해 안에 GPU 1만 장을 조속히 도입할 계획입니다. 또한, 연구개발 성과가 연구실을 넘어, 산업으로 연결되어 국가 성장에 기여할 수 있는 범부처 기술사업화 생

태계 조성에도 박차를 가하고 있습니다. 이 모든 과정의 중심에는 결국 ‘사람’이 있습니다.

산학연이 함께 적재적소의 인재를 길러내고, 세계 최고 수준의 두뇌를 확보하기 위해 범부처 「과학기술 인재 육성 기본계획」도 수립 중입니다. 과학기술이 곧 국가 경쟁력인 지금, 우리 R&D의 ‘초격차 전환’이 그 어느 때보다 절실합니다. 오늘 이 자리가 ‘초격차 대한민국’으로 가는 힘찬 발돋움이 되리라 믿습니다. 다시 한번 SBS 그랜드 퀘스트 개최를 축하드리며, 시청자 여러분과 참석하신 모든 분의 건강과 행복을 기원합니다. 감사합니다.



영상 보러가기

초불확실성 시대의 혁신을 향한 질문의 의미

최태원 대한상공회의소 회장

제1회 SBS 그랜드 퀘스트에 축하 인사를 전하게 되어 영광입니다. 오늘 이 자리는 국내 최고의 석학들과 산업계 리더들이 함께하는 매우 뜻깊은 자리입니다. '그랜드 퀘스트', 웅장한 탐구란 결국 정답이 없는 문제에 과감하게 던지는 질문입니다. 이 질문이 중요한 이유는, 우리가 그 답을 찾는 순간 산업과 과학기술의 판을 바꿀 수 있다는 가능성 때문입니다.

어떻게 보면 꿈같은 도전입니다. 그러나 이 담대한 꿈에 함께 힘을 보태 주시는 분들이 이렇게 모이셨다는 사실만으로도, 저는 대한민국의 미래에 대해 큰 기대와 희망을 품게 됩니다.

요즘처럼 세상이 급변할 때, "확실한 건 불확실성뿐"이라는 말이 실감 납니다. 우리는 지금 '초불확실성'이라는 거대한 파고 앞에 서 있습니다. 급변하는 글로벌 통상환경, 인플레이션 압박, 그리고 AI가 몰고 올 경제 시스템의 근본적 전환. 이 삼각 파도가 겹쳐 대한민국이라는 배를 뒤흔들고 있습니다.

지난 수십 년간 성장의 기반이었던 추격자 전략이나 자유무역 중심의 성장 방식이 더 이상 유효하지 않을 수 있다는 인식이 필요한 시점입니다. 이럴 때일수록, 눈앞의 단기적 해법보다 더 먼 곳을 비추는 본질적 질문이 절실합니다. 이러한 문제의식 아래, 서울대 국가미래전략원과 최종현학술원은 SBS와 협력하여 지난 1년간 공동의 여정을 이어왔습니다. 최종현학술원은 급변하는 지정학 환경과 과학기술의 상호작용을 분석하며, 대한민국과 인류의 더 나은 미래를 위한 창의적 전략을 모색해 왔습니다. 특히 2022년 출범한 최종현학술원 산하 과학기술혁신위원회는 융복합적 시너지를 추구하



는 이공계 석학 네트워크로, 이번 그랜드 퀘스트의 질문 도출을 주도해 왔습니다. 첨단과학 분야의 연구개발은 더 이상 학계나 연구소만의 과제가 아닙니다. 그것은 이제 기업의 미래이자, 산업 생존의 핵심과제입니다. 기초과학에서 출발한 혁신이 산업 현장을 바꾸고, 상상에 머물던 기술이 시장의 질서를 흔드는 시대입니다. 산업계와 비즈니스 리더들은 첨단과학 R&D에 더욱 적극적으로 투자하고, 중장기적 비전과 책임 있는 연대를 바탕으로 새로운 혁신 생태계를 함께 만들어가야 합니다. 우리는 과학기술 발전의 수동적 수혜자에 머물 것이 아니라, 이를 함께 창출하는 공동 창조자(co-creator)로 나아가야 합니다. 산업계의 적극적인 관심과 참여가 첨단기술의 실현 가능성을 높이고 미래 세대를 위한 지속가능한 성장의 토대를 마련할 것입니다.

지금이야말로 우리의 도전 정신과 비전을 다시 믿고, 위기를 혁신의 기회로 전환해야 할 때입니다. 오늘 이 자리가 우리 사회의 혁신과 미래 성장 동력을 찾는 출발점이 되길 바라며, SBS 그랜드 퀘스트의 지속적인 발전과 성공을 기원합니다.

첨단 기술로 여는 대한민국 기술주권의 미래

최민희 국회 과학기술정보방송통신위원장

2025년 'SBS 그랜드퀘스트' 포럼 개최를 축하드립니다. SBS 방문신 사장님, 유홍림 서울대 총장님, 윤석민 문화재단 이사장님께 감사드립니다. 또한 함께 해주신 유상임 과학기술정보통신부 장관님, 최태원 대한상의 회장님께도 인사의 말씀을 전합니다.

이번 포럼은 역노화 기술부터 뉴로모픽 아키텍처, 인공지능과의 공존까지 한국 사회가 반드시 주목해야 할 핵심 첨단 과학기술 분야를 중심으로, 대한민국 기술주권의 미래를 함께 모색하는 뜻깊은 자리입니다. 저성장 늪에 빠진 한국 경제, 산업 경쟁력의 새로운 돌파구도

바로 여기, 첨단 기술에서 찾아야 합니다. 국회도 함께 발맞춰 가겠습니다. 대한민국은 세계 두 번째로 AI 기본법을 제정했으며, 2025년까지 AI 반도체와 양자기술 등 3대 핵심 기술에 3.5조 원을 집중 투자할 계획입니다. 국회 과방위는 정파를 초월해 합의로 ▲AI 인프라 확충 ▲산업계 협력 강화 ▲법·제도 정비 ▲국제협력 확대 ▲정부 예산지원 확대 등을 담은 성명서를 채택했습니다. 또한 이번 추경에 포함된 1.8조 원 규모의 AI 투자 사업에 대해, 과기정통부가 기재부의 벽을 넘지 못한 부분은 없는지 세심히 점검하고 있습니다.

미래 기술 강국으로의 도약은 정치권, 정부, 학계, 노사를 포함한 산업계가 함께 손을 잡을 때 비로소 가능합니다. 학계가 질문을 던지고, 산업계가 현장을 말하며, 공동으로 해답을 찾아가는 'SBS 그랜드퀘스트'는 매우 의미 있는 시도라고 생각합니다. 이런 노력들이 의미 있는 성과를 내기를 기대합니다.



혁신의 도전을 위한 지혜의 결집

이철규 국회 산업통상자원중소벤처기업위원회 위원장

과학기술계 전문가 포럼, 제1회 SBS 그랜드 퀘스트의 성대한 첫 개막을 진심으로 축하드립니다. 먼저, 뜻깊은 행사를 개최하여 주신 윤세영 SBS 창업회장님, 윤석민 SBS 문화재단 이사장님, 방문신 SBS 대표이사님, 유홍림 서울대학교 총장님을 비롯한 SBS 임직원 여러분, 서울대학교 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다. 아울러, 자리를 빛내주신 대한상의 최태원 회장님, 권성동 원내대표님, 과기정통부 유상임 장관님, 국회 과방위 최민희 위원장님을 비롯한 귀빈 여러분께도 감사의 말씀을 전합니다.



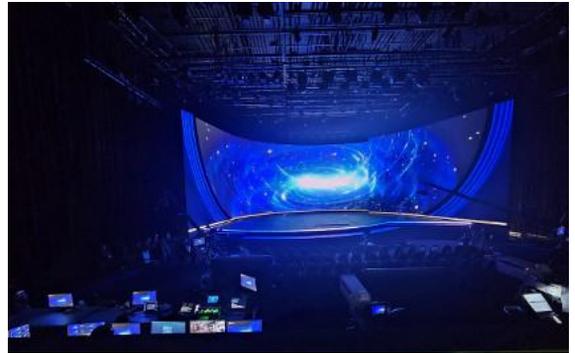
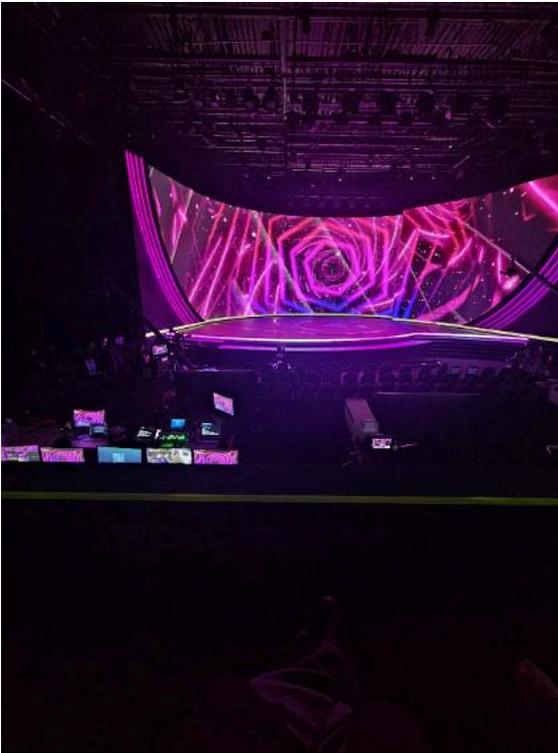
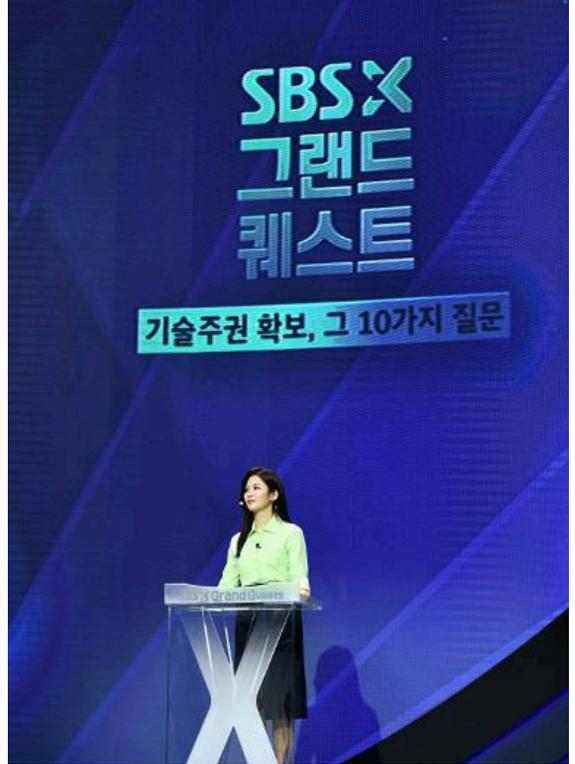
영상 보러가기

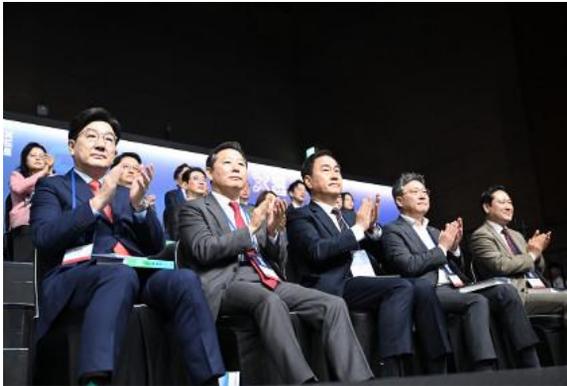
우리는 전례없이 빠르고, 급격하며, 예측 불가능한 대 전환의 갈림길에 서 있습니다. 이처럼 중대한 시점에, 국내 최고의 석학들과 산업계 리더들이 한자리에 모여 세상의 패러다임을 뒤흔들 도전적 질문을 던지고, 그 해답을 모색하는 자리에 함께하니 감회가 남다릅니다. SBS 그랜드 퀘스트의 탄생 배경처럼, 오늘 행사에서 다뤄질 10개 분야의 첨단 미래 과학기술 난제를 토대로 각 기술이 가진 함의에 대해 날카롭게 분석해볼 필요가 있습니다.

국회 산자중기위원회에서는 어제 전체회의를 열고, 美 관세조치 대응 및 산업 경쟁력 강화를 위한 추경안(산업부 13개 사업, 9,591억 원)과 중소기업의 통상리스크 대응 및 민생지원을 위한 추경안(중기부 16개 사업, 5조 112억 원)을 상정하여 심의 중에 있습니다. 국회 산자중기위원장으로 우리 경제에 미치는 충격을 최소화하는 것은 물론, 이 자리에 계신 과학기술계 석학 여러분, 기업의 리더 여러분의 치열한 도전을 힘 있게 지원해 나갈 수 있도록 모든 노력을 아끼지 않겠습니다. 다시 한번 제1회 SBS 그랜드 퀘스트 개최를 진심으로 축하드리며, 아낌없는 열정으로 이 자리에 함께 해주신 모든 분들의 건강과 행복을 기원드립니다.

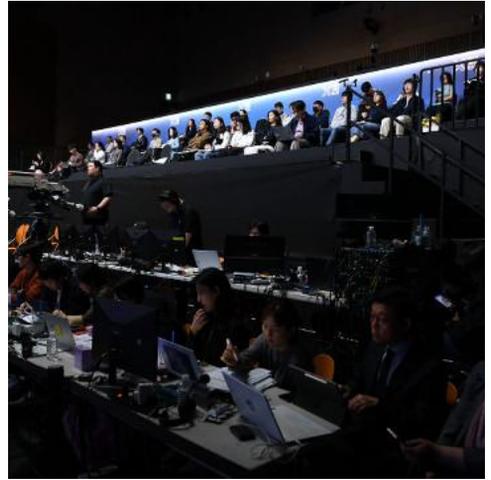


포토스케치







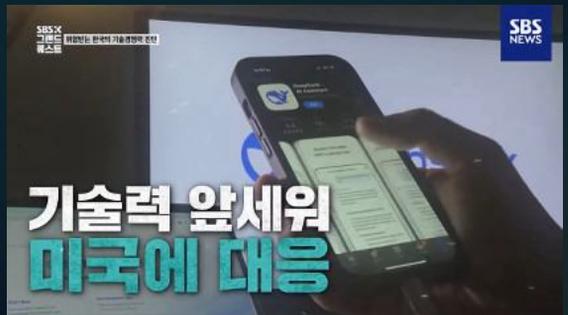


추격자에서 선도자로 : 그랜드 퀘스트를 던지는 이유

영상 보러가기

전 세계 첨단과학 기술 발전을 선도해 온 미국!
중국이 무서운 속도로 성장하면서 그 뒤를 바짝 쫓고 있습니다.

자율주행,,,전기차,,,반도체,,,디스플레이,,,로봇은 물론
인공지능, 우주 탐사까지!



기술 주도권을 둘러싼 미 중 간 패권 경쟁은
갈수록 격화되는 상황.

중국을 겨냥한 미국의 관세 폭탄!
중국의 첨단기술 굴기만큼은 절대 막겠다는 강한 의지의 표현이죠.

그 여파로 세계 경제의 위기감은 고조되고
한국도 일촉즉발의 상황에 놓였습니다.



도널드 트럼프 / 미국 대통령 (지난 3일)
아마도 최악은 한국, 일본 그리고 많은 나라가
부과하고 있는 비금전적 제한일 것입니다.

실제로 관세는 교역 물품의 가격을 바꾸려는 산업 정책의 대표적인 형태로 볼 수 있지만
사실 근거에는 미중 패권 경쟁으로 인해서 기술이 근거에 깔려 있다고 볼 수 있겠습니다.

박찬수 / 한국기술정책연구원 부원장

미국의 견제를 비웃듯 중국은 매섭게 부상 중입니다.
새로운 산업혁명 시, 중국은 '딥테크'를 앞세워
1년 만에 미국과의 격차를 바짝 좁혔습니다.

IT 강국으로 손꼽혔던 한국,
그런데 AI 기술 고도화는 기대에 미치지 못합니다.

주목할만한 AI 모델,
미국 40개, 중국 15개, 한국은 단 1개입니다.

AI 반도체 기술력은 세계적 수준인데
실질적인 산업경쟁력으로의 전환이 미흡하다는 지적이
빠아됩니다.

이런 간극, 벌어진지 꽤 됐습니다.
국가 전략기술 수준으로 볼 때 중국은 이미 3년 전
한국을 처음으로 앞질렀다고 평가된 바 있습니다.

중국 과학기술의 수준이 이제는 양뿐만 아니라 질적인 면에서 세계 최고가 됐다.
미안한 이야기지만 우리나라 과학기술 분야에서 중국보다 더 낫다고 분명히 이야기
할 수 있는 분야가 거의 없습니다.
양자 컴퓨터, 또 우주 기술들 우리나라는 아주 걸음마 단계입니다.

현택한 / 서울대 화학생물공학부 석좌교수

전통적인 우위에 있었던
제조업 기술경쟁력 상황도 녹록지 않습니다.
반도체 배터리 철강 석유화학 등
수출 주력 산업들에 경고등이 켜진 상황!



무역 흑자 품목은 2010년 230개에서 2024년 140개로 급감했습니다.
주요국들은 자국 우선주의 산업육성전략으로
핵심 산업의 경쟁력을 높이며
치고 나가는 상황,

기술 주권은 곧 생존의 문제라는
공통인식 때문입니다.

조선 산업의 경우는 한국의 기술력이 세계 최고입니다. 그래서 미국이 조선 산업 부흥을 위해서 한국과의 협력을 요청하고 있는 상황이거든요. 이러한 사례가 독자적인 기술 확보가 얼마나 중요한가 하는 것을 잘 보여주고 있다고 생각합니다.

이혜민 / 전 G20 대사

미중 패권 전쟁이란 글로벌 질서에서 '기술력'과 '산업경쟁력'은 더 중요합니다. 기술 주권을 회복해 한국을 세계 10위권 경제로 도약시킨 역동적인 산업 구조를 회복해야 합니다.



기술은 국방력이다라고 할 정도의 시대에 왔습니다. 그러면 우리만의 원천 기술이 있어야 하는 것이고요. 10년 후에 무슨 일이 일어날지 모르기 때문에 미래를 대비하는 기초 과학이 큰 덩어리가 있어야 되는 거죠. 거기서부터 싹이 나서 큰 나무가 되는 이게 산업이 되는 것이고 이 기초 과학이 안 보인다고 해서 안 가지고 있으면 이 나무가 늙으면 더 이상 없는 겁니다, 우리한테.

이준호 / 서울대 생명과학부 교수

이끌려 갈 것인가, 이끌어 갈 것인가.
지금 대한민국은
중요한 갈림길에 서 있습니다.

대한민국 과학기술과 산업의 미래: 그랜드 퀘스트

이정동 서울대 국가미래전략원 과학과 기술의 미래 클러스터장

한국 산업은 복합적인 위기에 처해 있습니다. 미중 기술경쟁과 기술주권의 파고가 높아지는 가운데 우리를 추격 해오는 줄 알았던 중국은 이미 모든 산업 분야에서 한국 산업을 앞서나가고 있습니다. 네분기 연속 분기성장률이 0%대에 머무르고 있습니다. 그러나 더 큰 문제는 장기 추세입니다. 20년 동안 장기성장률이 계속 떨어지고 있습니다. 또한 20년째 새로운 산업과 관련기업이 탄생하지 않고 있습니다. 피크코리아의 위기가 현실화되고 있습니다. 이 위기를 돌파해 나가는 유일한 길은 대체 불가능한 기술, 독창적인 기술을 갖는 것입니다.

대체 불가능한 독창적 기술이 탄생하는 비법은 명쾌합니다. 도전적 질문, 즉 그랜드 퀘스트와 스케일업입니다. 기존의 교과서에서 벗어나는 것이기 때문에 황당하다는 비난을 받을지 모르지만, 어떻게든 기존의 상식과 다르게 해보면 어떨까?라는 도전적인 질문이 첫 출발입니다. 도전적 질문에 대한 첫 번째 해법은 미완성일 수밖에 없습니다. 여기서부터 시행착오를 축적해 가면서 비전을 업그레이드 해나가는 치열한 스케일업 과정을 거쳐야 합니다. 안타깝게도 오늘 대한민국의 혁신생태계에는 도전적 질문도 스케일업도 찾아보기 힘든 것이 현실입니다. 그 이유는 대한민국이 성공해왔던 바로 그 과정에서 찾아볼 수 있습니다.

한국은 지난 70년동안 도입기술에서 개량기술로, 다시 자체기술의 단계를 거치면서 눈부신 속도로 선진국을 추격해왔습니다. 이 과정이 쉬웠을리 없습니다. 그러나 이 놀라운 성공의 이면에는, 선진기술이라는 벤치마크를 목표로 놓고, 그를 따라잡고자 하는 추격의 모델이



공통적으로 자리 잡고 있습니다. 이 추격의 과정이 너무 성공적이었기 때문에, 역설적으로 선진기술이라는 모범사례가 없는 경우에는, 우리 스스로 도전하기가 어렵게 되었습니다. 소위 튀는 시도가 환영받지 못하고, 시행착오를 두려워하는 사회 분위기가 된 것입니다. 대한민국의 산업과 기술이 가보지 못한 길, 그러나 반드시 가야할 길은 바로 선진기술의 벤치마크가 없을 때 스스로 벤치마크를 제시하는 것입니다. 이 장벽 너머의 길 없는 미개척지를 가는 비법은 앞서 이야기했던 두 가지 단어에 축약되어 있습니다. 해법이 잘 보이지 않지만, 도전적 질문을 던지고 시행착오를 버티면서 스케일업 해나가는 것입니다. 추격과 선도는 패러다임이 다릅니다. 문제를 잘 해결하는 한국이 아니라 이제는 문제를 출제할 수 있는 한국으로 진전해야 합니다. 교과서와 게임의 룰을 제시하는 한국으로 가야 합니다. 선진국이 만들어 놓은 로드맵을 충실히 따라가는 한국이



아니라 로드맵을 제시하는 한국이 되어야 합니다. 이것이 진정 추격의 단계를 벗어나 선도로 가는 유일한 길입니다. 이제 이 장벽을 넘어서는 시도를 시작해야 합니다. 우리는 이 패러다임 변화의 첫발을 떼기 위해 한국의 과학기술과 산업계에 도전적 질문을 던지기로 하였습니다. 그 결과가 오늘 포럼에서 소개되는 그랜드 퀘스트입니다. 지난 1년 동안 과학기술과 산업의 10개 분야별로 각각 2-3분씩의 총 21분의 전문가가 참여하여, 총 열 개의 도전적 질문을 도출하였습니다. 각 분야를 대표하는 두 전문가에게 단 한 가지 질문의 조건을 제시하였습니다. 뚜렷한 해법이 보이지 않는 질문을 도

출하는 것입니다.

당장 해결은 어렵겠지만, 만약 희미하게라도 해법을 찾아 스케일업할 수 있다면, 그 분야의 패러다임을 바꿀 가능성이 있는 질문이 무엇인지를 도출해달라고 부탁했습니다. 각 분야별로 전문가들이 오랫동안 숙의와 검토, 그리고 미래세대와의 공유과정을 통해 그랜드 퀘스트를 다듬었습니다. 이 10가지가 오늘 포럼에서 소개될 그랜드 퀘스트입니다. 오늘 포럼에서 소개되는 10개의 그랜드 퀘스트는 한국 산업의 패러다임 전환을 알리는 전령입니다. 우리는 한국의 산업과 사회의 각 분야에서 그랜드 퀘스트가 쏟아지기를 기대합니다. 또한 치열하게 시행착오를 축적하면서 스케일업하는 기업들이 가득하기를 소망합니다. 나아가 그랜드 퀘스트를 던지고 스케일업해 가는 그 힘든 과정을 지지하고, 응원하는데 국가의 일이 있다고 주장합니다. 오늘을 기점으로 우리 산업 곳곳에서 그랜드 퀘스트가 분출하고, 그 도전의 기운에 힘입어 미래 산업의 새로운 로드맵을 선도하는 대한민국이 되기를 간절히 바랍니다.

그랜드 퀘스트 2025

- 저속노화를 넘어선 역노화, 가능한가
- 코로나 다음 바이러스 막을 수 있나
- 현실과 화면의 경계를 허문 공간 디스플레이
- 온실가스로 플라스틱을 만든다?
- 태양전지 효율, 60% 벽 넘을 때
- 머리카락 100만 분의 1 반도체
- 실리콘 대체할 차세대 반도체 기술은
- 뇌처럼 작동하는 컴퓨터
- 뇌내현실이 현실화된다면?
- 인간의 역량을 추월하는 인공지능과의 공존



차기 정부에 전하는 과학계와 SBS의 '기술 패권' 대응 정책 제언

[영상 보러가기](#)

1 기술주권 '워룸(War Room)' 신설

2 책임자 거버넌스 총괄직 격상

3 '브레인 홈 코리아'

4 데이터 기반 R&D 효율 우선 지원

5 AI전진 & 제조강국 첨단기술로 부활



대한민국이 기술 주권을 가지고 산업 경쟁력을 회복하기 위해서는 뭐가 달라져야 할까요?
 특히 정부가 해야 할 일은 무엇일까요?
 저희가 SBS 그랜드 퀘스트 석학들과 업계 리더들 심층 인터뷰를 통해 답을 구해 봤습니다.
 기술강국으로의 재도약을 위한 SBS의 다섯 가지 정책 제언.

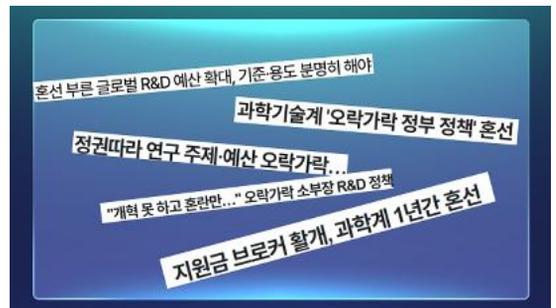


1. '컨트롤타워'에 대한 주문이 가장 많았습니다. 기술주권 확보는 이제 과학 영역 뿐 아니라 산업, 통상, 국방, 안보를 아우르는 복합적인 문제입니다. '공조'의 목소리는 높아지지만 범부처 컨트롤타워는 부재한 상황 이죠. 예를 들어 중국은 국무원을 중심으로 한 통합 AI 전략이 '딥시크' 탄생을 이끌었다면, 한국은 4개 부처가 산발적으로 추진하고 있습니다. 전쟁에 비유될 만큼 격해진 기술 패권 경쟁, 비상시 민첩한 대응을 위해 '기술 주권 워룸' 설치를 제언합니다.

2. '워룸' 리더를 격상해야 한다는 목소리도 많이 나왔습니다. '미래혁신부총리'와 같은 이름으로 총괄 거버넌스 체계를 이끌 수 있다는 건데요. 현 과기부나 산업부를 확대 개편할 지, 관련 기능을 모아 대부처를 신설 할지 등은 논의 대상이 될 수 있습니다.



3. 그럼 컨트롤타워와 리더만으로 될까요? 사실 가장 시급한 과제는 '인력' 문제입니다. 한국 시경쟁력 약화의 근본 원인으로 인재 부족이 꼽힐 정도로 기술 인재 유출 문제, 심각합니다. 한국의 1만 명 당 AI 인재 이동지표를 보면 2023년부터 마이너스로 돌아섰는데, 인재의 유입보다 유출이 많다는 겁니다. 중국이 '천인 계획'을 내세워 기술 인재를 영입을 시작한 게 무려 17년전, 과학자들 탈출을 막을 '브레인 홈 코리아' 프로젝트를 제안합니다. 차등적 보상과 지원, 비자 정책 등 완전히 틀을 깨지 않으면 변화는 없습니다.



4. 정치와 별개로 이뤄지는 독립적이고 장기적인 기술정책, '공무원, 행정 중심'보다 '과학자 중심'의 실질적 지원 결정, 모두가 바라는 것이었습니다. 정부마다 R&D 정책은 오락가락했고, 지원 기관과 시스템이 파편화 되어있다 보니 수많은 펀드가 나눠주기식 또는 중복 집행돼 왔죠. 데이터를 기반으로 통합적으로 관리하고 성과와 연동하는 최적화 시스템 구축이 필요합니다.



5. '제조업 부활'을 내건 미국의 통상 전쟁은 한국 경제의 구조적 취약성에 경고를 날렸습니다. K조선, K방산에 대한 러브콜에서 보듯, 그 공격에 대응할 카드도 결국 우리 전략 제조업의 기술 경쟁력 확보입니다. AI에 대한 수백조 투자 계획들이 나오고 있는데요, 제조업에 AI를 입힌 기술 혁신, '제조+AI' 고도화에 속도를 내야 합니다. 지금까지 SBS의 기술주권 확보를 위한 정책 제언이었습니다.

제언의 바탕이 된 과학계 현장의 목소리들

“기술주권 확보는 과학기술정책만의 문제가 아니다. 산업, 통상, 인력, 안보까지 엮인 복합문제. 각부처가 따로 움직이는게 아닌, 기술주권 전반을 총괄하는 컨트롤타워가 있어야한다.”

“과학기술이 경제, 산업, 국방, 안보 등 국가 경쟁력이 원천이다. 과학기술부총리 또는 미래혁신부총리 신설을 통해 강력한 과학기술계 리더십을 확보하고, 국가 과학기술 경쟁력 제고 해야 한다. 이를 통한 부처 총괄 거버넌스 구축이 필요하다.”

“정권마다 교육과학기술정책이 바뀌고 있다. 독립적이고 장기적인 계획을 가지고 진행되어야 한다. 1000억을 2,3년 대통령임기 내에 쏟아붓는 게 아니라 50억씩 20년간 투자하면 한국의 강점을 살리는 기술 개발 가능하다.”

“국가 연구비 지원 시스템에 있어야한다. 연구 어젠다의 설정이 대통령실이나 과기부 공무원들 중심으로 그동안 이루어져 왔다. 과학자들 중심의 연구 젠다 설정을 위한 기구를 새롭게 만들고 이를 중심으로 국가 연구비 지원 시스템을 개편해야 한다.”

“연구개발 사업기획, 과학기술 발전 장기전략 마련의 전문성 제고를 위해 전문 상근 인력 부서 필요하다. 정부 연구개발 사업의 기획은 각 부처에서 대학교수, 연구원 등 비상임 기획위원들이 로드맵 수립 등을 수행하고 있다. 비전문성과 투입 시간이 짧은 한계다. 부처내에 연구 개발 사업 기획을 전문으로 수행하는 상근 부서를 마련해 기획을 전담시켜야 한다.”

“모든 도전의 주체는 사람이다. 국내 인재는 물론 세계 우수 인력들이 한국을 실험의 항구로, 정착의 홈으로 인식하게 해야한다. '브레인 홀 코리아'라는 비전을 갖고 우수 연구자들이 한국을 머무르고 싶은 나라로 만들게 해야한다.”

“대학원 이상 재학 외국인 학생 비자 확대가 필요하다. 석박사 학위 취득 외국인 인력이 일정 수준 자격을 만족할 때 (국제저널논문 주저자 출판, 특허 등록, 저명학회 발표 등) 취업 비자 패스트트랙 신설을 하자.”

“국가 지정 연구자 제도 도입이 필요하다. 최고 인재 대상으로 연구+주거+자녀양육에 대한 종합 패키지 제공하는 방안이다. R&D 시스템 지능화를 통해, 특허/논문/기술이전 등의 성과를 양적/질적 평가를 통해서 지정하면 된다. 연구성과에 대한 소유권 인정함으로써 기술 개발에 대한 보상체계 확립도 필요하다.”

“사업-관리기관-관리 시스템 파편화 해소가 필요하다. 정부투자 연구개발 분야에 대한 통합적 인식하에 예산 배분 및 집행, 성과 관리할 수 있는 시스템 구축하자. 전문가 의견을 최대 존중하는 법적, 제도적 장치 마련 및 실행이 필요하다.”

“한국이 자국의 문제를 넘어 인류와 지구의 문제에 도전하는 국가적 미션을 가져야하는 시기. 기후변화, 감염병, 황사, 조류독감 등 글로벌 아젠더에 대해 정의하고 기술로 해법을 탐색하는 구조를 만들어야한다.”

“시장에 맡기면 중국의 저가태양광 패널에 국내 사업 고사한다. 지난 정부에서 안티 태양광 정책으로 학계 연구비 모두 삭감했다. 화석 연료 의존도를 줄이고 에너지 독립국이 되기 위해서는 신재생 에너지 확산이 필수이니 국내산 제품에 대한 인센티브나, 신재생 에너지 발전에 대한 정책적인 서포트, 인센티브 등이 필요하다.”

“바이오산업은 다수 부처의 규제 영향을 받고 있다. ‘유전자변형생물체의 국가 간 이동 등에 관한 법률’(LMO법) 등의 취지에는 공감하나 산업 발전에 과도한 장벽이다. 미국처럼 생산자 책임제로 선사업 추진 및 철저한 안전책임 관리로 산업적 시도가 가능하게 해야 신소재/신기술이 빠른 제품화 가능하다.”

“한국이 잘하는 산업분야를 기업에만 맡기면 안된다. 중국에 1위를 내준 디스플레이분야가 대표적 사례다. 정부에서 기업에만 미래기술개발을 맡겨 정부지원을 줄였다. 이로 인해 대학/연구소에서 인력양성을 못하는 악순환이다. 잘하는 분야에서 버티며 부를 창출할 수 있게 지속 지원해야 한다.”

“국책과제 통한 사업화 성공률이 떨어지는 것은 보고서에 집중되는 관행적 관성 때문이다. 보고서를 줄이고 산업화에 기여하는 요소들에 더욱 배점을 높이는 등의 경쟁력 강화에 포커싱해야 한다. 임팩트 있는 대형 롱텀 과제 선별을 위한 전문가 집단 육성도 필요하다.”

“여전히 부족한 것이 계산자원이다. 미국, 중국 등에 비하면 수십-수천배 부족한 상황. 인력의 질과 양은 빠르게 올라오고 있다. 나눠주식식이 아닌 소수에게 압도적인 리소스를 몰아주는 것이 탁월한 성과가 나올 것이다.”

“AI 시대/반도체 생산 시설 확충에 따른 전기 수요가 과거 예상보다 훨씬 빠르게 늘어날 것이다. 장기적인 관점에서 공급 계획이 만들어져야한다. 민간의 신재생 에너지 생산자로서의 역할이 확대/인정될때 태양광을 비롯한 신재생에너지의 비율이 늘어날수 있다.”

“비메모리분야는 스타트업의 역할이 중요하다. 벤처 펀드의 지원으로 스타트업 시작을 쉽게 하는 것이 필요하다. 단, 스타트업의 해외 매각에 긍정적이어야 액시가 중요한 생태계에서 펀드들의 모집이 용이할 것이다.”

“3D 디스플레이가 활성화 되기 위해서는 디스플레이 기술 뿐만 아니라 이를 활용할 수 있는 콘텐츠 생성 인프라 구축도 필요하다.”

“바이오 관련 학과의 인력 양성이 업스트림(기초, 원천 기술)에만 집중된다. 인프라에 대한 국가지원이 계획되고 있지만 정작 운영인력(연구원, 엔지니어, 기술직) 부재로 효용이 떨어진 과거 사례가 있다. 산학연 인재 육성 과제에 정부 지원 필요하다.”

“동북아시아 (한중일 혹은 한일) 블록 경제 협력을 위한, 첨단 과학기술 기반의 경제 협력 '판'을 새롭게 구상해야 한다. 한일경제협력공동체만 구성되더라도, 시장 규모는 상당히 커진다. 이를 통해 메모리 반도체 + 소재장비 반도체 생태계 협력 체계 도출을 해야 한다. 나아가, 한국-일본-대만 3개국 간의 반도체 블록 형성을 통해서, 인재 교류 및 자생적 시장 형성을 마련해야 한다.”

AI 혁명으로 다시 도약하는 대한민국

최형두 국회 과학기술정보방송통신위원회 간사

AI 혁명 유레카의 순간은 2016년 봄 알파고 이세돌 대국으로 서울에서 시작되었지만 우리는 정치 싸움에만 몰두했습니다. 깜짝 놀란 중국, 미국의 지도자들이 AI 혁명을 국가 과제로 추진했을 때 우리는 탄핵으로 날을 지냈습니다. 이제 그런 실수를 되풀이할 수 없습니다. 또다시 정치 위기 상황입니다. 담대한 과학기술 투자만이 대한민국의 생존과 번영을 이끌 수 있습니다.

AI G3 도약, 먼 곳에 있지 않습니다. 우리 국민이 교육 의료 분야에서 AI를 잘 사용해 혜택을 누리도록 하면 됩니다. 그 가운데 하나가 AI 디지털교과서입니다.

전국 방방곡곡 지방 도시와 농촌 도서벽지 학생들도 서울 강남처럼 최고 수준의 교육을 1대 1 맞춤형으로 받을 수 있습니다. 국민 한사람 한사람 정밀 맞춤형 선제적 건강 AI서비스도 있습니다. AI 디지털교과서 국민 건강AI 서비스는 K클라우드 산업을 성장시킵니다. 뿐만 아니라 AI컴퓨팅 인프라의 핵심 GPU에 맞설 국산 저전력 고효율 AI반도체 NPU 생산과 수요도 확대할 수 있습니다. AI 디지털교과서 AI국민건강돌봄로 AI강국 만들겠습니다.

반도체 AI 같은 혁신연구 인력의 발목을 붙잡는 규제도 풀겠습니다. 인공지능 대전환 시대에 우리가 가장 주목해야 할 지점은 제조업의 미래입니다. 미중패권 경쟁이 본격화되고, 특히 인공지능이 가공할 속도로 진화하면서 지각판이 바뀌고 있습니다. K방산, K원전, K조선 같은 우리 산업의 강점도 AI 날개 없이는 지속가능하지 않습니다. 사용자가 많을수록 데이터는 기하급수적으로 늘어나고, AI는 더 강력해집니다.



영상 보러가기

수십 억 명 단위의 사용자를 확보한 글로벌 빅테크들이 선점한 거대언어모델 LLM 시장에서 우리는 소버린AI를 키워내야 합니다.



AI시대 대한민국의 진정한 승부처는 K제조업 경쟁력을 바탕으로 한 제조 AI입니다. 우리의 엔지니어들이 세계 최정상으로 만든 제조업은 생산과정에서 최대규모와 최고 수준의 데이터를 창출합니다. 우리의 공장 문을 열고 글로벌 테크와 협업해, 제조AI 퍼스트 무버가 되어야 합니다. 그것이 바로 한강의 기적 이후 우리가 축적한 산업 경쟁력과 일자리를 혁신할 길입니다. 또 하나 명심해야 할 것은 AI는 막대한 전기에너지 싸움이라는 사실입니다. 전기 없이는 AI도 없습니다. 신재생만으로 부족합니다. SMR을 비롯한 과감한 에너지 믹스, 혁신적인 전력망구축이 절실합니다. 호남 영남 충청 강원을 비롯한 17개 시도가 AI혁명으로 고르게 발전하도록 국토에너지 인프라 균형발전 계획을 마련하겠습니다.

올해는 광복 80주년입니다. 대한민국은 2차대전 이후 식민지 황무지, 전쟁의 잣더미, 보릿고개를 딛고 서방 선진 7개국 반열에 오른 유일한 나라입니다.



이제는 미국도 도움을 청하는 K조선 K반도체 K원전의 나라가 되었습니다. 저는 대한민국 최초의 자유무역지역도시, 국가 기계공업산단이 만들어졌던 도시에서 성장했습니다. 우리는 무역대국, 산업대국의 기적을 만들었습니다. 80년대 90년대는 정보화 혁명으로 초고속 인터넷의 세계적 모범국가를 만들었습니다. 이제 다시 대한민국은 AI 3대강국, 초거대제조AI 강국으로 다시 우뚝 설 것입니다. 감사합니다.

기초과학과 미래기술을 선도하는 과학기술 강국

이한주 민주연구원장



한국 경제에 우려의 목소리가 높습니다. 힘차게 성장해 온 한국 경제가 앞으로도 지속될 수 있을까 많은 국민들께서 걱정하고 계십니다. 한국 경제가 위기에 처한 것은 사실입니다. 작년 경제성장률이 겨우 2.0%였는데, 올해 경제성장률은 더 낮습니다. 한국은행은 1.5%, JP모건은 0.7%를 예측하고 있습니다. 한국 경제성장을 하락의 중요한 원인 중 하나는 바로 기술경쟁력 저하 때문입니다. 기술경쟁력의 회복 없이는 경제의 반등도 기대하기 어렵습니다.

지금 우리가 겪고 있는 위기는 남들이 먼저 갔던 길을 빠르게 추격하는 위치에서, 남들이 가지 않았던 길을 먼저 가야하는 선도자의 위치로 변화하는 과정에서 겪고 있는 성장통입니다. 모방하는 국가에서 창조하는 국가가 되기 위해서는 근본적인 문제를 탐구하는 기초과학의 능력이 무엇보다 중요합니다. 오늘 행사에서 다뤄질 원자 및 전자를 제어하는 물리학, 미생물의 대사작용에 대한 생물학, 뇌의 뉴런을 모방한 새로운 알고리즘 연구를 통해 보다 근본적인 혁신을 이루게 되면 우리는 보다 빠르고 전력소모가 적은 반도체, 생물학에 기반한 친환경 고효율 생산공정, 미래의 감염병에 대응할 수 있는 백신, 탁월한 성능의 컴퓨터를 만들 수 있게 될 것입니다.

김대중 전 대통령께서는 “우리나라가 세계 일류국가가 되기 위해서는 과학기술자가 존경받는 나라가 돼야 한다”라고 말씀하셨습니다. 민주당은 IMF경제위기와 코로나19라는 국가적 위기 속에서도 R&D예산을 대폭 확대하고, 초고속인터넷에 투자했으며, 우주로 진출할 계획을 세웠습니다. 민주당은 과학기술을 국정의 중심에 두겠습니다. 먼저, 지난 정부에서 퇴행한 R&D예산을 바로잡겠습니다. 올해 정부 지출 기준 R&D 예산의 비율은 4.4%입니다. R&D 예산을 대폭 확대하고, 생태계를 혁신하여 긴 호흡이 필요한 기초연구와 전략기술 분야에 투자하겠습니다. 둘째, 연구자들의 자율성을 존중하고 전문성을 신뢰하며 연구자들이 연구에만 매진할 수 있는 환경을 만들겠습니다. 미래세대인 대학원생과 박사후 연구원의 처우 개선을 통해 정해진 답을 찾는 게 아니라 판을 바꾸는 창의적 연구에 장기적으로 몰입할 수 있는 연구생태계를 만들겠습니다.



민주당이 주목하는 두 번째 영역은 바로 인공지능, AI입니다. AI 기술은 모든 산업, 사회의 모든 영역에 영향을 미치고 있습니다. 이런 시대를 앞서 나가려면 AI 리더십은 필수적입니다. 미국과 중국을 위시한 모든 강국들은 AI 기술 리더십을 위해 필사적으로 경쟁하고 있습니다.

민주당은 AI 3대 강국 진입을 목표로 하고 있습니다. 국가가 적극적으로 AI인프라 구축에 나서겠습니다. GPU 5만개 이상 규모의 AI데이터센터를 구축하고 국내 기업들의 NPU 등 AI반도체 개발을 지원하여 AI반도체 분야의 기술주권을 확보하겠습니다. 고품질의 학습용 데이터 확보를 위해 공공데이터부터 활용하겠습니다.

민주당의 AI정책

- AI 인프라 구축 : GPU 5만개 규모의 AI 데이터센터
- AI반도체 분야의 기술주권 확보 : NPU 등 AI반도체 개발 지원
- 공공데이터를 AI 학습용 데이터로 활용
- 규제합리화
- AI 투자 확대 : 국민과 정부가 100조원 규모의 기금 조성

AI 시대에 맞게 규제를 유연하게 합리화하여 AI 산업생태계가 만들어질 수 있는 환경을 만들겠습니다. 지난 주(18일) 발표된 정부의 추경안에서 1조 8천억원 규모의 AI 예산이 포함되었지만, 보다 과감한 투자가 필요합니다. 민주당은 민간과 함께 100조원 규모의 기금을 조성하여 AI딥테크 유망기업들을 육성하고 다시 민간 분야의 투자를 이끌어 내겠습니다.

이번 대선은 대한민국을 새롭게 만드는 선거입니다. 민주당 강령은 "기초과학과 미래기술을 선도하는 과학기술 강국"을 목표로 하고 있습니다. 근본이 튼튼해야 위기에 강합니다. 세계를 선도한 국가들은 과학기술이 강한 국가들이었습니다. 민주당은 국민의 역량과 지혜를 모아 과학기술 강국, 새로운 대한민국을 만들겠습니다. 감사합니다



SESSION 1. 역노화 기술

저속노화를 넘어선 역노화, 가능한가



역노화의 기술 발전과 미래 전망

이준호 서울대 생명과학부 교수

영상 보러가기

SBS X
그랜드
퀘스트

불로불사는 예로부터 많은 사람들의 궁극의 소망이었습니다. 하지만 오랫동안 불로불사는 불가능한 일로 여겨졌었습니다. 진시황의 불로초는 없었습니다. 그런데 실제로 죽지 않는 생명체가 있습니다. 바로 '작은보호 탐해파리'인데요. 귀엽게 생겼죠? 작은보호탐해파리라는 해파리는 늙었다가도 먹이가 없어지면 젊어지고 다시 늙는 과정을 반복합니다. 즉, 생물학적으로 역노화가 가능한 사례입니다. 과학자들은 이 원리를 인간에게도 적용할 수 있을지에 대해 연구하고 있습니다. 그렇다면 과연 불가능하게 여겨졌던 역노화가 현재는 가능한 것일까요? '벤자민 버튼의 시간은 거꾸로 간다'와 같은 영화 속 이야기였던 '역노화'가 이제는 실험실에서 실현 가능성을 갖춘 과학적 도전이 되고 있습니다.



'역노화'가 이제는 실험실에서 실현 가능성을 갖춘 과학적 도전이 되고 있습니다.

오늘은 4가지 역노화 기술 핵심 전략을 소개하고자 합니다. 첫 번째는 텔로미어를 늘인 역노화입니다. 텔로미어는 염색체의 끝부분에서 신발 끈의 끝을 감싸는 플라스틱 매개와 같이 보호하는 역할을 수행합니다. 노화가 되면 텔로미어가 짧아지는데, 텔로미어가 짧아져 늙고 털도 빠진 생쥐에게 텔로미어를 다시 길게 만들면 젊어질 뿐 아니라 수명도 늘어난다는 것을 확인되었습니다. 2010년이었는데요. 역노화라는 말이 과학 논문에서 거의 처음으로 과감하게 사용했다는 점에서 의미가 큼니다. 다음으로 젊은 피를 수혈하여 회춘하는 방법입니다. 우리는 어떤 조직에 젊은 피를 수혈해 활성화 시키자는 말을 비유적으로 사용하는데, 실제로 생쥐를 대상으로 이 실험이 진행되었습니다. 두 개체의 순환계를 공유하는 파라바이오시스 실험을 통해 늙은

쥐와 젊은 쥐를 수술로 연결해서 서로 피가 순환하도록 만들었습니다. 젊은 피를 받은 늙은 쥐에서 신경세포가 많이 재생된 것을 확인할 수 있었습니다. 이는 젊은 피를 수혈받으면 뇌가 젊어질 수 있다는 것을 보여주는 결과였습니다.

세 번째로 노화된 세포의 제거를 통한 역노화 방법입니다. 개체가 늙게 되면 늙은 세포들이 많아지는데 이를 제거하는 약들을 세놀리틱(Senolytic)이라고 부릅니다. 현재 여러 가지 약들이 노화된 세포를 제거하는 세놀리틱으로 많이 알려져 있습니다. 실제로 세놀리틱을 늙은 쥐에 주사하면 역노화가 일어나 털색도 까매지고 전반적으로 젊어집니다. 하지만 여러가지 한계도 존재합니다. 마지막으로 최근에 주목 받고 있는 역노화 방법은 야마나카 인자(Yamanaka Factors)라고 하는 줄기세포의 유지와 생성에 중요한 단백질을 넣어 세포를 젊게 리프로그래밍하는 방법입니다. 최근의 연구에서는 야마나카인자를 적당히 넣어주면, 세포를 젊게 만들어서 재생과 역노화를 일으킬 수 있음을 보여주었습니다. 손상된 간이나 회복이 된다거나 시각 신경이 재생되는 것을 확인하기도 했습니다. 지금까지 역노화가 가능할 수 있다는 원칙적인 방법을 보여 드렸습니다.

이제 이런 일을 하는 주체가 누구인지 알아보면 미래가 보이지 않을까요? 먼저 미국이 가장 앞서 있습니다. 그 중에서도 역만장자들이 설립한 회사들이 주도하고 있습니다. 알토스는 아마존 창립자 제프 베이조스등이 설립한 회사로 야마나카인자를 기초로 하는 역노화 전략을 추진하고 있습니다. 구글이 창설한 칼리코(CALICO)는 노화의 생물학을 이해하고 그 결과물에서 역노화 비밀을 찾겠다고 합니다. 페이팔(Paypal)의 창립자가 만든 유니티(UNITY)는 세놀리틱(senolytic)을 중심으로 역노화를 직접 시도하고 있습니다. 주류 논의의 노화에 집중하고 있다고 합니다. 노화 연구에 대해서 기업은 실용화를 중심으로 진행한다고 하면 공적인 영역에서는 좀더 과학적 접근을 합니다.

미국의 국립노화연구소가 대표적입니다. 설립 50년을 넘긴 장수 연구소입니다! 여기서 시도하고 있는 가장 담대한 도전은 아르파-에이치(ARPA-H)라고 부릅니다. 아주 도전적인 건강 문제에 대한 혁신적인 연구를 지원하는 프로그램입니다. 최근에 임명된 프로그램 매니저 중 한 사람은 장 에베르라는 유전학자인데 이 학자는 뇌에 대해서도 치환을 통해 젊은 뇌로 만들 수 있다는 도발적 내용의 책을 쓴 학자이기도 합니다. 이런 정도의 도전이면 가치 '파괴적 혁신'에 가깝다고 할 수 있겠습니다.

그럼 우리나라의 사정은 어떨까요? 한 대표적인 예만 보여 드리겠습니다. 2022년 국회입법조사처에서 발간한 보고서의 하나입니다. 국립노화연구기관을 만들어야 한다는 주장을 담은 보고서입니다. 미국은 50년 전에 만들었던 노화연구소를 우리나라는 아직도 논의 중에 있다는 현실이 안타깝습니다. 이상으로 현재 존재하는 역노화 연구에 대해서 간단하게 소개드리겠습니다. 이제 한계들을 살펴보겠습니다. 현재의 연구들은 어쩔 수 없는 한계를 가지고 있는데 암 발생의 가능성을 배제할 수 없고, 역노화 자체의 위험성과 부작용, 연구들이 대부분 몸의 일부분만 다루는 것의 한계, 그리고 인간 연구의 어려움 등을 들 수 있습니다. 따라서, 이런 부작용을 없애면서 재생 및 역노화 능력을 잘 유지하는 것이 향후 연구의 가장 큰 과제일 것입니다. 우리나라는 확실히 후발주자입니다. 아니 아직 큰 발걸음을 떼지도 못했다고 하는 편이 낫겠습니다. 그럼에도, 세계적 동향을 분석해 보면 다음과 같은 방향을 잡아 볼 수 있습니다. 노화의 지표 확립, 경구형 역노화 약물 개발, 야마

나카방식의 최적화, 노화 세포 제거 기술의 조직특이적 적용, 다양한 역노화 기술의 조합, 그리고 부작용 확인 및 극복이 되겠습니다. 마지막으로 인공지능을 활용한 역노화 기술을 제시할 수 있겠습니다. 하나의 예를 들어 보려 합니다. 한센병은 세균에 의한 질병입니다. 한센으로 진단이 되면 땀손이라는 항생제를 처방하였습니다. 그런데 우리나라 한센인들 중 이 항생제를 평생 드신 분들이 오래 사셨다는 통계가 있습니다. 이 항생제를 예쁜꼬마선충에 먹었더니 수명이 아주 길어졌습니다. 그 표적을 찾아보니 세포 에너지 생산을 위한 경로의 한 효소를 약간 저해함으로써 활성산소 생산을 줄이는 방향으로 작동한다는 것을 알게 되었습니다. 문제는 땀손이 항생제여서 함부로 쓸 수 없다는 데 있습니다. 그래서 항생제가 아니면서 수명 연장 효과를 내는 새로운 약물을 개발한다면 대단히 유용한 항노화 약물이 될 것이라고 예상해 봅니다. 고전적인 방법도 있겠지만, 이제 인공지능의 시대에 와 있으니, 인공지능에게 물어서 해결하면 좋겠습니다. 화학적으로 합성 가능하면서 기능이 예측가능한 새로운 유도체들을 디자인해 보라고 명령할 수 있을 것입니다.

역노화기술 실현의 마일스톤

1. 누구나 어디에나 적용 가능한 노화의 분자 지표 확립 및 표준화
2. 수용성 역노화인자 발굴 및 검증: 경구형 역노화 약물 개발
3. 야마나카 인자에 의한 세포 역노화 최적화 및 조직 별 맞춤형 역노화 방식 확립
4. 노화세포 제거에 의한 역노화기술을 다양한 조직에서 확립: 특히 뇌의 역노화 기술
5. 다양한 역노화기술의 조합에 의한 역노화 효과 최적화 방안
6. 역노화과정에서 나타날 수 있는 부작용 확인 및 극복 방안
7. 시를 활용한 역노화 기술

현재 존재하는 역노화 연구의 한계

- 암 발생 가능성
- 역노화 자체의 위험성
- 비편적 연구의 한계
- 인간 연구의 어려움

좀 더 이상적이기로는 원하는 기능을 가지는 완전히 새로운 화학물질을 디자인해 줄 수도 있을 것이라고 기대하게 됩니다. 인공지능이 신약 개발 특히 역노화, 항노화를 위해 사용될 수 있는 아주 중요한 도구가 될 것이라고 믿습니다.

저명한 노화학자 두 사람이 내기를 걸었습니다. 현재 살고 있는 사람들 중에 150세까지 사는 사람이 나올 것이다, 아니다라는 두가지 선택 중 하나에 내기를 걸었



습니다. 150년이 지난 후 답을 알게 될 것이고 그때는 이 분들은 세상에 없겠지만 그 자손들에게 물려 주겠다는 약속도 했답니다. 현재의 정설은 지금까지의 방식으로는 사람의 수명을 150세까지 끌어 올릴 수는 없다는 것입니다. 하지만 기술의 발전이 우리의 상상을 넘어서는 속도로 이루어지고 있는 21세기에는 불가능한 일은 없어 보입니다. 역노화 기술이 개발되고 상용화된다면, 저는 150세를 돌파할 것이라는 데 걸겠습니다. 노화를 거스르고 사람들의 평균수명을 획기적으로 늘리는 기술이 개발되는 사회가 된다면, 모든 사람들이 더 행복해 질까요? 이 물음에 대한 답은 과학에서 찾기보다는 사회적 논의와 통찰을 통해 찾아가야 할 것입니다. 그래서 역노화의 영역은 과학이기도 하고, 사회학이기도 하다고 생각합니다.



피부역노화: 가능성의 눈을 뜨다

박원석 아모레퍼시픽 R&I 선형뷰티연구소장

[영상 보러가기](#)

거울을 보다가 문득 젊은 리즈 시절과 달리 낯설게 느껴지는 내 모습에 깜짝 놀라신 적 있으신가요? 피부는 우리 몸에서 노화과정을 쉽게 보고 느낄 수 있는 대표적인 장기입니다. 그렇다면 피부는 왜 늙을까요? 시간, 세월을 포함한 자외선, 미세먼지, 스트레스, 수면 부족 등 다양한 환경적 요인들이 피부에 반복적으로 노출되어 노화가 진행됩니다. 그럼 얼굴은 어떻게 늙어갈까요? 한눈에 보기에다 왼쪽 얼굴과 오른쪽 얼굴, 많이 다르죠? 나이가 들면서 우리 얼굴에는 많은 변화들이 나타납니다.

가장 먼저 눈에 띄는 변화는 피부에서 나타납니다. 피부 내부 구조가 무너지며 주름이 깊어지고, 탄력이 떨어지고, 피부가 칙칙해지며 기미, 검버섯이 나타납니다. 자세히 피부 속을 들여다보면, 표피와 진피층이 얇아지고 경계가 무너지며 콜라겐과 엘라스틴 같은 탄력 성분도 끊어지고, 감소합니다.

두 번째 변화는 피하 지방층의 변화입니다. 특정 부위의 지방이 줄어들고, 다른 부위에서는 오히려 늘어나 얼굴 윤곽이 변합니다. 예를 들어 볼이 꺼지고 이마가 평평해지면서 눈 밑(아이백)이나 턱 아래는 심술살로 알려져 있는 지방이 축적되어 피곤하고 무서운 인상을 주기도 합니다.

마지막 변화는 뼈 구조의 변화입니다. 20대와 70대 얼굴을 비교하면 안구부위 골감소와 함께 턱의 각도가 벌어지고 턱 끝이 돌출되면서 전체적으로 얼굴 윤곽이 무너집니다. 이런 골격 변화는 피부가 아래로 처지기 쉬운 조건을 만듭니다. 이렇게 속부터 바깥쪽 피부에 이르는 변화가 함께 나타나면서 우리가 늙었다고 느끼게 되는 것입니다. 하지만 나이는 숫자에 불과하다는 말처럼, 우리는 누구나 젊고 아름다운 피부를 유지하고 싶어 합니다. 이러한 바람을 실현하기 위해 많은 연구자들이 오랜 기간 피부 노화 연구를 지속해 왔습니다. 1980년대에는 콜라겐 감소로 인한 피부 탄력 저하가 발견되었고, 비타민 C와 E와 같은 항산화 성분의 피부 노화 예방 효과가 밝혀졌습니다.

1990년대에는 여드름 치료제로 사용되던 레티놀의 주름 개선 효과가 확인되어 항노화 성분으로 널리 쓰이기 시작했고, 저희 회사에서는 세계 최초로 레티놀을 안정화하여 전국적인 붐을 만들었습니다. 2000년대에는 소식과 장수의 연관성으로 장수 유전자 시르투인1이 주목받았고, 2010년대에는 줄기세포 기술을 활용한 피부 재생 연구로 역노화의 개념이 본격적으로 등장했습니다.

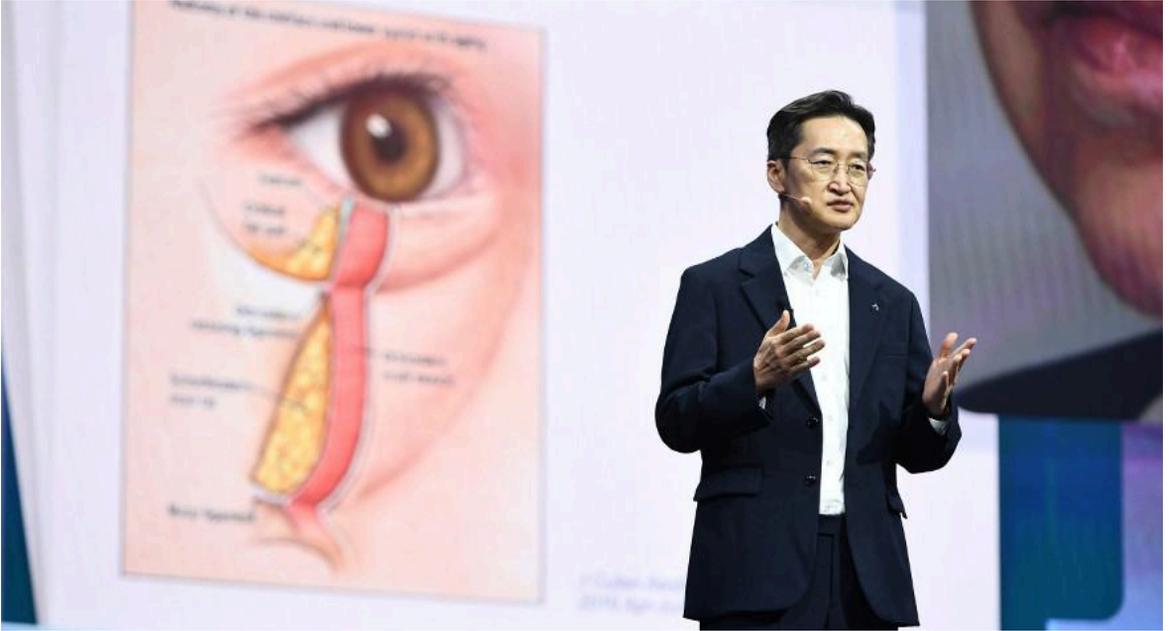
그리고 현재 2020년대에는 노화된 세포를 젊게 되돌리거나 선택적으로 제거하는 맞춤형 역노화 기술로 연구가 더욱 진화하고 있습니다. 그렇다면, 기존의 항노화 기술과 역노화 기술은 어떤 점에서 다를까요?

STEP 1. 타겟 찾기 "피부 역노화 타겟을 찾는 여정"

KAIST
KAIST 조광현 교수님
공동 연구
유형 & 주형 기술 특허 등록

STEP 2. 소재 찾기 "동백 바이오플라보노이드, PDK-1 억제하다"

STEP 3. 효능 확인하기 "임상에서 입증된 역노화의 가능성"



항노화는 피부 노화를 예방하고 늦추는 데 중점을 둔 '방어적 전략'입니다. 하지만 이미 진행된 피부 노화를 되돌리는 데에는 한계가 있습니다. 반면 역노화는 이미 손상된 세포와 피부를 다시 건강하고 젊은 상태로 회복시키는 적극적인 '공격적 전략'입니다. 피부 역노화의 가능성을 발견하는 성분, 아모레퍼시픽의 경우 '동백'에서 그 단초를 찾았습니다. 혹독한 겨울 속에서도 아름답게 꽃을 피우는 강인한 생명력 때문이죠. 먼저 역노화의 치료타겟을 찾기 위해서 KAIST 조광현 교수님과 함께 41개의 단백질과 77개의 연결로 구성된 세포 노화 네트워크 지도를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 구축했습니다. 이 분석을 통해 PDK1이라는 인자가 여기 3개의 단백질과 함께 노화 과정에서 핵심적인 역할을 한다는 사실을 새롭게 발견했습니다. 쉽게 설명드리면, '역노화'라는 전구에 불이 들어오는지 각 단백질을 스위치처럼 켜고 끄면서 확인한 건데요. PDK1 스위치를 껐을 때만 '역노화' 전구에 환한 불이 들어왔습니다.

다음으로 PDK1을 효과적으로 억제하는 소재를 찾기 위해 수백 가지의 후보 물질을 연구했습니다. 그중에서 오직 하나, 바로 동백에서 추출한 천연 바이오 플라보노이드가 PDK1 억제 효과를 강력히 보였습니다. 이 성분은 PDK1 활성 부위에 직접 결합하여 효과적으로 작용했습니다. 세포 실험에서도 노화 지표가 크게 감소하며 피부 조직에서도 젊은 피부 특성인 콜라겐 증가와 표피 강화 효과가 확인되었습니다. 임상 시험에서도 효과가 나타났습니다. 4주 동안 얼굴에 동백이 들어간 제품을 바를 경우 피부 수분량이 증가하였고 12주 차에서는 눈가 주름이 개선되는 것을 확인하였습니다. 존스홉킨스 대학과의 공동연구를 통해 6개월간 여러 인종으로 진행된 임상시험에서도 효능이 입증되었습니다. 피부 수분량이 증가하고 주름, 모공, 색소침착 등이 개선되었습니다. 이 연구 결과는 SCI논문으로 발표되었으며, 오는 5월 미국 피부연구학회(SID)에서도 소개될 예정입니다. 삶의 질을 높이는 피부 역노화에 대한 관심은 앞으로 더 커질 것입니다



표현형 역노화의 선구자 '보툴리눔 독신'

정현호 메디톡스 대표

[영상 보러가기](#)

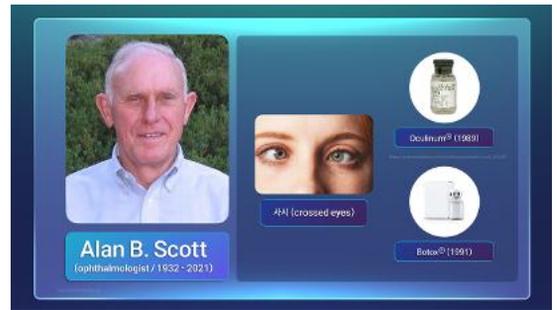
SBS X
그랜드
퀘스트

여기 보이는 것이 바로 저인데요. 뭐가 달라졌을까요? 좀 젊어 보이나요? 오늘은 바로 역노화에 대해 이야기 해 보려고 합니다. 우리 모두 이 중에 누가 더 나이 들어 보이는지 본능적으로 알 수 있습니다. 노화는 얼굴에 각종 주름이 생기면서 나이가 들어 보이고 활력도 없어 보이게 합니다. 또 흰머리가 나고 머리 숏도 적어지고 키도 근육도 줄어듭니다. 이런 노화의 징후들은 염색이나 가발 옷 등으로 어느 정도 가릴 수 있지만, 얼굴은 그러기가 어렵죠. 이러한 시간을 거스를 수 있는 획기적인 역노화기술이 있다면 얼마나 좋을까요? 노화된 유전자를 젊게 바꾸는 것은 저희 세대에선 기술적 한계 때문에 어려울 것 같습니다. 그렇지만 걸로 드러나는 표현형, 즉 피노타입을 바꾸는 역노화는 가능합니다.



가장 대중적인 것이 화장품입니다. 저도 아침에 로션을 바르고 나왔는데요. 여러분들도 외출 전에 바르고 나오셨을 겁니다. 남녀노소 가릴 것 없이 모두에게 익숙한 화장품 외에도 피부에 주입하여 물리적으로 채워주는 스킨부스터, 필러가 있습니다. 그런데 여기서 정말 재미난 제품이 하나 있습니다. 바로 보툴리눔독소입니다. 보툴리눔독소는 원래 문자 그대로 '독소, 독'입니다. 여기서, 보툴리눔은 라틴어로 소시지란 뜻의 'Botulus'라는 단어에서 기원했습니다 과거에 집단으로 발병했던 치명적인 보툴리눔중독증의 원인균을 소시지에서 발견했는데, 이것이 보툴리눔균입니다. 이 보툴리눔균은 1895년에 분리되었고, 이 균이 생성하는 독소 단백질인 보툴리눔독소는 1946년 분리 정제되었습니다. 이 독소는 1 그램으로 100만 명을 죽일 있는 자연상에서 존재하는 가장 강력한 맹독입니다. 어떻게 치명적인 독성을 나타내는 걸까요?

보툴리눔독소에 노출되는 상황이 보툴리즘인데요. 보툴리즘은 이 사진처럼 근육이 마비되어 죽게 됩니다. 마비에는 크게 두 종류가 있는데, (중풍에서 뻗뻗해지는 강직성 마비와 달리), 보툴리눔독소는 특이하게 이완성마비를 일으킵니다. 이완성마비에 착안하여 안과 의사 Alan Scott 박사는 보툴리눔독소를 사시 치료에 적용하였고, 치료제로 Oculinum이 개발되었습니다. 이후 안과치료제를 전문으로 하던 회사가 인수하여 보톡스가 탄생하게 됩니다.



이 보툴리눔독소를 눈꺼풀 연속치료에 사용하던 중에 눈가 주름이 퍼지는 효과를 발견하게 되는데요. 이후 독소는 주름은 물론, 우리나라에서 최초로 개발된 종아리 독소시술과 같은 체형 개선에도 사용되며 획기적인 피노타입 역노화의 선구제로 활약하게 됩니다.

1989년에 미국에서 최초 개발된 후, 독소제품 개발에 성공한 국가들은 현재 미국, 영국, 중국, 독일, 한국이 있습니다. 현재 미국 2개, 프랑스, 독일, 중국 각각 1개, 한국 18개 기업이 독소제품의 생산 및 개발을 진행 중에 있습니다. 앞으로의 시장 전망도 밝습니다. 글로벌 보툴리눔독소제제 시장 규모는 지속적으로 증가할 것으로 예상되고 있습니다. 이에 메디톡스를 포함한 많은 기업들이 더 좋은 제품을 개발하기 위해 노력하고 있습니다. 진보한 제형과 특성을 갖는 독소, 어떤 것들이 있을까요? 기존의 가루 형태 제품은 희석해야 하니 불편하면서 또 정확한 농도로 시술하기 어려웠습니다.



그래서 액상형 독신이 만들어졌고, 더 나아가 주사기에 약액이 담겨 있는 프리필드시린지도 개발되고 있습니다. 또 동물성 성분 함유로 인한 안전성 우려로 비동물성 독신이 개발되었습니다. 더 나아가 독신의 불필요한 단백질이 면역 반응을 유발할 수 있기 때문에, 비독소단백질을 제거한 제품도 개발되었습니다. 약효가 오랫동안 지속되거나 시술 후 빨리 효과가 나타나는 제품들도 필요하겠죠? 이러한 다양한 니즈를 반영한 제품들이 유전자 재조합 기술과 같은 최신 기술을 이용하여 개발되고 있습니다. 이러한 한계를 뛰어넘는 차세대 독신들, 진정한 역노화기술의 선구자라고 볼 수 있겠죠? 피노타입역노화가 결국 사람의 마음도 젊게 해주고 생활도 밝고 건강하고 젊은 삶을 영위하게 해줄 것이라 믿습니다. 젊게 보이는 것은 단지 외모의 변화가 아닌, 풍요롭고 활력 넘치는 삶의 원동력이 되어 사회를 더 밝게 할 것입니다.



SESSION 1. 패널 토크

저속노화를 넘어선 역노화, 가능한가

영상 보러가기



이준호
서울대 생명과학부 교수



이승재
KAIST 생명과학과 교수



박원석
아모레퍼시픽
R&I 선행뷰티연구소장



정현호
메디톡스 대표

● 김소원 아나운서

첫 번째 세션 저속 노화를 넘어선 역노화 가능한가? 강연 보셨는데요. 강연자 분들 다시 모셔서 더 자세한 얘기 들어보겠습니다. 본격적인 토론에 들어가기에 고투리를 한번 잡아보자면 왜 사람들이 이렇게 얘기하잖아요. 자연스럽게 늙어가는 게 좋은 거지 그게 생명의 도리지! 이렇게 얘기하고 있던 말이죠. 그런데 저희는 지금 여기서 항노화를 넘어서 역노화를 얘기하고 있습니다. 어떻게 보면 그냥 자연의 섭리에 맡기는 게 더 자연스러운 일이 아닐까 싶은데 거기에 대해서는 어떻게 생각하시는지 노화 관련한 연구를 하고 계시니까 한 분이 말씀을 해 주실까요?

● 이승재

과학의 발전에 의해서 사람들이 더 좋게 되는 것에 있어서 그거를 막을 수 있는 경우는 없습니다. 자연의 섭리를 만약에 거스르지 않아야 한다면 감염병이 걸렸을 때 그냥 치료를 받지 않고 다들 그냥 죽기를 바라야 되는 것처럼 노화에 있어서도 역노화기술이 개발된다면 분명히 이거를 활용하고 적극적으로 잘 써야 될 거라고 생각이 됩니다. 그 점에 있어서 성형을 예를 들자면 미용 성형도 중요하지만 기형이나 사고에 의해서 필요한 재건 성형이 훨씬 더 중요합니다. 노화에 있어서도 선천적으로 더 빨리 늙는 조로증 환자들이 있습니다. 그런 분들에게 먼저 적용이 되고 이후에 이제 보편적으로 사람들에게 다 역노화의 꿈을 이룰 수 있다면 분명히 사회적 경제적 문화적으로 좋은 일이라고 생각이 됩니다.

● 김소원 아나운서

설득이 됐습니다. 역노화 기술에 대해서 이제 얘기를 하고 있는데요. 우선적으로 해결하고 싶은 혹은 해결할 수 있는 노화 현상이나 노화 관련 질병은 무엇인지 답변 부탁드립니다.

● 이준호

저는 그동안에는 우아하게 늙어가기가 목표였는데요. 노화 연구를 하면서 그리고 역노화가 10년, 15년이 가능해진다고 하면 우아하게 늙어가되 각각의 조직들 중에서 특별히 더 빨리 늙는 부분에 대한 맞춤형 역노화를 하면 좋겠다는 생각입니다. 저 같은 경우는 특히 요새 사람 이름이 잘 생각 안 나서 뇌를 좀 역노화를 시키면 좋겠다 이런 생각을 해봅니다.

● 이승재

저도 비슷한 생각이 있습니다. 나이가 들면 점점 근골격계가 약해집니다. 예전에는 훨씬 더 체력이 좋았는데 점점 힘이 드는 것을 느낍니다. 근골격계가 더 좋아진다면 더 행복하게 살 수 있지 않을까, 이런 생각이 들어서 그 부분을 해결하고 싶습니다.

● 김소원 아나운서

뇌와 근골격계. 얘기 잘 들었습니다. 대부분 질병이 노화와 함께 진행이 되잖아요. 그렇다면 역노화 기술이 더 발전한다면 만병통치까지도 기대할 수 있지 않을까요? 어떻게 생각하시는지 궁금합니다.

● 박원석

뷰티 앤 헬스 기업에서 바라보는 역노화가 만병 통치가 된다는 말은 아직은 이른 것 같고요. 과학자들은 항상 선생님들한테 배울 때 겸손해야 되고, 아는 팩트나 데이터에 기반해서 해야 돼서 역노화를 치료할 수 있는 목표든 어떤 영역이든 가장 선택적이고 안전한 역노화를 가져가는 게 맞을 것 같습니다.

● 이준호

인공지능의 경우도 특별히 잘 하는 분야가 있었는데 지금은 일반 인공지능 이런 이야기를 하지 않습니까? 어쩌면 역노화에 대한 기대를 완전히 모든 조직이 젊어져서 정말로 나이가 어려워지는 것까지 기대를 한다면 그건

정말 역노화의 일반화인 것 같아요. 제가 보기에 현재 생물학적으로 가능하지 않은 현상인 것 같고요. 그래서 아까 말씀 드렸던 맞춤형으로 가는 게 적절하다. 그래서 모아놓고 보면 만병통치인데 각각에 대해서는 각각의 문제를 풀어주는 거다, 이렇게 저는 생각을 합니다.

● 김소원 아나운서

아까 교수님께서 뇌에 관련한 말씀 하셨잖아요. 관심이 간다고 그러셨는데 사실 어 새로운 기술이 생겨서 적용을 하면 가장 무서워지는 게 부작용 아닙니까? 그중에서도 만약에 뇌를 젊게 하기 위해서 어떤 처치를 했는데 부작용이 생긴다면 가장 두려울 것 같거든요. 그럴 위험성은 없습니까?

● 이준호

새로운 기술은 부작용이 언제나 가장 걱정되는 부분입니다. 뇌의 경우는 특히 지금 말씀하신 것처럼 한 번 잘못되면 못 돌아올 것 같은 그런 문제가 있는 거죠. 사람한테 적용하기 전에 굉장히 많은 시도를 하고 동물 실험도 하고, 임상 실험도 하고, 그런 단계를 다 거쳐야만 아마 직접 사람들에게 적용할 수 있지 않을까 싶습니다. 부작용을 걱정하는 것보다 얻을 수 있는 이득이 크면 하겠죠. 그런 판단을 아마 결국은 해야 되지 않나 싶습니다.

● 이승재

이게 가능성의 문제도 있지만, 현재에 존재하는 기술로는 여러 가지 기술적, 윤리적인 문제가 심합니다. 일단은 젊은 피를 수혈했을 때 노화가 역행되는 현상을 생쥐에서는 발견을 했지만 사람에게서는 증거가 된 바가 없습니다. 미국FDA에 의해서 알레르기라든지 혹은 그 수혈을 받았을 때 감염 혹은 면역 반응 등 때문에 금지를 했습니다. 생쥐에서의 연구조차도 젊은 회춘 인재라고 하는 것들이 몇 가지 제시가 되었는데 그게 과연 사실인지에 대한 논란이 굉장히 심각합니다. 현재 가장

큰 문제는 이게 실제 될지 안 될지에 대한 사실 관계가 시간이 걸려야 증명된다는 게 있습니다. 만약에 그렇다 하더라도 이제 사회적 불평등 문제가 심각할 겁니다. 그거는 저는 시간이 해결해 줄 거라고 생각합니다.

● 김소원 아나운서

오늘 강연해 주신 것에 집중해서 질문을 한 번 더 드려 보겠습니다. 역노화 기술의 현재 연구 관례가 4가지가 있다고 교수님께서 말씀을 해 주셨는데, 우리 연사분들께서는 그 네 가지 기술 가운데 어떤 것이 현실적으로 가장 도입 가능성이 높은가 이렇게 판단하고 계시는지 궁금하거든요. 차례로 말씀해 주시면 경청하겠습니다.

● 정현호

역노화의 학문적인 것은 잘 모르지만 제가 오늘 교수님 강의한 거 들었을 때 세포를 젊게 하는 게 가장 빨리 필요한 사안으로 보입니다. 제가 아는 기술로도 그쪽이 가장 빠르게 갈 수 있는 게 아닌가 그렇게 생각을 합니다.

● 박원석

저희 피부 연구 분야에서는 이미 노화된 세포하고 젊은 세포가 같이 이제 생존하면서 노화된 세포가 젊은 세포한테 나쁜 영향을 끼친다는 게 알려져 있습니다.

● 김소원 아나운서

제가 느끼고 있습니다.

● 박원석

그래서 이준호 교수님이 제안해 주신 것 중에 젊은 세포는 그냥 두고 노화된 세포만 선별적으로 제거하는 세놀리티 기술이 가장 저희 쪽 피부 분야에서는 유망하다고 생각합니다.

● 김소원 아나운서

확실히 이 항노화 관련한 산업계의 최첨단에 계신 분들은 세포 쪽에 집중을 하시는 그런 모습을 보여주시네요. 이 연구자 분들께서는 또 다른 생각을 하고 계신지 궁금하거든요.

● 이준호

그 네 가지 기술에 대해서 이렇게 이준호 교수님께서 소개를 해 주셨는데, 역사적 시간별로 발표를 해 주셨습니다. 지금 전 세계적으로는 네 번째 발표해 주신 세포의 리프로그래밍이 가장 각광을 받고 있습니다. 과학의 역사를 보면 이게 정말 지금 현재 가장 각광받고 있다고 해서 가장 좋은 기술이나 그거는 알 수 없습니다. 앞으로 한 얼마간의 시간이 지나야 알 수 있을 거라 봅니다. 저도 두 분과 동의하는 측면이 있습니다. 세포에 노화된 세포를 제거하거나, 젊게 만들거나, 혹은 변형하는 것들이 그나마 경구형으로 가장 가능한 기술입니다. 나머지는 주사를 맞는다든지, 피를 수혈한다든지 하는 기술이기 때문에 세포를 젊게 만드는 게 훨씬 제일 지금으로는 가장 가능성이 높을 것 같다는 생각이 듭니다.

● 김소원 아나운서

저는 전문가 사실 텔로미어입니다. 텔로미어를 길게 해서 역노화 하는 건 사실 조금 힘들 것 같은 생각이 좀 들고요. 우리나라에 그 생명공학연구원이나 이런 쪽에서 노화 연구를 굉장히 많이 하십니다. 거기서 그 젊은 쥐와 늙은 쥐의 혈액 속에 뭔가가 차이가 있다는 어떤 특정한 하나의 물질이 나올지도 모르겠습니다. 복합적인, 예를 들면 한약처럼 찾아낼 수도 있다면 그게 우리나라의 경쟁력일 수 있겠다는 생각을 합니다. 그 연구 분야가 사실 굉장히 뒤틀다가 한 번 이거 잘 안 된다고 해서 포기한 부분이 있거든요. 세계적으로 그런데 우리가 다시 찾아갈 수도 있지 않을까 그쪽에 더 기대를 하는 편입니다.

● 김소원 아나운서

앞서 강연 중에 나온 얘기인데 귀에 싹 들어왔던 게 뭐냐 하면 젊은 피의 수혈 있지 않습니까? 상당히 뭐랄까요? 자극적인 그런 소재이기도 한데요. 이게 논란이 된 적이 있습니다. 많이들 아실 텐데 '젊음이 뭐랄까 새로운 불평등의 상징이 되지 않을까' 이런 우려의 목소리가 있는 것이 사실이거든요. 조금 전에도 말씀하셨지만 이 항노화 역노화의 기술은 어쩌면 사회학적인 그런 그런 연구도 필요하다라는 말씀을 하셨던 것처럼 어떤 사회적인 장치가 필요하지 않을까라는 질문이 드는데요. 어떻게 보시는지 좀 궁금합니다. 예를 들어서 우리가 알고 있는 역노화라고 볼 수 있는 백내장을 치료하기 위해서 이제 인공 렌즈를 주입을 한다든지 혹은 보청기를 단다든지 하는 부분들은 예전에는 너무 비싸서 그 부자들만 할 수 있었습니다. 지금 기술이 발전함에 따라서 보편적으로 의료 보험도 되고 많은 사람들이 할 수 있습니다. 그런 기술이 아주 많이 발전한다면 역노화도 모든 사람들이 원한다면 누릴 수 있는 그런 의료적 혜택이 될 수 있는 사회가 올 거라고 생각을 합니다.

● 이준호

젊은피 수혈 아까 말씀하셨는데 실제로 그런 극단적인 일을 하신 분 있죠? 그 억만장자 중에 한 분이 1년에 200만 달러인가 써가면서 그걸 하다가 이제 포기를 했다고 합니다. 그런데 그게 정말 잘 된다고 하더라도 1년에 200만 달러 쓸 수 있는 사람은 별로 없다는 게 문제인 거죠. 기술이 발전되면 훨씬 더 좋아지겠고, 조금 더 우리가 적극적으로 뭔가를 할 수 있을 겁니다. 예를 들어서 유전자 혁명이 일어났을 때 학자들이 모여서 이 기술을 어디까지 쓸 것인가에 관한 논의를 하고 사회적인 합의를 끌어내는 그런 회의를 한 적이 있습니다. 실제로 그런 관례들이 있어 와서 만약에 역노화의 기술이 정말 상용화되고 위험에 대해서 평가를 할 수 있게 되고, 가격에 대해서도 이야기를 할 수 있으면 그런 사회적인 합의 기구 같은 게 작동해야 되지 않을까 그런 생

각을 합니다.

● 김소원 아나운서

과학계와 의료계가 그런 식의 대비도 해야 하는 게 맞는 말씀인 것 같습니다. 조금 전에 말씀하셨듯이 역노화 항노화의 그런 기법들 기술들이 적절한 가격 수준으로 모든 사람한테 그 진입 장벽을 좀 낮추게 된다면 아마도 그런 선두에는 여기 산업계 첨단에 계시는 이 두 분이 제일 힘을 써주실 것 같은데 이런 질문을 좀 드러 보겠습니다. 예전에는 노화가 중년 이상 연령층의 관심사였다면 요즘은 20대 MZ세대들도 뭐 저속 노화니 뭐니 해서 관심이 매우 높아졌습니다. 각 연령대 세대별로 혹은 남녀별로 이 노화에 대해서 느끼는 것들이 좀 다른지 대처하는 것들이 좀 다른지 현장에서 보고 느끼신 것들이 있을 것 같거든요.

● 정현호

저는 특신 전문가고, 특신 제품을 개발하는 사람입니다. 특신의 작용 원리가 근육을 이완해서 결국 주름도 펴고 궁극적으로는 표정을 변화시킵니다. 뒤늦게 주름 펴는 것 때문에 나이 든 분만이 특신을 맞는다는 게 처음 시작이 됐습니다. 사실 요즘 제가 일선 선생님들한테 의사 선생님들한테 듣는 트렌드는 아 조금이라도 더 일찍 와라 왜냐하면 나중에 고치면은 비용도 많이 든다. 처음에 아주 소량으로서 틀을 잡아가는게 낫다는 얘기를 들었습니다.

● 박원석

산업계에서 화장품 회사 같은 경우는 20대 고객부터 80대 고객까지 다 이제 저희가 소통을 해야 됩니다. 화장품 회사에서 보는 노화는 이제 20대가 이제 초기 노화 이제 시작점이다. 30대는 좀 늙기에는 좀 빠르다, 조기 노화. 이제 40대는 이제 좀 빨리 늙어간다, 가속 노화. 저 같은 이제 50대는 본격적인 자연 노화라고 하고, 60대는 이제 저속 노화, 70~80대는 후기 노화라고 저

희가 고객분들을 분류를 합니다. 근데 가만히 이제 고객들의 라이프 스타일과 저희가 드릴 수 있는 제품이나 서비스를 보면은 20대부터 70,80대까지 다 상황이 다릅니다. 모든 기업은 20대부터 고객분들이 노후화에 노출된 환경들이 다르기 때문에 거기에 맞는 솔루션을 맞춤형으로 제공하는 게 맞고요. 최근에 작년 8월에 뉴스화된 게 있는데요. 우리가 20대부터 80대까지 계속 선형적으로 꾸준하게 늙는 게 아닙니다. 이제 스탠포드 대학학에서 연구한 바에 따르면 44세에 한 번 생애 주기에서 확 늙고, 또 60대에 확 늙는다는 보고가 있었습니다. 특히나 뭐 여기 계시는 방청객이나 시청자분들도 이제 44세나 60대에 그때 가장 조심해야 되지 않는가 생각하고 있습니다.

● 김소원 아나운서

눈빛이 초롱초롱하십니다. 현장에서 질문을 주신 것들이 몇 개 있거든요 이걸 저희가 좀 소화를 해 드리는 게 맞을 것 같아서요. 현장 질문들 좀 소화를 해 보겠습니다. 아까 경구용으로 말씀하셨잖아요 영양제가 노화 지연 혹은 역노화에도 도움을 준다고 보시나요? 현대인들에게 필수로 추천하는 영양제가 있으실까요, 라고 보내주셨습니다. 아주 현실적인 질문입니다.

● 정현호

저도 영양제 매일 먹습니다. 필수 비타민을 필요해서. 당연히 우리 몸 생리 작용에 필요한 영양소는 우리가 먹는 음식만으로는 다 보충을 할 수 없기 때문에 그런 관점에서 비타민은 꼭 챙겨 드셔야 되고, 나이에 따라서 부족한 비타민도 계속 달라지고 있기 때문에 거기에 맞춤형으로 드시는 것도 필요하다고 생각을 합니다. 저희 회사 비타민 안 만듭니다.

● 김소원 아나운서

때문에 더 믿음이 가는 말씀이신 것 같습니다. 하나 더 질문을 좀 소화해 보겠습니다. 이거는 조금 더 범위를 확장한 그런 질문이 될 것 같은데요. 정신적으로 느껴지는 노화와 실제 나이의 노화 차이는 어떤 관계가 있을까요? 정신적 스트레스 차이인지 건강 관리에 따른 실제 육체 건강 상태에 따른 차이인지 연령대에 따라서도 노화를 느끼는 체감하는 것이 다른데 관련해서 그 차이가 궁금합니다라고 하셨습니다.

● 이준호

텔로미어를 연구해서 노벨상 받으신 블랙번 교수님이 내신 책을 보면요. 아이들의 엄마들을 두 그룹으로 나눈 다음에 텔로미어의 길이를 계속 재는 실험을 합니다. 텔로미어의 길이를 재면서 엄마들이 어떤 느낌을 갖고 있는지를 조사를 해요. 결론적으로는 스트레스를 받는 순간이 길어지면 텔로미어의 길이가 짧아지고 그때 노화가 진행된다. 스트레스를 줄이면 다시 돌아오더라라는 식으로 연구 결과가 있거든요. 각자가 느끼는 바에 따라서 나의 노화의 정도도 왔다 갔다 한다. 가역적이다. 그렇게 생각을 합니다. 그게 아까 우리가 자기 얼굴을 보면서 더 젊게 느낄 수 있게 되는 것처럼 마음이 몸을 만드는 것 같습니다.

● 김소원 아나운서

마지막으로 좀 가볍지만, 가볍지 않은 질문 현장에서 보내주시는 질문인데 저희가 한번 해답을 좀 찾아보겠습니다. 반려동물을 키우는 인구가 급증하고 있습니다. 그런데 반려동물 수명은 십 년 남짓이라서 어 펫로스 증후군을 앓으시는 분들도 요즘 많으시거든요. 만약에 역노화 기술이 발전을 한다면 사람뿐만이 아니라 반려동물에게도 적용 가능할 수 있지요.

● 이승재

노화를 늦추는 연구에서 가장 큰 연구 중에 하나가 시애틀을 중심으로 해서 반려동물에게 항노화의 가능성이 있는 약물인 라파마이신이라고 하는 약을 처리를 해서 그 개들이 노화가 지연이 되는지, 하는 연구가 진행이 되고 있습니다. 그런 시장들이 많이 있고, 실제로 역노화 실험도 생쥐 실험에서 사람에게 가기 전에 이제 안전성이 많이 확보가 되었는데 사람에게까지 가긴 힘들때 개나 고양이를 통한 실험을 하면 더 좋지 않을까. 그런 생각입니다.

● 김소원 아나운서

노화 관련해서 정신적인 문제 반려동물의 문제까지 한번 두루두루 이야기를 나누어 봤습니다. 2018년 세계보건기구에서 노화에 질병 코드를 부여하면서 노화를 공식적인 질병의 한 형태로 분류를 했습니다. 향후 역노화 산업이 본격적으로 발전될 것으로 기대되는데 그 전망과 국가적 보건 의료적 과제는 무엇인지 정말 짧게 1분씩 각 연사분들께 답변을 들어보도록 하겠습니다.

● 이준호

저는 대한민국이 국립 노화연구소를 만들어야 한다 그게 가장 중요하다 생각합니다.

● 이승재

오늘 네 가지 역노화 방법에 대해서 말씀을 드렸지만 그 네 가지 전부 다 우리나라에서 나온 게 아닙니다. 우리나라에서 독창적으로 나올 그런 연구들을 찾아서 지원을 해주는 게 중요하다고 생각합니다.

● 박원석

오늘 자리가 기술 주권 확보인 만큼 미래를 위해서 원천 기술을 위해서는 국가 단위의 R&D 지원이 절실합니다.

● 정현호

피노타입 역노화만 해 왔고, 이분야의 세계 최고가 되겠다는 그런 생각으로 일을 해 왔는데 오늘 교수님 말씀을 좀 듣고 이제는 좀 이너사이드 역노화도 메디톡스가 해야 되지 않을까 그런 생각을 해봤습니다.

● 김소원 아나운서

연구자분들 그리고 산업계에 계신 분들의 이야기를 들어봤습니다. 자, 이상으로 2025년 SBS 그랜드 퀘스트의 첫 번째 세션 역노화 기술 세션을 마무리하겠습니다.



SESSION 2. 신종 바이러스 예방 백신

코로나 다음 바이러스 막을 수 있나



속도, 플랫폼, 협력... 무엇이 다음 팬데믹을 바꿀 수 있을까?

김훈 SK바이오사이언스 Global Biz 대표

영상 보러가기



감염병의 대유행 즉 팬데믹은 수천 년 동안 인류의 역사에 큰 시련을 주었습니다. 현대 사회에서는 잊혀가고 있는 소아마비 바이러스, 호환 마마로 유명한 천연두, 중세 유럽에서의 페스트, 최근에 많이 익숙해진 신종 플루, 조류독감, 사스, 메르스 등 때문에 저희는 이제는 잘 대응할 수 있고 충분히 준비가 되어 있다고 생각했습니다. 코로나19는 이러한 관점에서 단순한 감염병 유행이 아니라, 글로벌 보건 체계의 취약성과 회복력을 동시에 드러낸 역사적 전환점이었습니다. 저는 코로나 19에 대응하는 현장에서 백신 연구 개발과 생산, 글로벌 공동 대응을 직접 경험하면서, 단순한 위기 대응을 넘어, 다음 위기를 어떻게 준비할 것인가, 과연 사전 준비가 가능할까, 라는 질문을 갖게 되었습니다. 오늘은 그 질문에서 시작해 보겠습니다.



당시 저는 코로나 대유행 발생 즉시 백신 개발 및 생산 책임자로서, SK에서 개발하여 국내 자급화를 이루었던 여러 백신 개발 경험을 바탕으로 초스피드의 개발 전략, 임상 수행, 대량 생산, 식약처와의 끊임없는 협의와 단계적 승인을 통하여 아스트라제네카 백신, 노바백스 백신, 그리고 국산 백신 '스카이코비원' 개발을 완수하였습니다. 살아있는 아데노바이러스를 변형시켜서 만

든 아스트라제네카의 백제브리야 백신, 곤충세포 생산 플랫폼을 이용하여 만드는 노바백스의 뉴백스비드 백신, 그리고 동물세포 배양 플랫폼을 활용하여 나노입자 백신으로 만드는 스카이코비원, 이처럼 다양한 방식의 백신을 가장 짧은 시간에 연구 개발에서 수억 명분의 백신 대량 생산 및 공급까지 해야 하는 그 과정은 치열한 전쟁 같은 상황이었습니다. 연구개발, 허가, 생산, 공급이 동시에 돌아가는 상황에서 팬데믹 대응을 위해서는 기술 개발뿐 아니라 백신의 개발 속도와 빠른 대량 공급이 얼마나 중요한지 몸으로 느낄 수 있었습니다. 백신의 개발에서 가장 중요한 것 중의 하나가 안전성입니다. 짧은 기간에 개발된 백신이라 백신 개발자로서 확신을 갖고자 가장 먼저 백신을 저희가 접종 받았고, 며칠 간의 떨림 속에 비로소 안심할 수 있었습니다. 한 여름 밤의 꿈처럼 정신없이 지나간 약 3년간의 경험에서 많은 아쉬움과 여전히 해결해야 될 한계를 느꼈습니다.



첫째, 플랫폼 기술은 여전히 확장성과 전환성에서 한계를 드러냈고, 둘째, 제조 시스템은 너무 중앙 집중적이어서 위기 대응에 유연하지 못했습니다.

셋째, 백신 접근성의 불균형은 글로벌 대응의 큰 취약점이었습니다. 이 세 가지는 구조적인 한계로, 향후에도 반복될 가능성이 높습니다.

이 현장에서 절감한 세 가지 키워드가 있습니다. 바로 개발 속도, 상호신뢰, 그리고 공급망입니다. 개발 속도는 생명과 직결됩니다. 2009년의 신종 플루 발생 시에도 우여곡절 끝에 백신이 개발되었지만 이미 사회적으로 많은 희생을 치르고 난 뒤였습니다. 국제 협력은 신뢰가 바탕이 되어야만 작동합니다. 특히 사기업 간의



협력은 상당히 어렵습니다. 저희가 개발한 스카이코비원은 많은 백신 관련 기관 기업의 협력으로 탄생한 백신입니다. 개발 자금을 지원한 빌게이츠 재단, 세피, 글로벌 임상을 수행한 국제백신연구소IVI, 질병청 및 공공백신센터 특히 우수한 면역보조제를 제공하고 협력한 GSK, 이러한 공동 협력으로 성공했고, 이는 팬데믹에 공동 대응하고자 하는 목표와 평상시 여러 협력을 통한 상호 신뢰가 있었기에 가능했다고 생각합니다. 그리고 공급망이 무너지면, 아무리 뛰어난 기술도 현장에 닿지 못합니다. 백신은 보통 냉장 유통, 또는 mRNA 백신처럼 냉동 유통 등 다양한 보관 온도로 이송되고, 특히 빠른 시간 내에 공장에서 병원까지 수송되어 접종되어야 합니다. 다행히 대한민국은 질병청의 진두지휘 하에 체계적으로 공급되었지만 그렇지 못한 아프리카 등의 지역이 많습니다.

좀 더 빨리, 안전하게, 국내 뿐 아니라 전세계로 대량 공급이 가능한 공급 체계를 구축해야 됩니다. 이 세 요소는 앞으로 어떤 팬데믹에서도 흔들려선 안 되고 지속적

인 고민을 통해 대응 체계를 더욱 공고히 해야겠습니다. 앞으로의 팬데믹은 코로나19보다 더 복잡하고 빠르게 다가올 수 있습니다. 지구촌화 되어 있는 연결된 사회, 기후 및 생태계의 변화 등의 이유로 동시다발적인 병원체 출현, 빠르고 높은 전파 등으로 그 희생이나 영향이 코로나19보다도 더 클 수 있습니다.

최근의 조류독감, 에볼라 바이러스, 미발견 병원체, 항생제 내성 미생물... 이제는 'Disease X'라고 불리는 정체불명의 위협이 현실이 되고 있습니다. Disease X는 세계보건기구 WHO가 만든 용어로 인류에게 심각한 영향을 줄 수 있는 전염병을 가리키는 가상의 질병 이름입니다. 간단히 말해 미지의 감염병에 대비하자는 경고 신호입니다. 코로나19를 통한 경험에서 알 수 있듯이 지금의 준비 체계만으로는 이 위기를 감당하기 쉽지 않을 것 같습니다.

이제 우리는 구조를 다시 설계해야 합니다. 첫째, 플랫폼 기술은 특정 병원체가 아니라 다양한 감염병에 대응 가능한 범용성이 필요합니다. 둘째, 제조 및 공급은 중앙집중 방식이 아닌, 분산형, 유연한 구조로 바뀌어야 합니다. 셋째, 국제 협력은 단기 계약이 아닌 지속 가능한 파트너십 기반이어야 합니다. 이 구조적 재설계 없이는 다음 위기에 실질적으로 대응할 수 없습니다. 이제 기술 자체보다 기술이 위기 속에서 어떻게 작동하는가를 물어야 합니다. "현재의 과학과 기술은 실제 위기 상황에서 얼마나 유연하고 효과적으로 작동할 수 있는가?", "그 기술이 사회 전체로 얼마나 빠르게 확산될 수 있는가?" 기술은 단지 존재하는 것만으로는 충분하지 않습니다. 작동하는 구조와 수용 가능한 사회 기반이 함께 필요합니다. 다음 팬데믹은 지금보다 더 빠르고, 복잡하고, 치명적일 수 있습니다. 팬데믹 발생 시 마스크부터 찾는 대응책에서 벗어나기 위해 우리는 기술, 전략, 협력의 구조를 근본부터 다시 설계해야 합니다. 그 해답을 찾는 여정이, 바로 우리가 지금부터 시작해야 할 다음 준비입니다.



미래에 나타날 신종 바이러스 감염을 예방하는 백신을 미리 만들 수 있을까?

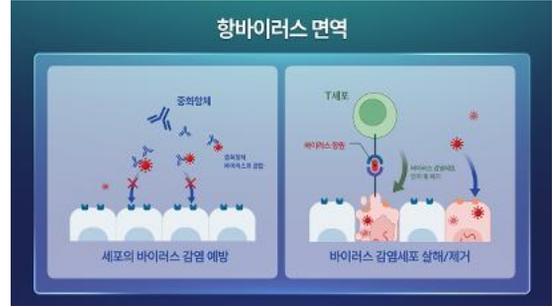
박수형 KAIST 의과학대학원 교수

영상 보러가기

SBSX
그랜드
퀘스트

2021. 10. 10

코로나19 팬데믹을 겪으며 우리는 신종 바이러스가 더 이상 영화 속 이야기가 아니라, 현실에서 언제든 나타날 수 있다는 사실을 깨달았습니다. 그리고 안타깝게도, 앞으로 또 다른 신종 바이러스가 계속 등장할 가능성이 매우 높습니다. 그렇다면 미래에 유행할 신종 바이러스에 어떻게 대비해야 할까요? 모든 바이러스에 대응하는 백신을 만드는 건 현실적으로 어렵기 때문에, 인류 전체에 큰 위협이 될 가능성이 높은 바이러스에 집중해야 합니다. 이러한 신종 바이러스의 공통점은 호흡기로 전파되고 변이가 빈번하다는 점입니다. 이 조건에 딱 들어맞는 대표적인 바이러스가 있는데요. 바로 코로나바이러스와 인플루엔자 바이러스입니다. 코로나 바이러스는 우리가 익히 아는 사스, 메르스, 코로나19를 유발한 바이러스들로, 이 그래프에서 볼 수 있듯이 코로나19 바이러스는 팬데믹 기간 동안 알파, 베타, 델타, 오미크론 등 다양한 변이종이 계속해서 발생했습니다. 코로나19 바이러스의 변이종들이 나타나고 사라지는 주기가 엄청나게 짧죠.



예를 들면, 2020년에 유행했던 코로나19 바이러스는 현재는 더 이상 존재하지 않습니다. 코로나바이러스는 사스, 메르스, 코로나19 원인 바이러스들 외에도 다양한 종류가 존재합니다. 아직 사람에게 감염되지는 않았지만, 박쥐, 낙타, 천산갑 등 여러 동물 숙주에 다양한 코로나바이러스들이 존재하고 있고요. 이 중 일부는 언제든 인간에게 전파될 가능성이 있고, 코로나19 팬데믹과 같은 심각한 위기를 다시 초래할 수도 있습니다.



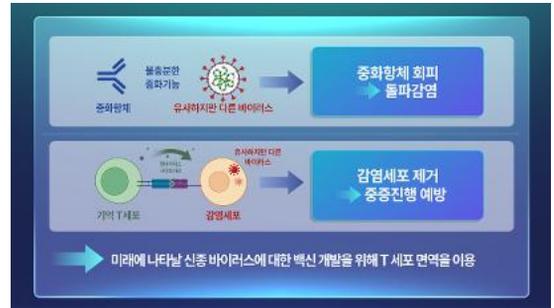
인플루엔자 바이러스도 매우 중요한데요. 이 바이러스는 RNA 유전자가 8조각으로 나뉘어 있어서, 한 숙주에 두 종류의 인플루엔자 바이러스가 동시에 감염될 경우 유전자가 섞이며 전혀 새로운 바이러스로 재조합될 수 있습니다. 특히, 조류 인플루엔자가 돼지 같은 중간숙주를 거쳐 인간에게 적응하면 큰 위협이 될 수 있고, 최근엔 조류독감에 감염된 젓소와 접촉한 사람이 감염된 사례도 보고되었습니다. 즉, 조류 인플루엔자도 인간에게 점점 가까워지고 있는 상황입니다.



이처럼 새로운 바이러스는 언제든지 등장할 수 있으며, 과학적 대비가 매우 중요합니다. 따라서, 변이가 잦은 바이러스들에 대해선, 특정 변종이 아닌 “코로나바이러스 전체” 또는 “인플루엔자바이러스 전체”를 동시에 예방할 수 있는 범용 백신을 개발하는 것이 가장 효과적인 전략일 것입니다. 우리 몸에 바이러스가 침입하면 면역반응을 유도하여 이를 제거하게 됩니다. 이때 중요한 두 가지 면역 반응이 바로 항체 면역과 T세포 면역입니다. 중화항체는 바이러스와 결합해 세포로의 침입을 막는 역할을 하고, 지금까지의 백신 대부분은 이 중화항체 유도에 초점을 맞춰 개발돼 왔습니다. 그런데 또 하나의 중요한 면역 요소가 있습니다. 바로 T세포입니다. T세포는 바이러스에 감염된 세포를 찾아 제거함으로써, 바이러스가 더 이상 퍼지지 못하게 하고 중증으로 진행되는 것을 막을 수 있습니다.

여러분 모두 코로나19 팬데믹을 겪으며, 감염 예방에 있어서 중화항체의 중요성을 한 번씩은 들어보셨을 겁니다. 하지만 팬데믹 당시의 많은 연구들은 T세포 면역 역시 감염을 제어하는 데에 매우 중요함을 증명하였고,

인간을 대상으로 한 연구에서도 B세포 제거 치료를 받은 혈액암 환자 중에 강한 T세포 면역을 갖는 환자의 생존율이 더 높다는 결과 역시 발표되었습니다. 이러한 근거들을 종합해 보면, 중화항체가 부족하더라도 강한 기억 T세포 면역반응이 유도된다면 중증감염으로의 진행을 막고, 환자의 예후를 개선할 수 있다는 점을 명확하게 보여줍니다.



무엇보다 중화항체는 약점이 있습니다. 바로 돌연변이에 매우 취약하다는 점입니다. 코로나19 바이러스의 경우, 항체가 작용하는 부위는 바이러스 표면에 존재하는 스파이크 단백질 중 RBD라는 아주 작은 부분인데, 이곳에 돌연변이가 특히 자주 발생합니다. 그래서 오미كرون 변이처럼 많은 돌연변이가 생기면 백신의 효과가 급격히 떨어지게 됩니다. 즉, 중화항체는 바이러스가 조금만 바뀌어도 무력화될 수 있습니다. 반면, T세포는 다릅니다. T세포는 바이러스 단백질이 잘게 찢개져 만들어진 8개에서 11개의 아미노산 길이의 T세포 에피토프를 인식합니다. 이러한 T세포 에피토프는 바이러스의 모든 단백질에 존재할 수 있기 때문에, 다수의 에피토프들에 대한 T세포 면역반응을 동시에 유도할 수 있습니다. 게다가 개개인마다 T세포가 인식하는 에피토프 부위가 다르기 때문에, 바이러스가 면역 회피를 하기 더 어렵습니다. 따라서, 유사하지만 다른 변종 바이러스에 대해서도 T세포는 여전히 작동하여, 감염세포를 제거하고 중증진행을 억제할 수 있게 됩니다.

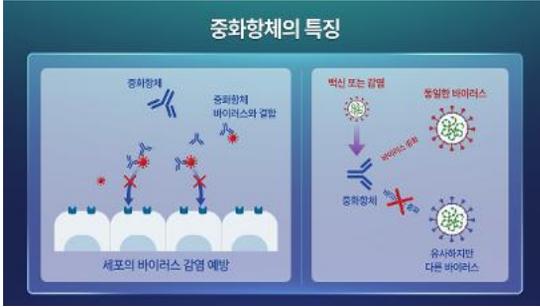
이번 강의를 통해 제시하는 범용 백신이란 모든 바이러스를 막는 것이 아니구요. '코로나바이러스 전체' 혹은 '인플루엔자바이러스 전체'처럼 같지만 유사한 바이러스들을 타겟으로 모두 예방하는 전략이라 할 수 있습니다. 중화항체가 감염 예방에 중요함은 명확한 사실이지만, 코로나바이러스나 인플루엔자바이러스 같이 변이가 잦은 신종바이러스에 대해서는 T세포 면역 기반의 범용 백신을 개발하는 것이 해결책이 될 수 있다 생각합니다.



사회가 새로운 지식을 수용하는 방식: 면역의 사례

신의철 KAIST 의과학대학원 교수

영상 보러가기



조금 전에 들으신 것처럼, 중화항체는 바이러스에 결합해서 우리 세포로 침입하지 못하게 함으로써 감염을 예방하는 기능이 있습니다. 하지만 중화항체는 바이러스가 조금만 바뀌어도 그 중화기능이 제대로 나타나지 못합니다. 그래서 유사하지만 다른 바이러스에 대해서는 무용지물이 되기 쉽습니다. 반면 T세포는 바이러스에 감염된 세포를 재빨리 찾아내어 살해 제거함으로써, 감염 후에 바이러스가 더 이상 증식하지 못하도록 막는 기능이 있습니다. 따라서 바이러스의 감염 자체를 예방하지는 못하지만 감염 후에 중증질환으로 진행되는 것을 막을 수 있습니다. 그리고 T세포는 바이러스가 조금 다르다 하더라도 이에 대해서도 여전히 작동하는 경향이 있습니다. 심지어는 코로나19 바이러스에 대한 T세포가 다른 종류의 코로나바이러스에 대해서도 반응하는 경우도 종종 있습니다. 현재 사용되고 있는 코로나19 백신 접종을 하면, 중화항체뿐만 아니라 기억 T세포 반응도 유도되기는 합니다. 하지만 현재 사용되고 있는 백신들은 주로 중화항체에 초점을 맞추는 방향으로 개발되어 왔습니다. T세포 반응은 부수적인 것이었습니다. 하지만 T세포 면역을 초점을 맞춘 백신을 만들면, 미래에 나타날 수 있는 신종 코로나바이러스나 신종 인플루엔자 바이러스에 대한 범용 백신을 미리 만들 수 있다는 것이 앞 강의의 내용이었습니다.

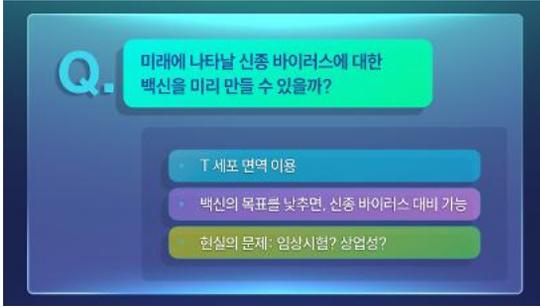
그렇다면 왜 지금까지 이런 일을 하지 않고 있을까요? 거기에는 어떤 특별한 이유가 있을까요? 바로 이것이 제가 드릴 말씀의 내용입니다. 제가 드리는 짧은 강연의 제목이 “사회가 새로운 지식을 수용하는 방식”입니다. 즉 풀어서 말하자면, T세포 면역이라는 좋은 수단이 있는데 왜 지금까지 이를 적극적으로 활용하여 신종 바이러스에 대한 백신을 만들지 않는지에 대한 이야기

입니다. 일반적으로 새로운 과학 지식이나 정보가 나오면 사회는 이를 열광적으로 받아들이고 수용할 것 같지만 꼭 그렇지는 않습니다. T세포의 경우가 그렇습니다. 인류가 항체에 대해서 알게 된 것이 130년이 넘는 반면 T세포에 대해 알게 된 것은 50년 정도 되었습니다. 물론 이 시간도 꽤 긴 시간이지만 항체에 비하면 비교적 최근에 알려진 것이지요. 그리고 그 작동 원리를 이해하는데 있어 항체는 직관적으로 이해되는 반면 T세포는 매우 복잡해서 바로 이해하기가 어렵습니다. 항체에 비해 T세포는 측정을 하기도 어려워서 표준화된 측정을 하기가 힘듭니다. 또한 T세포는 원래 그 기능이 다른 세포를 살해하는 것이므로 백신에 의해 강화된 T세포 면역반응이 오히려 조직 손상을 일으킬지 모른다는 걱정도 유발하게 됩니다.

사회가 새로운 지식을 수용하는 방식: T 세포

- 비교적 짧은 역사, 복잡한 원리, 어려운 측정법
- 오히려 조직 손상을 일으킬지 모른다는 걱정
- 감염을 예방하는 백신을 만들고 싶은 마음

하지만 가장 중요한 이유는 바로 이것입니다. 백신의 목표를 바꾸기 싫은 것입니다. 지금까지는 중화항체의 원리를 이용하여 감염을 예방하는 백신을 잘 만들어서 이용했는데 T세포는 이론적으로 감염을 예방하기보다는 감염 이후에 중증질환이 발생하는 것을 막기 때문입니다. 하지만, 백신의 목표를 살짝 낮추어 설사 감염을 예방하지는 못하더라도 중증질환의 발생을 예방할 수 있다면 그것만으로도 좋지 않을까요? 특히 T세포의 원리를 이용하여 미래에 나타날 신종바이러스에 대한 백신을 미리 만듦으로써 신종 바이러스가 설사 유행하더라도 중증질환이 생기지 않도록 할 수 있다면 매우 유용하지 않을까요? 실제로 코로나19 팬데믹 기간 중에서는 이러한 내용의 글을 저명한 면역학 저널에도 실고 관련 논문들도 활발히 발표하였습니다.



그 결과, T세포 면역학자들로부터는 좋은 반응과 지지를 받게 되었습니다. 하지만 항체 면역학자들은 반대였습니다. 항체 면역학자라고 모두가 그런 것은 아니었지만 일부 항체 면역학자들은 바이러스 감염에서 T세포는 중요하지 않다고 교과서에 있는 내용까지도 부정하는 의견을 내기도 하였습니다.

여기 여러분이 잘 아는 벌거벗은 임금님 동화의 그림이 있습니다. 코로나19 팬데믹 중에 어떤 항체 면역학자는 학회 발표에서 벌거벗은 임금님 그림을 보여주면서 T세포가 벌거벗은 임금님이라고 비유를 하기도 했습니다. 실제로는 벌거벗었지만 모두 멋있는 옷을 입고 있다고 이야기해 주는 임금님처럼, 실제로는 별로 중요하지 않는데 모두 T세포가 바이러스 감염에서 중요한 역할을 한다고 이야기한다는 것입니다.

이와 같이, 잘 드러나지는 않았지만 코로나19 팬데믹은 T세포 면역학자들과 항체 면역학자들 사이의 눈에 보이지 않는 전투가 벌어진 시기이기도 했습니다. 즉 “바이러스 감염에서 T세포가 얼마나 중요한 역할을 하는가”에 대한 학문적 논쟁이 벌어진 것입니다. 일반적인 항체 면역학자들은 T세포의 역할을 인정합니다만, T세포를 벌거벗은 임금님으로 비유한 분 같은 극단적 항체 주의자들도 계셨던 것이지요. 그러면 왜 이런 일이 발생할까요? 제가 앞에서 말씀드린 것처럼, 저는 아직 사회가 T세포라는 지식을 완전히 수용하지 못하기 때문이라고 생각합니다. 복잡한 원리나 어려운 측정법, 예방이라는 백신의 목표를 바꾸기 싫은 마음까지 어우러져서요.

저는 과학자들이 새로운 지식을 발견하는 것에만 집중할 것이 아니라, 발견한 새로운 지식을 어떻게 사회가 잘 받아들이고 활용하게 할 것인지에 대해서도 늘 고민을 해야 한다고 생각합니다.



원래의 질문으로 돌아가 봅시다. 미래에 나타날 신종 바이러스에 대한 백신을 미리 만들 수 있을까요? 앞에서 말씀드린 모든 것을 종합해 보면, T세포 면역을 이용하면 가능할 것입니다. 하지만 이 경우에는 백신의 목표를 낮추어야 합니다. 감염의 예방이 아니라 중증질환 발생의 예방으로요. 백신의 목표를 낮춘다고 하니 약간 마음에 안 들기는 하지만, 치명적인 신종바이러스가 유행하는 상황을 상상해 본다면 중증질환의 발생을 예방하는 백신을 미리 가지는 것이 아무것도 없는 것보다는 훨씬 더 낫다는 것에 금방 동의하실 것입니다.

하지만 현실의 문제도 고려해야 합니다. 아직 현실에 존재하지 않는, 미래에 나타날지 모르는 신종바이러스에 대한 백신을 만든다면 임상시험은 어떻게 해야 할까요? 결국 이런 백신은 백신회사가 만들어서 상품화해야 하는데 과연 상업성이 있을까요? 이런 문제들에 대해서는 잠시 후에 토의 시간에 함께 고민해봤으면 합니다.



SESSION 2. 패널 토크 코로나 다음 바이러스 막을 수 있나

영상 보러가기



김훈
SK바이오사이언스 Global Biz 대표

박수형
KAIST 의과학대학원 교수

신의철
KAIST 의과학대학원 교수

● 김소원 아나운서

SBS 그랜드 퀘스트 두 번째 세션 연사분들 모시고 토의 진행해 보도록 하겠습니다. 앞선 첫 번째 세션 그 역노화 관련한 세션은 사실 희망과 기대가 섞인 그런 토대 위에서 진행이 됐습니다. 이번 세션은 이 신종 바이러스 코로나19를 겪으면서 그 백신 기술 주권이 생존에 달린 문제라는 것을 우리 모두가 체험한 이후에는 약간 공포의 토대를 둔 그런 토의가 되지 않을까, 라는 생각도 듭니다. 먼저 여쭙보고 싶은 건 이런 이야기가 있더라고요. 20년 사이 최근 신종 바이러스 감염병이 유독 많이 발생하고 있다는 이야기가 있는데, 그건 왜 그런 걸까요?

● 박수형

크게 두 가지 정도를 생각을 할 수가 있는데요. 지난 20년 동안 전 세계 인구들의 이동이 월등히 증가했습니다. 신종 바이러스가 발생을 하더라도 특정 지역에 국한될 수 있는 그런 질병들이 전 세계로 퍼져나갈 수 있는 여건이 만들어졌습니다. 코로나19 예를 들어봤을 때도 아프리카에서 새로운 변이종이 발생이 되면, 한 달 이내에 전 세계에 그 변이종이 주도종이 될 정도로 널리 퍼지게 됐습니다. 그게 이제 한 가지 이유라고 생각할 수가 있고요. 두 번째는 이제 기후 온난화를 둘 수가 있습니다. 예 중에 하나는 모기에 의해서 유래되는 바이러스 질병들이 상당히 많은데요. 날씨가 더워지면서 모기들이 점점 더 북쪽으로 올라오게 됐습니다. 그렇기 때문에 그 신종 바이러스가 퍼질 수 있는 여건이 훨씬 더 많이 그 나타나게 됐다고 볼 수가 있겠죠.

● 김소원 아나운서

사람들의 이동과 지구 온난화 집중 얘기를 해 주셨는데요. 박수형, 신의철 교수님께 먼저 좀 질문을 드리겠습니다. 상당히 흥미로운 부분이었는데, T세포 면역학자들과 항체 면역학자들 간의 학문적 논쟁 이야기 말입니다. T세포 면역 기반 백신이 만약에 해결책이 될 수 있

다면, 효과만 있다면 개발하는 것이 그렇게 어려울 것 같지 않거든요. 그런데도 뭔가 걸림돌이 있는 듯한 그런 분위기를 말씀해 주셨던 말이죠. 조금 더 이야기를 들어볼까요?

● 신의철

그 얘기는 아까 제가 제 짧은 강의에서 얘기를 해 드렸는데요. 중앙체라는 것의 원리를 이용한다면, 이 경우는 성공적으로 백신이 만들어지면 감염을 예방할 수가 있습니다. 그런데 T세포를 초점을 하면은 넓은 범위의 바이러스에 대해서 이제 방어력을 줄 수는 있지만, 방어력이 감염을 막는 것이 아니고 감염은 허용을 하고 종종 감염으로 이행하는 걸 막는 것이 되는 거예요. 목표가 좀 낮아진다는 거죠. 그게 약간 좀 사람들의 마음에 안 드는 것 같고요. 더 중요한 이유는 산업화로 갈 때는 표준화가 필요하거든요. 항체는 그 측정하는 게 굉장히 용이하고 표준화가 되게 쉽습니다. T세포는 지금도 측정을 하는 게 되게 어려워요. 그러니까 이것도 똑같은 백신을 맞고도 누가 T세포 반응이 너무 센지 약한지 이런 걸 측정하는 방법 자체가 표준화가 어렵습니다. 현대인들이 바라는 방식으로 정량화나 산업화에서도 좀 어려움을 겪고 있습니다.

● 김훈

산업계에서 백신을 개발할 때 백신의 유효성, 효과성을 약 70% 이상이 되어야지만 허가를 받을 수 있습니다. 이 말씀을 드리는 이유는 실제로 지표라는 게 있다는 거죠. 왜 70%가 되는지. T세포는 상당히 좋고, 좋은 방어 효과를 가지지만 이 지표를 어떻게 설정할까가 이슈입니다. 아직까지 저희 과학 기술로는 그 지표를 설정하기에는 상당히 좀 어려움이 많다고 생각하시면 될 것 같습니다.

● 김소원 아나운서

과학계와 그리고 산업계 이야기를 두루 들어볼 수 있어서 더 좋았던 것 같습니다. 대표님께 하나 더 여쭙볼까요? 코로나19 팬데믹 때 T세포를 타깃한 백신 개발 상황이 어땠는지, 앞서 말씀해 주신 것처럼 그렇게 좀 진척이 어려웠는지.

● 김훈

지표 설정에 대한 약간의 이슈가 있었기 때문에 전통적으로 저희가 잘 알고 있는 중화항체, 바이러스가 들어오면 얼마나 방어되는지를 눈으로 직접 볼 수 있는 직접적인 지표를 가지고 설정을 했습니다. 다만 아직까지는 과학계에서는 유용한 톨이지만 산업계에서는 증명하기 좀 어려운 그런 톨이기 때문에 시간이 좀 더 필요합니다. 코로나 때문에 아쉽게도 그 간접 지표 정도로만 활용이 되었습니다.

● 김소원 아나운서

속도는 좀 느리지만 시도는 계속해서 이루어지고 있다는 말씀으로 이해를 하겠습니다. 오늘 강의에서 다음 신종 바이러스로 변이가 잦은 코로나 바이러스나 인플루엔자 바이러스를 주로 언급을 해 주셨는데요. 만약에 이것들이 아닌 전혀 새로운 바이러스로 팬데믹이 이루어진다면 그것 역시 T세포로 백신을 제조하는 것이 가능할지 궁금합니다.

● 신의철

오늘 말씀드린 거는 큰 제목이 미래에 나타날 신종 바이러스에 대한 백신을 미리 만들 수 있을까, 였습니다. 미리 하려면 조금은 미리 예상이 돼야 되는 거죠. 그렇기 때문에 코로나나 인플루엔자를 저희가 이제 주로 타깃을 한 거였거든요. 지금 이제 질문하신 거는 우리가 보통 미지의 X라고 하는 거죠. 뭔지도 모르는 거예요. 이렇다면 어떤 것인가라는 게 바로 그 질문이거든요. 그런 경우는 당연한 얘기지만 미리 만들 수는 없겠죠.

그런 경우는 신속 전략이 중요하겠죠. 우리가 이번에 했던 것처럼 코로나19 때 했던 것처럼 이 바이러스가 창궐하게 된다면 빨리 우리가 그 바이러스의 정체를 알고 이제 빨리 신속하게 만들어야 합니다. 그때는 두 가지 시도가 다 될 겁니다. 재미있게도 지금 인간한테 질병을 일으키는 많은 박테리아나 바이러스가 있잖아요. 종류에 따라서 어떤 거는 면역에 있어서 중앙체가 중요한 게 있고요. 상대적으로 T세포가 중요한 게 있어요. 미지의 것을 아직 모르니까 우리가 이제 그걸 빨리 네 정체를 알게 된다면 이때는 두 가지를 또다시 시도해 봐야 되겠죠. 결과적으로 이게 더 중요한 것 같아 그러면 그쪽으로 가게 됩니다. 저희가 T세포를 이제 역점을 두었다고 해가지고 꼭 그게 정답이라는 게 아니고 둘 다 동시다발적으로 봐야 되겠죠.

● 김소원 아나운서

세션을 준비하면서 자료를 읽어보면서 가장 많이 느꼈던 게 뭐냐면 그 어느 것보다 이 백신 세션이 속도가 가장 중요하다는 생각이 들었습니다. 당면한 문제를 해결해야 되는 거거든요. 생존이 걸린 문제를 말이지요. 대표님 이전에 빌 게이츠 재단과 연계를 통해서 국내 코로나 백신 개발에 성공하신 경험이 있다고 말씀해 주셨는데요. 새로운 백신 개발에 가장 중요하게 고려되어야 하는 요소는 무엇인지 여쭙겠습니다.

● 김훈

강의할 때도 많이 말씀을 드렸지만 백신을 개발할 때 속도가 상당히 중요하죠. 그보다 더 중요한, 양보할 수 없는 딱 두 가지 요소가 있습니다. 유효성, 그리고 안전성입니다. 이 두 가지는 저희가 증명을 해야 되는 두 가지고요. 일반적으로 백신은 한 10년에서 15년, 많게는 20년까지 기간이 걸립니다. 아까 말씀드린 유효성과 안전성을 증명하기 위해서요. 이거를 코로나 기간 동안에는 약 2년으로 단축했습니다. 그 말은 게이츠 재단이라든지, CEPI(Coalition for Epidemic

Preparedness Innovations)라든지, 국제백신연구소라든지 특히 질병청이라든지 이쪽에서 많은 공조를 통해서 저희가 이루었기 때문에 짧은 시간에 가능했습니다. 하지만 아직도 아쉬움이 좀 많고요. 좀 더 효과가 좋고 안정성 좋은 백신을 더 단기간에 개발했다고 했었다면 하는 이런 생각을 가지고 있습니다. 아마 그런 것들 때문에 어떻게 준비해야 될지를 이야기하기 위해서 아마 이 자리를 마련하신 게 아닌가 그렇게 생각합니다.

● 김소원 아나운서

하지만 대표님의 경험이 큰 자산이 돼서 대처를 하는데 훨씬 더 큰 도움이 될 거라고 저희가 믿습니다.

● 김훈

그래서 국내에서도 100일 안에 백신을 개발할 수 없을까? 그 미지 X에 대해서 백신을 개발할 수 없을까? 사전에 준비할 수 없을까?라고 말씀하신 것처럼 저희 산업계에서는 100일 안에 어떤 이제 미지의 바이러스가 발생했을 때 100일 안에 저희가 이것을 백신을 개발할 수 없을까라는 쪽으로 현재 연구를 하고 있고 거기에 많은 지원을 하고 있습니다. 그게 가능하다고 저희가 좀 더 잘 대응할 수 있지 않을까 그렇게 생각하고 있습니다.

● 김소원 아나운서

알겠습니다. 조금 전에 나왔던 질문 후속 질문으로 현장에서 보내주신 질문을 한번 소화를 해야 될 것 같아서요. 코로나 다음 바이러스로 학계와 업계에서 예상하는 바이러스의 형태와 주요 증상은 무엇입니까? 이 바이러스도 역시 T세포 백신이 유효할까요,라고 현장 질문 보내오셨습니다. 소화를 좀 해 주셔야 될 것 같은데

● 박수정

앞으로 닥칠 미래의 바이러스가 뭐가 나올지는 모르니다. 그렇지만 바이러스 면역을 하는 사람들이 10명한테 물어보면 9명이 대답하는 게 조류인플루엔자입니다. 그러니까 조류 인플루엔자가 앞으로 가장 큰 위협이 될 거라고 생각을 하고 있습니다. 호흡기로 감염이 되고, 변이가 많을수록 훨씬 더 위험하다고 얘기하는데 조류 독감 바이러스가 거기에 딱 들어맞는 바이러스입니다. 그렇기 때문에 대응하는 게 필요합니다. 독감 바이러스에 대해서 백신을 개발하려는 노력은 많이 있어 왔습니다. 우리는 매년 백신을 독감 백신을 맞고 있잖아요 거기에 이제 범용으로 대비할 수 있는 백신을 개발하는 게 무엇보다도 중요하다고 생각을 합니다.

● 김소원 아나운서

범용 백신 개발이 중요하다,라는 말씀까지 들었고요. T세포 관련한 질문이 아무래도 제일 많습니다. 중증도를 막는다는 의미로 T세포 백신을 아까 말씀하셨는데요. 역시 현장에서 보내주신 질문입니다. 중증도를 치료할 수 있는 의료 기술과 이 T세포를 활용한 백신 기술은 별개인가요, 라고 질문을 해 오셨어요. 저도 이 질문을 하고 싶었거든요.

● 신의철

이거는 굉장히 단순한 얘기인 거죠. 다른 질병의 경우에도 백신을 통해서 예방하는 기술하고, 환자가 된 사람을 치료하는 기술은 약간 비슷하면서도 다른 개념이 되는 거죠. 이 경우는 중증으로 가는 것을 예방한다고 제가 말씀을 드렸지만은 이러한 T세포를 초점을 맞춘 백신을 저희가 성공적으로 개발한다면 이 백신을 안 맞았을 때는 중증으로 이행했을 가능성이 높았는데 이걸 막았기 때문에 중증으로 안 가게 되는 것이죠. 이런 기술을 말씀을 드린 거고요. 그런 백신을 없을 때 또 맞았다 하더라도 설사 또 중증을 가는 사람들이 있을 때 그런 중증을 어떻게 치료할 것인가 하는 기술은 전혀 다

른 기술입니다. 사실은 하지만 여러분들한테 제가 질문을 역으로 던진다면 우리한테 두 가지 기술이 있습니다. 하나는 이 백신을 맞으면 종종으로 갈 가망성을 많이 낮춰주는 기술이 있고, 또 하나의 기술은 이미 종종으로 갔는데 그 사람을 살리는 기술이 있다면 둘 다 필요하겠지만 여러분은 어느 걸 택하시겠습니까? 저 같으면 예방을 택하겠습니다.

● 김소원 아나운서

조금 더 일반적인 질문을 좀 드려볼게요. 이미 사실 일반인들의 입장에서 볼 때는 백신이 수많은 백신이 출시가 되어 있고, 접종도 말씀하셨던 것처럼 독감 접종 바이러스 접종 많이 이루어지고 있는데 그럼에도 불구하고 이러한 기술이 새로운 팬데믹에 사용되기 어려운 기술적 한계는 무엇인지요

● 김훈

제가 백신이나 바이러스를 연구한 지 한 35년째 됩니다. 학계도 좀 있었고, 주로 산업계에 있었습니다. 저희가 아직도 해결하지 못한 바이러스들이 많습니다. HIV라든지 그 다음에 HCV라든지 공부하면 공부할수록 그 수천 가지의 바이러스가 있습니다. 아직도 저희가 모르는 바이러스가 있고 그리고 그 이 친구들이 저희들한테 이제 감염을 일으킬 때도 상당히 다양한 방법으로 예측하지 못한 방법으로 저희를 감염시킵니다. 저희가 그걸 방어할 해야 되는데 산업계에서 쓸 수 있는 기술은 한정적이라는 거죠. 오늘 얘기된 T세포도 좀 유망한 기술이라고 말씀드릴 수 있습니다. 한정적인 기술을 어떻게 더 커버를 할 수 있을까. 그런 측면에서 보면 끊임없는 싸움이 될 것 같고, 바이러스가 사람의 100만 분의 1밖에 안 되는 저 짧은 유전자를 가지고 있지만 얼마나 다양하게 사람들을 공격하는지, 공부를 하면 할수록 이거는 진짜 어려운 싸움이 되겠구나를 느낄 수 있습니다. 산업계는 그런 측면에서 너무나 죄송하게 많은 백신이 저희가 익히 알고 있는 타깃이 있지만, 거기에 대한 백

신을 개발하지 못하고 있다 이렇게 생각하시면 될 것 같습니다.

● 김소원 아나운서

백신 관련한 최전선에 계신 세 분께 질문을 공통적으로 좀 드리고 싶은 게, 저희가 코로나19가 한창 기승을 부릴 때 팬데믹 시기에 SBS D포럼에서 기조연사로 유발 하라리 교수를 모신 적이 있습니다. 그때 그 유발 하라리 교수가 이런 상황은 유엔 수준을 넘어서는 새로운 국제 공조 기구를 빨리 발족시켜서 국제 공조를 통해서 문제를 해결해야 한다 이렇게 강하게 주장을 하셨거든요. 자국 중심주의도 더 강화됐고 세계가 이전보다 훨씬 더 분열된 느낌인데, 그런 새로운 위기가 닥쳤을 때 이전 수준의 국제 공조를 기대하기도 어려울 것 같다는 그런 우려가 든단 말이죠. 그 점에 대해서는 어떻게 생각하시는지 기술 주권 확보라는 차원에서도 연결해서 답변을 드릴 수 있을 것 같습니다.

● 김훈

코로나가 상당히 많은 교훈을 주었다고 생각합니다. 저희가 기술이 있다고 해서 저희가 할 수 있는 건 아니고 실제 생산이 되어서 공급이 돼야 합니다. 초기에 기술이 개발되고 난 다음에 수억 명분의 백신을 생산해야 되는데 생산할 수 있는 원자재 그 소위 말하는 소부장, 소재 부품 장비가 사실 한국에서는 좀 전무했고 다 수입을 해야 되는데 그걸 확보하기 위한 게 다 전쟁이었습니다. 말씀하신 것처럼 다시 팬데믹이 발생해도 그런 똑같은 상황이 발생할 수 있을 것 같습니다. 다만 조금 배웠던 교훈은 저도 대한민국 국민이기 때문에 저희 국민을 더 우선시 해야 될 의무가 있습니다. 그런 차원에서 보면 좀 더 많은 사전 준비가 돼 있고 국내에 소부장을 생산할 수 있는 시설이나 그런 게 있었다고 그러면 이런 국제 협력에서 좋은 위치에서 저희가 협력할 수 있지 않을까 생각합니다. 향후에도 저희가 끊임없이 그런 준비를 해야지만 될 것 같고 아마 그런 노력 없이

속수무책의 상황이 될 것 같습니다.

● **신의철**

신종 감염병에 대한 대응에 있어서 국제 공조가 이전보다 더 중요하다, 이거는 다 동의할 만한 얘기인 거죠. 지금 말씀하신 것처럼 국제 정치적으로는 오히려 전체적인 분위기는 그런 거에 역행하는 분위기도 있다는 거죠. 해법을 이런 걸 제시하고 싶습니다. 코로나19 팬데믹을 생각해 본다면은 그때도 전 세계적인 문제지만 각국 간의 약간씩 이 질병을 바라보는 시각이 똑같지만은 않았어요. 어느 나라가 대응을 더 잘했다 안했다는 성적표를 매기자는 건 아니지만 시각이 달랐습니다. 스웨덴은 집단 면역을 추구했다라든지 이런 식으로요. 자신들의 어떤 태도와 철학이 있는 거거든요. 그래서 국제 공조는 중요한데 일단 우리라도 잘하자라는 생각을 하고 있습니다. 아까 강의에서 T세포 중심의 면역은 예방은 못할지언정 중증 감염을 이행을 막을 거라고 얘기를 했습니다. 이런 철학을 받아들이는 나라가 있고 안 받아들이는 나라가 있을 수도 있습니다.

● **김소원 아나운서**

사회적인 합의가 먼저 있어야 하니까..

● **신의철**

어떤 가상의 시나리오를 생각해 본다면, 어떤 국가는 항체 중심의 A라는 시나리오를 택할 거고, 어떤 나라는 그건 목표가 과도한 것 같아 목표는 낮추지만 우리 T세포 중심으로 가볼까? 나중에 성적표가 나오게 되겠죠. 과학 기반으로 합리성을 기반으로 선택을 해야 된다고 생각을 합니다.

● **박수형**

코로나19 사태를 겪으면서 과학계 자체는 공조가 잘 됐다고 생각을 합니다. 백신을 만들기 위해서는 과학의 영역이 있고, 백신 개발의 영역이 있습니다. 과학의 영

역에서는 누구나 할 것 없이 다 달려들어서 다 이제 해결하려고 노력을 했고요. 백신 개발 측면에서는 여전히 자국 우선주의가 따랐던 게 사실인 것 같습니다. 제가 더 강조 드리고 싶은 거는 한국에서도 백신을 개발하기 위한 플랫폼 기술을 가져야 된다는 생각입니다. 그걸 위해서 준비를 해야 된다고 생각을 하고 있습니다.

● **김소원 아나운서**

세 분 연사님의 말씀을 들어보니까 확실히 백신과 기술 주권 확보는 떼려야 뗄 수 없는 그런 관계인 것 같습니다. 의미 있는 대화가 많이 오갔는데요. 코로나 다음 바이러스 막을 수 있나 이 세션은 여기서 마무리하도록 하겠습니다.



SESSION 3. 공간 디스플레이

현실과 화면의 경계를 허문 디스플레이



상상 속 공간 디스플레이 기술

홍용택 서울대 전기정보공학부 교수

영상 보러가기

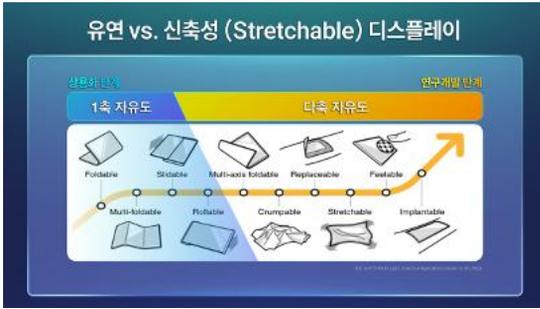


2010년의 SBS에서 개최한 SDF(서울디지털포럼)의 기초연사기이기도 했던 영화 아바타의 감독 제임스 카메론은 3D 콘텐츠 영화의 폭발적인 성장을 기대했습니다. 영화 아바타는 세계적으로 충격을 주었고, 안경을 쓴 관람자들은 3D 영상과 영화를 함께 즐겼습니다. 하지만, 15년이 지난 현재 3차원 영상으로 상영되는 영화는 극히 제한적이며 3차원 영상을 가정에서 볼 수 있는 디스플레이 제품 또한 거의 없습니다. 사용자들이 안경을 반드시 착용해야 한다는 점에서 그 한계점을 가지고 있기도 합니다. 역시 영화 마이너리티리포트의 어드바이저이자 오블롱인더스트리 수석과학자인 존 언더코플러도 2010년에 SDF에 온 적 있는데요. 당시 패션을 위한 의류 디스플레이, 스위치 블레이드에서 펼쳐지는 공간 디스플레이, 신체 부착되면서 형태가 변하는 스트레처블 디스플레이 등 영화 속 컨셉 기술을 보여 주면서, 50년 정도 지나야 우리 주변에서 볼 수 있을 거라고 얘기했습니다. 또, LCD, OLED, 플렉서블 디스플레이 등 2010년 당시 세계 기술을 선도하고 있던 대한민국의 기술에 의해 제품으로 구현될 것이라고 얘기했습니다.



자, 그림 영화와 기술은 어떻게 연결될 수 있을까요? 영화 속 기술의 키워드는 정치 경제 사회 환경과 아트 디자인의 시대적 변화와 함께 진화했고, 이러한 기술을 상용화하기 위해 과학기술자들이 많은 노력을 했습니다. 키워드를 분석해 보면, 영화 속 기술이 제품화되기 까지 대략 20~30년 정도 걸렸습니다. 물론 아직 상상 속 기술로만 남아 있는 영화 속 기술들도 있습니다. 먼저 현실이 된 상상 속 기술을 한번 볼까요? 1990년에 개봉했던 영화 '백 투 더 퓨처2'는 1985년을 사는 주인공이 2015년으로 시간 여행을 가는 내용입니다. 지난 2015년에는 25년 전 영화 속에서 상상했던 기술들이





얼마나 현실이 되었는지 전 세계 언론들이 앞다투어 보도를 했습니다. 영화 속 비디오 글래스는 2013년 구글 글래스로, 화상통화 TV는 2008년 스마트 TV로, 지문 인식 자물쇠는 한국의 경우 2006년 이후 거의 의무적으로 설치되었고, 날아다니는 카메라는 2010년 헬리캠이 선보이면서 2015년부터 급격하게 성장해 왔습니다. 영화 속 제품들이 20~30년 후 모두 제품화가 된 것입니다.

이렇게 30년 전에 상상했던, 신기하게만 생각했던 기술들이, 지금은 오히려 없으면 안 되는 제품으로 우리 주위에서 쉽게 찾아볼 수 있게 되었습니다. 반면에 이 영화의 가장 중요한 기술인 타임머신은 아직도 요원한 기술입니다. 이렇게 여전히 상상의 기술로만 남아 있는 영화 속 기술이 있는데요. '여러 기술들' 중 디스플레이 기술에 한정해서 한번 살펴봅시다 그 첫 번째는 형태가 변 디스플레이입니다. 휘고, 접고, 말 수 있는 물성을 넘어서 쪽 늘어 나는 특성으로 인해 형태를 마음대로 변형할 수 있는 디스플레이입니다. 영화 속 장면처럼 피부 일체형으로 디스플레이나 웨어러블 기기를 만들려면, 피부에 착 붙어서 형태가 함께 자유로이 변화하는 기술이 필요합니다. 바로 스트레처블 디스플레이 기술이 핵심입니다. 현재 상용화된 제품으로 여러분들이 사용하는 디스플레이는 1축 자유도를 가지는 기술인데요, 영화 속 기술이 현실화되려면, 다축자유도를 갖는 스트레처블 디스플레이 기술이 개발되어야 합니다. 아직 연구 개발 단계이기는 하지만 디스플레이의 응용 분야를 확장하는 핵심 요소 기술이라고 할 수 있습니다. 스트레처블 디스플레이는 쪽 늘어서 어떠한 표면에도 붙일 수 있어, 공간적인 한계를 벗어나 현실 속 어느 곳

에나 디스플레이를 구현할 수 있다는 점에서 경계를 없애는 기술이라고 할 수 있습니다. 그럼 현재의 기술 수준을 잠시 한번 볼까요?

여러 다양한 분야에서 새로운 아이디어를 제시하고 검증하면서 상용화를 위한 연구 개발이 활발히 되고 있습니다. 2010년대 개봉한 영화에서 볼 수 있는 상상의 기술이니 SDF에서 존 언더코플러가 언급했던 패션 의류, 신체부착형 컨셉 제품이 대한민국의 기술로 구현되고 있습니다. 이러한 영화 속 상상의 기술은 2030년 이후에는 우리 곁에 와 있지 않을까요? 상상의 기술로만 남아 있는 영화 속 기술 그 두 번째는 공간 디스플레이입니다. 실제로 아무것도 없는 공간에 영상을 표시하는 기술입니다. 같은 공간에 있지 않지만 가상의 영상을 띄워, 서로 대화하고 회의를 진행하거나 UX/UI 기능을 탑재한 공간 디스플레이를 이용해 제품을 설계하고 필요한 정보를 얻는 모습이 영화에는 단골손님처럼 등장합니다. 본 세션의 주제가 바로 공간의 제약이 없어질 뿐만 아니라 시각적으로 현실과의 경계를 허무는, 바로 이 공간 디스플레이입니다. 영화 속 공간 디스플레이는 구현 방식에 따라 원도타입과 볼류메트릭타입으로 나눠 생각해 볼 수 있는데요. 그 동작 원리와 현재의 기술 수준, 그리고 어떻게 기술이 발전해 나갈지 다음 발제자들께서 발표해 주실 겁니다. 원도타입 공간 디스플레이는 투명 유리창이나 평면 디스플레이를 원도로 활용하여 원도를 통해 보이는 영상이 3차원 공간에 존재하는 것처럼 우리가 인식하게 하는 기술입니다. 볼류메트릭 공간 디스플레이는 정말로 아무것도 없는 허공에 3차원 영상을 맺히게 하는 기술로 영화 속 상상의 기술인 진정한 공간 디스플레이 기술입니다.





미래 디스플레이는 어떤 방향으로 발전할 것인가?

김기홍 LG디스플레이 차세대 디스플레이 담당

영상 보러가기

앞서 말씀해 주신 미래 공간 디스플레이 구현을 논의하기 전에 지금까지 3차원 디스플레이가 어떻게 발전했는지에 대해 말씀드리겠습니다. 현재까지는 평판 디스플레이를 이용해서 3차원 영상을 구현했는데, 어떻게 2차원 평면인 디스플레이에서 3차원인 입체감을 느끼게 할 수 있을까요? 그 원리를 이해하기 위해서는 사람이 입체감을 느끼는 요인을 알아야 합니다. 디스플레이에서 표현되는 2차원 영상에서 깊이감을 더해 우리는 입체감을 느끼는데, 인간이 깊이감을 인지하는 가장 큰 요인은 양안시차입니다. 눈앞에 손가락을 들어 한쪽 눈을 번갈아 감아 보세요. 왼쪽 눈과 오른쪽 눈으로 보시는 영상이 다를 것입니다. 이 현상이 양안시차입니다. 왼쪽과 오른쪽 눈에 다른 이미지가 들어오면 우리의 뇌는 이를 합성해서 깊이감을 느끼게 됩니다. 즉 왼쪽 눈과 오른쪽 눈에 다른 영상을 보여줄 수 있다면 우리는 3차원인 입체감을 느낄 수 있습니다. 오른쪽 눈과 왼쪽 눈에 다른 영상을 인가하기 위해 가장 쉽게 접근했던 방식이 안경을 사용하는 것이었습니다. 이전에 출시된 안경 타입 3D TV 및 놀이공원에 안경을 쓰고 3D 영상을 시청하는 것도 모두 이를 이용하여 양안시차를 구현한 3D 디스플레이입니다.



안경을 이용한 3D 디스플레이도 크게 두 가지 FPR이라고 부르는 편광안경 방식과 SG라고 부르는 셔터글라스 방식으로 나누어집니다. 먼저 FPR 방식은 디스플레이 표면에 패턴 리타더라는 특수 필름을 부착하면 디스플레이 위치별로 편광이 다른 좌안 영상과 우안 영상이 출력되게 됩니다. 이를 편광 안경을 사용해서 오른쪽 눈은 우안 영상만 왼쪽 눈은 좌안 영상만 보게 만들면 양안시차를 구현하는 디스플레이를 만들 수 있습니다.

SG 방식은 디스플레이에서 좌안 영상과 우안 영상을 번갈아 출력하고, 이와 동기를 맞추어 좌안 영상이 출력 될 때는 왼쪽 안경에서만 빛을 받아들이고, 우안 영상이 출력될 때는 오른쪽 안경에서만 빛을 받아들여 양안시차를 구현하는 방식입니다. 하지만 안경을 이용한 3D TV 제품은 성공하지 못하고 현재 단종이 되었습니다. 왜 안경 타입 3D TV 제품이 성공을 거두지 못했을까요? 저는 크게 두가지 이유가 있다고 생각합니다.



첫 번째는 안경 착용에 따른 불편함을 들 수 있습니다. 특히 안경을 착용하는 사람들이 3D TV를 시청하기 위해서는 사용하는 안경 위에 3D TV를 시청하기 위한 안경을 착용해야 하는 아주 큰 불편함이 있었습니다.

두 번째는 3D TV로 즐길 수 있는 콘텐츠가 부족했다고 말씀드리고 싶습니다. 3D TV가 유행하던 2010년대 초반에는 3D 콘텐츠를 제작하기 위해서는 특수 카메라를 이용해서 영상을 촬영해야 했기 때문에 제작 비용이 높고, 3D 영상 제작 및 방송 관련 인프라 투자가 거의 일어나지 않아 시청할 수 있는 콘텐츠가 부족했습니다.

최근 연구 동향: LFD

LFD (Light Field Display)

Concept

- 물체에서 발산된 빛 중에서 눈으로 입사된 빛을 이용해서 사물을 인지함
- 특정 위치에서 발산하는 빛을 재현할 수 있으면, 사물이 없더라도 동일하게 인지할 수 있음

Light Field Display



빛의 특성 수학적 표현 방법

$$l(k_x, k_y, k_z, x, y, z)$$
 빛 특성 표현 위치

Light Field 1 = E1
 Light Field 2 = E2
 Light Field 3 = E3
 Light Field 4 = E4

최근에는 라이트 필드라는 개념을 이용해 3D 디스플레이를 만들려는 연구개발이 활발히 진행되고 있습니다. 여기에 사과가 있다고 생각해 봅시다. 광원에서 나온 빛이 사과에 맞고 반사되어 사방으로 흩어집니다. 이 흩어진 빛 중 일부가 우리 눈으로 들어와 우리는 사과를 인지할 수 있습니다. 이제 사과가 있던 위치에 디스플레이를 하나 두고, 디스플레이가 사과가 있을 때와 동일한 빛을 재현할 수 있다면 우리는 사과가 없더라도 이를 동일하게 인지할 수 있습니다. 라이트 필드라는 개념은 한 위치에서 발산하는 빛을 표현할 수 있는 수학적 방법입니다. 한 위치에서 발산하는 빛의 방향과 그 크기 등을 표현할 수 있어서, 이 개념을 이용하면 발산하는 빛을 재현할 수 있습니다. 하지만 디스플레이로 발산하는 모든 빛을 재현하기는 그 양이 너무 많아 불가능합니다. 발산하는 빛 중에서 중요한 건 우리 눈으로 들어오는 것이기 때문에 우리 눈의 위치만 정확히 알 수 있다면, 그 방향으로 진행하는 빛을 재현해서 3D 디스플레이를 구현할 수 있습니다. 라이트 필드 디스플레이에서는 발산하는 빛을 정확하게 재현하는 것이 중요하며, 이를 구현하기 위해 LG 디스플레이는 다음과 같은 핵심기술 연구에 힘을 쏟고 있습니다.

많은 양의 빛을 만들기 위한 고해상도 디스플레이 패널, 패널에서 나온 빛을 제어하기 위한 렌즈 기술, 실시간으로 사람 눈의 위치를 찾을 수 있는 시선 추적 및 그 위치에서 최적의 3D 영상을 보여주기 위한 3D 영상 변환 기술 개발에 자사의 기술과 노하우를 집중하고 있습니다. 그리고 라이트 필드 디스플레이는 우수한 3D 화질과 무안경이라는 장점을 가지고 있지만 한 명만 시청이 가능하다는 단점도 있어, 이를 극복하기 위한 핵심기술 또한 활발히 연구하고 있습니다.



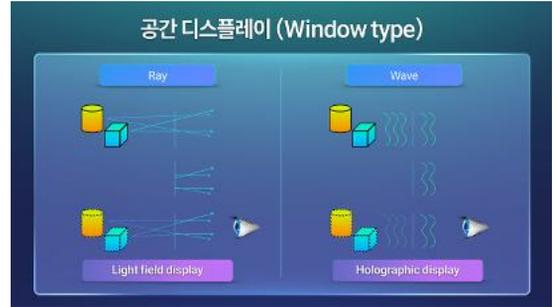
원도 타임과 볼류메트릭 타임 공간 디스플레이

박재형 서울대 전기정보공학부 교수

[영상 보러가기](#)

라이트 필드 디스플레이는 물체에서 오는 광선들의 분포를 재현하여 공간 입체 영상을 만들어 내는 기법입니다. 이보다 미래의 기술로 생각되는 것은 빛의 파동을 재현하여 공간 입체 영상을 만들어 내는 홀로그래픽 디스플레이입니다. 빛의 파동을 재현한다는 것이 생소하게 들리실 수도 있는데요. 어려운 내용은 아닙니다. 빛은 전자기파 즉 전기장과 자기장의 진동입니다. 공간상에 물체점이 하나 있다면 그로부터 전자기파가 이와 같이 모든 방향으로 구면파의 형태로 전파해 나갑니다. 이때 어떤 특정한 면에서 전자기파의 분포를 보면 그 진폭과 위상이 이와 같은 분포를 이루고 있을 것입니다. 물체점이 하나라면 이렇게 깔끔한 분포를 가지고 있을 텐데요.

일반적인 3차원 물체에 대해서는, 물체를 이루는 수많은 점들에서 출발한 구면파들 간의 간섭으로 그 진폭과 위상이 이와 같이 매우 복잡한, 그냥 노이즈처럼 보이는 형태를 띠게 됩니다. 홀로그래픽 디스플레이는 디스플레이 면에서 빛의 진폭과 위상을 이와 같은 모양으로 변조합니다. 그러면 디스플레이 면에서 형성된 빛이 아까의 과정을 거꾸로 겪어 원래 물체가 있던 곳에 홀로



그래픽 공간 영상을 형성하게 됩니다. 일반적인 디스플레이는 표시하고자 하는 물체, 예를 들면 사과를 표시하고 싶으면 사과 영상을 디스플레이 면에 그대로 표시하는데요. 홀로그래픽 디스플레이를 사과로부터 전파된 빛의 복잡한 진폭과 위상 패턴을 디스플레이 면에 표시해서 사과의 공간 영상을 형성한다는 점에서 큰 차이가 있습니다. 아직 디스플레이는 아니지만 홀로그램 인쇄물의 예입니다. 아주 얇은 필름에 기록된 홀로그램인데 보시는 것처럼 공간감 있는 실제 3차원 물체를 매우 사실적으로 표시하고 있습니다. 이러한 화질로 홀로그래픽 디스플레이를 만들 수 있다면 너무 좋을 것 같은데요. 아직은 매우 어려운 일 중의 하나입니다.





그 이유는 디스플레이 패널이 표시해야 하는 진폭/위상 패턴이 너무 조밀하기 때문인데요. 빛의 파장, 그러니까 수백 나노 미터 정도의 픽셀이 있어야 이러한 진폭/위상 패턴을 온전히 표시할 수 있습니다. 하지만 지금 우리의 디스플레이의 픽셀은 가장 작은 것도 그 10배가 넘는 수 마이크로미터 이상의 크기를 가지고 있어 홀로그래픽 공간 영상을 표시하는 것이 쉽지 않습니다. 그럼에도 불구하고 최근 많은 연구의 진전이 이루어지고 있습니다. 왼쪽은 홀로그래픽 디스플레이를 이용하여 구현한 VR 안경형 디스플레이이고요, 오른쪽은 태블릿 형태로 구현한 홀로그래픽 디스플레이입니다. 동영상을 자세히 보시면 카메라의 초점이 변하면서 영상 속의 캐릭터와 배경이 서로 독립적으로 선명해졌다 흐릿해졌다 하는 것을 볼 수 있는데요.

이것이 우리가 지금 보고 있는 영상이 일반 2D 영상이 아니라 3D 공간 영상임을 보여주는 증거입니다. 홀로그래픽 디스플레이의 구현은 여전히 도전적인 과제이긴 하지만, 최근 연구가 빠르게 진행되고 있어서, 조만간 홀로그래픽 디스플레이를 우리가 활용할 수 있는 시대도 올 수 있을 것으로 생각합니다. 지금까지 홀로그래픽 디스플레이에 대해 말씀드렸는데요. 훌륭한 기술이긴 하지만 여전히 한계를 가지고 있습니다. 그것은 영상과 우리 눈 사이에 매개체, 즉 홀로그램 디스플레이면이 존재한다는 것인데요. 영상을 이 디스플레이면을 통해서 보아야만 하기 때문에, 여기서는 홀로그래픽 영상이 보이지만, 여기서는 영상이 이 디스플레이 패널을 벗어나서 홀로그래픽 영상이 보이지 않습니다. 즉, 볼 수 있는 시야각이 제한된다는 것이지요.

하지만 우리가 영화에서 보는 공간 디스플레이는 조금 다릅니다. 블랙 팬서 영화에 나오는 것처럼 손 위의 아무것도 없는 허공에 공간 영상이 떠오르고 이것은 모든 방향에서 사람들이 동시에 볼 수 있습니다. 이런 게 가능하다면 정말 좋을 것 같은데요. 이러한 디스플레이가 실제로 가능할까요? 물론 매우 어려운 일입니다. 그러나 연구자들이 그 해법을 찾기 위해 노력하고 있고 몇 가지 후보 기술들이 있습니다. 허공에 영상을 만들고 모든 각도에서 보이게 하기 위해서는 결국 빛을 산란시키는 산란체나 발광할 수 있는 발광체 입자 즉 voxel(복셀)을 허공에 형성해야 하는데요.

이를 위해 스크린을 위아래로 빠른 속도로 움직이며 그에 맞는 영상을 프로젝션해 주거나, 강한 레이저를 집속하여 공기 중의 분자를 플라즈마 상태로 만들어 발광시키거나, 역시 강한 레이저로 작은 입자를 잡아 움직이거나, 아니면 빛 대신 음파를 이용하여 입자를 잡아 움직이거나 하는 방법들이 시도되고 있습니다. 아직 너무 강한 레이저를 필요로 하거나 만들어 낼 수 있는 영상의 해상도가 너무 낮거나 하는 등의 여러 문제가 있어 매우 초기의 연구 단계이긴 하지만, 이러한 후보 기술들이 더욱 발전하여 미래에는 정말 영화에서 보는 것과 같은 공간 영상을 볼 수 있을지도 모르겠습니다. 개인적으로는 그런 시대가 빨리 오길 고대하고 있고 그를 위해 저도 미력하지만 열심히 연구하고 있습니다.





우리 앞에 펼쳐질 공간 디스플레이의 미래

홍종호 삼성디스플레이 연구소 마스터

[영상 보러가기](#)

Q

궁극적으로 현실과 화면의 경계를 허물려면 어떤 기술 수준이 필요한지? 언제 실현될지?



초실감 디스플레이

- 초고해상도 패널
- 정밀 광학 기술
- 사실적인 색감 표현



초고성능 컴퓨팅

- 대용량 이미지 실시간 처리
- 고대역폭 인터페이스
- 공간 컴퓨팅



초광대역 통신

- 초고속 데이터 전송
- 데이터 압축
- 저지연 기술

저는 공간 디스플레이가 어떻게 우리의 미래를 바꿔갈지 얘기해보려 합니다. 디스플레이는 지금까지 우리와 세상을 연결해주는 창문 같은 존재였습니다. 우리는 늘 두 눈으로 평면화면을 바라보며 세상과 소통해 왔습니다. 하지만 머지않아 공간 디스플레이가 본격적으로 상용화되면, 이제는 화면 안으로 직접 들어갈 수가 있습니다. 그리고 반대로 가상의 물체가 우리 현실 속으로 튀어나오는 경험도 가능해집니다. 다시 말해서, 시간과 공간의 경계를 넘어 어디에서든 존재할 수도 있고요, 경험을 있는 그대로 전달하는 새로운 소통 방식이 열리게 될 겁니다. 즉 공간 디스플레이는 단순한 기술이 아니라, 우리 삶의 방식 자체를 바꾸는 커다란 변화입니다. 어떻게 바뀔지 몇 가지 예를 들어 볼까요? 거실에서 가상 회의실로 이동해서 동료들과 회의를 하거나, 멀리 떨어진 가족이나 좋아하는 연예인을 눈앞에서 만나는 것처럼 느낄 수도 있습니다. 스포츠 경기도 더 이상 평면 TV로 보는게 아닙니다. 경기장 맨 앞에 앉은 듯한 몰입감으로 즐기게 되죠. 태양계를 입체적으로 보면서 공부하고, 테이블 위에 실제 지형을 구현할 수도 있을 겁니다.

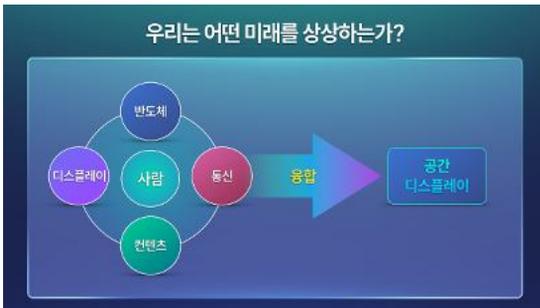
이런 이야기가 아직 멀게 느껴질 수도 있지만, 사실 일부 기술은 이미 우리 가까이에 와 있습니다. 대표적으로 앞의 발표에서 말씀드린 라이트 필드 디스플레이 (LFD: Light-Field Display), 즉 LFD 기술이 먼저 상용화되고 있는데요 삼성전자에서는 최근에 안경 없이도 입체 영상과 게임을 즐길 수 있는 3D 모니터를 출시했고요, 해외 업체들도 LFD를 점차 사업화하고 있습니다. 저희 삼성디스플레이도 LFD에 있어서 최고 수준의 3D 화질과 기술력을 보유하고 있고 미래 공간 디스플레이 기술에 대해서도 다양한 기초 연구를 수행하고 있습니다. 물론, 공간 디스플레이가 완전히 일상이 되려면 넘어야 할 벽도 많습니다.

첫 번째는 초실감 디스플레이입니다. 수많은 시점을 동시에 보여줘야 하고, 빛을 정교하게 제어해야 하기 때문에 지금보다 훨씬 높은 해상도와 정밀한 광학 기술이 필요합니다. 두 번째는 초고성능 컴퓨팅입니다. 초실감 콘텐츠는 데이터량이 어마어마하게 많아서, 이걸 실시간으로 계산하고 전송하려면 엄청난 성능의 메모리와 연산 성능이 필수입니다. 기술적으로 아직 쉽지 않겠지만, 뉴로모픽 반도체 등의 신기술을 통해 돌파구가 열릴 것으로 기대하고 있습니다.



니다. 무엇보다 이 모든 중심에는 사람이 있습니다. 앞으로는 기술을 이해하고, 제대로 활용해서 융합할 수 있는 인재가 더 많이 필요해질 것이고요 여기 계신 여러분도 관심을 많이 가져 주신다면, 우리의 상상을 현실로 만드는 미래가 더 빨리 다가올 것이라고 기대합니다.

마지막으로는 초광대역 통신입니다. 아직은 우리가 통신 대역폭을 충분히 활용하지 못하고 있지만 2030년 이후에 6세대 이동통신 시대가 열리면 공간 디스플레이에 필요한 정보량을 충분히 수용할 수 있을 것으로 예상합니다. 기술이 아무리 좋아도, 결국 중요한 건 콘텐츠입니다. 우리가 경험하고 싶은 입체 콘텐츠가 얼마나 다양하게 존재하느냐가 핵심이죠. 과거엔 3D 콘텐츠를 제작하려면 시점 수와 동일한 수량의 카메라가 필요했지만, 앞으로는 AI 덕분에 이런 카메라 없이도 누구나 쉽게 입체 콘텐츠를 만들 수 있게 됩니다. 예를 들어, 내가 몇가지 키워드만 주면 AI가 알아서 3D 공간을 만들어주고, 사진 몇 장만 올려도 입체 영상으로 재구성되는 시대가 가까이에 와있습니다.



그러면 우리는 앞으로 어떤 준비를 해야 할까요? 공간 디스플레이는 단순한 기술을 넘어, 디스플레이/반도체/통신/콘텐츠가 함께 어우러진 융합 기술의 결정체이고 각 분야가 함께 발전하고 협력해야 완성할 수 있습니다. 우리나라의 디스플레이와 반도체 산업은 글로벌 시장에서 이미 큰 성과를 거두었지만 경쟁은 날로 치열해지고 있습니다. 지속적인 투자와 지원이 있어야 경쟁에서 살아남을 수 있고, AI 기술력 강화 역시 매우 중요함



SESSION 3. 패널 토크 현실과 화면의 경계를 허문 디스플레이

영상 보러가기



홍용택
서울대 전기정보공학부 교수

김기홍
LG디스플레이 차세대 디스플레이 담당

박재형
서울대 전기정보공학부 교수

홍종호
삼성디스플레이 연구소 마스터

● 김소원 아나운서

그 어느 세션보다 제가 공대를 나왔더라면 얼마나 좋았을까 훨씬 더 알아듣기 쉬웠을 텐데 이런 생각을 강하게 하면서 열심히 경청을 했습니다. 영화 속에서처럼 말이죠. 정말로 공간과 화면의 경계가 사라지는 세상이 펼쳐진다면 우리 삶에서 가장 크게 달라질 변화는 무엇이라고 생각하시는지요. 그리고 어떻게 활용될 거라고 생각하시는지요. 자유롭게 말씀해 주시면 될 것 같습니다.

● 홍종호

가장 큰 변화는 매체가 보는 거에서 경험하는 매체로 바뀌는 거라고 생각을 합니다. 보는 매체는 텔레비전에서 시작이 됐잖아요. 텔레비전이라는 용어는 '텔레'가 '멀리'고, '비전'이 '보다'입니다. 공간 디스플레이가 나오면서는 텔레프레젠텐스라는 용어가 많이 사용이 되고 있습니다. 텔레프레젠텐스는 멀리 있는 사람을 가까이 있는 것처럼 재현을 시키고, 이 사람과 직접적으로 소통을 하는 건데요. 이런 경험이 자기 자신이 어디 가지 않더라도, 예를 들어서 우리가 여행을 가거나 회사를 가거나, 학교에 가거나 하는 여러 가는 행동들이 있는데 그것들이 가는 게 아니라 나한테 다가오는 이런 경험으로 바뀔 거라고 생각합니다. 이게 여러 가지 산업에도 영향을 미칠 텐데요. 예를 들어 방송이나 광고 교육이나 의료 여러 가지가 있을 겁니다. 예전에는 좀 일방향으로 어떤 이런 인터랙션이 진행이 됐지만 공간 디스플레이가 좀 더 본격화되면 서로 상호 작용하는 방향으로 좀 발전이 될 거라고 생각을 합니다.

● 홍용택

아까 교육 말씀을 주셨는데요. 인트로 영상에서 영화 속 장면들을 보셨듯이 예전에는 2D에서의 매뉴얼을 통해서 제품의 설계는 3D로 이렇게 했습니다. 만약 공간 디스플레이가 상용화된다면 제가 만들고자 하는 제품의 3차원 영상이 공간에 투영이 되고, 거기에서 필요한

부분들을 교체를 하거나 나의 손 사이즈나 다리 사이즈에 맞게 마음대로 조절을 할 수 있습니다. 그런 면에서 제품 설계 또는 현장에서의 교육에서 디스플레이를 통한 경험을 느낄 수 있을 거라고 생각이 듭니다.

● 김소원 아나운서

15년 전에 저희가 SDF에서 '아바타'의 감독 제임스 카머런 감독을 모셔서 이런저런 얘기를 들었었거든요. 그 때 3D의 세상이 올 것이다 이야기를 하셨어요. 그런데 연사분들께서도 말씀해 주셨지만 그런 세상은 오지 않았습니다. 시간이 많이 지나고 기술도 많이 축적이 됐고 AI 기술까지 나왔잖아요. 그렇다면 새로운 디스플레이의 세상이 확실히 더 빨리 올 수 있는 건지 궁금해지거든요. 어떻게 생각하시는지요?

● 김기홍

'아바타'가 나왔던 2009년 대비 생성형 AI라든지 컴퓨터 그래픽 툴을 이용해서 3D 영상을 만들기는 굉장히 쉬워졌습니다. 일반인들도 하지만 이렇게 3D 영상이 만들어지기 쉽다고 해서 볼 만한 콘텐츠가 많으냐는 거는 아닌 것 같습니다. 또 하나의 문제는 아직 이 만들어진 콘텐츠를 어떻게 공유를 할 거냐 하는 부분에 대해서는 전혀 발전이 이루어지지 않은 것 같습니다. 그때 대비 방송 인프라라든지 그 시그널 포맷이라든지, 방송 표준이라든지 이런 것들이 정비가 안 됐기 때문이에요. 제 생각에는 그런 것들도 같이 기술 개발이 되어야만 이 시장이 열리지 않을까 싶습니다.

● 김소원 아나운서

새로운 공간 디스플레이가 개발이 된다 하더라도 협력해서 나아갈 수 있는 산업적 기반이 필요하다는 그런 말씀이신 것 같습니다. 공간 디스플레이가 상용화된다면, 그런 꿈같은 세상이 펼쳐진다면 우리 삶에 유익한 점도 말씀하셨듯이 많겠지만 사회적인 이슈나 우려해야 할 지점도 있지 않을까 미리 좀 대비를 해야 되지 않

을까요? 어떻게 생각하시는지 의견을 듣고 싶습니다.

● 박재형

먼저 생각할 수 있는 건 뭐 안전상의 이슈 그런 것을 생각할 수도 있을 것 같습니다. 최근 실용화까지 사람들이 많이 생각하고 있는 것은 길을 지나갈 때 벽에서 영상이 튀어나와서 우리가 걷고 있는 공간 속에서 영상을 보게 되고, 그것을 광고나 전시 같은 데 사용하게 되는 것입니다. 기존에는 영상이라고 하는 것이 디스플레이의 물리적인 틀 안에서만 있었기 때문에 영상이 있는 곳과 우리가 사는 현실 세계를 명확하게 구분할 수 있었습니다. 공간 영상이 되면 영상이 그 프레임을 벗어나서 우리가 살고 있는 현실 세계 안에 실제 물체처럼 들어오는 것입니다. 사람들이 일상생활을 할 때 이게 실제 물체일지 아니면 영상일지 하는 것을 혼동스럽게 하는 경우가 많이 있을 수 있습니다. 예를 들어 운전을 하고 있다가 길을 걷고 있을 때 안전상의 요소로 다가올 수도 있을 것 같습니다.

● 김소원 아나운서

아이러니네요. 디스플레이가 현실감이 있을수록 안전상의 문제는 뒤따라 올 수 있다는 게. 그렇군요.

● 김기홍

생각해야 할 부분이 어쨌든 가상의 3차원 영상을 우리가 눈으로 보기 때문에 이런 이미지들이 우리의 건강에 어떤 영향을 미칠지에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았습니다. 기존 3D 디스플레이를 보신 분들은 아시겠지만 뭔가 좀 이상하다는 느낌을 좀 강하게 받으실 겁니다. 눈의 피로도 당연히 있고요. 어지럼증을 느끼는 분들도 있습니다. 이런 3차원 공간 디스플레이 영상이 우리에게 어떤 영향을 미치는지에 대한 연구가 좀 먼저 선행이 돼야 할 것 같고요. 그에 따라서 안전 규제라든지 디스플레이 개발 방향에 대해서도 좀 가이드가 필요할 걸로 보입니다.

● 김소원 아나운서

현장에서 많은 분들이 지금 질문을 보내주시고 계시거든요. 다 연결이 되는 질문들입니다. 공간 디스플레이가 실내에서만 가능하다는 공간적인 한계가 존재하는 것 같습니다. 만약 야외에서도 공간 디스플레이가 실현될 수 있다면 키 포인트는 어디에 있을까요?

● 박재형

공간 디스플레이가 굳이 실내에서만 가능한 것은 아니고 그렇습니다. 실외에서도 우리가 구현할 수 있습니다. 길을 걸을 때 영상이 이렇게 튀어나오는 거 그걸 말씀드린 적이 있는데요. 벽 속에 영상을 표시할 수 있는 디스플레이 장치가 있고, 그다음에 이 영상을 이쪽 사람이 걷는 허공으로 프로젝션 해 줄 수 있는 광학계가 현재도 있습니다. 그것을 이용한 광고도 일본에서는 지금 진행되고 있기도 합니다. 그래서 실외에서도 공간 디스플레이를 만들 수도 있고요. 혹은 제가 뭐 발표한 내용 중에 마지막에 보면 레이저를 강하게 집속해서 공기 중에 분자를 이렇게 발광시키는 디스플레이를 말씀드리기도 했습니다. 그것은 실험실 안에서 이렇게 가능하기도 하지만 그것을 높은 건물의 옥상에 하늘을 바라보도록 레이저를 집속해서 실현할 수도 있습니다. 우리가 지금은 야외 옥외광고판이 빌딩 위쪽에 벽에 디스플레이를 붙여서 만드는데 거기에 빌딩의 위쪽에 허공에 영상이 이렇게 떠서 돌아가는 식으로, 그래서 모든 방향에서 볼 수 있게 그런 형태로도 구현할 수 있을 것으로 희망적인 사람들은 예상을 하고 있기도 합니다.

● 김소원 아나운서

지금 제 머릿속에 공상과학 영화 SF영화 한 장면들이 스쳐 지나갔습니다. 공간 디스플레이 관련 영화에서 단골로 많이 나오는 소재가 가상현실 게임인 것 같습니다. 아마도 여기 박사님들과 보셨을 것 같은데 2018년도에 나온 '레디 플레이어 원' 같이 가상 현실 이미지를 보는 것뿐만이 아니라 직접 만지고 느끼고 상호작용하

는 시대가 올 수 있을지 궁금하고요. 그에 필요한 기술이 있다면 어떤 것들이 있어 지도 궁금합니다.

● **홍용택**

그거를 보통 인터랙션이라고 얘기를 할 수 있는데요. 디스플레이는 시각적으로 현실감 있는 이미지를 만들어 내게 되는 거고요. 만약에 제가 가상 현실에서 볼 속에 뛰어 들었다고 하면 몸이 뜨거워져야 됩니다. 이를 위해 어쩔 수 없이 우리가 착용형 센서나 또는 액추에이터나 또는 열을 내는 장치들을 몸에 착용하고 있고 보통 게임에 많이 현재는 활용이 되고 있습니다. 게임 슈트가 나와 있는데 가상 현실에서 제가 만약에 누군가에게 한 대 맞았을 때 타격감을 센서가 또는 액추에이터가 몸에 전달합니다. 그런 형태로 해서 시각과 다양한 촉각 또는 다른 미각이든지 여러 가지 감각을 한꺼번에 사람에게 현장감을 줄 수 있게 하는 기술들이 계속 발전해 나가고 있습니다. 가까운 미래에 되지 않을까 생각이 듭니다.

● **김소원 아나운서**

기대해 주셔도 될 것 같습니다. 상당히 창의적인 질문이라고 생각이 드는데요. 혹시 시각적으로 보는 공간 디스플레이가 아니라 뇌신경 신호 등만으로 시각적이 아닌 체험 디스플레이가 가능할까요, 라는 질문을 하오셨습니다.

● **홍용택**

뇌내 현실을 우리가 그랜드 퀘스트에서 얘기를 같이 했었거든요. 돌을 접목하면 상당히 좋겠다. 제가 기억하기로 미국 의학 드라마에서 어떤 한 환자가 마지막 순간에 딸을 보고 싶는데 딸을 볼 수가 없는 거죠. 식물인간 상태였기 때문에 그때 뇌에 프로브(probe)를 넣어서 그 사람의 시신경에 딸의 영상이 보이게 하고, 마지막으로 눈물을 흘리면서 사망을 하는 장면들이 있습니다. 만약에 뇌 프로브가 발전을 하고, 뇌의 어떤 부분에

어떤 시그널을 줘서 아까 보셨던 뇌내 현실처럼 그런 감각을 준다면은 저희와 경쟁하는 기술이 될 수 있겠습니다. 뇌내 현실의 공간 디스플레이가 되면 실제 우리 디스플레이는 필요가 없이 머리에 이렇게 뭔가 하나를 끼고 살면 모든 게 해결이 됩니다. 약간 끔찍하긴 하죠. 그거는 뭐 한 100년 아니면 50년 이후가 되지 않을까 생각합니다.

● **박재형**

약간 더 부가 설명 드리면 실제로 개발되고 있습니다. 몇 가지 단계가 있는데요. 첫 번째는 망막이 안 좋은 사람들에게 인공 망막을 넣어서 시신경을 직접 전기적으로 자극해서 뭔가를 보고 있는 것처럼 하는 것은 이미 상용화되었습니다. 실제 눈이 안 좋은 장애인분들한테 적용이 돼서 시술되고 있습니다. 두 번째는 시신경이 작동이 안 되는 사람한테 직접 뇌에 자극을 주어서 뭔가 보는 것처럼 만드는 것. 그것도 지금 연구 개발되고 있고요. 최근에 본 실험 결과는 높은 해상도로 영상을 보게 만드는 건 당연히 아직 안 되는데, 여기까지는 밝고 여기서부터는 어둡고 그런 경계 정도를 알아볼 수 있게 하는 거는 지금 사람을 대상으로 실험이 되고 있습니다.

● **김소원 아나운서**

시각장애인들 같은 경우는 너무나 간절한 그런 기술이 아닐까 싶은데 이런 기술을 말씀드리는 순간 LG와 삼성에서 오신 관계자분들께서는 표정이 약간 어두워지는 것 같은 그런 느낌이 들었습니다.(웃음) 다음 질문으로 넘어가겠습니다. 공간 디스플레이가 개발되고 확산이 된다면 기존 디스플레이 산업의 가치 사슬이 어떻게 변할지 여쭙보고 싶습니다. 새로운 기술이 도입되거나 기존 가치 사슬 영역 중에 없어지는 영역이 생길까요라고 물어 오셨습니다. 상당히 구체적인 질문을 해 오신 것 같은데요.

● 김기홍

제 생각은 뭐 크게 바뀔 건 없을 것 같습니다. 지금 디스플레이의 확장이지 않을까 싶고요. 박 교수님이 말씀해 주셨던 궁극적인 디스플레이 기술이 개발이 된다면 뭔가 새로운 가치 사슬이나 이런 것들이 만들어질지 모르겠습니다. 지금 현재의 기술로 달성할 수 있는 3D 디스플레이가 기존의 산업 구조와 크게 다르지는 않을 것 같습니다.

● 김소원 아나운서

각각 산업계에서는 어떤 방식의 미래 공간 디스플레이에 관심을 갖고 계신지도 궁금해집니다. 말씀해 주실 수 있을까요?

● 홍용택

저희 삼성에서도 아까 가치 사슬 얘기도 하셨지만 기술적인 제약에 어떤 구애받지 않고 여러 가지를 하고 있습니다. 그래서 아까 말씀드린 LFD(Light Field Display)나 AR, VR 홀로그램 다양한 기술을 시도하고 있고요. 어떤 기술로 하나보다, 전체 생태계 구축이 더 중요하거든요. 공간 디스플레이를 실내에서도 사용할 수도 있고, 실외에서도 사용할 수도 있고, 각각의 그 사용 사용 케이스에 따라서 애플리케이션은 아주 다양할 겁니다. 안경 형태가 되든, 실외의 형태가 되든지. 그래서 그런 고민보다는 전체적으로 로드맵을 좀 고민을 하면서, 디스플레이만 가지고 되는 기술은 아니기 때문에 다른 업계랑 어떻게 같이 보조를 맞추고 협력해서 제대로 된 생태계를 좀 쓸 만한 생태계를 만들어 갈 것인가에 대한 고민이 필요한 부분인 것 같습니다.

● 김소원 아나운서

오늘 이 네 분의 연사분을 모시고 우리가 집중해야 되는 분야가 바로 기술 주권 확보라는 키워드가 아닐까 싶습니다. 사실 한국의 디스플레이 기술하면 세계 최고라고 저희가 알고 있었었습니다. 최근에는 중국에 많이

따라잡히는 것이 아닌가, 미래 기술 역시 따라 잡히는 게 아닌가, 이런 우려의 목소리가 나오고 있는 것이 사실입니다. 대한민국 기술 주권으로 이 공간 디스플레이 관련한 기술을 키워나가기 위해서 어떤 것들이 필요하다고 생각하시는지. 네 분 모두에게 공통 질문을 드려 보도록 하겠습니다.

● 김기홍

공간 디스플레이 분위기가 2010년 하고 아주 유사하다고 좀 생각이 듭니다. 2009년에 영화 '아바타'가 나오면서 2010년에 3D의 광풍이 한번 분 적이 있습니다. 그러면서 3D TV도 많이 개발이 됐고요. 디스플레이 기술이 먼저 이끌어 나가면서 제반 사항이 따라왔어야 했습니다만, 콘텐츠 제작부터 방송 관련 인프라든지 이런 것들은 기술 개발이 이루어지지 않았습니다. 그러다 보니까 시장이 없어졌는데요. 지금도 비슷한 것 같습니다. 라이트 필드라는 개념의 디스플레이가 시장에 풀리고 있습니다. 나머지 기술들을 봤을 때는 10년 전하고 달라진 게 하나도 없는 것 같거든요. 그러면 지금도 똑같은 것 같습니다. 디스플레이 기술이 이런 공간 디스플레이 시장을 열고는 있는데 제반 기술이 못 따라와서 다시 이 시장은 물밑으로 가라앉을 수도 있을 것 같거든요. 그래서 생태계 구축이 굉장히 중요한 것 같습니다. 단순히 디스플레이뿐만 아니고 콘텐츠 제작, 이것 어떻게 공유를 할 거냐, 공간 디스플레이를 어떻게 잘 활용할 거냐 하는 사용 단계까지 말이죠. 각 분야의 전문가들이 모여서 이런 목표를 좀 정하고 그리고 이 생태계를 구축하는 게 중요한 시점인 것 같습니다.

● 홍용택

오늘 기술 주권 경제 안보 이런 얘기를 많이 하셨는데요. 디스플레이는 세계적으로 중국과 한국 밖에 없는 상황이고요. 중국의 강한 추격이 두렵긴 하지만 한국은 전 세계 안보를 위해서 디스플레이 기술의 격차를 벌리

고 미래 기술을 개발해야 하는 사명감이 있습니다. 전 세계 만약에 제품이 전부 한 나라에서만 만들어지는 제품으로 바뀌면 국방 과학 사회 모든 전반에서 상당히 큰 문제를 야기할 수 있기 때문입니다. 공간 디스플레이 포함해서 학교에서는 고급 인재를 계속 양성을 해서 학생들이 사명감을 가지고, 우리 디스플레이 산업과 기술을 계속 세계를 이끌어 나갈 수 있도록 열심히 노력을 해야겠다는 생각이 듭니다.

● 박재형

기술 주권을 키워 나가기 위해서는 제 생각엔 우리나라에서 연구 개발이 활발하게 일어나야 합니다. 그러려면 사용 시나리오, 즉 우리가 킬러 애플리케이션이라고 하는 게 명확히 정의가 되어야 할 것 같습니다. 공간 디스플레이가 신기하기 때문에 입체로 보면 재밌잖아라고 얘기를 하지만 그것만으로는 모든 사람들이 그것에 집중하기는 어려울 것 같습니다. 공간 디스플레이를 응용한 것들을 찾아야 될 것 같은데요. 제 개인적으로는 안전이나 생활의 편의에 연관된 것이 중요할 것 같습니다. 예를 들면 노안을 위한 디스플레이, 나이가 들었을 때 안경 대신 바로 선명하게 볼 수 있는 디스플레이 혹은 자동차 헤드업 디스플레이처럼 뭔가 3D가 되면 정확하게 안전을 더 향상시킬 수 있는 응용들입니다. 우리의 생활에 정확하게 향상을 가져다 주는 그런 응용에 보다 집중해서 키워 나가면 생태계도 자연스럽게 따라올 수 있지 않을까 생각합니다.

● 홍종호

저도 홍용택 교수님과 같은 말씀을 드리고 싶습니다. 이미 LCD(액정 디스플레이-Liquid Crystal Display)는 사실 중국에서 거의 생산을 많이 합니다. 올레드는 아직 우리가 좀 1,2위지만 중국이 많이 따라오고 있는 상황이고요. 중국이 이렇게 잘 할 수 있는 건 정부에서 보조금을 많이 주고, 세제 혜택도 많이 주는 부분들이 있습니다. 최근에 전시회나 학회를 가보면 걱정되는 부

분이 있습니다. 중국에 있는 업체들은 좀 더 신기술에 대해서 자유롭게 좀 도전을 합니다. 지원이 있기 때문에 리스크가 적은 느낌입니다. 반면에 LG에서도 비슷하게 느끼시겠지만, 저희는 신기술을 도전이 실패했을 때 어떤 결과를 아웃이 좀 받아들이면서 해야 되기 때문에 더 신중하게 접근할 수밖에 없거든요. 그래서 많은 기술을 다 한 번에 할 수는 없습니다. 공간 디스플레이 포함해서 좀 다양하게 할 수 있는 지원들이 좀 더 있으면 좋을 거라고 생각합니다.

● 김소원 아나운서

기업과 정부 차원의 공조 협조가 더욱 필요하지 않을까라는 생각을 다시 한 번 해보게 됩니다. 네 분 말씀 너무 잘 들었습니다. 좀 어려웠지만 정말 흥미로웠습니다.



SBS 문화재단

그랜드퀘스트 프라이즈 시상식

SBS X 그랜드 퀘스트

첨단 기술로 여는 대한민국 기술주권의 미래

KAIST 박수형 교수·서울대 서상우 교수 선정

감염병·기후위기 대응 연구에 총 2억 원 연구비 지원



‘SBS문화재단 그랜드 퀘스트 프라이즈’는 우리나라가 과학기술분야의 기술주권을 확보하기 위해 제정한 상으로, ‘SBS D포럼 2023’에서 진행된 공동연구에서 서울대 국가미래전략원이 제시한 과학기술 분야의 난제 해결에 더 많은 석학들이 관심을 가질 수 있는 환경을 제공하기 위해 제정됐습니다. SBS문화재단과 서울대는 지난해부터 중장기적 과학기술 난제를 연구하는 신진과학자를 2명씩 선정해 시상하고, 총 2억 원의 연구비를 지원하고 있습니다.

올해 ‘SBS 문화재단 그랜드 퀘스트 프라이즈’에서는 감염병과 기후위기에 맞서기 위한 중장기적 연구를 진행하는 박수형 KAIST 의과학대학원 교수와 서상우 서울대 화학생물공학부 교수가 수상자로 선정되었습니다.



박수형 교수는 신·변종 바이러스 감염에 대한 방어면역 특성 규명, 그리고 백신 및 치료제 개발, 감염병, 암, 자가면역질환 등 면역질환에서 병리 기전과 치료 전략을 연구하고 있습니다. 이번 그랜드 퀘스트에서는 아직 출현하지 않은 신종바이러스에 대한 선제적 대응이라는 인류 보건 분야의 근본적 패러다임 전환 과제를 제시했다는 평가를 받았습니다. 기존의 예측 및 백신 기술이 가진 한계를 극복하고, 항체 기반과 T세포 기반 면역 반응을 통합한 범용 백신 가능성을 탐색했다는 점은 신·변종 바이러스에 대한 대응 기술력을 입증했다는 분석입니다.



서상우 교수의 연구분야는 '미생물 합성 생물학'으로, 산업 균주 개발에 응용될 수 있는 다양한 합성생물학 기반의 균주 개량기술과 산업균주의 게놈 수준 네트워크 분석을 위한 시스템 생물학 분석 기술을 개발하고 있습니다. 이 연구 기술을 바탕으로 의약품, 고부가 기능성 화학물질, 바이오연료, 바이오화합물 등의 생산에 이용할 수 있는 인공세포공장을 개발하고, 향후 헬스케어 산업에 응용할 수 있을 것으로 기대됩니다. 특히 제안한 그랜드 퀘스트가 기후위기 및 환경문제라는 인류 공동의 난제에 대응하여 재생가능 자원을 기반으로 산업구조 전환을 모색하는 패러다임 전환형 질문으로, 도전성과 파급력, 지속가능성을 두루 갖췄다고 심사위원 들은 전했습니다.

SBS문화재단과 서울대 국가미래전략원은 4월 17일 '그랜드 퀘스트 프라이즈' 수상자 선정 위원회를 개최하고, '그랜드 퀘스트' 21명의 학계 연구자 가운데 연구 주제의 도전성, 경제·산업·사회적 파급효과, 신진학자로서의 성장 가능성 등을 고려하여 2명의 수상자를 선정했다고 밝혔습니다. 선정위원회 위원장은 김도연 전 교육과학기술부 장관이 맡았으며 위원으로 강원택 서울대 국가미래전략원 원장, 윤의준 한국공학한림원 회장, 노정혜 전 한국연구재단 이사장, 권오남 여성과학기술단체 총연합회 회장, 현택환 서울대학교 석좌교수, 이종수 서울대학교 연구처장, 이정동 서울대 국가미래전략원 과학과 기술의 미래 클러스터장이 함께 했습니다.

한편 <SBS 문화재단 그랜드 퀘스트 프라이즈> 첫 해였던 지난해에서는 초미세-초저전력 반도체를 연구하는 김상범 서울대 재료공학부 교수와 인공지능기반 항체 설계를 연구하는 백민경 서울대 생명과학부 교수가 수상자로 선정된 바 있습니다. 특히 백민경 교수는 2024년 노벨화학상 수상자 3명 중 1명인 데이비드 베이커 미국 워싱턴대 교수의 노벨상 수상을 이끈 핵심 연구인 단백질 구조 예측 분야에서 혁신적인 성과를 가져온 인공지능 모델을 국제학술지 '사이언스'에 발표했을 때, 제1저자(해당논문에 가장 기여를 한 사람)로 등재돼 있어 베이커 교수의 노벨화학상 수상 이후 국내에서도 큰 화제가 되기도 했습니다.





SESSION 4. 미생물 세포공장

온실가스로 플라스틱을 만든다?



온실가스로부터 플라스틱을 경제적으로 만들 수 있을까?

이상엽 KAIST 생명화학공학과 특훈교수

영상 보러가기

우리는 심각한 기후위기를 경험하고 있습니다. 지구촌 여기저기 폭염, 혹한, 홍수, 산불 등 기후와 연관된 여러 문제들이 발생하고 있습니다. 이 기후위기의 주요 원인 중 하나는 땅속에 잘 있던 탄화수소로 이루어진 원유와 천연가스, 그리고 석탄을 마구 꺼내서 태우거나 제품으로 만들어 사용 후 폐기되어, 온실가스라고 부르는 이산화탄소와 메탄으로 바뀌어 대기 중으로 많이 올라갔기 때문입니다. 인류는 화석원료로부터 석유화학공정을 통해 가솔린/디젤과 같은 연료, 다양한 화학물질들, 그리고 오늘의 주재인 플라스틱에 이르기까지 우리 인류를 풍요롭게 하는 다양한 물질들을 생산 사용해 왔습니다. 석유화학공업이 없었다면 우리 인류가 이렇게 잘 살고 있지 못할 것입니다. 그런데 이 과정에서 너무나도 많은 온실가스가 배출되었고, 화석원료는 언젠가는 고갈되어 없어질 것이라는 문제도 있습니다. 플라스틱은 그릇과 용기, 폴리에스터, 나일론, 스판덱스 등으로 만든 다양한 옷들, 다양한 전자제품과 자동차 부품들, 그리고 강철보다 강한 엔지니어링 플라스틱 등 우리 생활 모든 곳에 쓰이고 있다고 해도 과언이 아닙니다.



올 한 해만해도 전 세계적으로 약 4억5천만 톤의 플라스틱이 생산되며, 제가 계산으로 예측해 본 숫자로는 인류가 이제까지 약 137억 톤의 플라스틱을 생산하였습니다. 이는 사람 몸무게를 평균 60kg이라 할 때 2283억 명의 몸무게와 맞먹는 엄청난 양입니다. 이 많은 플라스틱이 도대체 다 어디로 갔을까요? 11%는 리사이클했고, 13%는 태웠으며, 76%는 버려졌습니다. 즉, 땅 밑에 잘 보관되어 있던 탄소를 온실가스로 대기 중으로 보냈고, 지구표면과 바다에는 폐플라스틱 오염 문제가 생긴 거지요. 이러한 기후위기의 주범, 그리고 유한자원인 화석원료 사용에서 탈피하기 위하여 바이



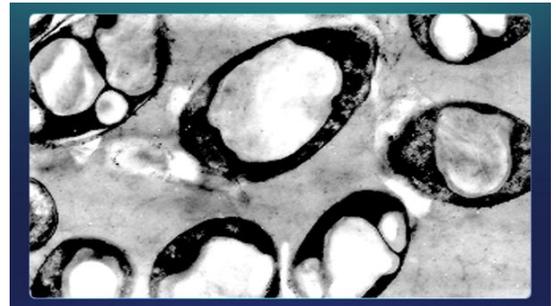
오제조가 전 세계적으로 주목받고 있습니다. 폐목재, 잡초 등 우리가 먹지 않는 비식용 바이오매스를 원료로 이로부터 얻어진 포도당 등을 탄소원으로 하여 미생물을 키우고, 그 미생물로 하여금 우리가 원하는 연료, 플라스틱, 범용화학물질, 정밀화학물질 등을 생산하게 하는 것입니다. 하지만, 미생물을 자연계에서 분리하여 우리가 원하는 것을 생산하라고 하면 잘 안 합니다. 그래서 등장한 공학이 대사공학입니다. 대사공학은 생명체의 대사회로를 우리가 원하는 방향으로 디자인하고 실제 조작하여 유용물질들을 효율적으로 생산할 수 있게 합니다. 이러한 대사공학 또는 합성생물학을 이용하여 우리가 원하는 플라스틱을 포함한 다양한 제품들을 미생물 세포공장을 이용하여 생산할 수 있게 됩니다.



우리는 미생물의 대사회로를 디자인하고 최적화하여 플라스틱을 직접 생산하거나, 단량체를 생산하여 중합하여 플라스틱을 바이오기반으로 만들 수 있습니다. 대표적인 바이오플라스틱인 폴리하이드록시알카노에이트, 폴리하이드록시알카노에이트 (PHA-미생물이 영양분, 특히 탄소원 과잉 상태에서 생성하는 고분자 물질)의 경우 대사공학을 통해 미생물로 하여금 폴리머부터 고무 특성을 나타내는 다양한 고분자로 생산할 수 있게 할 수 있습니다. 이 전자현미경 사진은 KAIST 제 연구실에서 대사공학으로 개발한 플라스틱을 생산하는 대장균입니다. 대장균의 세포 내를 꽉 채울 정도로 효율적으로 생산합니다. 현재 전 세계적으로 가장 많이 쓰이는 바이오플라스틱은 젯산으로 이뤄진 고분자 PLA(Poly Lactic Acid-옥수수 등 바이오매스를 원료로 하여 만들어지는 생분해성 고분자)입니다. PLA는 미생물 발효로 젯산을 생산하고, 이를 정제하여 화학공정으로 중합하여 만듭니다. 이렇게 복잡한 두 단계의 공장을 돌리는 이유는 PHA와는 달리 PLA를 합성하는

효소가 자연계에 없기 때문입니다. 제 연구실에서는 자연계에 없는 효소를 만들고 대사회로로 구축하여 미생물로 하여금 PLA를 직접 발효 생산할 수 있는 기술을 개발하여 전 세계적으로 주목받은 바 있습니다.

더 최근인 지난 3월에는 아마이드 결합(탄소와 질소 원자가 이중 결합을 형성하는 화학 결합으로, 특히 단백질과 같은 생체 분자를 구성하는 펩타이드 결합과 유사)을 가진 고분자를 세계 최초로 생산하기도 하였습니다. 100% 바이오나일론을 생산하기 위해 계속 연구 중입니다. 대사공학의 힘을 잘 보여준다 하겠습니다. 그러면 이러한 바이오플라스틱들은 무엇을 원료로 생산해 왔을까요? 다양한 바이오매스로부터 포도당과 자당을 얻어 원료로 써 왔습니다. 바로 여기서 우리는 질문을 던집니다. 가장 직접적으로 온실가스를 줄이면서 이를 플라스틱으로 고정할 수 있는, 즉 미생물로 하여금 이산화탄소를 원료로 발효하여 경제적으로 플라스틱을 생산할 수는 없을까? 답을 미리 말씀드리면 최근 들어 지난 몇 년간 제 연구실 포함 전 세계 여러 연구실에서 이산화탄소, 그리고 그를 전환 시킨 개미산을 원료로 예전에는 못 자라던 대장균 등 박테리아를 키우는 대사공학기술들이 개발되고 있습니다.



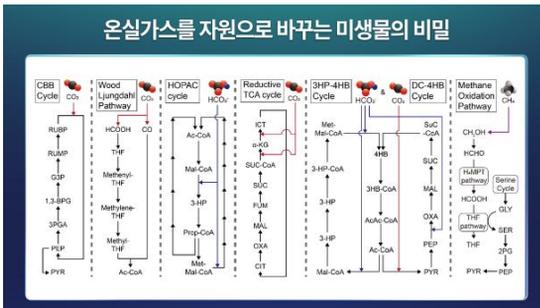


미생물 세포공장 기반 온실가스의 플라스틱 전환

서상우 서울대 화학생물공학부 교수

[영상 보러가기](#)

이산화탄소와 메탄 같은 온실가스가 사실 미생물에게는 놀라운 자원이 될 수 있다는 점, 알고 계신가요? 조금은 어려워 보이지만 지금 보시는 복잡한 대사경로가 광합성 미생물이 이산화탄소를 생체물질로 전환하거나, 메탄자화균이 메탄을 산화해 에너지를 얻는 방법입니다. 자연계에서 이미 작동하고 있는 이 메커니즘을 이해하고 활용하는 것이, 기후위기의 원인이 되는 온실가스를 오히려 다양한 제품의 재료로 활용할 수 있게 하는 중요한 단서를 제공합니다. 그렇다면 어떻게 온실가스를 플라스틱으로 바꿀 수 있을까요?



합성생물학 기술을 활용하면, 자연에 존재하는 온실가스 대사 경로와 플라스틱 생산 경로를 원하는 대로 재설계할 수 있습니다. 예컨대 메탄을 산화하는 효소나 이산화탄소를 고정하는 효소, 그리고 플라스틱을 합성할 수 있는 효소를, 산업 현장에서 익숙하게 쓰이는 대장균과 효모와 같은 미생물에 옮겨 놓기도 하는데요. 이런 식으로 온실가스를 기반으로 플라스틱 등 다양한 물질을 만들어낼 수 있는 새로운 가능성이 열렸습니다.

그렇다면, 왜 이것이 그랜드 퀘스트의 주제 중 하나일까요? 그 이유는 바로 경제성입니다. 온실가스로 플라스틱을 만들려면 결국 경제성이 관건이죠. 경제성을 높이는 핵심 지표는 크게 세 가지인데, 먼저 '생산농도(titer)'는 온실가스로부터 최종적으로 얼마나 많은 양의 플라스틱을 만들어 낼 수 있는지를 의미합니다. 둘째, '생산속도(rate)'는 공정 시간이 짧을수록 비용 절감 효과가 크다는 점에서 중요합니다. 마지막으로 '생산수율(yield)'은 동일한 양의 원료로 얼마나 많은 제품을 만들 수 있는지를 보여주죠. 이 세 가지 영문 앞자를 따서 TRY라고 하는 지표를 고르게 향상시키면, 기존

석유화학공정과 경쟁할 수 있는 수준을 기대할 수 있습니다. 그렇다면 이 지표들을 어떻게 끌어올릴 수 있을까요? 조금 더 구체적으로 이를 향상시키기 위한 기술적인 그랜드 퀘스트들을 살펴보겠습니다. 첫 번째 그랜드 퀘스트는 미생물 세포공장 내에서 온실가스를 포획하는 '고정 효소의 반응성'을 극적으로 끌어올리는 것입니다.



예컨대 이산화탄소를 고정하는 '루비스코(RuBisCO)'나, 메탄을 산화하는 '메탄 산화효소(MMO)'는 대표적인 탄수화물 중 하나인 포도당을 소비하는 데 쓰이는 헥소카이네이즈 등의 다른 효소에 비해 반응 속도가 최대 10,000배 이상 낮습니다. 이런 낮은 반응성 탓에 온실가스를 빠르고 대량으로 소모하기 어려운 게 현실이죠. 따라서 효소의 개량이나 새로운 반응 메커니즘 발굴을 통해, 온실가스가 신속히 전환되도록 돕는 기술이 시급하다고 할 수 있습니다.



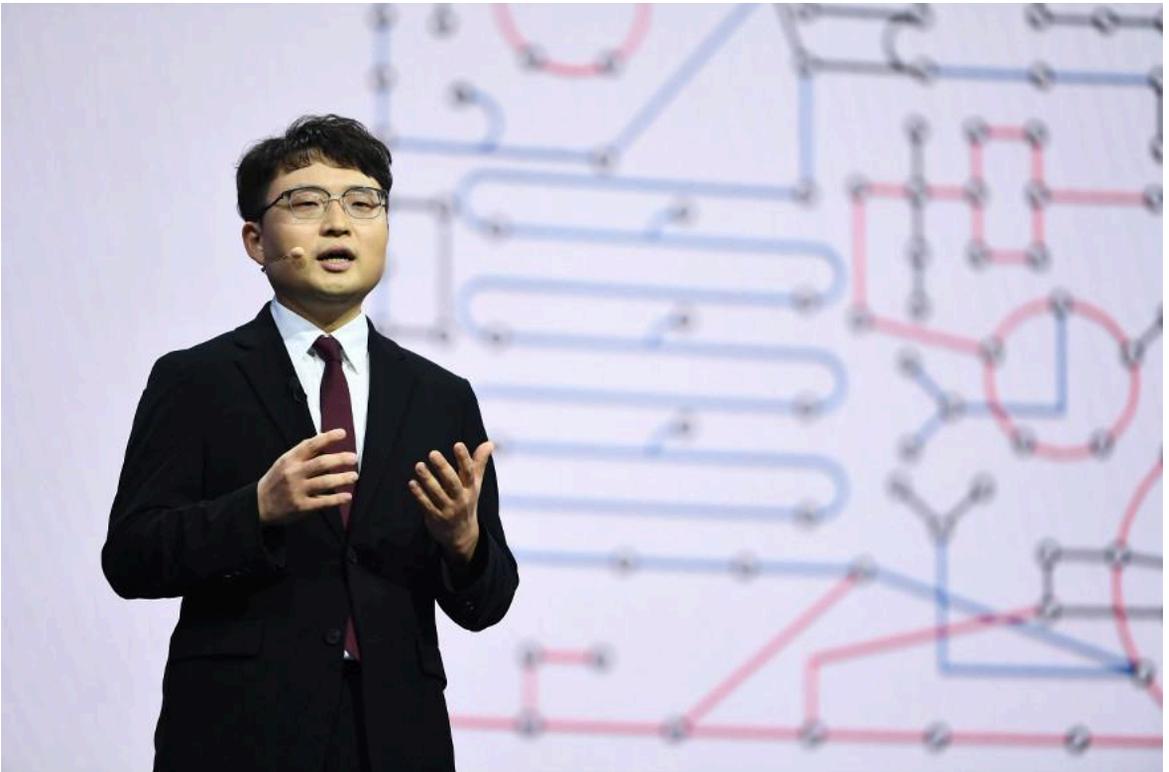
두 번째 그랜드 퀘스트는 '대사흐름의 예측 및 최적화'입니다. 새로운 효소가 미생물 내에 도입되면, 미생물 내부의 기존 대사 경로가 예상치 못한 방식으로 바뀔 수 있는데요.

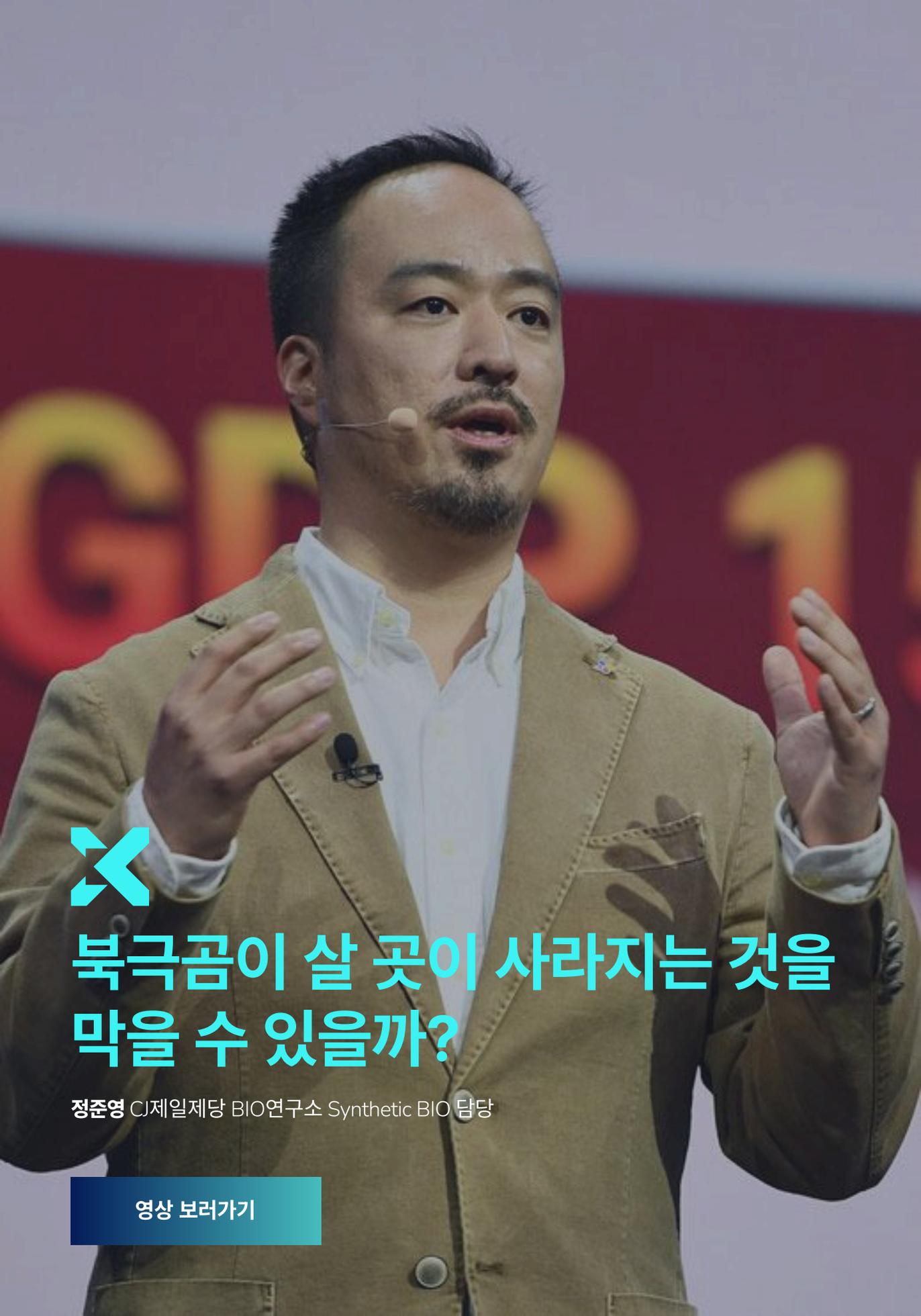
어떤 물질은 과잉 생성되고, 어떤 물질은 부족해질 수도 있습니다. 이렇게 균형이 깨지면 최종적으로 만들어지는 플라스틱의 양과 속도가 크게 저해될 수 있죠. 따라서 원하는 물질 즉 플라스틱을 최대치로 생산하기 위해서는, 고정 효소뿐 아니라 다른 대사 경로도 정교하게 조절해야 합니다. 이를 위해 컴퓨터 시뮬레이션으로 대사 경로 변화를 예측하고, 효소의 발현량이나 대사 회로를 재설계해 전체 흐름을 유기적으로 통합하는 과정이 필수적입니다. 제가 말로는 쉬운 것처럼 설명하고 있지만, 사실 생명체 내에서 이처럼 다양한 변수를 동시에 제어하기란 결코 쉽지 않습니다. 그래서 최근에는 '바이오파운드리'라는 자동화 플랫폼을 기반으로 DBTL (Design-Build-Test-Learn) 즉 설계-제작-시험-학습 사이클을 통해 문제 해결 속도를 높이려는 시도를 하고 있습니다. 먼저 AI 기반 컴퓨터 모델링으로 최적의 효소 서열이나 유전자 조합을 설계(Design) 하고, 실제 DNA를 합성해 미생물에 도입하는 제작(Build) 과정을 거칩니다. 이후 시험(Test) 단계에서 얻은 데이터를 바탕으로, 새로운 패턴이나 상관관계를 학

습(Learn)하면서 반복적으로 개선해 나가죠. 이런 자동화 시스템을 활용하면, 예전에는 몇 달씩 걸리던 실험도 며칠 만에 처리할 수 있어, 미생물 세포공장 최적화에 큰 박차를 가할 수 있습니다.

마지막으로, 온실가스를 플라스틱으로 전환하는 일이 단순히 기술만으로 완성되지 않는다는 점을 강조하고 싶습니다.

탄소배출원에서 가스를 효과적으로 포집하는 인프라, 대규모 생산 공정으로의 확장, 그리고 새로 만들어진 플라스틱의 규제 이슈와 시장에서의 소비자 반응까지 모두가 유기적으로 맞물려야 하기 때문입니다. 결국, 학계·산업계·정부 기관뿐 아니라 소비자까지 서로 협력해야 온실가스 활용이 순환적 가치사슬로 자리 잡을 수 있습니다. 이는 기후위기를 해결할 핵심 열쇠이자, 동시에 지속가능한 신산업 생태계를 창출할 큰 기회라고 생각합니다.





북극곰이 살 곳이 사라지는 것을 막을 수 있을까?

정준영 CJ제일제당 BIO연구소 Synthetic BIO 담당

영상 보러가기

앞서 이상엽 교수님이 말씀하신 기후변화 임팩트는 월드뱅크와 NGFS(녹색금융협의체) 분석 기준 각각 2160억 달러 손실과 글로벌 GDP 15% 감소가 예상됩니다. 이런 임팩트는 기후재난과 같은 직접적인 피해에 사회적, 경제적 연결 피해가 더해지면서 예상 손실피해는 더욱 커질 것으로 예측됩니다. 그래서 사회적으로 직접적인 문제 해결과 위기 관리를 위한 기술과 산업이 개화하고 있는데요. 저는 오늘 그중에서 미생물을 활용해서 탄소포집활용(CCUS) 및 순환 경제에 이바지 할 수 있는 기술들이 왜 혁신인지를 기업관점에서 설명 드리고 이를 실현하기 위해 필요한 우리 사회의 노력에 대해서 말씀드리려고 합니다. 그런데 왜 헛반, 비비고 만드는 CJ제일제당에서 이런 이야기를 할까 하시는 분들 계실까요? 모르는 분들을 위해 짧게 설명 드리면 CJ제일제당은 국내에서 미생물 발효로 MSG 생산을 시작으로 현재 글로벌 11개 공장에서 미생물 발효 기반 식품, 사료 첨가제를 공급하는 그린바이오 사업을 영위하고 있으며 넥스트로 지속 가능한 세상을 만들기 위한 화이트 바이오 영역으로 확장을 준비하고 있습니다.

CJ제일제당이 만들어가는 지속가능을 위한 제품과 솔루션은 보시는 바와 같이 생분해성 플라스틱(PHA)와 플라스틱 분해 기술입니다. 첫째, 생분해성 플라스틱은 미생물만 만들어 낼 수 있는 소재인데요. 환경에서 긴 시간 동안 분해되지 않는 석유계 플라스틱과는 달리 해양, 토양 등 환경에 노출시 생분해 되어 자연으로 돌아갈 수 있는 소재입니다. 현재 대량 생산을 위한 경제성을 확보하고 빨대, 포장지를 포함한 다양한 용도 개발로 시장을 만들어 가고 있습니다. 둘째, 플라스틱을 분해할 수 있는 효소기술의 개발입니다. 미세플라스틱의 문제는 모두 들어보셨을 텐데요. 분해가 어려운 석유계 플라스틱을 분해하여 다시 플라스틱으로 만들어낼 수 있는 기술로 현재 페트를 타깃으로 경북대에서 창업한 자이언과 함께 POC(개념증명) 완료하고 경제성 확보 및 순환경제를 만들어내기 위한 노력을 지속 중입니다. 분해가 어려워 문제인 플라스틱의 문제를 해결하는 생분해성 플라스틱, 이미 세상에 많은 플라스틱을 분해하고 재활용 할 수 있는 기술이 사업화 된다면 우리가 꿈꾸는 지속 가능한 세상을 만들 수 있지 않을까요?





자 그럼 이런 제품들은 정말 지속가능성에 도움을 줄 수 있을까요? 답부터 말씀드리면 '현재 수준으로는 혁신적인 저감이 어렵다'입니다. 석유계 플라스틱과 비교했을 때 바이오 플라스틱은 대체적으로 긍정적이지만 혁신적이지는 않습니다. 왜 그럴까요? 비슷한 문제를 안고 있는 배양육을 예시로 함께 설명 드리겠습니다. 온실가스의 주요 원인 중 하나인 가축대신 세포를 키워 고기를 공급하여 탄소발자국 저감에 상당히 많은 기여를 할 수 있을 것으로 기대 되지만, 세포를 키우는 과정에서 석유를 원료로 사용한 에너지를 공급하면 기존 가축을 통하는 방법보다 탄소발자국 관점에서 불리합니다. 그럼 어떻게 개선하죠? 바로 에너지를 재생 에너지로부터 공급해야 합니다. 플라스틱도 마찬가지입니다. PHA를 예로 들어서 2013년 기준, 탄소 발자국 수치 2.3을 생산현장에서 에너지원의 일부를 재생 에너지로 변경하면 1.6 정도로 저감 됩니다. 향후 100% 재생에너지를 사용하게 되면 1.0 이하의 넷제로를 목표로 할 수 있습니다.



다음은 원재료입니다. 현재 발효산업은 제품들의 원가 경쟁력 강화를 위해 원래 주로 쓰던 원당, 전분당 외에 오일, 가스 같은 대체 탄소원을 사용하기 위한 연구를 많이 진행하고 있습니다. 왜 꾸준히 이런 연구를 진

행하고 바꾸려 할까요? 답은 현재 전분당과 원당 가격, 그리고 공급 측면 지속가능성에 대한 걱정 때문입니다. 전분당과 원당은 곡물가격, 국가간 무역정책, 신규 수요와 같이 복잡하고 다양한 요소들이 가격과 수급을 결정하는 전략적 자원이기 때문입니다. 기후변화로 재배 지역, 작황이 변하고, 무역분쟁으로 수급에 문제가 생기는 빈도수가 증가하면서 가격의 우상향과 변동폭은 커져 갑니다. 원재료의 변동성이 사업운영 불확실성을 높이기 때문에 경쟁력을 갖춘 원재료의 발굴은 매우 중요합니다. 비식용 목질계 바이오매스, 거대조류를 탄소원으로 활용하기 위한 연구도 지속 진행 중이지만 이 또한 경작되고 확보돼야 하는 자원이라는 측면에서 대규모 활용 측면 불확실성을 내포하고 있습니다.

그런 점에서 오늘 그랜드 퀘스트에 상정된 온실가스를 탄소원으로 쓸 수 있다면 우리나라 환경과 사회 시스템에 큰 임팩트가 기대됩니다. 왜냐구요? 온실가스 배출원들은 우리 생활 곳곳에 있으니까요. 폐기물부터 배기가스에 이르기까지 온실가스 배출원들은 다양합니다. 그런 온실가스를 포집하고 미생물발효공정을 통해 플라스틱과 같은 유용 물질로 전환시킵니다. 만들어진 물질은 생활에서 사용되고 일부는 자연으로 일부는 재활용을 통해 다시 새로운 제품으로 태어납니다. 이런 탄소순환경제가 구축이 되면 첫째 배출되는 온실가스는 누적 탄소발자국을 획기적으로 감소시킬 수 있습니다. 하지만 아직 기술, 인프라, 전방 후방산업의 연결 등 모든 것이 걸음마 단계입니다.

제가 모든 산업을 대표 할 수는 없기에 발효산업 관점에서 좀더 상세히 말씀드리면 첫째, 탄소포집 경제성을 확보하기 위한 추가적인 기술개발과 인프라 투자 동력이 필요합니다. 앞서 서상우 교수님이 언급하신 가스포획 효소기술의 혁신이 대표적인 예입니다. 기술이 완성된다면 기업 입장에서 기존 발효설비를 신규 인프라로 전환을 고려할만한 경제성의 확보입니다. 이는 둘째 바이오 공정과도 연결되는데요. 현재 가스발효로 상용화된 대표적인 제품은 에탄올 한 가지입니다. 기업이 대규모 인프라 투자를 고려하려면 더욱 고부가가치 물질을 미생물이 만들 수 있어야 합니다. 마지막은 이런 기

술개발과 투자가 일어날 수 있는 환경을 조성하기 위한 정부 정책 지원과 국민들의 노력이 필요합니다. 정부 정책은 국민의 행복과 안정을 목적으로 하기 때문에 개개인이 기후변화위기와 해결방법을 이해하고 지지한다면 선순환 구조가 만들어진다고 생각합니다. 사업 관점에서 소비자, 정부 관점에서 국민이 관심이 없다면 그것은 사업적으로 정책적으로 오랜 시간 동안 지지를 받아 기술의 혁신이 일어나기 힘들기 때문입니다.

탄소 포집 및 순환경제 혁신기업 Case Study

	LanzaTech	Carbios
	"탄소를 쓰레기가 아닌 자원으로"	"생분해·친환경 기반 플라스틱 문제 해결사"
기술특성	순환가스(CO/CO ₂) 활용(CO ₂)	효율적 PET 분해 및 재조합 기술
정부지원	· R&D 보조금(DOE) · 공중이용 인증서(LGA 지원)	· R&D 보조금 및 운영연료 인센티브 · EU Horizon 프로그램의 국가 정책 지원
파트너십	글로벌 대기업 JV (Monsanto, Shell, Ineos, Mitsui)	글로벌 대기업 JV (Dow, Nestle, PepsiCo, Indorama Ventures)

'산·학·정 노력과 국민들의 관심으로 바이오대 전환 달성'

마지막으로 이런 혁신은 누가 어떻게 만들어가고 있는지 함께 보시죠. 미국의 란자텍, 프랑스의 까비오스라는 기술벤처들이 대표적인 예시입니다. 란자텍은 공장 부생가스를 미생물이 탄소원으로 활용하여 에탄올의 상용화 스케일 생산을 최초로 성공했습니다. 현재는 앞서 언급한 제품을 단백질소재와 지속가능항공유(SAF)와 같은 고부가가치 소재로 확장하기 위한 노력을 지속하고 있습니다. 까비오스는 PET 분해와 재조합 기술을 기반으로 분해한 플라스틱으로 다시 플라스틱을 만드는 순환 경제 사업을 추진합니다. 현재 상용화 스케일 공장 건설 및 순환 생태계를 실현할 파트너링에 집중하고 있습니다. 이런 기업들 15년, 20년 되었습니다. 혁신을 만들어 가는 인재 확보, 기업과 사업협력 그리고 정부의 자금, 정책지원을 통해 혁신을 이루려는 노력은 왜, 어떻게 지속되는 걸까요? 오늘 이어지는 토론을 통해 우리나라가 이 분야에서 기술 주권을 확보하기 위해서 각자의 역할에 대한 의미 있는 논의가 이뤄질길 기대합니다.



SESSION 4. 패널 토크 온실가스로 플라스틱을 만든다?

영상 보러가기



이상엽
KAIST 생명화학공학과 특훈교수

서상우
서울대 화학생명공학부 교수

정준영
CJ제일제당 BIO연구소 Synthetic BIO담당

● 이상엽

저희 세션의 그랜드 퀘스트 질문이 “미생물 세포 공장이 과연 기존 석유화학 기반 산업 구조를 대체할 수 있을까?”였거든요. 우리 과학계의 든든한 신진 과학자이신 서상우 교수님, 그리고 실제로 방금 전 발표에서도 보셨듯 업계 최전선에서 기술 개발의 선구자 역할을 하고 계신 정준영 담당님의 생각을 들어보고자 합니다. 과연 석유화학 공정을 미생물 세포 공장이 대체할 수 있을까요?

● 서상우

시작부터 굉장히 어려운 질문을 해 주시는 것 같습니다. 저도 그렇고 이상엽 교수님과 정준영 담당님도 그렇고 모두 미생물 세포 공장 연구를 하고 있지만, 현실적으로 단기적으로 이 석유화학 공정 전체를 미생물 세포 공장이 대체하리라고 보기는 조금 어려울 것 같습니다. 아마도 이 분야를 연구하시는 분들이라면 어느 정도 공감하실 거라고 생각합니다. 그렇다고 해서 우리가 말도 안 되는 소리를 하고 있는 건 절대 아니라고 생각합니다. 오늘 그랜드 퀘스트 자료에서 보여드린 것처럼, 지금까지 버려지고 있던 온실가스, 환경 문제가 되고 있던 온실가스를 전환하는 기술, 혹은 바이오와 화학이 하이브리드로 새로운 공정을 만들어내서 원료 비용을 절감시킬 수 있는 방식 등은 기존에 존재하는 인프라와 잘 얼라인먼트가 이루어진다면, 그 특별한 영역에서는 미생물 세포 공장이 기존의 석유화학 공정의 일부를 충분히 대체할 수 있다고 생각합니다. 산업계에서는 어떻게 생각하세요?

● 정준영

사실 전통적으로 당을 사용하는 발효를 통해 여러 차례 프로젝트를 진행해봤지만, 결국은 석유, 즉 기존의 밸류체인을 전부 대체할 만큼의 혁신을 이루는 건 쉽지 않겠다는 생각이 들었습니다. 그래서 만약 그 방식으로 성공할 수 있겠느냐는 질문을 받고 이 자리에 초대되었

다면, 솔직히 저는 나오지 않았을 것 같습니다. 그런데 가스 발효에 대한 말씀을 주셨기 때문에, 가스 발효처럼 원재료 단계부터 시작해서 최종 제품까지의 밸류체인을 새롭게 설계하고 구축할 수 있는 기술이라면, 이상엽 교수님의 답변에 저도 충분히 공감합니다.

● 이상엽

지속 가능한 세상을 만드는 데에 큰 기여를 할 수 있다는 점에는 저희 세 사람 모두가 동의하는 것 같은데요. 이렇게 좋은 바이오 제조 기술이 분명히 있음에도 불구하고, 왜 그동안 널리 활용되지 못하고 있었던 걸까요? 참 좋은 기술인데, 마치 말 못 할 사정이 있는 것처럼 말이지요.

● 정준영

처음에 저도 공부를 시작했을 때는 당연히 모든 걸 바이오로 생산할 수 있고, 기존 산업을 완전히 바꿀 수 있을 거라고 생각했습니다. 그런데 현실에 나와 보니 상황이 굉장히 냉혹하더라고요. 제일 첫 번째 이유는 바로 '가격'입니다. 가격 문제 이전에 근본적으로 생각해 보면, 결국 사업이라는 것은 돈이 돌아가려면 시장에서 인정해주고 수용해주는 구조가 있어야 하는데, 그게 잘 안 되는 겁니다. 처음 공부할 때는 기술이 워낙 뛰어나니까 시장이 당연히 인정해 줄 거라고 믿었지만, 막상 산업 현장에 들어가 보니 그런 가치에 대한 인식이 나 인정이 거의 없더라고요. 20년 전쯤에는 '바이오 프리미엄'이라는 말을 입에 달고 살았어요. '바이오로 만들면 석유화학보다 더 좋다', '더 친환경적이다.' '이미지도 좋고 임팩트도 크다' 이런 인식이 있었죠. 그런데 실제로는 제품마다 성패가 갈리는 걸 보았습니다. 예를 들어 인슐린이나 아미노산 같은 경우는 과거에 화학적 방법이나 추출로 만들던 것들을 바이오가 완전히 대체했습니다. 이미 90~99%는 바이오 기반으로 바뀌었어요.

그런데 범용성 물질, 특히 플라스틱처럼 커머더티 제품의 경우에는 이야기가 다릅니다. 이런 물질은 워낙 석유화학이 수백 년 동안 최적화해 왔기 때문에, 그걸 바이오가 뛰어넘기는 정말 쉽지 않다는 걸 실감하고 있습니다. 저는 그렇게 판단하고 있습니다.

● 이상엽

작년에 데이비드 베이커 그룹이나 구글 등에서 알파폴드, 로제타폴드를 통해 단백질 구조를 AI로 예측했고, 이로 인해 노벨상까지 받았잖아요. 이처럼 AI로 단백질 구조를 정확히 예측할 수 있게 되면서, 우리가 지금 원하는 효소를 디자인하는 데도 그 기술을 활용할 수 있는 시대가 왔습니다. 그런데 아까 발표에서도 공유했듯, 이산화탄소를 고정하는 효소의 경우에는 턴오버 넘버(turnover number-단위 시간당 효소가 생산물로 전환될 수 있는 기질 분자의 최대 수)가 너무 낮습니다. 효율 자체가 너무 떨어지는 거죠. 그렇다면 이런 AI 기반 기술을 활용해서 이 효소를 개량할 수 있을 것 같은데요, 교수님은 여기에 대해 어떻게 생각하시고, 지금 현재의 기술 수준, 즉 스테이터스는 어떤 것 같다고 보시나요?

● 서상우

네, 답부터 말씀드리면 저도 당연히 가능하다고 생각합니다. 그 기술이 정말 파급력이 크기 때문에 작년에 노벨 화학상을 수상하게 된 것도 그런 이유에서라고 생각하고요. 요즘 같은 시대에는 유전자 서열이나 아미노산 서열만 알면 단백질의 구조 예측이 가능하고, 이상엽 교수님께서 말씀해주신 것처럼 최근에는 단순한 단백질 구조 예측을 넘어서 화학 반응, 생화학 반응을 매개할 수 있는 효소까지 디자인할 수 있는 시대가 되었습니다. 그래서 우리가 이번 그랜드 퀘스트에서 중요하게 다뤘던 온실가스를 고정화하는 효소조차도, 이제는 개량이 가능할 뿐만 아니라 어쩌면 자연계에 존재하지 않는 전혀 새로운 형태의, 새로운 서열을 갖는 고정화 효

소를 만들 수도 있을 것이라고 생각합니다. 꿈은 크게 꺾어야 하니까요. 효율을 높이기 위해선 지금보다 만 배, 천만 배 이상 향상시켜야겠지만, 저는 충분히 가능할 거라고 믿고 있습니다.

● 이상엽

기대하겠습니다. 우리가 이산화탄소나 메탄처럼 탄소가 하나인 물질을 이야기할 때, 이를 통틀어 C1 화합물이라고 부릅니다. 그리고 이런 C1 화합물을 활용하는 대사 경로를 C1 대사 경로라고 하는데요. 이걸 어떻게 활용할 수 있을지에 대해 두 가지 접근 방식이 있습니다. 하나는 원래부터 C1 대사 경로를 가지고 있는 미생물을 사용하는 방법인데, 문제는 이런 균들이 너무 느리게 자라고 산업적으로 활용하기에는 현실적으로 어려운 점이 있다는 겁니다. 또 다른 하나는 우리가 익숙하게 다루는 대장균처럼, 생명공학적으로 디자인하고 개조하기 쉬운 균주에 C1 대사 경로를 새롭게 도입하는 방법이죠. 그래서 여기서 질문 드리고 싶은 것은 이 겁니다. 1번처럼 기존의 C1 미생물을 개량해서 쓸 것이냐, 2번처럼 대장균에 새로운 C1 대사를 이식해서 쓸 것이냐. 아니면 둘 다 병행해야 할까요? 어느 방법을 선택해야 할까요?

● 서상우

제가 학위 과정을 하던 15년 전쯤으로 돌아간다고 생각하면, 아마 저는 지체 없이 모델 미생물인 대장균 같은 균주를 써야 한다고 말씀드렸을 것 같습니다. 그런데 그 이후 15년 동안 과학기술이 정말 눈부시게 발전했습니다. 아까 말씀드린 것처럼, 기존에 자연에서 C1 화합물을 고정할 수 있는 야생 미생물들조차도 이제는 개량이 가능한 수준까지 기술이 발전했거든요. 물론 그렇다고 해서 지금 당장 그런 균들을 모델 미생물처럼 빠르게 개량할 수 있다는 뜻은 아니지만, 15년 전과 비교하면 엄청난 기술적 진보가 있었기 때문에 앞으로는 두 가지 방향을 모두 함께 가져가는 것이 좋지 않을까 생

각합니다. 자연계에서 기존에 C1 가스를 잘 활용할 수 있었던 미생물에게는 그만한 이유가 있었고, 특히 가스라는 특성을 생각해 보면, 오히려 모델 미생물에 이러한 C1 대사 경로를 도입하는 쪽이 기술적 허들이 더 클 수도 있겠다는 생각이 듭니다.

● 이상엽

네, 좋은 답변이신 것 같고요. 결국 두 가지 접근을 균형 있게 가져가야 한다는 말씀이신데, 그건 학교에서 가능한 이야기고요. 현실적인 산업계, 즉 회사 입장에서는 둘 중 하나만 선택해야 합니다. 어느 쪽을 고르시겠습니까?

● 정준영

저는 처음에는 1번, 그러니까 C1 대사 경로를 원래 가지고 있는 미생물을 활용하는 방향으로 갔었는데, 최근에는 2번, 즉 대장균 같은 모델 미생물에 C1 대사를 도입하는 쪽이 더 현실적인 선택이라는 생각이 들기 시작했습니다. 서 교수님도 말씀하셨듯, 결국은 파운더리 기술이 도입되면서 과거와는 비교가 안 될 정도로 우리가 좋은 균주들을 스크리닝하고 설계할 수 있는 역량이 생겼기 때문입니다. 그러니까 이제는 능력이 생긴 거죠. 아주 쉬운 예시로 설명하자면, 서 교수님은 지금 학생들과 실험을 많이 하실 테니까 잘 아시겠지만, 요즘 제일 실험 잘하는 학생이 일주일에 균주를 몇 개나 만들 수 있나요?

● 서상우

한 10개 만들 수 있을까요?

● 정준영

파운더리에 투자해서 시스템을 갖추게 되면, 하루에 1만 개의 균주도 만들 수 있습니다. 그러니까 이 말은, 과거와는 달리 이제는 엄청난 속도로 균주를 생성하고 스크리닝할 수 있다는 거죠. 물론 그렇다고 해서 “기계가

사람보다 낫다”는 얘기를 하려는 건 아닙니다. 정말 인사이트 있는 연구자들은 기계가 해내는 양적인 노력 이상을 해내기도 하니까요. 하지만 과거에는 두 번째 방식, 즉 모델 미생물에 새로운 대사 경로를 넣는 전략이 현실적으로 어려웠던 이유가, 괜찮은 균주를 골라내는데 시간이 너무 오래 걸리고 노동력이 너무 많이 들었기 때문이었습니다. 그런데 이제는 파운더리라는 시스템이 생겼고, 사람은 복잡하고 창의적인 부분에 계속 집중하고, 반복적이고 노동집약적인 작업은 기계에 맡길 수 있게 되면서 훨씬 효율적인 작업 환경이 마련된 겁니다. 그리고 결정적으로 산업계에서는 미생물이 너무 느리게 자라면, 결국 생산에 더 많은 돈이 들어가기 때문에 사용할 수 없습니다. 그래서 저는 결국 두 번째 전략, 즉 대장균 같은 모델 미생물에 새로운 대사 경로를 도입하는 방식이 산업적으로 더 현실적인 선택이라고 봅니다. 이상엽 교수님께서 최근 이 분야에서 좋은 연구들을 많이 해주시고 계시니, 교수님께서 좋은 균주를 만들어주시면 저희가 그걸 산업 현장에서 잘 써보겠습니다.

● 이상엽

우리가 아까 이야기 나눈 내용을 보면, 결국 이산화탄소로부터 어떤 유용한 물질을 만들어내는 과정에서 미생물 세포 공장이 중심에 있는 구조입니다. 그런데 그 전체 과정 안에는 몇 가지 핵심 단계가 있죠. 첫 번째는 탄소를 포집해야 하고, 두 번째는 포집한 이산화탄소(C1 화합물)를 미생물을 통해 두 개, 세 개가 아니라 여섯 개, 일곱 개 등 우리가 원하는 복잡한 탄소 구조로 합성해야 하며, 세 번째는 그 전체 발효 과정에 에너지가 많이 들어가기 때문에 에너지 사용 효율이나 공급 방식도 매우 중요한 문제가 됩니다. 이 세 가지가 모두 중요하겠지만, 상용화라는 관점에서 봤을 때, 현재 가장 집중해서 육성해야 할 핵심 요소는 무엇일까요? 이 부분은 정 박사님께서 산업계 입장에서 답변해 주시면 좋겠습니다.

● 정준영

일단 첫 번째인 탄소 포집과 세 번째인 가스 발효 공정은 사실 미생물 세포 공장만의 과제가 아닙니다. 다른 산업 분야, 다른 기술 도메인에서도 충분히 활용될 수 있는 부분이지요. 그런데 바이오 산업을 하는 회사 입장에서는 두 번째 문제, 즉 C1 화합물을 가지고 미생물이 원하는 고분자 물질로 전환해내는 대사 경로 문제가 풀리지 않으면, 애초에 투자 자체를 시작하지 않을 겁니다. 왜냐하면 이 문제는 오랫동안 많은 글로벌 석학들과 연구자들이 노력을 기울였음에도 불구하고 여전히 어려운 과제입니다. 탄소가 하나인 물질을 여러 개 연결해서 유용한 물질을 만든다는 것은, 미생물 입장에서는 상당히 많은 에너지가 필요한 일이기 때문입니다. 그런데 모든 생명체의 존재 목적은 결국 '번식'인데, 미생물에게 "너는 번식 말고 이 화학 반응에 에너지를 집중해"라고 푸시를 주는 것이 결코 쉬운 일이 아닙니다. 그래서 저는 만약 이 두 번째 문제가 해결된다면, 이는 정말 완전한 '게임 체인저'가 될 수 있다고 생각합니다. 결국 이 부분이 선행되어야만 기업이 움직일 수 있는 동기를 가질 수 있을 것이라 보고, 가장 집중 육성해야 할 핵심이라고 답변드리고 싶습니다.

● 주시은 아나운서

저도 궁금한 점이 있습니다. 이상엽 특훈 교수님께서서는 시스템 대사공학의 창시자시고, 또 일각에서는 현재 국내 과학자 중에서 노벨상에 가장 근접해 계신 분이라는 이야기도 들었습니다.

● 이상엽

그건 아닌 것 같습니다만, 계속하시죠.

● 주시은 아나운서

네. 그렇다면 선진 기술을 보유하고 있는 미국과 유럽과 비교해 우리나라에서 이러한 혁신이 가능했던 이유는 뭐라고 보십니까?

● 이상엽

한마디로 말씀드리면, 답은 '인재'입니다. 인재의 질이죠. 저는 지난 31년 동안 학생들을 지도해 왔는데, 정말 훌륭한 학생들이 문제만 제대로 주어지면—즉, 좋은 과제와 도전이 주어지면—놀라운 정도로 창의적인 해결책을 만들어냅니다. 이것이 우리가 지금 이 자리에 모여 그랜드 퀘스트를 진행하고 있는 이유이기도 합니다. 그래서 저는, 가치와 비전만 계속해서 제시해 줄 수 있다면, 우리 인재들의 역량은 어느 나라와 비교해도 절대 뒤처지지 않는다고 생각합니다. 저는 그것이 우리 과학기술 혁신의 원동력이라고 보고 있고, 앞으로도 그런 인재들이 능력을 발휘할 수 있도록 정부 정책이나 사회 전반의 지원 시스템이 제대로 작동해야 한다고 믿습니다.

● 정석문 아나운서

저도 질문 하나 드리겠습니다. 지금 미생물을 사용해서 플라스틱을 만들어내는 연구를 하고 계신 걸로 알고 있는데, 반대로 우리가 일상에서 배출하는 플라스틱 쓰레기들도 굉장히 많은데요. 이런 플라스틱 폐기물을 미생물을 이용해서 분해하거나 처리할 수 있는 방법이 있을까요?

● 이상엽

역시 아주 중요한 질문을 해주셨습니다. 있습니다. 실제로 저희가 약 7년 전쯤에 발견한 효소 중에 'PTAZ'라는 것이 있습니다. 참고로 효소 이름은 보통 끝에 'ase'를 붙여서 명명하는데요, 우리가 흔히 알고 있는 소화 효소 '리파제(lipase)'처럼요. 이 PTAZ는 PET, 즉 페트병을 분해하는 미생물이 내놓는 효소인데, 저희가 경북대 연구팀과 함께 이 효소의 크리스탈 구조를 밝혀 내면서 작용 원리까지 규명한 바 있습니다. 또 최근에는 제가 자문을 맡고 있는 한 회사에서 나일론을 분해하는 효소도 발견되었고, 그 효소의 분해 속도를 약 50배 이상 빠르게 만든 변형 효소도 개발되었습니다. 이

처럼 플라스틱을 분해하는 다양한 효소들이 속속 개발되고 있는 상황입니다. 다만 한 가지 강조하고 싶은 점은, 현재 기술 수준에서는 바이오 방법만으로 플라스틱을 분해했을 때 경제성이 잘 나오지 않는다는 겁니다. 하지만 물리적, 화학적, 생물학적 방법을 총동원해서 함께 적용했을 때는 몇몇 경우에 경제성이 있는 해법이 나오고 있다는 것이 지금까지의 기술적 가능성이라고 말씀드릴 수 있겠습니다.

● 정석문 아나운서

네, 그렇군요.

● 주시은 아나운서

객석에서도 질문이 많이 들어오고 있는데요. 현장 질문을 받아 볼까요?

● 정석문 아나운서

네, 제가 질문 전달해 보겠습니다. 온실가스 변환 과정에서 플라스틱을 생산하면, 새로운 온실가스가 발생하는지는 아닌지 질문하셨습니다.

● 이상엽

물론 나옵니다. 다만 들어간 양보다는 적게 나옵니다. 왜냐하면 들어간 것의 상당수가 균이 자라는데 쓰였고, 균이 우리가 원하는 걸 만드는데 쓰였기 때문에 나가는 양은 확실히 적습니다. 다음으로 발효를 하는데 들어가는 전기나 이런 것도 다 계산을 해야합니다. 라이프사이클 분석을 해보면 프로덕트의 종류에 따라서 다르긴 하지만 확실히 줄어든 거는 맞습니다.

● 주시은 아나운서

그렇다면, 화학 공정을 미생물 세포 내에 넣게 되면 설비가 간단해지고, 이에 따라 소형화되거나 이동이 쉬워진다는 장점도 있을까요?

● 이상엽

있습니다. 미생물 세포 공장이라는 건—우리가 보통 여수 석유화학 단지 같은 데를 가보면, 여천 석유화학 단지만 해도 버스를 타고 30분, 1시간씩 돌아다닐 정도로 유닛들이 굉장히 크잖아요—그런 공정을 미생물 한 마리에 다 집어넣는 겁니다. 그리고 그 미생물을 계속 배양하는 방식이기 때문에, 당연히 장치는 간단해질 수밖에 없습니다.

● 정석문 아나운서

그렇다면 이런 장점이 실제로 응용될 수 있을까 하는 질문이 들어왔는데요. 예를 들어, 이산화탄소를 수동적으로 주입받는 포집기가 아니라, 이산화탄소를 능동적으로 찾아다니며 옮겨 다니는 포집기를 보다 용이하게 만드는 데에 이런 기술이 활용될 수 있을까요?

● 정준영

일단 지금 말씀드린 가스 발효라는 건, 사실상 이산화탄소가 상당히 농축되어 있는 상태에서 진행되는 방식입니다. 그래서 만약 대기 중의 CO₂ 농도 수준에서 진행해야 한다면, 미생물이든 포집 장치든 상당히 많이 돌아다녀야 할 겁니다—즉, 효율이 많이 떨어지겠죠. CO₂가 많이 발생하는 지역, 예를 들어 공장 주변 같은 곳에서는 확실히 좀 더 나은 조건이 되겠지만, 현재 기술 수준에서는 공장이나 음식물 쓰레기 처리시설 등 탄소 배출원이 명확한 곳에서 일차적으로 이산화탄소를 모은 상태에서 전환하는 방식이 필요합니다. 그것이 지금 기술의 한계이기 때문에, 이산화탄소를 능동적으로 찾아다니며 포집하는 기술이 실현되기까지는 좀 더 시간이 필요하다고 판단하고 있습니다.

● 이상엽

그러니까 예를 들면 이런 방식입니다. 이산화탄소를 가장 많이 배출하는 곳 중 하나가 제철소고, 또 다른 하나는 시멘트업업입니다. 이 경우에는 제철소나 시멘트 공장 옆에 포집 장치를 붙여서, 거기서 나오는 고농도의 이산화탄소를 포집해 원료로 활용하는 방법이 하나 있습니다. 또 다른 방법은, 기후 위기의 주범이 되는 대기 중 이산화탄소를 직접 빨아들여 농축하는 방식입니다. 이를 '다이렉트 에어 캡처', 줄여서 DAC 공정이라고 부르는데요. 이 기술도 현재 굉장히 빠른 속도로 발전하고 있어서, 우리가 원하는 위치, 아무 곳이나 설치해 활용할 수 있다는 장점이 있습니다. 다만 경제성을 조금 더 확보하려면, 이산화탄소 농도가 높은 지역, 예를 들어 제철소나 시멘트 공장 인근 같은 곳에 설치하는 것이 더 유리하겠죠.

● 주시은 아나운서

마지막으로 질문을 하나 더 드려도 될까요? 이산화탄소를 원료로 플라스틱을 만들거나 바이오 제조를 하는데 있어서, 미생물 세포 공장의 개발이 핵심이고, 또 그를 위한 핵심 기술이 대사공학과 합성생물학이라고 들었습니다. 그렇다면, 이 대사공학과 합성생물학의 미래가 앞으로 어떻게 발전해 나가길 바라시나요?

● 이상엽

네, 일단 목적만 놓고 본다면, 당연히 인류에 도움이 되고 환경을 보호하는 데 기여할 수 있는 제품과 공정 개발에 이러한 기술들이 쓰여야 한다고 생각합니다. 그리고 그걸 가능하게 하기 위해, 미래에는 어떤 방향으로 기술이 발전할지를 예측해보면, 아까 정 박사님께서도 말씀하셨지만, 바이오 파운드리처럼 AI와 로봇이 결합돼 정말 빠른 속도로 미생물 세포 공장을 최적화할 수 있게 될 것입니다. 그렇게 최적화된 미생물 세포 공장을 통해, 재생 가능한 에너지를 최소한으로 사용하면서 우리가 원하는 제품들 - 예를 들어 플라스틱 같은 물질

들-을 만들어내는 방식으로 큰 기여를 할 수 있을 것입니다. 그리고 오늘의 주제는 아니지만, 사실 똑같은 기술이 사람을 살리는 데도 쓰입니다. 예컨대 치료제 개발이라든가, 우리가 먹는 음식과 관련된 부분에서도요. 지금은 우리가 풍부하게 먹고 있기 때문에 먹거리 문제를 크게 걱정하지 않을 수도 있지만, 기후 위기가 심각해지면 상황이 달라질 수 있습니다. 예를 들어 지금처럼 산불이 나면 송이버섯처럼 귀한 식재료가 사라지기도 하잖아요. 그런 식으로 먹거리에도 전 세계적으로 영향을 미칠 수 있기 때문에, 대사공학과 합성 생물학 같은 첨단 기술을 도입해서 먹거리 문제까지 해결하고, 나아가 인류 생존에도 기여할 수 있다고 말씀드릴 수 있겠습니다.



SESSION 5. 효율 60% 태양전지

**태양전지 효율, 60% 벽 넘을 때
벌어지는 일**



60% 효율 태양전지

박남규 성균관대 화학공학부 종신석좌교수

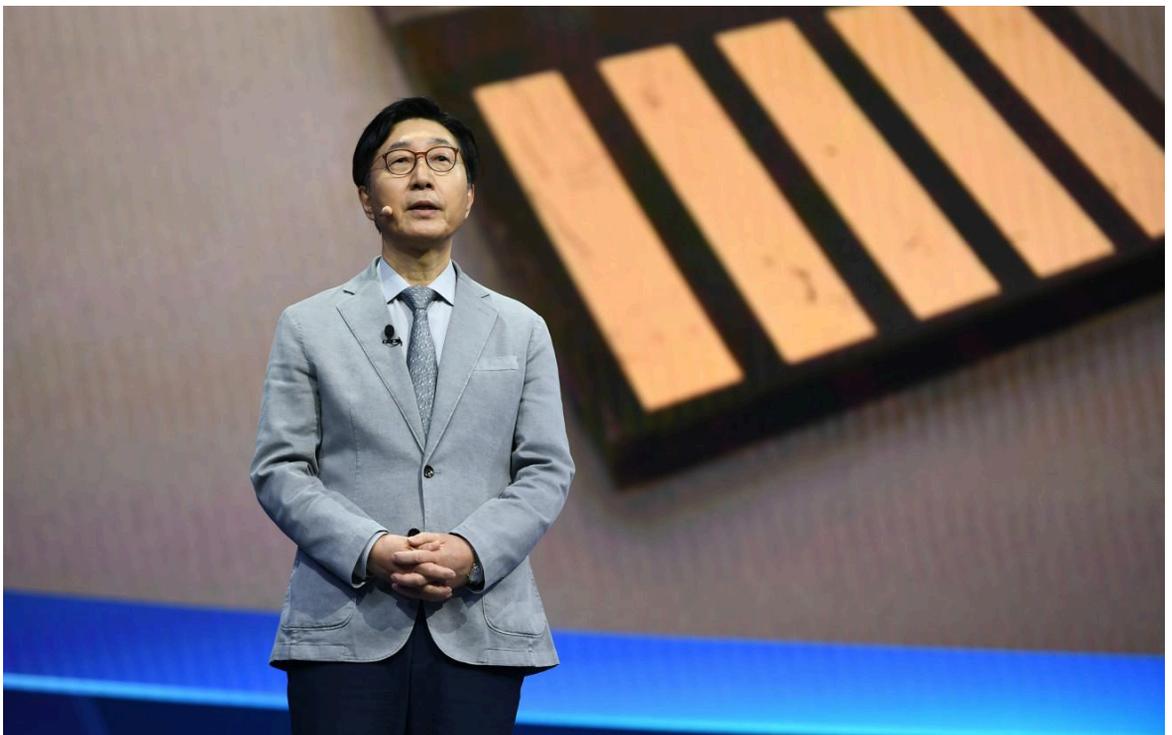
[영상 보러가기](#)

미국 데스밸리에서 섭씨 55도(화씨 131도)를 기록하며 역대 최고 기온을 경신했고, 미 서부 전역은 폭염과 산불로 큰 피해를 겪고 있습니다. 2024년 6월 지구 평균 기온도 관측 이래 최고치를 기록하며, 13개월 연속 최고 행진을 이어가고 있습니다. 전 세계적으로 폭염, 홍수, 산불 등 기상이변이 잇따르고 있으며, 기후학자들은 화석연료 사용에 따른 지구온난화가 원인이라고 경고합니다. 2024년 9월 포르투갈 중북부에서 시작된 산불이 서울 면적의 1.5배에 달하는 9만 헥타르를 태우며 2017년 이후 최악의 화재로 번졌습니다. 주민과 소방관들이 진화에 나섰지만 피해는 커지고 있으며, 인근 국가들이 지원에 나섰습니다. 동시에 유럽 중부와 동부는 저기압 폭풍 '보리스'로 인해 홍수 피해가 속출해 23명이 사망했습니다. 유럽연합은 이를 기후 파괴의 증거라고 경고했습니다. 유엔개발계획은 세계 기상의 날을 맞아, 2050년 미래 기상예보 영상을 통해 어린이 예보관이 폭염과 가뭄 등 기후 재난의 심각성을 전했습니다. 이는 지금 행동하지 않으면 극한 기후가 일상이 될 수 있다는 경고와 함께, 기후위기 해결을 촉구하는 미래 세대의 메시지를 담고 있습니다.

영상의 내용은 폭염, 대형산불, 홍수와 같은 극한기후로 인류의 삶이 위협받고 있고, 미래세대에는 더 큰 재앙이 될 수 있다는 경고 메시지입니다.



이와 같은 극한 기후의 원인은 화석연료가 뿜어내는 이산화탄소로 인한 지구온난화 때문입니다. 지구에 도달하는 태양에너지는 일 년에 약 380만 엑사 주울입니다. 1 엑사줄은 백경 주울, 즉 십억 곱하기 십억 주울에 해당합니다. 지구 인류가 일년에 사용하는 총 에너지는 약 600 엑사 주울로, 태양에너지의 고작 0.0016 퍼센트입니다.



하루에 도달하는 태양에너지의 양만 있어도 지구 전체의 연간 에너지를 충당할 수 있는 만큼 매우 많은 에너지입니다. 태양에너지를 우리가 사용할 수 있는 전기 에너지로 변환할 수 있다면, 화석연료처럼 태우지 않고도 에너지를 얻기 때문에 이산화탄소 배출이 없는 기술이 될 것입니다. 태양에너지를 전기에너지로 변환하기 위해서는 태양전지라는 것이 필요합니다. 따라서 태양전지는 지구온난화를 멈출 수 있는 매우 유용한 기술인 동시에 태양이 있는 한 계속 사용할 수 있기 때문에 신재생 에너지 기술입니다. 태양전지가 생산할 수 있는 전기 양은 와트라는 단위로 나타냅니다.



전 세계에 설치된 태양전지의 누적 설치량은 꾸준히 증가하여 2022년 1 테라와트 (=1000 기가와트) 규모입니다. 1 기가와트는 보통 원전 1기에 해당된다고 보면 원전 1000 기가 설치된 정도라고 보시면 됩니다. 2050년까지 탄소배출을 억제하여 넷제로를 만들기 위해서는 이보다 훨씬 많은 약 75 테라와트 누적설치량이 필요하다고 합니다. 이러한 목표를 달성하기 위해서는 매년 설치되는 태양전지 발전량도 지금보다 더 많아져야 합니다. 단순계산을 하여도 75 테라와트를 달성하기 위해서는 매년 3테라와트 정도 설치돼야 하는데, 2023년 설치량이 약 400 기가와트인 점을 고려하면, 연간 설치량은 S 곡선처럼 매우 가파르게 증가할 것으로 예상됩니다. 그렇다면 연간 증가하는 수요량을 충족하기 위해서는, 현재 효율 20% 수준의 태양전지 기술을 이용할 경우 태양전지를 아주 많이 만들어야 하고 또 아주 많은 공간도 필요할 것입니다. 만약 현재 기술보다 2배 3배 높은 변환효율을 갖는 태양전지가 개발된다면, 설치 면적도 줄어들게 되고 연간 발전량도 크게 증가하겠죠. 태양전지는 어떻게 작동할까? 이런 질문에 답하기 위해 간단한 애니메이션을 준비했습니다.

애니메이션에서 보는 바와 같이 태양전지는 태양 빛을 받으면 전기를 발생시켜 전구를 켜는 원리입니다.



전기는 전자의 흐름으로 설명할 수 있는데, 어떻게 태양전지가 빛을 받으면 전자가 도선으로 흐를까요? 좀 더 자세하게 설명하면 태양전지를 구성하는 물질 중에서 광흡수 반도체가 있는데, 빛을 받으면 광흡수반도체의 밸런스밴드에 있는 전자가 빛에너지를 얻어 에너지 준위가 높은 컨덕션밴드로 들뜨게 되고, 들뜬 전자를 pn 접합 원리를 이용하여 분리하여 전극으로 모이게 하면 태양전지가 전기를 만들게 됩니다. 이때 에너지 변환효율은 광흡수 반도체 물질의 흡광계수와 들뜬 광전자의 이동도와 수명에 비례하게 되는데, 특히 흡광계수가 크면 클수록 전자를 들뜨게 하는 데 유리하고, 광전자의 이동도가 빠르고 수명이 길면 역시 높은 효율에 유리합니다. 따라서 광흡수반도체를 고려할 때 이러한 광전자공학을 염두에 두고 태양전지를 설계해야 합니다. 2021년 8월 우리 연구팀에서 고체 페로브스카이트 태양전지를 세계에서 최초로 개발했습니다. 페로브스카이트는 무기 원소로 만들어진 광흡수 반도체로 기존의 알려진 물질에 비해 흡광계수가 매우 높고 광전자 이동도와 수명이 우수합니다. 처음 보고할 당시 효율은 약 10% 수준이지만, 현재는 27% 수준의 매우 높은 효율이 보고되고 있습니다. 페로브스카이트 태양전지는 실리콘 단결정 태양전지보다 더 높은 효율이 보고되고 있으며, 실리콘과 텐덤을 이루면 효율은 34% 이상 수준으로 더욱 더 높아집니다. 우리나라 한화큐셀을 비롯하여 전세계 태양전지 관련 기업들이 앞다투어 양산 계획을 발표하고 있습니다. 페로브스카이트 태양전지는 실험실에서 발견된 신소재와 신기술이 실험실에서 나와 산업화가 되는 과정을 보여주는 아주 좋은 예라고 할 수 있습니다.

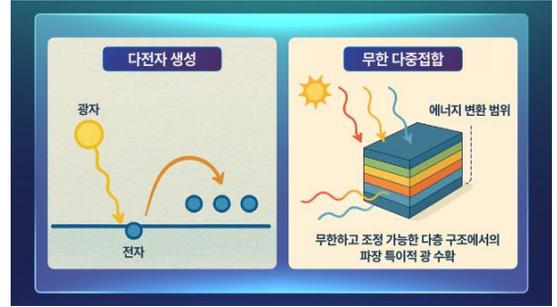


60% 태양전지를 위한 과학적 상상력

남기태 서울대 재료공학부 교수

[영상 보러가기](#)

태양은 매 순간 우리에게 엄청난 양의 에너지를 보내고 있습니다. 하지만 이 에너지는 단순하지 않습니다. 마치 속도도 다르고, 방향도 다른 수많은 야구공이 한꺼번에 날아오는 것처럼, 각각의 광자는 에너지와 파장이 모두 다릅니다. 우리가 하려는 일은 이 다양한 광자들을 하나도 놓치지 않고, 정확하게 '쳐서' 전기로 바꾸는 것입니다. 60% 효율의 태양전지를 만든다는 건, 그 수많은 커브볼 중 60%를 홈런으로 만드는 일과도 같습니다. 이것은 물리학과 화학, 나노공학이 함께 도전하는 현대판 불가능에의 도전입니다. 그렇다면, 우리는 어떤 전략으로 이 도전을 해낼 수 있을까요?



이것이 바로 물리학에서 유명한 오제르 효과를 (Auger process)를 이용한 전략입니다.

또한, 각기 다른 파장을 가장 잘 흡수할 수 있도록 설계된 무한한 접합(junction) 구조를 쌓아 올리는 것도 하나의 방법입니다. 이런 방식으로, 더 많은 전자를 더 효율적으로 만들어낼 수 있게 되는 것이죠.

자연은 이미 수억 년 전부터 이 문제를 해결해 왔습니다. 식물은 광합성을 통해 태양 에너지를 화학 에너지로 바꾸는데, 그 과정에서 양자 코히런스(quantum coherence-결맞음) 현상이 나타납니다. 빛의 에너지는 엽록체 내부를 여러 경로로 '동시에' 퍼지며, 최적의 경로를 스스로 선택해서 이동합니다. 이 놀라운 전략을 이해하고, 모방한다면, 우리가 꿈꾸는 전기 대신 화학 에너지로의 전환도 가능한 시대가 열릴 것입니다. 왼쪽의 이미지는, 이러한 자연 전략의 핵심인 강간 기반 촉매 구조입니다. 놀랍게도, 이 구조는 자연 안에서 매우 정밀하게 작동합니다. 마지막 전략은, 빛 자체를 우리가 통제하자는 것입니다. 자연에는 존재하지 않지만, 우리가 만들 수 있는 메타물질(metamaterials)은 빛의 경로, 속도, 흡수를 인위적으로 조절할 수 있는 나노 구조체입니다.



첫째, 멀티 일렉트론 제너레이션 (multi-electron generation) 그러니까, 하나의 광자로 여러 개의 전자를 만들어 내는 전략입니다.

둘째, 무한한 접합(junction)구조: 지금은 소수의 경계면에서 변환이 일어나지만, 모든 파장을 가장 잘 흡수할 수 있도록 맞춤형 구조를 무한히 배열하는 것입니다.

셋째, 자연의 전략을 모방하는 것입니다. 광합성처럼, 빛을 직접 화학 에너지로 바꾸는 방법입니다.

넷째, 빛의 경로를 제어하는 기술, 즉 메타물질(metamaterials)과 빛 가두기(light trapping) 기술을 통해, 빛이 물질 속에서 더 오래 머무르도록 유도하고, 그 에너지를 더 효율적으로 활용할 수 있는 시간과 공간을 늘리는 전략입니다.

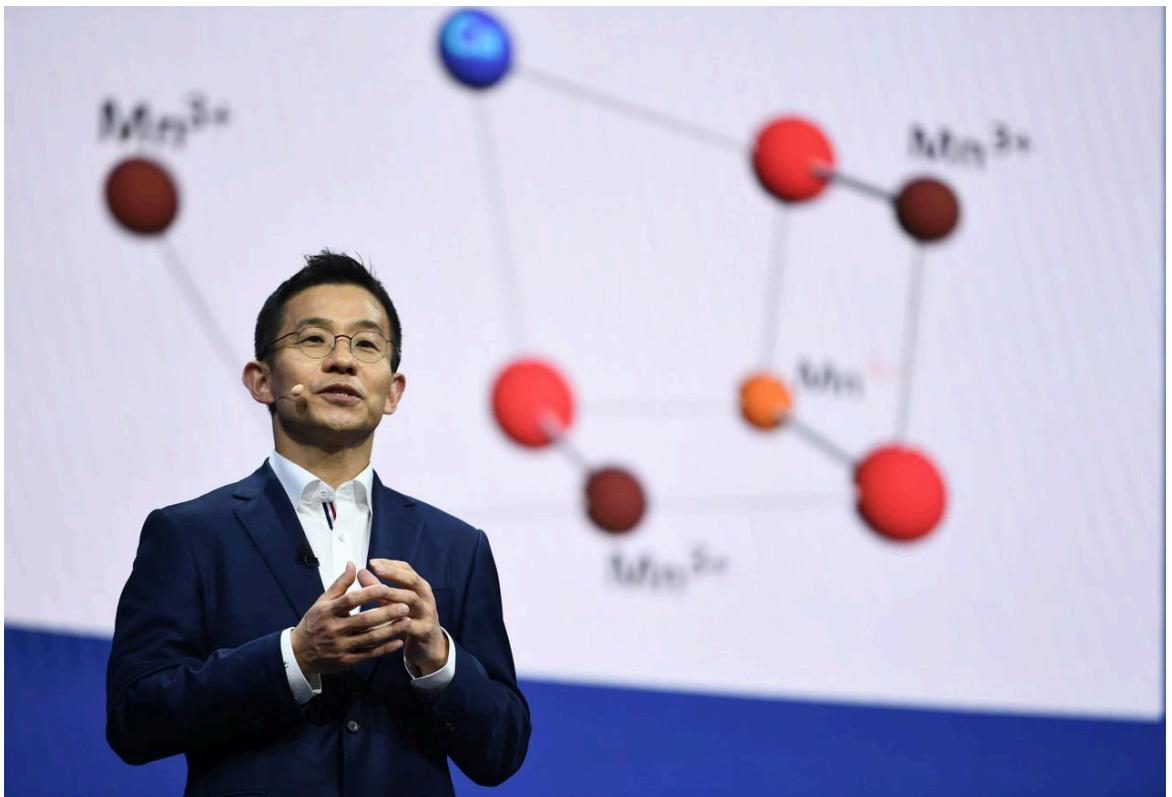
일반적인 태양전지는, 에너지가 높은 빛(광자) 하나로 전자 한 개만 만들어냅니다.

그 나머지 에너지는 대부분 열로 날아가 버리죠. 그런데 만약 남은 에너지를 주변 전자에게 나눠줘서 추가 전자를 만들어낼 수 있다면 어떨까요?



지금 보시는 그림은 저희 연구실에서 만든 나노 구조의 예시입니다. 투명한 구조체에 빛이 닿으면, 그 경계에서 마치 무지개빛 소용돌이처럼 에너지가 회오리쳐 몰입됩니다. 마치 블랙홀 주변의 강한 중력처럼, 빛이 그 안에 머물고, 에너지가 한곳으로 모이며(focusing) 결

국 전자로 전환될 가능성이 더욱 높아지게 되는 것이죠. 이런 방식으로, 우리는 빛의 흐름을 설계하고, 빛의 시간을 늦추고, 에너지를 손실 없이 모으는 시스템을 꿈꿉니다. 지금까지 말씀드린 네 가지 전략은, 기존 태양전지의 한계를 넘어 우리가 빛을 직접 설계하고, 자연을 재해석하며, 불가능한 효율에 도전하는 여정입니다. 이 여정은 단순한 기술의 진보를 넘어서, 에너지 문제, 기후 위기, 그리고 인류의 미래를 바꾸는 열쇠가 될 수 있습니다.





페로브스카이트 탠덤 태양전지 과학의 비약적 발전에서 상업적 실행 가능성까지의 로드맵

문수진 한화솔루션 큐셀부문 판교 R&D센터장

[영상 보러가기](#)

SBSX
그랜드
퀘스트

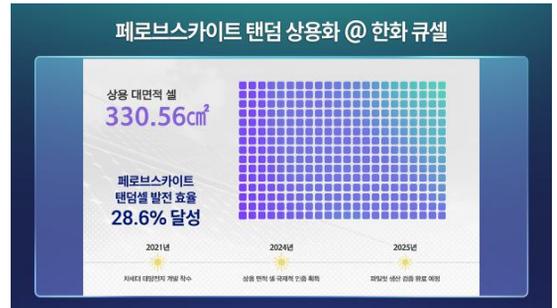
기술주권 확보, 그 10가지 질문

앞서 교수님들께서 새로운 태양전지, 60% 발전 효율을 내는 태양전지에 대해 소개해 주셨는데요. 글로벌 에너지 수요는 계속해서 증가하고 있고, 화석 연료를 대체할 고효율 신재생 에너지원에 대한 수요 역시 높아지고 있습니다. 대표적인 재생 에너지원 태양광, 산업에서는 고효율 태양전지 개발을 위해서 어떤 기술 개발을 진행하고 있고 기술의 완성도는 어느 정도인지에 대해 말씀드리려 합니다. 1883년도에 미국의 프리츠에 의해 개발된 최초의 태양전지 발전 효율은 1%에 불과했습니다. 발전 효율 1%란 태양전지가 흡수한 태양광의 1%만 전기로 변환할 수 있다는 건데요, 2025년 현재 실리콘 태양전지의 발전 효율은 20% 이상입니다. 오랜 기간의 연구개발과 적극적인 투자를 통해 20% 이상의 발전 효율을 달성했고, 태양광 모듈 가격 역시 지난 50년 사이에 크게 낮아졌습니다. 주택 지붕 위에 설치하여 가정에 필요한 전력을 생산하는 것뿐만 아니라 상업용, 대규모 발전용, 최근에는 영농형 태양전지에 대한 관심도 높습니다.



폴리실리콘이라는 원재료로 웨이퍼를 만들어, 여러 물질들의 증착과정들을 거치게 되면 태양전지가 만들어 지는데요. 각각의 전지들을 연결하여 만든 모듈을 대량으로 설치하여 전력을 생산하게 됩니다. 글로벌 태양전지 시장에서 실리콘 태양전지가 가장 높은 시장 점유율을 차지하고 있습니다. 실리콘 태양전지가 이론적으로 달성할 수 있는 최대 발전 효율은 29% 정도입니다. 시중에 판매되는 실리콘 태양전지의 발전 효율은 이미 23~24%로 이론적 한계치에 근접해 더 이상의 고효율 발전을 기대하기는 어렵습니다. 앞서 소개된 페로브스카이트라는 물질은 광흡수율이 높고, 실리콘 셀과 함께 사용했을 때 단파장과 장파장의 빛을 상호 보완적으로

흡수해 발전 효율을 극대화 시킬 수 있다는 장점이 있습니다. 페로브스카이트-실리콘 탠덤셀의 이론 한계 효율은 44%로, 실리콘 단일 셀의 29%에 비해 1.5배 이상 높습니다.



큐셀은 지난해 말 상용 면적인 330.56cm²의 실리콘 셀을 사용하여 발전 효율 28.6%의 페로브스카이트-실리콘 탠덤 셀 최고 기록을 달성했습니다. 이번 기록은 현 태양전지 양산 웨이퍼 중 주류를 이루고 있는 M10 웨이퍼(wafer) 사용 및 당사가 대규모로 양산하고 있는 양자(Quantum) 기술 기반의 실리콘 태양전지를 하부셀로 그대로 적용하고 독자개발한 페로브스카이트 상부셀 기술을 접목하여 상용화에 가까운 탠덤 태양전지로서 최고 효율을 구현했다는 데 큰 의미를 가집니다. 또한 2024년에는 1,300억 이상을 투자해 충북 진천에 탠덤 셀 파일럿 생산 라인을 구축했으며, 상용화를 위한 연구개발에 집중하고 있습니다. 끊임없는 기술 혁신으로 세계에서 가장 먼저 차세대 태양전지의 대규모 양산과 상업화를 성공시켜 글로벌 태양광 시장을 이끌어 갈 계획입니다.

태양광 발전의 경제성은 앞으로 더 높아질 것으로 보입니다. 에너지 발전원별 경제성 비교를 위해 균등화발전비용이라는 지표가 가장 널리 활용되고 있는데, 균등화발전비용이란 발전설비의 전 수명주기 동안의 평균 발전단가를 의미합니다. 국제재생에너지기구(IRENA)에 따르면 기술 발전과 효율성 개선이 지속적으로 이루어질 경우 태양광 균등화발전비용이 2050년에는 2023년 대비 50% 수준으로 크게 낮아질 것으로 예상하고 있습니다. 페로브스카이트-실리콘 탠덤 셀은 동일 면적에서 더 많은 전력을 생산할 수 있기 때문에 균등화발

전비용을 낮추는데 있어 크게 기여할 것으로 보입니다. 국제에너지기구(IEA)는 넷제로 로드맵 보고서에서 세계 에너지 공급량 중 신재생에너지 공급 비율이 2030년 28%에서 2050년 71%로 확대될 것이라고 예상했는데요. 한국에 비해 재생에너지 발전 단가가 현저히 낮은 유럽에서는 이미 지난해 태양광 발전 비중이 처음으로 석탄 발전 비율을 넘어섰습니다. 기술 혁신으로 태양광 발전의 효율성과 경제성이 극대화된다면 에너지 전환 시기는 더욱 앞당겨질 것이라 생각합니다.





SESSION 5. 패널 토크 태양전지 효율, 60% 벽 넘을 때 벌어지는 일

영상 보러가기



박남규
성균관대 화학공학부 종신석좌교수



남기태
서울대 재료공학부 교수



문수진
한화솔루션 큐셀부문 판교R&D센터장

● 정석문 아나운서

에너지야말로 기술 주권을 논의하는 데 있어서 가장 중요한 화두가 아닐까 싶은데요. 연사님들을 모시고 조금 더 자세한 이야기를 이제 나눠보겠습니다. 세계 최초로 국내에서 고체 페로브스카이트 태양전지가 개발되고 자체 개발한 셀로 28.6% 세계 최고 발전 효율을 기록한 성과는 굉장히 자랑스러운 우리의 기술이 아닌가 싶습니다. 오늘 저희 포럼의 제목 그랜드 퀘스트는 남들이 가보지 않은 길을 간다는 의미도 담고 있는 것 같습니다.

● 주시은 아나운서

무엇보다 세 분 다 새로운 분야를 개척하는 데 남다른 이력을 가지고 계신데요. 본격적인 태양전지 얘기를 하기에 앞서서 혁신가로 새로운 분야를 개척해 가는 데 가장 필요한 조건은 무엇이라고 보시는지 한 분씩 말씀해 주실까요?

● 박남규

어떤 혁신적인 기술 개발을 위해서는 불편한 부분들을 그냥 받아들이지 않고, 항상 개선하려고 하는 어떤 생각이 필요할 것 같습니다. 세상에 없는 기술을 만들기 위해서는 항상 현재 있는 기술에 만족하지 않고, 무언가 어떤 새로운 소재, 새로운 어떤 것에 대한 어떤 관심을 갖는 것도 매우 중요할 거라고 생각을 하고 있습니다.

● 남기태

저도 이제 계속 고민입니다. 과연 어떤 것들이 혁신을 이루는 가장 기본이 되는 걸까? 첫 번째 중요한 것은 관찰력이라고 생각을 합니다. 과학자들에게 관찰력이라고 하면 어떤 과학의 결과에 대해서 세부적으로 실험을 잘하고, 관찰을 잘한다는 걸로 생각하게 되실 것 같습니다. 관찰력의 의미를 좀 넓게 생각을 하면 아까 박남규 교수님께서 말씀하신 것처럼, 세상을 관찰하는 능력

이 굉장히 중요한 것 같습니다. 세상이 과연 어떤 걸 필요로 하고 앞으로 어떻게 나아가는지, 미래에 대한 관찰을 할 때 좋은 아이디어가 나옵니다. 그런 아이디어가 있을 때 실험을 하는 과정 속에서, 세부적으로 관찰을 잘하면서 이런 혁신들이 이루어질 거다라는 생각이 들고요. 혁신이라는 것은 굉장히 시간이 많이 걸립니다.

● 문수진

스스로 혁신가라고 생각해 본 적은 없지만, 제가 여태까지 해온 연구 개발들이 나름 차세대 기술들을 하고 있었습니다. 그러면서 제가 배우게 된 거는 혁신이라기 보다는 한 가지 토픽을 꾸준히, 좀 약간 버팀의 미학을 가지고 진행을 하게 되면 혁신과 같은 결과를 얻지 않을까 싶습니다. 무수히 많은 실패를 하게 된다고 생각합니다. 우리에게 그런 무수히 많은 실패에도 회복할 수 있는 회복 탄력성 같은 그런 것들이 필요한 것 같습니다.

● 정석문 아나운서

그러면 이제 60% 효율의 태양 전지 얘기를 좀 듣고 싶은데요. 이게 상용화 된다면은 미래가 어떻게 변할까라는 게 굉장히 궁금합니다. 그리고 이게 언제쯤 달성 가능할까라는 것도 궁금한데요.

● 문수진

60% 태양전지에 대해서 논의를 하기 위해 자리를 했는데요 저는 될 거라고 믿습니다. 60% 태양전지가 우리가 실생활에서 가질 수 있다면 아주 많은 것들이 변하게 되겠죠. 현재 배터리를 아파트 주차장에서 충전을 하는데, 60% 태양 전지를 차 위에 얹는다면 모빌리티 자체가 그런 충전이 필요 없어집니다. 바로바로 주행을 하면서 충전이 되는 배터리를 충전할 수 있는 것부터 시작해서 여러 가지 많은 변화들이 있을 것 같아요. 지금은 엄청나게 많은 면적이 필요하다는 게 어찌 보면

태양광의 단점인데요. 60%라는 효율을 가지게 된다면 아주 적은 면적을 활용해서 동일한 전력을 생산할 수 있겠죠. 그런 장점들이 있을 것 같습니다. 제가 생각할 때는 실험실에서는 10년에서 15년 사이에 작은 사이즈라도 저희가 가질 수 있지 않을까 싶습니다. 하지만 실제 기업에서 제품화 하는 데에는 그 2배 이상의 시간이 걸리지 않을까 생각합니다. 비용도 굉장히 중요하고, 그리고 물질의 안정성도 중요합니다. 지금 실리콘 태양전지가 낼 수 있는 정도의 내구성 이런 것들을 고려한다면 실험실보다는 좀 더 많은 시간이 걸리겠죠.

● 남기태

문센터장님 말씀하신 거에 이어서 하면, 미래에는 우리 인류 모두에게 정말 깨끗한 전기가 필요한 시기입니다. 그래서 전기 수요는 계속 늘어나고 있죠. 또 AI 시대에 맞춰서 전기가 늘어나야 되고요. 로봇도 큰 변화가 있고, 새로운 자동차들도 요즘 많이들 전기자동차 형태로 나오고 있고요. 60% 태양전지가 된다면 자동차나 로봇의 이런 태양 전지들이 어떤 주 동력원으로서도 큰 역할을 할 수 있을 것 같다고 상상을 해 봅니다. 저도 과학자지만 미래를 참 예측하는 게 어렵습니다. 저희는 항상 긍정적으로 5년 후다 10년 후다 얘기를 드립니다. 어떨 때는 그보다 더 빨리 올 때도 있고, 어떨 때는 좀 늦을 때도 있습니다. 저는 60%의 태양 전지를 우리 박남규님께서 해 주시지 않을까라고 감히 예상을 해 봅니다.

● 박남규

그러니까 60% 효율을 언제 달성할 것인가라는 것은 우리가 어떻게 연구를 하느냐에 따라서 달린 것 같아요. 60%를 달성해야만이 2050년까지의 넷제로(Net Zero), 우리가 이산화탄소를 줄이는 데 기여를 할 수 있다면 그 시기를 앞당기는 것은 연구자의 몫이라고 생각을 하고 있습니다. 언제 될 거라는 것보다는 언제까지 우리가 해야 된다는 것이 더 맞지 않을까 하는 생

각이 들고요. 지금 화석연료 발전 효율은 약 많아봐야 40% 정도입니다. 60% 태양전지가 만약에 세상에 나오게 된다면은 그것보다 훨씬 많은 효율이기 때문에 화석 연료와의 어떤 경쟁은 불필요하게 될 것입니다. 효율이 오르게 되면 그만큼 가격이 아주 낮아지는 그런 효과가 있습니다. 그렇게 된다면 모든 사람들이 어떤 전기를 발생하는 생산자가 될 수도 있습니다. 어떻게 보면은 에너지의 민주화가 이루어질 수 있다는 생각을 하고 있습니다. 그래서 60% 태양전지의 개발은 기후 변화와 같은 문제를 해결할 뿐만 아니라, 에너지의 민주화 까지도 생각해 볼 수 있다 이렇게 봅니다.

● 정석문 아나운서

문수진 센터장께 묻고 싶은데요. 한화가 중국의 태양전지 기업들과의 경쟁에서 경쟁력을 가지고 있는데 기술적 우위 전략에 성공했던 요인이 무엇일까요?

● 문수진

흔한 대답일 수도 있는데 선택과 집중이라고 생각합니다. 사실상 중국의 시장 영향력은 아무도 무시할 수 없을 정도로 뛰어납니다. 가격만 저가가 아니라 대량의 물량을 공급하는 것 플러스해서 기술력도 우수합니다. 그렇기 때문에 저희 한화큐셀은 오히려 고효율 고내구성 그리고 디자인에 중심을 둔 프리미엄 마켓을 공략한 거죠. 시장에 대한 좀 선제적인 조사, 특히나 미국은 자국 보호 정책을 펼치고 있기 때문에 인플레이션 감축법을 선제적으로 대응을 해서 이런 시장에 대한 좀 이득을 가져올 수 있게 노력을 했습니다. 마지막으로 가장 중요한 건 차세대 기술에 대한 투자라고 생각합니다. 오늘도 여러분들께 한화에서 진행하고 있는 페로브스카이트 실리콘 탠덤 셀에 대해서 소개를 드렸습니다. 좀 보여드리고 싶어서... 저희 회사에서 만들고 있는 M10 웨이퍼 사이즈의 탠덤 셀입니다. 이런 차세대 기술에 대한 투자를 아끼지 않고 하기 때문에 기술력에 있어서 경쟁력을 가질 수 있었다고 생각합니다.



● 정석문 아나운서

이게 28%의?

● 문수진

28.6%의 효율을 낼 수 있는 M10 웨이퍼의 탠덤 셀입니다.

● 주시은 아나운서

이어서 현장에서 보내주신 질문들 한번 드려보겠습니다. 페로브스카이트 구조를 가지는 화합물이 굉장히 많다고 알고 있는데 가장 유망한 물질은 무엇이며 그 이유는 무엇인지 질문 주셨어요.

● 박남규

페로브스카이트 물질은 좀 약간 거슬러 올라가면 우리가 초전도체라고 잘 알려져 있는 물질들이 있습니다. 1987년도에 페로브스카이트 구조를 가지고 고온 초전도체를 만든 밀러 박사께서 노벨 물리학상을 받았습니 다. 당시만 하더라도 고온 초전도체 물질은 금속에서 발견되는 것이었는데 밀러 박사께서는 그 산화물을 가지고 고온 초전체를 만들었습니다. 그때 그 산화물의 구조 중에서 페로브스카이트 구조를 갖는 산화물을 가지고 고온 초 전도체를 만들었습니다. 그러한 것들이 옥 사이드 물질 중에는 좋고요. 지금 저희들이 태양전지 중에서는 산소 대신에 할로겐 원자로 치환한 할라이드 페로브스카이트가 태양전지 쪽에서는 매우 우수한 물

질로 지금 알려져 있습니다. 페로브스카이트라는 것은 어떤 결정 구조를 말하기 때문에 거기에 다양한 원소들을 가지고 다양한 어떤 물질을 만들 수가 있습니다. 어떤 물리적인 특성에 따라 가지고 태양 전지에도 사용될 수도 있고, 고온 초전도체 그 다음에는 압전체, 여러 가지 어떤 물질의 촉매 이런 곳에도 사용될 수 있기 있습니다. 때문에 페로브스카이트라는 어떤 하나의 어떤 플랫폼 물질이 다양한 어떤 응용 분야에 고루 적용될 수가 있고 그 응용 분야에 적합한 조성들이 다 있다고 이렇게 말씀드릴 수 있겠습니다.

● 정석문 아나운서

또 질문이 들어왔는데요. 페로브스카이트 태양전지 등 새로운 태양 전지는 입사각이나 온도의 영향을 덜 받는지도 궁금합니다라고 질문 주셨거든요.

● 문수진

페로브스카이트 태양전지 같은 경우에 장점으로 거론되고 있는 것이 실리콘 태양전지에 비해서 이런 일조량이나 온도에 대해 덜 민감하게 반응을 합니다. 실리콘 태양전지 같은 경우에는 실험실에서는 원선(Onesun)이라고 하는 컨디션을 얘기를 합니다. 아주 일조량이 굉장히 높은 상태에서 최대 에너지를 낼 수가 있죠. 페로브스카이트 같은 경우에는 그보다 적은 양의 빛으로도 동일한 정도의 에너지를 낼 수 있다는 게 큰 장점입니다. 그리고 이 물질 자체의 특성으로 인해서 온도에 대한 민감도가 낮습니다. 실리콘 태양전지와 비교했을 때 실생활에 좀 더 적합한 타입의 태양 전지라고 말씀드릴 수 있을 것 같습니다.

● 주시은 아나운서

좀 더 이야기를 나누면 좋겠습니다만 시간 관계상 이쯤에서 마무리를 해야 될 것 같은데요. 마지막으로 혹시 이 자리를 빌어서 추가로 언급하고 싶으신 것이 있으실까요.

● 남기태

오늘 우리 이 포럼의 주제가 그랜드 퀘스트잖아요. 큰 질문을 가지는 거는 아까 초반에 나온 것처럼 또 새로운 혁신을 만드는 데 굉장히 중요하다는 생각이 듭니다. 근데 그랜드 퀘스트는 혼자 풀 수가 없습니다. 오늘 이 포럼에 정말 여러 다양한 분들도 오시고, 저희 포럼만 하더라도 여기 또 학계에 저명하신 분 또는 산업계도 같이 오셨습니다. 그랜드 퀘스트를 저희가 함께 같이 만들고 또 여기 계신 분들하고 하나하나 또 해결해 갈 때 우리나라의 중요한 기술들이 또 새롭게 탄생할 수 있지 않을까 기대를 해봅니다.

● 정석문 아나운서

태양전지 변환 효율 60%에 도전하는 우리 국내 연구진 그리고 학계의 노력 산업계의 노력 앞으로 계속될 겁니다. 여러분 많이 응원해 주시기 바랍니다.



SESSION 6. 옹스트롬 미터 시대 반도체 기술
머리카락 100만 분의 1 반도체



와트 다이어트: 실리콘 반도체 기술의 미래

신창환 고려대 전기전자공학부 교수

영상 보러가기

자료에서 보시듯이, 반도체 시장은 지난 수십 년간 꾸준한 성장을 해 오고 있습니다. 실제, 1990년 PC 시대 개막과 함께 50 빌리언 달러(500억 달러) 규모로 반도체 시장은 성장하였습니다. 이후, 2002년 모바일 시대의 개막과 함께, 반도체 시장은 PC시대 대비 약 3배 성장한 141 빌리언 (1천4백억 달러) 달러로 시장 규모가 확대 되었습니다. 이후, 코로나 팬데믹 직전인 2018년 AI 시대가 본격적으로 개막되며, 반도체 시장 규모는 모바일 시대 대비 약 3배 성장한 총 466억 달러까지 더욱 더 확대되었습니다. 특히 ICT 기기가 생성하는 데이터와 사람이 생성하는 데이터의 폭발적 증가가 반도체 시장 성장의 견인차 역할을 하고 있습니다. 인공지능 시대의 성숙과 함께, 2030년에는 반도체 시장이 1조 달러 규모 이상으로 성장할 것으로 전망됩니다. 반도체 시장 성장을 이끈 핵심 기술은 바로 반도체 칩을 구성하는 단위 소자 크기, 즉 트랜지스터의 물리적 크기의 성공적인 미세화에서 찾을 수 있습니다.

은 불가능에 가깝고, 최고 속도가 3백9십만 km/h에 이를 수 있는 것도 어려울 것입니다. 하지만, 이런 단순 비교를 통해, 타 산업에 비해 반도체 기술의 발전 속도가 얼마나 눈부시게 성장하였는지 여러분들은 체감하실 수 있을 것으로 생각합니다. 정리하면, 반도체 소자 크기의 미세화는 단순한 물리적 크기 축소가 아닌, 반도체 소자의 성능과 효율, 가격의 혁명을 의미하는 것입니다.

앞서 언급한 대로, 반도체 칩을 구성하는 반도체 소자/공정 기술은 지난 수십 년간 눈부신 발전을 이루어 왔습니다. 90nm부터 10nm 이하 기술 노드에 이르기까지, 실리콘 반도체 제조공정 기술은 다양한 기술적 혁신을 달성해 냈습니다. 2003년 90nm 공정 기술에서는 실리콘 원자 간 간격을 조절하여 전자의 이동도를 향상시킨 스트레스 엔지니어링 기술 도입, 2007년 45nm 공정 기술에서는, 더 높은 유전상수값과 금속 게이트 기술을 반도체 소자의 게이트 영역에 도입하였으며, 2011년 22nm 기술에서는 2차원을 넘어 3차원 반도체 소자 구조, 즉 물고기 지느러미 모양을 본떠 만든 핀펫 기술이 도입되었습니다. 현재는 7nm, 5nm, 3nm 공정까지 발전하며 핀펫(FinFET)을 넘어선, GAA FET(Gate-All-Around Field Effect Transistor) 구조를 가진 반도체 소자가 양산되고 있습니다. 앞서 말씀드린대로, 지난 20년 아니 반세기 동안 반도체 소자의 물리적 크기는 수백~수천배로 성공적으로 줄일 수 있었습니다. 즉, 더 작은 반도체 소자로 구성된 반도체 집적회로 칩들은 고성능, 고밀도, 저전력 기능을 달성할 수 있었고, 그러한 기술 진보는 PC시대, 모바일 시대, 인공지능 시대를 구현하는 핵심 인프라 요소로서 역할을 충실히 해왔습니다.



여러분의 이해를 돕기 위해서, 반도체 미세화의 의미를 자동차 산업과 비교해 설명해 보겠습니다. 지난 반세기 동안 자동차의 성능이 반도체 제조 공정기술의 성능 향상만큼 성장했다고 가정해 봅시다. 첫째, 비용 측면에서 가장 비싼 롤스로이스 고급 자동차 가격은 현재 약 40달러 정도가 되었을 것입니다. 둘째, 효율성 측면에서는, 연료 1리터로 지구 두 바퀴를 돌 수 있는 효율성을 갖춘 자동차를 만들 수 있었을 것입니다. 셋째, 성능이라는 측면에서는, 부가티 시론의 최고 속도인 463km/h보다 약 8,400배 빠른 속도인 3,900,000km/h라는 속도를 가진 자동차를 만들어 낼 수 있었을 것입니다. 하지만, 40달러를 주고 자동차를 사기도 어렵고, 연료 1리터로 지구 2바퀴를 도는 것



원자 두께의 차세대 반도체는 나노를 넘어 옹스트롬 미터 시대를 열 수 있 는가?

이철호 서울대 전기정보공학부 교수

[영상 보러가기](#)

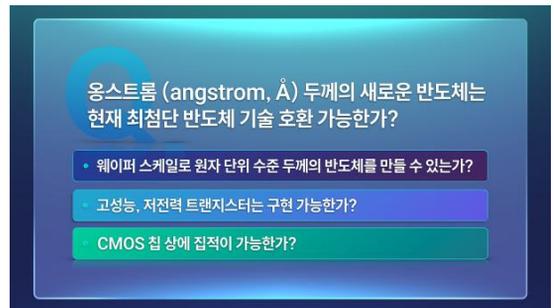
우리는 종종, 앞으로 나아갈 길에 대한 해답을 지난 역사 속에서 찾곤 합니다. 지금 우리가 마주한 질문—"앞으로 어떤 반도체가 필요할까?"—이 역시, 반도체 기술의 역사에서 실마리를 찾아볼 수 있습니다. 본격적인 이야기에 들어가기 전에, 트랜지스터가 어떻게 동작하는지를 아주 간단히 설명드리겠습니다. 여기 얇고 평평한 수도관이 있다고 생각해 보세요. 그 위를 긴 막대기로 눌러서 물의 흐름을 조절하는 장면을 떠올리면, 트랜지스터가 전류를 켜고 끄는 스위치 역할을 한다는 걸 쉽게 이해할 수 있습니다. 초기에는, 더 강하게 누르기 위해 게이트 유전체의 유전율을 높이고 금속 게이트를 도입한 HKMG(High-K Metal Gate) 기술이 45나노미터 노드에서 적용되었습니다. 그다음에는, 물을 한 방향이 아닌 여러 방향에서 누르듯 22나노미터에서는 FinFET, 그리고 최근 3나노미터에서는 GAA 구조로 발전하며 전류 흐름을 훨씬 효과적으로 제어하게 된 것이죠.

하지만, 아무리 정교하게 눌러도 채널 자체가 두꺼우면 조절에 한계가 생깁니다. 그래서 기술은 항상 채널을 더 얇게 만들려는 방향으로 진화해왔습니다. 그런데 이제는, 트랜지스터의 크기나 채널 길이를 줄이는 데 물리적 한계에 직면했습니다. 지금까지는 트랜지스터의 게이트 산화물, 금속, 소자구조를 바꾸며 이런 한계를 극복해 왔지만, 이제는 채널 물질 자체를 바꾸는 고민이 필요한 시점입니다. 실리콘을 완전히 대체한다기보다는, 기존 기술을 보완하면서도 새로운 가능성을 열어줄 수 있는 재료, 바로 그런 물질이 필요한 시대가 된 것입니다.

그럼 새로운 채널 물질의 요건은 무엇일까요? 앞서 트랜지스터의 작동 원리를 설명 드렸듯이, 성능을 유지하면서 소형화를 계속하려면 채널 물질은 가능한 한 얇아야 합니다. 우리가 상상할 수 있는 가장 얇은 수준은 바로 원자 단위, 오늘 제가 소개할 2차원 반도체가 바로 그런 물질입니다. 구조적으로는 우리가 잘 아는 흑연과 비슷하네요, 어릴 적 흑연이 '층상 구조'라서 연필로 쓸 수 있다고 배웠던 기억이 있으실 겁니다. 이 층상 구조의 가장 얇은 단위, 단 한 겹의 원자층이 바로 그래핀입니다.

그래핀은 전기적으로는 반도체가 아니지만, 비슷한 구조를 가지면서 반도체 특성을 지닌 전이금속 칼코겐 화합물이라는 2차원 물질들이 최근 주목을 받기 시작했습니다.

하지만 단순히 얇기만 하다고 해서 되는 건 아닙니다. 새로운 물질이 트랜지스터 채널로 쓰려면 또 하나 중요한 조건이 있습니다. 바로, 원자 수준으로 얇아져도 본래의 특성을 유지할 수 있어야 한다는 것입니다. 실리콘은 3차원적으로 원자들이 결합해 있기 때문에 두께가 너무 얇아지면, 원자 간 결합이 끊기고 물질 고유의 특성을 잃게 됩니다. 반면 2차원 물질은 두께 방향으로 화학결합이 거의 없는 구조를 갖고 있어서, 옹스트롬 수준의 두께에서도 본래 성질을 유지할 수 있습니다. 예를 들어, 전자 이동도나 열전도도 같은 중요한 물리적 특성이 얇아져도 그대로 유지되는 것이죠. 이러한 특성 덕분에, 2차원 반도체는 차세대 채널 물질로서 주목받고 있는 것입니다.



이번 발표에서는 옹스트롬, 즉 1억 분의 1미터 두께의 새로운 반도체가 과연 현재의 최첨단 반도체 기술과 호환될 수 있을까?라는 질문에 대해 이야기해 보려고 합니다. 이 질문은 세 가지 측면으로 나뉘볼 수 있는데, 저는 그중 첫 번째인 '웨이퍼 스케일로 원자 단위 두께의 반도체를 만들 수 있는가?'에 집중해서 말씀드리겠습니다. 그럼 본격적인 이야기로 들어가기 전에, 왜 우리가 지금까지 실리콘을 그렇게 잘 써왔는지, 실리콘이 얼마나 뛰어난 물질인지를 먼저 짚고 넘어가겠습니다. 우리가 흔히 아는 다이아몬드와 비교해보면 이해가 쉬운데요, 탄소와 실리콘은 주기율표상 같은 4족 원소로, 둘 다 흔한 원소입니다. 탄소는 다이아몬드처럼 매우 단단한 결정 구조를 이루지만, 이를 손바닥만 한 크기

로 만들기는 어렵습니다. 반면 실리콘은 거대한 단결정으로 성장시킬 수 있다는 게 가장 큰 장점입니다. 즉, 실리콘은 ‘잉곳’이라는 덩어리 형태로 자라난 다음, 그걸 얇게 절단해 직경 300mm 크기의 웨이퍼로 만들 수 있습니다. 이렇게 대규모 생산이 가능하고, 성능도 충분히 좋은 재료이기 때문에 지금까지 반도체 산업에서 실리콘이 주역이 될 수 있었던 겁니다.

이제 자연스럽게 이런 질문이 떠오릅니다. "그렇다면 우리가 기대하는 차세대 반도체, 예를 들어 원자 수준의 얇은 반도체를 300mm 웨이퍼 크기로 만들 수 있을까?" 이걸 지금으로선 정말 어려운 도전입니다. 그래서 여전히 실리콘이 반도체 산업의 중심에 있는 것이죠. 하지만 2차원 물질은 조금 다른 가능성을 보여줍니다.

이 물질들은 수직과 수평 방향의 표면 에너지 차이, 즉 구조적인 이방성(Anisotropy) 덕분에, 수평 방향으로만 원자 결합이 이루어지는 특징을 가집니다. 반면 실리콘 같은 3차원 물질은 세 방향 모두로 원자들이 결합



반면, 2차원 트랜지스터는 2011년에 처음 실험실 수준에서 만들어졌습니다. 초기에는 매우 조잡한 형태였지만, 현재는 삼성, TSMC, 인텔 같은 세계적인 반도체 기업들이 직경 300mm 웨이퍼에서 10나노미터 채널 길이를 가진 2차원 트랜지스터를 제작하는 데 성공했습니다. 물론 아직 소재 특성이나 소자 성능, 안정성 등 해결해야 할 과제가 많습니다. 그럼에도 불구하고, 불과 12~13년 만에 이뤄낸 이러한 진전은 기존의 성숙한 반도체 기술들을 기반으로 가능했던 일입니다.

특히 최근 몇 년 사이에는 대학 실험실을 넘어서 산업계, 그것도 메이저 기업들이 본격적으로 관심을 보이기 시작했습니다. 올해 IMEC—세계 최고 수준의 대학, 기업 협력 기반 반도체 연구소—에서 발표한 반도체 기술 로드맵에 따르면, 2030년대 중반, 정확히는 2037년에 2차원 반도체 트랜지스터를 A2, 즉 2 옹스트롬 기술 노드에 적용하여 상용화하는 것이 목표로 설정되어 있습니다. IMEC뿐 아니라, 삼성전자, TSMC, 인텔 등 글로벌 반도체 기업들 모두 자사 기술 로드맵에 2차원 반도체를 포함시키고 있으며, 비슷한 시기를 목표로 연구개발을 가속화하고 있습니다.



하며 큰 결정으로 성장합니다. 그래서 잉곳을 자르면 300mm 웨이퍼를 만들 수 있죠. 하지만 이렇게 입체적으로 결합하는 구조에서는 원자 단위 수준의 얇은 두께를 유지하기가 거의 불가능합니다. 반면, 2차원 물질은 얇은 두께를 유지하면서 수평 방향으로만 결합할 수 있기 때문에, 이론적으로는 원자 하나 두께의 물질을 300mm 웨이퍼 크기로 정렬해서 확장해 나갈 수 있는 겁니다.

실리콘 외의 새로운 물질을 반도체 산업에 도입한다는 것은 아직 인류가 본격적으로 걸어보지 않은 길이기에 많은 어려움이 예상됩니다. 하지만, 더는 미룰 수 없는 도전이기도 합니다. 저 또한 이 분야를 10년 넘게 연구해 온 한 사람으로서, 이 기술이 어떻게 현실화될지 매우 궁금합니다.



용스트롬 시대로 접어드는 반도체 기술의 난제들

권석준 성균관대 화학공학부 교수

[영상 보러가기](#)

옹스트롬 시대의 반도체 기술이 성립하기 위해서는 옹스트롬 스케일의 극히 미세한 구조물을 만들 수 있어야 합니다. 현재까지의 반도체 제조 공정, 특히 전공정에서는 이러한 미세 구조물을 만들기 위해 패터닝 공정이라는 것을 사용했죠. 여기서 말하는 패턴은 곧 미세한 전자 스위치, 즉, 트랜지스터의 전극과 게이트 패턴을 의미합니다. 패턴을 작게 만들려는 이유는 웨이퍼 위에 더 많은 트랜지스터를 만들어서 더 좋은 성능의 칩을 만들기 위함이에요. 지금까지의 패터닝 공정의 핵심 기술은 미술에서도 많이 쓰는 석판화 기법과 비슷한 포토리소그래피입니다. 이 기술은 짧은 파장의 빛을 이용하여 원하는 영역에서만 광화학반응을 일으켜 선택적으로 미세한 구조물을 만드는 기술을 의미해요. 작은 크기의 패턴을 포토리소그래피로 만들기 위해서는 파장을 짧게 하거나 NA, 즉, 개구 수를 늘려야 합니다. 예전에는 DUV 같은 심자외선을 쓰다가 이제는 EUV 같은 극자외선을 쓰는 것도 파장을 짧게 가져가기 위함이에요.

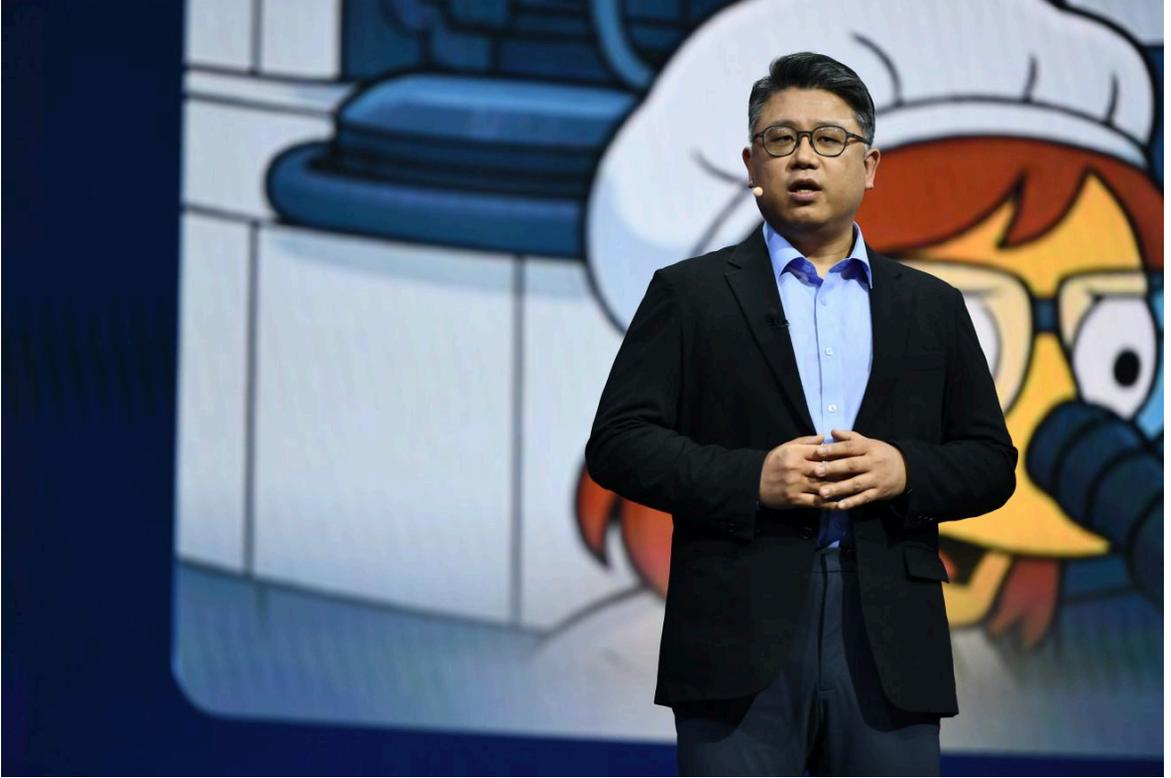
그런데 EUV에서도 이제 파장을 줄이는 것은 어려워니, 개구수를 늘려가고 있어요. 이 분야에서 가장 앞서 있는 네덜란드의 반도체 장비기업인 ASML은 현재 2세대 EUV 리소그래피(lithography) 장비로 불리는 0.55 NA짜리 장비를 만들고 있어요. 그리고 이들은 2030년대 초반 즈음해서 0.75NA짜리 3세대 장비를 개발할 계획을 가지고 있어요. 그렇지만 ASML 내부에서도 정말 3세대 장비가 개발될 수 있을지에 대해 여전히 부정적인 여론이 있고, 만들어진다고 하더라도, 개구수가 높아진 상황에서는 더 가혹한 패터닝 공정이 필요하기 때문에 공정 비용이 매우 높아질 것이라는 예상이 있습니다. 설사 0.75NA 장비가 잘 만들어진다고 하더라도, 문제는 그다음에 올 기술이 여전히 불분명하다는 것이에요. 옹스트롬 시대의 패터닝에서 0.75NA 혹은 그 이상의 패터닝 기술이 필요할 것임은 분명해 보이지만, 이미 기술적으로 많은 난제는 물론, 앞으로의 로드맵도 불분명해지고 있는 것이죠.

한국이 앞으로도 첨단 반도체 제조에서 계속 글로벌 경쟁력을 유지하며 기술 혁신에 뒤처지지 않으려면 결국 이러한 난제를 정면으로 마주하며 다양한 기술적 시도를 해야 합니다.



우선 옹스트롬 시대에서 만들어지는 패턴들, 특히 9, 8, 7 같이 한 자릿수 옹스트롬 공정이 되는 상황에서의 물리적 패턴 크기는 이름 그대로 옹스트롬의 크기가 된다는 뜻은 아닙니다. 대략적으로 2.5배 정도를 곱하면 되는데요, 예를 들어 5-8 옹스트롬이라면 0.5-0.8 나노미터 곱하기 2.5이니까, 1.2-2 나노미터 정도 됩니다.

이게 얼마나 작은 크기냐 하면요, 원자의 크기를 기준으로 생각해 보면 됩니다. 예를 들어 반도체 공정에서 가장 중요한 소재인 실리콘을 살펴볼게요. 실리콘 원자 하나의 크기는 대략 0.11 나노미터쯤 됩니다. 우리가 만약 1.2 나노미터짜리 패턴을 만든다면요, 이 패턴 안에는 실리콘 원자가 11개쯤 나란히 배열된다는 것을 의미해요. 그런데 여기서 한 가지 주목할 부분이 있어요. 그것은 현재까지 우리가 만들어온 반도체 소자나 그 소자의 작동 메커니즘, 그리고 그 메커니즘의 근간이 되는 고체물리학 이론은 소재 내의 전자 상태를 해석하는 과정에서 연속체 가정을 하고 있다는 것입니다. 즉, 전자가 엄청 많이 있고, 이들의 파동함수를 집단적으로 해석할 수 있는 유용한 방법인 띠, 영어로는 밴드라는 개념으로 이들을 기술하여 트랜지스터부터 커패시터 등 모든 전자 소자의 작동을 설명해 왔다는 것이에요. 그런데 이러한 연속체 가정은 패턴의 크기가 원자의 크기보다 충분히 클 때만 말이 돼요. 만약 1.2 나노미터 정도 되는 패턴처럼 원자가 10개 내외만 있는 상황이라면 이러한 연속체 가정을 쓰기 어렵게 됩니다.



이 말인즉슨, 반도체 소재와 소자의 작동 원리를 다시 해석하고 그에 따라 소자 구성도 다시 해야 한다는 것을 의미해요. 1.2 나노미터 패턴에서 11개의 실리콘 원자가 들어간다고 했잖아요? 그런데 또 하나 주목할 것은 외부에 노출된 실리콘 원자와 내부에 있는 원자들의 숫자 비율이 이제는 무시할 수 없다는 것도 있어요. 이 경우 외부에는 2개, 내부에는 9개가 노출되는데, 내외부 환경은 많이 다르죠. 따라서 외부의 실리콘 원자와 내부의 실리콘 원자의 전자 에너지도 다르게 기술되어야 하는데, 문제는 대부분의 신호 흐름은 외부, 즉 계면에 있는 원자들의 상태에 영향을 받는다는 것이예요. 따라서 옹스트롬 시대의 미세한 패턴은 원자 수준에서 모든 것을 다시 시작해야 하는 상황이 도래함을 의미해요.

옹스트롬 시대로 접어들어서 반도체 패턴이 아주 작아진다고 하면, 또 하나의 문제가 생겨요. 리소그래피 같은 반도체 첨단 공정 장비도 아주 미세한 노이즈, 진동, 열적 요동 등 다양한 환경적 요인에 의해 조금씩 흔들려요. 패턴의 크기가 비교적 클 때는 이러한 작은 흔들

림의 영향은 크지 않아요. 그렇지만 수 나노미터 이하의 물리적 크기를 만드는 옹스트롬 공정에서는 이 정도의 흔들림만으로도 패턴의 모양이 뒤틀릴 수 있어요. 뒤틀리다 못해, 패턴끼리 만나지 말아야 할 부분에서 만나거나, 만나야 할 부분에서 연결되지 못 하는 등의 문제가 생기면, 그 패턴이 포함된 반도체 소자는 작동 오류가 나기 때문에 폐기해야 해요. 이런 일이 옹스트롬 공정으로 접어들면 더 빈번해질 수 있다는 것이예요. 사실 이미 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 방법이 동원되고 있긴 합니다. 그렇지만 그 방법을 적용하기 위해서는 공정이 너무 느려지거나, 검사를 더 많이 해야 하기 때문에 웨이퍼 생산속도가 떨어지고 단가가 올라간다는 문제가 생겨요. 아마 이러한 추가적인 공정들 때문에 옹스트롬 시대의 반도체 생산량은 그 이전 시대에 비해 적어도 1/2 이하로 떨어지게 될 거예요. 이것은 그만큼 더 비싸진다는 것을 의미하죠. 옹스트롬 시대에서 만들어지는 1-2나노미터 이하 수준의 물리적 패턴 크기는 또 하나의 흥미로운 현상을 만들어낼 수 있어요.



이게 흥미롭다는 것은 과학적으로 흥미롭다는 것에 가까워요. 가장 흥미로운 부분은 앞서도 잠깐 언급했지만, 원자 단위로 패턴이 만들어지기 때문에, 이른바 양자역학적 효과가 더 잘 나타날 수 있다는 것입니다. 예를 들어 학부 양자역학을 배우면 초반에 수소 원자의 전자가 퍼텐셜 우물에 갇히는 문제를 푸는 연습문제가 나옵니다. 여기서 말하는 퍼텐셜은 일종의 장벽이구요, 그 장벽 사이에 갇힌 전자가 취할 수 있는 에너지 상태는 파동함수의 경계조건에 따라 불연속적으로 결정되죠. 이러한 현상은 단순히 연습문제가 아니라, 이제 실제로 나타날 수 있다는 것입니다. 장벽 사이에 갇히면 양자구속 효과가 나타나고, 이로 인해 전자들의 파동함수도 띄엄띄엄 결정되죠. 또한 아주 작은 부도체 패턴을 사이에 둔 두 도체는 이제 양자터널링이라는 현상으로 인해 전류가 흐르지 말아야 하는 상황에서도 전류가 새어나갈 확률이 높아지게 돼요. 이러면 게이트에서 전압을 조절하며 전류의 흐름을 제어한다는 트랜지스터 제어도 어렵게 되죠. 전압의 조절이 어려워지면, 그에 합당한 조절 장치가 더 필요한데, 이러면 트랜지스터 집적도가 떨어지는 문제가 생겨요.



이러한 문제를 오히려 역이용할 수도 있어요. 예를 들어 아예 단원자소자를 만들자는 접근도 있어요. 이러한

소자는 원자 몇 개 단위에서 작동하는 전자 소자를 의미하는데, 띄엄띄엄 존재하는 전자의 파동함수를 하나의 신호 전달 매개체로 보고, 정해진 에너지만큼에 해당하는 외부 전압을 매칭하여 여러 단계에서 소자의 작동을 제어하겠다는 의도가 있습니다. 굉장히 어려운 기술이지만, 양자역학적 효과가 발현되는 것을 막을 수 없다면, 이렇게 오히려 역이용하겠다는 접근도 생각해볼 만해요. 이렇게 문제와 기회가 동시에 존재하는 웅스트롬 시대이지만, 결국 우리는 계속 반도체가 필요하고, 기술은 계속 진보해야 하므로, 어떻게 해서든 위기를 돌파할 방법을 찾아낼 것으로 생각합니다. 예를 들어 바닥부터 시작하는 방식, 즉 다음에 심포 삭제 바텀업(bottom-up)이라고 부르는 방식을 생각할 수 있어요. 주로 제안되는 기술들은 분자 단위로 마치 레고를 조립하듯, 저절로 조립되게 만드는 분자 자기 조립기술이 있습니다. 이들은 작게는 1-2나노미터 수준의 규칙적인 패턴을 만들 수 있기 때문에, 리소그래피의 대안이 될 수 있죠. 위에서부터 접근하는 방식, 즉 탑다운(top-down) 방식도 있어요.

이를 이용하여 양자컴퓨터를 만드는 것처럼, 양자 셀룰러 오토마타 같은 일종의 자기작동 트랜지스터도 만들 수 있습니다. 바닥이나 천장이냐를 따지기 전에, 아예 전자를 쓰지 않는 방법은 없을까 고민하는 기술도 있어요. 예를 들어 포토닉스나 광컴퓨터는 전자 대신 빛 알갱이, 즉 광자를 쓰는 기술이에요. 그리고 전통적인 트랜지스터 같은 소자 구조를 대체하는 새로운 소자, 예를 들어 멤리스터 같이 메모리와 저항이 같이 붙어있는 소자도 생각할 수 있어요. 이들은 인간의 신경세포를 흉내 낼 수 있어서 뉴로모픽 컴퓨터 같은 기본 소자로 활용될 수도 있죠. 이 밖에 다양한 기술적 대안들이 꾸준히 제시되고 있어요. 어떤 기술들은 사장될 것이고, 어떤 기술들은 양산단계에서 밀려날 수도 있을 것입니다.

한 가지 확실한 것은 그러한 돌파구를 만들기 위해 우리는 계속 기초과학의 단계에서 더 아래의 세계를 탐험해야 한다는 것이에요. 아주 오래 전에 유명한 물리학자 리처드 파인만이 바닥에는 여지가 많다(There is a plenty of room at the bottom)이라고 한 것처럼요.



SESSION 6. 패널 토크 머리카락 100만 분의 1 반도체

영상 보러가기



신창환
고려대 전기전자공학부 교수

이철호
서울대 전기정보공학부 교수

권석준
성균관대 화학공학부 교수

● **주시은 아나운서**

나노라는 단위는 대중적으로 잘 알려져 있는데 옹스트롬이라는 단위는 잘 모르는 분들도 많으실 것 같습니다. 0.1나노미터가 1옹스트롬 미터인데요. 이미 학계에서는 옹스트롬 미터 시대를 치열하게 준비하고 있습니다.

● **정석문 아나운서**

옹스트롬 수준의 반도체 기술 구현에 있어서 아직 해결해야 될 것들이 많이 있는 것 같은데요. 어떤 문제가 가장 먼저 선결되어야 할지 권석준 교수님께 여쭙볼까요?

● **권석준**

일단 옹스트롬 시대로 가기 위해서는 지금보다 훨씬 더 정밀한 리소그래피 기술들이 필요할 겁니다. 그래서 앞서 말씀드린 극자외선(EUV) 리소그래피도 중요합니다만 이것보다 훨씬 더 짧은 파장의 빛을 이용한다든지 아니면 이런 빛에 적합한 광학 반응을 만들어 낼 수 있는 소재들도 처음부터 다시 만들어야 될 것으로 보입니다. 하지만 이렇게 기술들이 만들어진다 하더라도 이들이 실제로 공정 단계에서 충분히 잘 만들어질지 여부도 불확실합니다. 그렇기 때문에 에칭부터 증착까지의 모든 공정 기술 자체가 또 한 번의 혁신을 거쳐야 될 것으로 생각됩니다.

● **정석문 아나운서**

초미세 스케일에 들어가게 되면, 새로운 양자역학적 현상과 물리적 한계가 나타나고, 그것을 어떻게 극복하고 제어할 것이냐는게 굉장히 중요할 것 같은데, 혹시 이것에 대한 실마리가 있을까요?

● **권석준**

아예 터널링을 역이용하는 방법도 있을 수 있습니다. 아니면 터널링 자체를 막기 위해 포텐셜 장벽을 더 높

이는 방법도 있을 수 있습니다. 그 외에도 이철호 교수님 말씀하신 아주 새로운 2차원 물질을 이용하는 방법도 있을 수가 있습니다.

● **주시은 아나운서**

반도체에서는 소재가 아주 중요하잖아요. 기존 실리콘의 물리적 한계를 뛰어넘을 수 있는 차세대 반도체 소재는 또 무엇이고 어떤 것들이 요구되는지 궁금합니다.

● **이철호**

반도체 소재의 미세화가 물리적인 한계에 직면하고 있기 때문에 지난 70여 년 동안 쓰였던 실리콘을 대체하는 차세대 소재에 관심이 커지고 있습니다. 차세대 소재들은 기본적으로 아주 얇아야 됩니다. 소재가 작아지면서 성질을 유지해야 되고, 저전압에서도 구동해야 되는 물질들 중 하나로 옹스트롬 두께의 2차원 반도체가 될 수 있을 것 같습니다.

또 신창환 교수님이 말씀하셨던 기존의 실리콘 시모스 칩 위에 새로운 반도체 소재를 집적하는 기술이 하나의 방안이 될 수 있습니다. 집적도를 높이려면 실리콘 위에 어떠한 새로운 소재를 만들어야 되는데 온도 제약이 발생합니다. 하지만 온도가 너무 높으면 기존의 실리콘 소재들이 망가지기 때문에 400도 이하에서 공정이 가능한 템퍼러처라는 소재들이 필요합니다. 이러한 소재들로 2차원 반도체나 산화물 같은 반도체들을 많이 연구하고 있으며, 이러한 소재들이 필요하다고 생각합니다.

● **정석문 아나운서**

옹스트롬 반도체 시대로 들어가기 위해 어떤 방법이 가장 유력하고, 이에 따른 산업 생태계가 어떻게 변해야 할 것인지도 궁금합니다.

● 신창환

우선 권석준 교수님께서 말씀하신 양자 역학의 세계까지 내려가는 길은 언젠가 가지 않을까 생각하고, 또 이 철호 교수님께서 얘기하신 원자 수준 두께의 초박막 소재도 언젠가 반도체 제조 공정 기술에 도입되어야 마땅할 겁니다.

다만 제가 강조하고 싶은 부분은 '이러한 미래 기술들이 향후 5년 내에 우리의 먹거리가 될 것인가, 아니면 10년, 15년 내에 상용화가 되어 우리에게 돈을 벌어드주는 제품이 될 것인가'입니다. 제 개인적인 의견은 아직까지는 힘들다라는 겁니다.

현재는 n형 반도체와 p형 반도체를 좌우로 놓고 작게 만들어서 더 많은 반도체 소자를 칩에 넣고 있습니다. 하지만 가까운 미래, 즉 5~15년 사이에 우리가 준비해야 하는 반도체 집적 기술은 n형과 p형을 위로 쌓아 올리는 C-FET(Complementary FET) 기술들도 주목 받고 있습니다.

또 하나의 기술 혁신은, 웨이퍼를 생산하는 과정을 보면 대부분의 반도체 소자는 웨이퍼 표면 윗면에 제조 공정이 되는데, 사실 우리가 놓친 부분이 바로 뒷면입니다. '웨이퍼 후면에 우리가 무슨 일을 할 수 있을까' 고민해 본다면 가장 첫번째로 쉽게 도입할 수 있는 건 반도체 칩의 전압을 공급하는 구동 파워라인을 삽입할 수 있을 겁니다. 이 기술이 중요한 이유는 반도체 칩 안에 들어가는 소자의 크기가 물리적인 한계에 봉착해서 더 이상 소형화가 안 된다면 할 수 있는 일은 칩을 쌓는 시대가 올 겁니다. 칩을 쌓는 시대가 왔을 때, 반도체 칩의 후면에 우리가 어떤 전력을 선제적으로 구축하고, 그런 기술을 우리가 내재화하고 있느냐에 따라 대한민국 반도체 기업들의 명운과 미래 먹거리를 얼마나 많이 만들어낼 수 있을지에 대한 중요한 이정표가 되기 때문에 웨이퍼 후면에 관심을 가져야 하지 않을까 하는 얘기를 드리고 싶습니다.

● 주시은 아나운서

우리나라 핵심 산업이라고 해도 과언이 아닌 반도체 산업이 사상 최대 위기를 맞았다는 보도가 이어지고 있습니다. 특히 중국의 빠른 추격으로 주도권을 뺏기고 있다 아니면 뺏겼다는 식의 진단도 나오고 있는데요, 대한민국의 반도체 산업의 지속적 발전을 위해선 어떤 전략이 필요할까요?

● 권석준

지금은 반도체의 가장 큰 전환시대라고 봅니다. 그 중심에는 역시 AI가 있을 겁니다. 그 중에서도 AI의 작동을 가능하게 하는 AI 하드웨어로 많이 알고 계시는 GPU도 있을 것이고요. 또 특정한 기능을 수행하고 있는 MPU나 TPU같은 개념도 있을 것입니다. 하지만 우리나라가 앞으로도 AI 반도체를 포함해서 고성능, 고부가가치 반도체 칩에서의 주도권을 가져가기 위해서는 기본적으로 반도체의 설계부터 생산까지 이어질 수 있는 생태계가 더 건강해지고 다양해질 필요가 있습니다.

우리나라는 비교적 반도체 제조 강국이라고 알려져 있지만 막상 반도체 패키징이나 반도체 설계 그리고 설계와 공정을 이어주는 소재나 부품 장비들의 생태계는 여전히 글로벌 경쟁력이 미흡한 상황입니다. 이러한 생태계가 더 건강해질 필요가 있겠고요. 특히 이런 생태계들이 더 다양해지기 위해서는 이 안에서 만들어질 수 있는 다양한 칩들을 테스트하고 또 시험 생산할 수 있는 저비용 구조, 그리고 고효율 구조들이 더 정착이 될 필요가 있습니다.

● 이철호

지금 반도체는 엄청난 변곡점에 있습니다. 지난 70년 역사 속에서 새로운 반도체 소재를 활용하겠다는 아주 큰 그랜드 퀘스트를 가지고 있습니다. 저희가 소재 산업에 대한 경쟁력은 상대적으로 약하더라도 기존의 미세화 공정에 대한 경쟁력은 충분히 리더십을 가지고 있

기 때문에 성숙한 반도체 공정 기술과 새롭게 이머징하는 소재 기술들을 접목해서 활용할 수 있는 정책적인 기반과 산학 협력들이 필요한 시기라고 생각합니다.

● 신창환

대한민국 하면 반도체 밸류체인 상에서 팹리스나 파운더리, 메모리, 패키징이 있는데요, 가장 잘하고 있는 분야는 '메모리 반도체'입니다. 메모리 반도체를 잘 하고 있으니 앞으로는 더 다른 분야에 더 투자하는 게 합리적이고 발전 가능성이 높지 않느냐라는 의견을 가지셨는데, 일부 동의하지만 제 개인적인 의견은 잘하는 메모리를 앞으로 더 잘하게 육성해야 메모리 강국으로서의 위상을 놓치지 않을 것이라고 생각합니다.

현재 중국의 D램 기술은 국내 큰 두 소자 기업 중 하나의 기업과 거의 동급 내지는 살짝 앞선 기술을 이미 확보했다라고 보고 있습니다. 중국 반도체 생산 능력 역시 향후 5년 내, 2배 정도 더 늘어난다고 합니다. 결국 시장에 참여하는 플레이어로서 중국 메모리 반도체 기업은 앞으로 우리가 경쟁해야 되는 대상입니다. 이런 냉혹한 미래 앞에 '메모리 반도체는 잘 하니 기업에게 맡겨두고, 나머지 분야를 더 투자하자'는 얘기는 어찌 보면 '국어는 잘하고 있는데, 수학을 못하니까 수학에 집중하다가 결국 국어까지 꼴찌하는 일'이 생길 수도 있지 않을까라는 생각이 듭니다.

그래서 '메모리 반도체' 하면 D램과 낸드로 크게 양분이 되는데요, D램은 현재 기술적 변곡점에 와 있습니다. 소위 말하는 6F스퀘어 면적에서 4F스퀘어로 넘어갈 것이고, 그 다음은 더 이상 좁힐 수가 없습니다. 스케일링 다운 미세화가 더이상 안 되기 때문에 현재 연구소에서는 3차원 구조를 가진 D램 연구에 몰입하고 있는데요, 사실 국내 대학이나 연구소에서 3D D램을 연구하는 산업 생태계는 거의 멸종 수준에 이르고 있습니

다. 이런 점에서 정부 차원과 산학 협력을 잘 해서 메모리 연구를 좀 더 잘 할 수 있는 생태계는 반드시 필요할 것입니다.

3D 낸드는 올해 내지는 차년도에 거의 400단 정도까지 양산되어서 나올 텐데요, 단수는 계속해서 올라갈 예정입니다. 400단, 500단, 600단 이렇게 선형적으로 발전하겠지만 그 과정에서 3D 낸드의 핵심 기술인 식각 공정 기술도 분명히 한계에 봉착할 거기 때문에 결국 칩과 칩을 붙여서 단수를 늘릴 수밖에 없습니다. 쉽게 설명드리면 300단짜리 3D 낸드를 웨이퍼 1번에서 만들고, 또 다른 300단 3D 낸드를 웨이퍼 2번에서 만든 다음 웨이퍼 1번과 2번을 본딩해서 붙임으로써 600단을 구현해 낼 수 있습니다. 하지만 이런 미래 기술은 이미 5년도 아닌 10년 전에 중국의 YMTC라고 하는 낸드 기업에서 이미 양산에 활용하고 있는 기술입니다.

그렇기 때문에 그 과정에서 쌓인 노하우와 레슨은 어마어마할 것입니다. 또한 이런 미래 기술, 어려운 말로 하면 '하이브리드 본딩 기술'을 이용한 3D 낸드의 단수 경쟁은 앞으로 더 치열해질 것입니다. 마지막으로 이 반도체 산업은 원래 민간 기업 간의 경쟁의 영역이었는데, 어느 순간 '첨단 반도체 칩을 설계하고 제조할 수 있느냐 없느냐'가 그 국가의 안보와 직결되는 상황으로 내몰리게 되었습니다. 그 결과 미중 패권 경쟁 속에서 반도체 산업은 패권 경쟁의 전장터가 돼버렸고, 모든 정부 정책은 반도체에 쏠리고 있는 것이 사실입니다. 그 과정에서 우리 미래 인재들이 갖추어야 될 역량 중에 하나가 반도체 기술 자체에 대한 지식도 중요하지만 지정학적 리스크에 대한 이해도 대단히 중요하다고 생각합니다.

그래서 가능하다면 정부의 정책 중의 하나로, 학생들이 사회·정치·통상·반도체 D램 등 전문가라는 롤을 각자

정하고, 룰 플레이 게임처럼 한 테이블에 앉아 '내가 트럼프 대통령이라면? 시진핑 주석이라면?' 어떤 정책을 할지 치열하게 의견을 나눌 수 있는 정책 게임을 할 수 있는 플랫폼을 만들어서 미래 인재들이 자연스럽게 반도체에 관심도 가지고, 인문사회계 학생과 자연 공학을 공부하는 학생도 참여하는 멋진 플랫폼도 대한민국이 주도적으로 가져가면 어떨까 싶습니다. 그 과정에서 중국과 미국의 반도체 인재와 함께 어우러져서 다시금 민간 기업들이 서로 경쟁하면서 동반 성장할 수 있는 반도체 시장을 기대해 보고 싶습니다.



SESSION 7. 포스트 실리콘 반도체 소자

실리콘 대체할 차세대 반도체 기술은



신 컴퓨팅 아키텍처와 실리콘 플랫폼의 융합

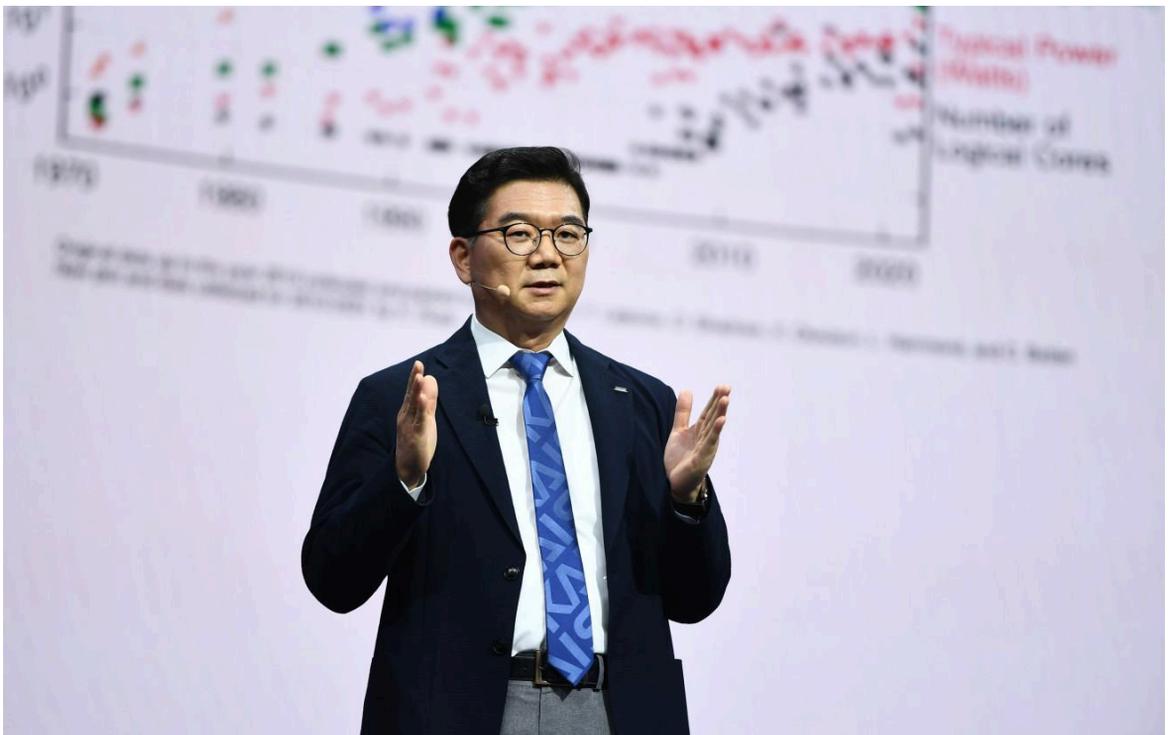
최성을 KAIST 전기 및 전자공학부 교수

[영상 보러가기](#)

오늘날 우리가 사용하는 반도체 기술은 실리콘 CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)의 약자로 반도체 회로 설계 방식 중 하나)를 기반으로 발전해 왔습니다. 하지만 현재는 물리적·경제적 한계에 직면해 있죠. 1961년, 로버트 노이스가 개발한 첫 실리콘 집적회로는 고작 4개의 트랜지스터로 구성돼 있습니다. 그런데 오늘날의 최신 AI 가속기칩에는 무려 2080억 개의 트랜지스터가 들어갑니다. 정말 엄청난 발전이죠. 이처럼 반도체 성능이 비약적으로 향상될 수 있었던 이유는 바로 무어의 법칙 덕분입니다. 트랜지스터 수가 약 2년마다 두 배씩 증가하면서 지난 65년간 반도체 기술은 무려 1000억 배 이상 성장해왔고, 이는 현대 정보화 사회의 기반이 되었습니다.

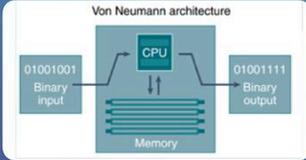
하지만 이제 트랜지스터의 미세화는 한계에 이르렀습니다. 기술적으로는, 양자터널링과 누설전류 문제 때문에 더 이상 크기를 줄이기 어렵습니다. 특히 3나노 이하의 게이트 길이를 가진 GAA 트랜지스터는 동작 실패 가능성도 제기되고 있습니다. 경제적인 측면에서도 문제입니다. 3나노, 2나노 같은 첨단 공정 노드는 개발

비용이 폭발적으로 증가하고 있으며, 막대한 투자 대비 수익성은 점점 낮아지고 있습니다. 따라서 지금은, 신 소재를 포함한 새로운 기술혁신으로 이 한계를 돌파해야 하는 시점에 와있습니다. 이론적으로 디지털 연산 소자의 크기 한계는 약 1나노미터로 예측됩니다. 현재 트랜지스터의 크기는 10~20나노미터 수준이지만, 이보다 더 줄이는 건 매우 어렵습니다. 이제는 단순한 축소를 넘어서, 새로운 소재와 물리 원리, 그리고 전혀 다른 방식의 컴퓨팅이 필요합니다. 그 대표적인 예가 바로 TMD(전이금속 디칼코게나이드)와 CNT(탄소나노튜브) 같은 저차원 반도체 소재입니다. 그리고 더 나아가서는, 기존과는 전혀 다른 신규 컴퓨팅 패러다임에 기반한 기술도 필요해지고 있습니다. 최근 AI 연산 수요가 폭발적으로 증가하면서, 전력 소모가 큰 이슈로 떠오르고 있습니다. 이 문제를 해결하기 위해 새로운 컴퓨팅 패러다임들이 연구되고 있는데요, 예를 들어, 뉴로모픽컴퓨팅은 인간 뇌처럼 작동하며 병렬 연산에 강하고 전력 소모가 적습니다. 광 컴퓨팅은 빛을 이용해서 고속·저전력 연산이 가능하고, 양자 컴퓨팅은 양자비트 즉, 큐비트(qubit) 연산을 이용해 기존 방식으



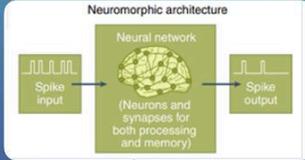
새로운 컴퓨팅 패러다임들

기존의 폰노이만 아키텍처



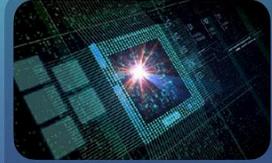
- 순차적 처리
- Computation과 Memory의 분리
- Binary 명령어 코드 및 데이터
- Clock 구동 (Synchronous)

뉴로모픽 아키텍처

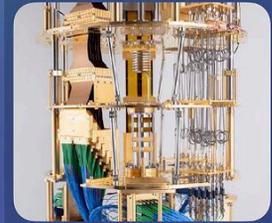


- 대규모 병렬 처리
- Collocated 프로세스 및 Memory
- 스파이크 신경망
- Event 구동 (Asynchronous)

<https://www.nature.com/collections/legabggg>
<https://spectrum.ieee.org/practical-quantum-computing-101>



Optical Computing Chip



Quantum Computer, IBM

로는 풀 수 없는 문제까지 접근할 수 있습니다.

이처럼 새로운 방식들은 실리콘 CMOS 기술로는 어려운 연산을 매우 효율적으로 처리할 수 있어서, 미래 컴퓨팅에서 핵심 역할을 할 것으로 기대되고 있습니다. 다만, 아직까지는 모든 종류의 연산 문제에 적용하기엔 한계가 있다는 점도 함께 고려해야 합니다. 우리 연구실에서는 이러한 새로운 접근의 예로, 질화붕소(BN) 멤리스터 기반 뉴로모픽 반도체를 연구하고 있습니다. BN 멤리스터는 단순한 구조이면서도 저전압 동작이 가능하고, 소재의 결정성에 따라 단기 및 장기 메모리 특성을 제어할 수 있다는 장점이 있습니다. 우리는 이 특성을 활용해 BN 멤리스터 어레이를 적층해서 뉴로모픽 기능 중 하나인 레저버 컴퓨팅(Reservoir Computing)을 구현했습니다. 그 결과, 기존 딥러닝 보다 1/100 수준의 파라미터 수만으로도 유사한 정확도를 달성했고, AI 연산에서의 가능성을 실험적으로 입증할 수 있었습니다.

앞으로의 반도체 기술은 기존 CMOS 플랫폼에 이처럼 새로운 컴퓨팅 패러다임을 융합해 나가는 방향으로 발전할 것입니다. 예를 들어, 20년 전 제안된 올인원 패키지(All-in-Package) 개념은 오늘날 고성능 AI 반도체 패키지 기술로 현실화됐습니다. 마찬가지로 다양한 신소재와 신기술을 통합하면 성능과 효율성 모두를 극대화할 수 있습니다. 물론 어떤 기술이 미래를 주도할지는 예측할 수 없지만, 혁신적인 접근과 융합이 핵심이 될 것임은 분명합니다. 결론적으로, 반도체 기술은 이제 실리콘 CMOS를 넘어서는 새로운 국면에 접어들고 있습니다. 신소재, 새로운 소자 구조, 패키징 기술을 활용한 혁신적인 접근이 미래 반도체 산업은 물론, 우리 사회 전반에 큰 변화를 가져올 것입니다. 오늘 발표가 여러분께 포스트 실리콘 시대 기술의 가능성과 중요성을 이해하는 데 조금이나마 도움이 되었기를 바랍니다.



AI 시스템 한계에서 찾은 실마리: 포스트 실리콘 시대, 우리는 무 엇을 준비해야 하는가

류수정 서울대 차세대반도체 혁신융합대학사업단 교수

[영상 보러가기](#)

대표적인 언어 모델들의 파라미터 수 증가 추이가 기하 급수적인 증가세를 보여주고 있습니다. 이로 인해, 매년 모델의 복잡도와 연산 요구량이 급격히 증가하고 있고, 이는 바로 전력이슈, 메모리 병목현상, 시스템 복원과 생태계 구축에 대한 이슈들로 직결되고 있습니다. 이러한 문제에 대한 해결은, 특히 새롭게 시장에 진출하고자 하는 반도체 회사들에게 큰 숙제가 되고 있습니다. 이제 하나씩 알아가 볼까요?



첫 번째는 전력 이슈입니다. 단순히 전력 소비량이 많아진다는 수준을 넘어서 전력 밀도(Watt/mm²), 그리고 발열과 냉각 문제로 인해 시스템 설계 및 성능에 제약 받고 있습니다. 생성형 AI로 인해, 미국 데이터센터의 전력 수요가 향후 증가하는 모습을 이 그래프가 보여주듯이, 에너지 인프라 및 환경과 관련된 사회적 이슈로도 확산되고 있습니다. 현재 이에 대한 대응방안으로, 아직은 활용범위가 제한적이지만, 에너지 효율이 높은 전용 AI 가속기 도입을 진행 중에 있고요, 또한, 발열 문제들에 대한 방안으로 기존의 공랭방식의 냉각에서 최근에는 액침냉각까지 에너지 효율성이 높은 냉각기술로의 전환이 이루어지고 있습니다. 이러한 기술들로 연산량이 폭발적으로 증가하는 AI 워크로드를 감당하기 어렵기 때문에, 궁극적으로는 전력 자체를 줄이기 위한 구조 및 소자의 전환 및 혁신이 필요할 것으로 생각합니다.

다음은 메모리 병목현상입니다. AI 학습 및 추론에서 메모리 접근 병목 현상이 심화되고 있는데요, 이는 연산 성능 향상률에 비해 메모리가 낮기 때문입니다.

이를 해결하기 위해서는 데이터 이동을 최소화하는 기술들이 적용되고 있는데요. 데이터 자체의 양을 축소시키는 저정밀도연산, 압축기술, 메모리 근처에 연산을 배치하는 근접연산기술(Near Data Processing) 기술과 함께, 차세대 기술로서 메모리-연산 통합 구조들이 연구 개발되고 있습니다.



두 번째 해결 방향으로는 데이터 이동 속도 향상을 위한 고속 인터페이스 기술입니다. CXL(컴퓨트익스프레스링크) 같은 새로운 인터커넥터 표준 체계를 활용함으로써, CPU와 다양한 메모리 디바이스 고속 연결을 통해 이종 메모리 간 효율적 데이터 이동을 목표로 하고 있습니다. 이와 같이, 단순 연산 성능 향상을 넘어 메모리 접근 효율성 고려는 시스템 성능을 고려할 때 필수적입니다. 다음은 시스템 복원이슈입니다.

AI 모델이 대규모화됨으로써, 학습 인프라도 수백에서 수천 개의 GPU로 구성된 대형 클러스터로 확장이 되고 있습니다.



이처럼 복잡해진 시스템에서는 GPU 한 대의 장애만으로도 전체 학습이 중단되는 리스크가 커짐으로써, 장애 시 복구를 위한 체크포인트 저장 등 장애 복구에 드는 오버헤드가 누적되어 실질적인 학습 시간 감소 현상까지 보일 수 있게 됩니다.

임계 GPU 수를 넘어서면 더 이상 성능 확장이 아니라 비효율로 전환된다는 점을 보여주고 있습니다. 이에 대해 세 가지 정도의 해결 방향으로 기술 개발이 진행 중입니다. 인-메모리(In-Memory) 체크포인트 등의 체크포인트 방식의 개선, 학습 프레임워크 자체에서 여러 발생에 대응하는 기술, 마지막으로, 하드웨어와 AI 모델 차원에서의 복원성 확보를 진행 중에 있습니다. 이와 같이 시스템 복원성은 성능과 함께 차세대 AI 인프라의 필수 조건으로 이미 대두되고 있습니다. 마지막으로 생태계 구축입니다. AI시대가 대두되면서, 지금은 다양한 하드웨어 가속기와 컴퓨팅 플랫폼이 동시에 존재하는 시대입니다. 동일한 AI 모델이라고 하더라도, 플랫폼이 다르면 튜닝부터 배포까지 다시 해야 하는 경우가 많고, 이로 인해 개발 비용과 시간, 유지보수 부담이 증가하게 됩니다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는, 오픈스탠다드 활용, 오픈소스 중심의 생태계 확장, 다양한 개발 도구 제공으로 사용성을 높이는 방법, 그리고 실사례에 대한 많은 확보 등을 통해 확장해가는 방법이 필요합니다.

새로운 개념의 소재에 따른 구조가 필요하게 된다면 이러한 생태계에 통합하기 위한 방안을 고려해야 합니다. 지금까지, AI 반도체 기반 시스템의 주요 문제와 그에 따른 해결 방향에 대해서 말씀 드렸습니다. 이러한 이슈들은 단순한 개선으로 해결이 어려울 것으로 보이기 때문에, 패러다임 전환을 위해 대비해야 하고, 이는 "포스트 실리콘(Post-Silicon)" 기술에 대한 관심으로 이어져야 할 것으로 보입니다. 또한, 새로운 패러다임 전환이 이뤄지려면 새로운 연산 방식 기반 모델, 새로운 소재 및 아키텍처, 새로운 개발툴과 프레임워크 등을 필요로 하기 때문에 이러한 기술의 변화가 산업에 빠르게 스며들 수 있는 생태계를 함께 만들어가야 하는 점을 인지하고 지금부터 같이 준비해 나가야 하겠습니다

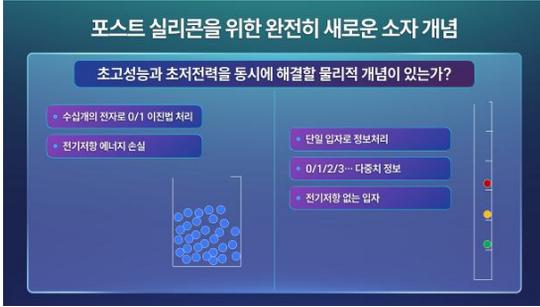




포스트 실리콘 소자

염한웅 포항공대 물리학과 교수

[영상 보러가기](#)



앞에서 들으신 바와 같이 실리콘 소자의 크기를 줄여서 집적도를 높이는 방식으로 성능을 향상해 다운사이징 기술은 곧, 그러니까 2030년대 초반에 한계에 다다를 것이 예견되어 있습니다. 그 이후에는 신호를 전달하는 채널의 물질을 실리콘에서 이차원 TMDC 물질 등으로 바뀌어서 궁극적으로 옹스트롬 기술, 즉 원자 크기의 소자 기술로 전환될 것으로 전망됩니다. 하지만 아직까지 전망일 뿐이고, 2040년대의 소자 기술이 무엇인지 분명하지 않습니다. 만약 이차원 물질이 활용된다 하더라도, FET 기술을 활용하는 것이어서 이 기술이 가지는 근본적인 문제를 해결하는 것은 아닙니다. 그 근본 문제의 하나가 앞서 들으신 대로 에너지를 너무 많이 사용하는 문제입니다. 주로 그 에너지가 전기저항에 의해 열로 방출됩니다.

이미 현재 인류가 생산하는 총 에너지의 6% 이상을 컴퓨터기기가 사용하고 있고, AI의 광범위한 활용이, 에너지 소모를 폭증시켜, 이 비율이 수십 %에 매우 빨리 도달하게 될 것이 쉽게 예측됩니다. 이것은 너무나 방대한 에너지 소모이고, 심각한 기후 위기 하에서 감당할 수 있는 수준이 아닐 것입니다.

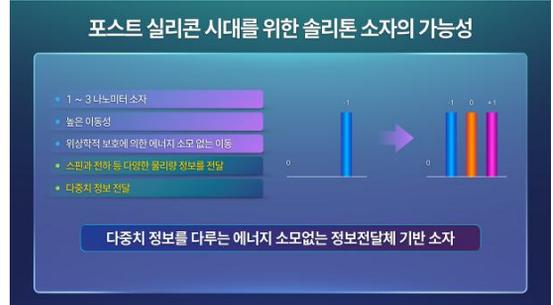
혹자들은 양자컴퓨터가 실리콘 소자와 컴퓨터를 대체하는 것처럼 얘기하고 있으나, 양자컴은 기존의 컴퓨터들이 풀어온 문제의 극히 일부를 푸는 도구로서, 범용 실리콘 컴퓨터를 대체하는 것이 결코 아니라는 점을 분명히 인식해야 합니다. 아울러 현재의 양자컴 플랫폼들이 엄청난 에너지를 소모하는 장치들이라는 것도 충분히 고려해야 합니다. 즉, 실리콘 소자의 위기를 양자컴이 해결해주는 것은 아니라는 겁니다. 해서, 실리콘 소자가 한계에 도달했을 때 이를 근원적으로 해결하기 위해 새로운 개념의 소자를 구현하는 것은 인류의 과학기술이 풀어야 할 중대한 도전과제가 아닐 수 없습니다.

물리학적으로는, FET와 같이 수십 개의 전자를 묶어서 전류로 이동시키고, 이때 발생하는 전기저항으로 에너지를 소모하는 소자에서 벗어나, 근본적으로 전류가 아닌 물리량을 활용하는 소자를 생각할 수 있습니다. 또한 0,1의 이진법 정보를 넘어서 0,1,2,3등 다진법을 가능하게 하는 다중치 정보를 표현하면서, 전기 저항 없는 정보 전달체가 가능하다면, 막대한 양의 정보를 전기저항 없이 처리하는, 초고성능 초저전력 소자를 실현시킬 수 있다고 생각합니다. 정말 그런 꿈에나 나올 법한 정보처리가 가능한 것인지? 다행히 트랜지스터 발명 이후 지난 70년 동안 축적된 물리학의 지식 속에 그 답이 있습니다. 이를 테면, 전하가 없어서 전류저항이 없는 정보 전달체는 물리학적으로 여러 가지가 알려져 있습니다. 빛의 입자, 즉 광자가 대표적이고, 이를 활용한 광컴퓨터가 활발하게 개발되고 있습니다. 전자와 전공을 합쳐서 전하가 없는 입자로서 엑시톤 입자라는 것도 잘 알려져 있으며 이를 광과 전자를 복합한 소자로 활용하는 기술이 최근에 개발되었습니다. 전하가 있더라도 전기저항이 없는 상태 또한 가능하며, 저온에서 발생하는 초전도상태에서의 초전류가 그 대표적인 예가 됩니다. 저온이라는 문제가 있으나 초전도를 활용하는 소자 기술 또한 활발히 연구되고 있고, 현재 가장 널리 연구되는 양자컴도 초전도 소자를 기반으로 합니다.

이외에서 제가 최근에 연구하고 있는 전자파동의 솔리톤 입자라는 것도 전기저항이 없이 전하나 스핀을 전달할 수 있습니다. 솔리톤이라는 입자는 빛의 파동에서 먼저 기술로 확립이 되었는데, 광기반 정보를 에너지 소모없이 2만 킬로미터의 초장거리로 전송하는 기술이 90년대 초반에 확립되었습니다. 이 개념을 전자소자에 활용하기 위해서는 전자파동의 솔리톤을 하나하나 관측하고 조작하는 기술이 필요한데, 저희 연구진이 지난 십년에 걸쳐 세계최초로 개발하였습니다.



이 영상은 실리콘 기판 위 만들어진 세 개의 나노선을 확대하여 보여주는 현미경 사진으로, 밝게 빛나는 부분들이 정보를 가지고 이동하고 있는 솔리톤 입자들입니다. 이 영상은 솔리톤의 운동을 실시간을 측정한 세계 최초의 영상입니다. 솔리톤의 경우에는 전하를 가진 전자가 직접 전하를 운반하여 전류를 발생하는 것이 아니라, 전자들을 우선 전부 짝지어 지지 않은 전자를 하나 만들어 놓게 되면 이 영상에서 밝게 빛나는 부분의 원자에 그 전자가 위치하게 되는데요. 이 전자의 위치가 계속 바뀌면서 전하 정보가 한 방향으로 전달됩니다. 이를 통해 전류의 저항발열을 통한 에너지 소모 없이 정보전달이 가능해집니다. 이런 개념을 전자소자에 활용하기 위해서는 전자파동의 솔리톤을 관측하는 것을 넘어서, 조작하는 기술이 필요한데, 저희 연구진이 지난 3년간의 연구를 거쳐 올 초에 세계최초로 실리콘 기판 위에 솔리톤을 저장하고 다른 저장소로 이동하고, 또, 하나의 솔리톤을 두 가지 서로 다른 솔리톤으로 쪼개거나 합치는 기술들을 모두 실현시켰습니다.



이 기술들을 조합하여, 솔리톤 하나하나로 구동되는 논리소자와 기억소자를 만들 수 있을 것으로 기대하고 있습니다. 이상 말씀드린 바와 같이 물리학에서는 이미 저항발열이 없는 다양한 정보전달 입자들이 확보되어 있으며, 저희의 최근 연구는 실리콘 기판 위에서 솔리톤 입자를 사용하여 에너지 손실이 매우 적은 상태로 정보를 저장하고 전달하고 조작하는 것에 성공하였습니다. 솔리톤 입자는 두 가지 또는 세 가지 이상의 상태로 존재하여, 삼진법과 사진법 등 다중치 정보처리가 가능합니다. 이러한 입자들을 사용한 소자기술들은 실리콘 소자 기술과 FET기술 자체의 한계를 넘어서서, 에너지 소모 없이 막대한 양의 정보를 다룰 수 있는 소자와 컴퓨터로 발전할 가능성을 가지고 있습니다. 이러한 초기 단계의 기술들을 소자화하고, 스케일업하는 기술들이 2040년 이전에 확보되면, 그것은 포스트 실리콘 소자 혁명이라 할 수 있는 새로운 시대를 열게 될 것입니다.



SESSION 7. 패널 토크 실리콘 대체할 차세대 반도체 기술은

영상 보러가기



최성율
KAIST 전기 및 전자공학부 교수



류수정
서울대 차세대반도체
혁신융합대학사업단 교수



염한웅
포항공대 물리학과 교수

● 정석문 아나운서

실리콘 기반 소재의 한계를 넘어서는 새로운 패러다임 전환을 모색하는 다양한 대안까지 소개해 주셨습니다.

● 주시는 아나운서

이번 토론은 염한웅 교수님께서 직접 모더레이터로 나서서 이야기를 이어가 주시기로 했는데요. 교수님 진행해 주시죠.

● 염한웅

저희는 오늘 이 자리에서 우리가 현재까지 써왔던 실리콘 기반 소자의 한계에 대비해서 완전히 새로운 소자로 또 패러다임을 전환해야 되고, 그것을 실현시키기 위해서 어떠한 과제들을 풀어야 하는지에 대해서 질문을 던졌습니다. 이제 구체적인 질문을 드리고 싶은데요, 최선을 교수님께서 말씀하신 전체적인 그림을 보면, 실리콘 소자를 기반으로 지금 논의되고 있는 여러 가지 소자 기술이 합쳐진 개념을 생각하시는 것 같은데, 정확히 저희들한테 전달해 주시면 좋겠습니다.

● 최성울

우선 실리콘 시모스(CMOS) 기술에 대해서 간단하게 소개해 드렸다시피, 현재 전자 산업, 반도체 산업 전체가 실리콘 시모스 기술에 기반했다고 볼 수가 있습니다. 거의 모든 반도체 소자라고 할 수 있는 90% 이상이 실리콘 시모스로 되어 있고요. 기술적으로 좋기 때문에 그런 것도 있겠지만 사실 이런 기술을 개발하기 위해서 굉장히 많은 소재, 장비와 소자 업체들, 그리고 설계 업체들과 IP생태계가 굉장히 탄탄하게 구축되어 있기 때문입니다. 그런데 이런 실리콘 시모스 기술을 현실적으로 대체하는 것은 굉장히 어려울 것 같아요. 먼 미래에 아주 혁신적인 패러다임이 전 생태계를 만들 수 있으면 모르겠지만 굉장히 어려울 것 같습니다.

지금 논의되고 있는 다양한 새로운 컴퓨팅 패러다임들이 있죠. 아까 말씀드린 뉴로모픽 컴퓨팅, 광 컴퓨팅, 또

염한웅 교수님이 연구하시는 솔리톤 컴퓨팅, 또 양자 컴퓨팅과 같은 다양한 컴퓨팅 패러다임들이 있을 수 있지만, 이런 패러다임들은 모든 문제를 풀 수 있는 그런 것은 아닙니다. 우리는 디지털 컴퓨터를 가지고는 대부분의 문제를 풀 수가 있습니다. 시간이 오래 걸리고 에너지가 효율적이나 아니냐의 차이가 있을지언정, 대부분은 문제를 풀 수 있지만 양자 컴퓨팅이라든지 뉴로모픽 컴퓨팅은 어떠한 특정 연산에서만 굉장히 효율적이거나 이런 문제들을 풀 수 있기 때문이죠. 따라서 이런 뉴 컴퓨팅 패러다임들이 실제로 사용되기 위해서는 실리콘 플랫폼, 시모스 플랫폼 위에 새로운 패러다임들이 직접화 되어 인터커넥트 되고, 효율적으로 연산할 수 있는 부분들은 뉴 컴퓨팅 패러다임이 연산을 하고, 나머지 디지털 연산, 우리가 갖고 있는 디지털 인프라들을 활용하는 부분은 여전히 실리콘 시모스일 가능성이 많다고 생각합니다. 그런 면에서 실리콘 시모스를 중심에 두고 새로운 컴퓨팅 패러다임들이 융합되는 형태로 발전할 것이라고 말씀드릴 수 있겠습니다.

● 염한웅

류수정 교수님께서서는 현재 AI 반도체의 여러 문제점 중, 가장 중대한 문제점인 에너지 소모에 대한 얘기를 하셨습니다. 저도 굉장히 관심이 많은 문제인데, 실제 AI 반도체의 에너지 소모 문제가 얼마나 큰 문제인지 좀 더 구체적으로 말씀해 주시면 좋겠습니다.

● 류수정

어떻게 보면 기술적으로 굉장히 큰 문제라고 말씀을 드렸습니다. 하지만 기술적인 문제를 떠나서 어떻게 보면 앞으로 지속가능한 컴퓨팅 쪽의 배려가 될 거라고 생각이 듭니다. 아까도 데이터센터에서 소비하는 전력에 대해서 말씀을 드렸는데요. 그 이상으로 봐야 될 게 AI 데이터센터 하나에서 에너지가 소비되는 양을 보면 실제 중소 도시에서 하루에 소비되는 전력량만큼 소비되고 있거든요. 그러다 보니 기술적인 이슈뿐만 아니라 실제

적으로 AI 인프라스트럭처라든가 환경적인 문제까지도 굉장히 큰 이슈가 되고 있기 때문에 아까 소개해 주셨던 솔리톤과 같이 저전력·초저전력의 소자 같은 신기술이 정말로 필요한 시점이라고 생각합니다.

● 최성율

실제로 AI 연산을 하고 있는 어떤 가속기 칩들에서 전력을 어디서 많이 쓰고 있는가를 조금 더 분석해 보면, 우리가 흔히 이야기하는 트레이닝하거나 추론하는데, AI 연산을 하는 데 쓰이는 전력이 물론 많습니다. 하지만 현재 AI 연산을 하기 위한 시모스 기술은 굉장히 발달한 반면, 메모리 쪽은 사실은 로직 소자와 연산 소자에 비해서 굉장히 느려요. 그렇기 때문에 메모리와 연산 소자 간에 데이터를 주고받는 곳에 굉장히 많은 병목 현상이 있습니다. 우리가 메모리 병목 현상이라고 하는 거죠. 그런데 AI라는 건 결국 데이터를 엄청나게 많이 쓰기 때문에 굉장히 많은 데이터를 메모리에 주고 받아야 합니다. 그러면서 그 메모리와 연산 소자 간에 주고받는 인터커넥션 부분에서 전력을 60~70% 소모하고 있거든요.

결국 소자라는 측면에서 보면, 우리가 연산 소자 따로 또 메모리 소자가 따로 있는 폰 노이만 아키텍처라고 하는 구조를 전통적으로 써왔는데, 최근에 이런 것들을 극복하기 위해서 많이 하고 있는 부분이 아예 메모리를 연산 소자에 가까이 두거나, 아니면 메모리 자체가 연산 소자 기능을 할 수 있게끔 만드는 프로세싱 인 메모리(PIM)와 같은 개념들이 등장하고 있습니다. 그래서 먼 미래에는 아마 염한웅 교수님이 연구하시는 솔리톤이라든지 쿼텟 컴퓨팅 같은 것들이 훨씬 더 발전해서 실리콘 플랫폼에 융합될 수 있는 시기가 올 거라고 생각을 합니다. 그전에는 현재 시모스 기술과 우리가 잘 발달되어 있는 메모리 기술들이 융합되어, AI 가속기 등의 전력 문제를 어느 정도 해결할 수 있는 하이브리드 형태로 발전할 수 있을 거라고 생각하고 있습니다.

● 염한웅

결국 지금 말씀하신 현재 반도체 산업의 문제를 저희 같은 기초 과학자들도 깊이 고민하는 이유는 저희가 판단하기에 현재 실리콘 반도체 기술과 두 분께서 말씀하신 AI 반도체나 이런 것들의 근원적인 기술 자체가 한계에 봉착했기 때문일 텐데요. 사실 류수정 교수님께서 아주 최근까지도 AI 반도체를 직접 개발하신 회사의 CEO로 계셨고, 아주 성공적인 성과를 내셨는데요. 이 문제를 바라보는 학계의 시각이 아니라, 업계에서 어떤 위기감을 가지고 전반적인 실리콘 소자의 한계에 대해서 바라보고 있는지 그 위기감에 대해서 첨언해 주시면 좋겠습니다.

● 류수정

학계와 산업계 양쪽에 있으면서 느꼈었던 것 중에 하나가 그냥 한마디로 말씀드리면 실리콘의 어떤 물리적인 한계에 저희가 접근하고 있기 때문에 정말 위기감을 느끼고 있습니다. 실제 미세화되면서 저희가 계속 성능이라든가 아니면 전력 소비라든가 이런 쪽에 있어서 효율성을 계속 높여 왔었는데, 더 이상 그 어떤 트랜지스터의 미세화에 따른 전력 효율이 좋아지고 있지 않습니다. 저희는 사실 이러한 한계 상황이 앞으로 AI쪽의 컴퓨팅이 지속적으로 향상이 되는 데 있어서 마지막 한계점에 도달해 있다는 생각들을 계속하고 있습니다.

한 가지 더 첨언한다면, 이 산업계에 있으면서 이런 소자와 함께 실제 생태계에 접근하는 것들이 어렵구나 하는 점들을 굉장히 많이 느꼈습니다. 그래서 새로운 소자를 개발함에 있어서 사실 그 소자를 활용하는 기술까지 같이 개발이 돼야 되거든요. 저희가 개발을 했을 때, 지금 말씀하신 뉴로모픽이라든지 프로세싱 인 메모리라든지 아니면 솔리톤과 같은 새로운 소자들이 실제 성능뿐만 아니라 생태계에 바로 접근할 수 있는 전주기적인 개발 프레임이 준비돼야 된다고 생각하고 있습니다.

● 정석문 아나운서

현장에서 들어온 질문인데요, 국내 생태계 안에서 실리콘 이후의 시대를 제대로 준비하려면 가장 시급한 요소가 무엇일까요?

● 염한웅

굉장히 어려운 질문인데 중요한 질문인 것 같습니다. 말씀드렸다시피 실리콘 생태계가 하루아침에 만들어진 건 아니구요. 아까 말씀드린 것처럼 실리콘 직접회로가 61년도에 나왔고 65년 거의 70년 가까이 세월이 흐르면서 지금까지 고도화됐거든요. 아마 새로운 컴퓨팅, 어떤 소자들이 나오더라도 굉장히 오랜 시간 동안 스케일업 축적의 시간이 걸릴 것 같습니다. 그런데 그런 것들을 좀 더 단축시키기 위해서 좀 더 과감한 질문을 던지고 노력을 해야 할 필요가 있는 것이죠.

아마도 현재 새롭게 등장하고 있는 컴퓨팅 패러다임들이 연구실 수준에서만 머무를 게 아니라, 많은 업계 관계자들이나 또 학계에 있는 분들이 같이 검증할 수 있고 또 그것이 필요한 또 실제로 그것들을 구현하기 위한 여러 가지 소재, 부품, 장비 등 이런 것들이 전반적으로 개발돼야지만 그것들이 생태계 속에 들어갈 수 있습니다. 류수정 교수님께서 말씀하신 것처럼 하드웨어적으로 개발된다고 해서 그것들이 어떤 시스템화 될 수 있는 건 아닙니다. 거기에 올라가는 소프트웨어라든지 또 다양한 애플리케이션 같은 것들이 함께 개발돼야 되기 때문에 시간은 걸리겠지만 예전보다는 가속화될 것이라고 봅니다. 왜냐하면 우리가 실리콘을 개발해 보고, 그것들을 경쟁력 있게 키워본 경험이 있기 때문에 그런 경험들을 우리의 새로운 컴퓨팅 패러다임에도 충분히 적용할 수 있지 않을까라는 기대를 하고 있습니다.

● 주시은 아나운서

해당 분야와 관련해서 교수님들께서 상상하시는 미래는 어떤 모습인지도 궁금합니다.

● 류수정

저희가 생각할 때는 이제 이중의 컴퓨팅, 서로 다른 소자들이 굉장히 복합적으로 사용될 거라고 생각하고 있습니다. 그렇기 때문에 하나의 솔루션에 하나의 하드웨어가 아니라, 서로 다른 소자를 어떻게 활용할 수 있는지 칩의 모양, 그 다음에 전체적인 AI 시스템 차원에서도 여러 개의 칩들이 서로 다른 목적성을 가지고 연결되는, 그리고 저희는 인공지능을 하면서 느끼는 것은 앞으로 하드웨어가 실제로 스스로 발전하고 생각하고 인풋을 받아들이고 또 판단하면서 굉장히 새롭게 진화하는 모습으로 보여질 거라고 생각하고 있습니다.

● 염한웅

두 분은 공학자의 입장에서 말씀을 하신 것 같고요, 기초 과학을 하는 제 입장에서는 미래는 지금과 완전히 달라야 된다고 생각합니다. 그래서 공학에서 예측하는 미래는 선형적으로 조금씩 발전되어가면서 진화하는 모습인데요, 사실 그 기술들이 한계에 다다랐을 때, 그 패러다임을 완전히 뒤집는 것은 과학에서 나온다고 생각합니다. 그래서 기초 과학이나 현장에서 연구하시는, 또는 저를 포함한 사람들이 연구하는 새로운 개념들이 완전히 바뀌어서 우리가 예측할 수 없는 더 좋은 미래가 왔으면 좋겠다고 소망하고 있습니다.

● 최성을

저도 공학의 입장에서 이게 진화적인 발전이라고 표현할 수도 있을 텐데 반드시 어떤 혁신적인 것들이 나오려면 파괴적인 혁신이 필요하다고 생각합니다. 그 근원은 과학 기술에 있고요, 염한웅 교수님 말씀하신 대로 기초 과학의 성과들이 산업 현장까지 이어지기 위해서는 굉장히 많은 허들을 겪어야 됩니다. 그래서 꾸준함이 필요하고요. 그런 면에서 새로운 여러 개념들이 많이 출현하고 있고, 그런 것들에 도전하는 우리 젊은 인재들이 많이 과학기술계로 왔으면 좋겠고요, 이 젊은 친구들이 실제로 도전하면서 실패도 겪을 수 있지만 용

기를 북돋아주고, 더 지원할 수 있는 그런 사회가 되면 더 좋겠습니다. 그래서 새로운 과학 기술들이 좀 더 현재의 기술적 한계를 극복할 수 있도록 젊은 세대들이 더 크게 기여할 수 있는 사회가 되면 좋겠다고 생각합니다.

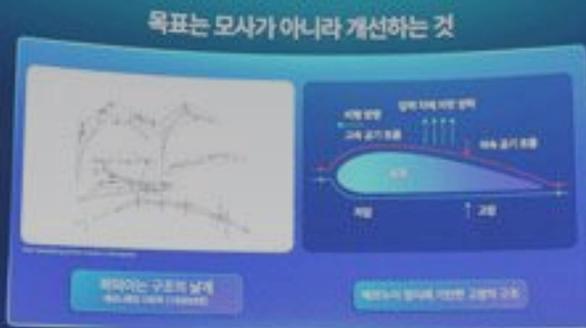


SESSION 8. 대담 뉴로모픽 아키텍처 사람의 뇌처럼 효율적인 컴퓨터 만들 수 있을까?

영상 보러가기



석민구
컬럼비아대 전기공학부 교수



전동석
서울대 융합과학기술대학원 교수

● 최혜림 아나운서

미국 텍사스에 있는 마이크로소프트 데이터 센터 사진입니다. 이 데이터 센터에서는 여러분이 챗GPT에 무심코 던진 질문 5개를 처리하기 위해 500ml의 물이 사용되고 있다고 합니다. 문제는 이뿐만 아닙니다. 이런 데이터 센터를 만드는데 드는 비용도 천문학적인데요. 엔비디아사의 DGX H100라는 컴퓨터입니다. 2년 전에 나온 모델인데 컴퓨터 한 개당 가격이 약 5억 원입니다. 현재 보통의 데이터 센터에서는 약 3000개의 H100 컴퓨터가 들어가는데, 이 컴퓨터 가격만 1조 5천억 원에 달한다고 합니다. 이렇게 엄청난 자원을 소비하는 AI컴퓨터와 비교해 인간의 뇌는 단 세 끼의 식사만으로, 자동차를 운전하고, 그림을 그리고, 대화를 나누는 등 훨씬 다양한 역할을 하고 있습니다. 그래서 과학자들은 의문을 품었습니다. “인공지능을 위한 컴퓨터를 만든다면 뇌를 모사해야 하지 않을까?” 이 질문의 답을 찾는다면 완전히 새로운 컴퓨팅 시대가 열릴 텐데요. 기술적 난관을 넘어 뇌와 같은 높은 연산 효율을 가진 뉴로모픽 컴퓨터 시대를 준비 중인 세계적인 석학 두 분을 모셔보겠습니다. 참고로, 두 분은 2009년부터 15년째 함께 공동 연구를 하고 계시다는데요. 이제는 이심동체, 뇌쌍둥이라는 설도 있다고 합니다.

● 석민구

‘과학자들이 뇌를 모사해서 컴퓨터를 만들어야 하지 않을까?’에 대해 한 가지를 바로 잡고 가고 싶습니다. 제 생각에, “모사”는 좋은 방향이 아니라고 생각합니다. 인간의 뇌와 컴퓨터는 기본적인 구성요소(Building Block)가 다르기에, 겉모양만 흉내 낸다고 뇌처럼 동작하진 않습니다. 오히려 우리는 뇌에서 모티프(Motif)를 찾고 이를 개발해서, 손에 잡히는 실질적인 성과를 만드는 전략을 고민해야 한다고 생각합니다. 겉모양을 흉내내는게 아니고, 원리를 응용해야 한다는 것이죠. 이를 잘 보여주는 예시가 비행기 개발 과정인데요, 인류

는 오랫동안 하늘을 나는 꿈을 꾀 왔습니다. 1500년대 레오나르도 다빈치는 새의 날갯짓을 모방한 비행 기계를 스케치했습니다. 날개를 퍼덕이는 방식은 새의 비행을 가장 직접적으로 모방한 형태였음에도 불구하고 성공하지 못했는데, 그 이유는 구조적으로 취약하여 쉽게 부서졌기 때문입니다. 현대의 비행기는 새의 날개를 그대로 모방하는 대신 고정익(Fixed Wings)을 채택하고 있으며, 윗면은 곡선을 이루고 아랫면은 평평한 형태의 날개를 가지고 있습니다. ‘베르누이의 정리’에 따르면, 비행기가 추진력을 받으면 날개의 윗면과 아랫면을 따라 두 개의 다른 공기의 흐름이 형성되며 그 결과 양력이 발생하게 됩니다. 결국 이러한 개념이 널리 받아들여지며, ‘고정익’이라는 새로운 해법이 하늘을 날게 만든 겁니다.

● 전동석

석민구 교수님의 말씀에 전적으로 동의합니다. 사실 뉴로모픽 컴퓨팅을 조금이라도 연구해 보신 분들은 대부분 동의할 것입니다. 인간의 뇌를 그대로 만들 필요도 없고, 만들 수도 없으며, 설령 만든다고 해도 얻을 수 있는 것이 아직 명확하지 않습니다. 또한 뇌가 정확히 어떻게 동작하는지도 완전히 밝혀지지 않은 상황에서 이를 그대로 재현하는 것은 별 의미가 없다고 생각합니다. 그 대신, 우리가 뇌에서 얻은 모티프를 바탕으로 컴퓨터의 실질적인 성능 개선을 이루는 것이 더 중요하다고 생각합니다.

● 석민구

전동석 교수가 좋은 말을 해 주셨습니다. 실질적인 성능 개선을 이루는 것이 가장 중요하죠. 그럼 도대체 어떤 성능을 개선해야 할까요? 저는 효율성 개선이 주요 목적이 되어야 한다고 생각합니다. 사실 신경망 알고리즘이 최근 엄청난 발전을 이루면서 이미 여러 분야에서 인간의 능력을 초월하는 성능을 보여주고 있습니다. 그러나 현재 인공지능은 효율성이라는 큰 문제에 직면해

있습니다. 막대한 양의 하드웨어가 필요하며, 전력 소모도 엄청납니다. 그래서 우리는 열 개의 그랜드 퀘스트 주제 중 하나로 뉴로모픽 컴퓨터 개발을 제시하며, 특히 뇌 수준의 효율성을 갖춘 컴퓨터 구조를 제안하고자 합니다. 적은 에너지를 사용하고 적은 컴퓨터 자원을 사용하는 것이 핵심입니다.

그럼 잠깐 한 걸음 물러나서, 왜 대한민국이 뉴로모픽 컴퓨터 기술을 도전해야 하는 걸까요? 이 질문에 대한 가장 현실적인 답은 천문학적인 시장 가치 때문입니다. 많은 전문가들이 인공지능 반도체 시장 규모가 조만간 약 700조 원까지 성장할 것으로 예상하고 있습니다. 이는 현재 반도체 시장의 전체 규모와 맞먹는 수준이고 한국 현재 GDP의 1/3에 달하는 어마어마한 양입니다. 이렇게 성장하는 시장을 어떻게 선점할 것인가 하는 점에서 뉴로모픽 컴퓨터 기술이 굉장히 중요한 역할을 하게 된다고 생각합니다.

● 전동석

그런데 “왜 하필이면 뉴로모픽 기술을 도전해야 하나요?” 라고 물어 보시는 분들이 있을 것 같습니다. 그 질문에 답하기 위해, 인공지능 반도체, 넓게로는 비메모리 반도체 시장에서 승자가 되기 위해서 어떻게 해야 할지를 먼저 생각해 봐야겠습니다. 승자가 되는 아주 간단한 방법은 ‘먼저 시작하는 것’입니다. 누가 시장에 먼저 진입하느냐가 가장 중요합니다. 예를 들어, 인텔은 1971년 세계 최초로 CPU를 개발한 이후 지금까지 CPU 시장을 주도하고 있습니다. 엔비디아 역시 1999년 최초의 GPU를 개발한 이후 현재까지 GPU 시장을 장악하고 있습니다. 그래서 이 비메모리 시장에서 성공하려면 무엇보다 최초로 시작하는 것이 중요하고, 그렇기 때문에 뉴로모픽 기술을 지금 연구하는게 중요하다고 생각합니다.

● 석민구

덧붙여 말씀드리자면 많은 분들이 아시다시피, 현재 인

공지능 반도체는 엔비디아가 선발주자로서 시장을 장악하고 있습니다. 그렇다면 후발주자가, 어떻게 이미 시장을 장악하고 있는 엔비디아를 이길 수 있을까요? 엔비디아를 이기기 위해서 가장 중요한 것은, 엔비디아와는 다른 접근 방식을 취해야 하는 것입니다. 단순히 동일한 기술을 반복하는 것으로는 시장 리더를 따라잡기에 한계가 있습니다. 물론 AI 시장이 워낙 크니까, 2등, 3등 회사들도 생존할 가능성은 있습니다. 하지만 이런 상황에서는 생존을 위해 어려운 싸움을 해야 합니다. 그런 면에서, 오직 차별화된 기술 개발을 통해 새로운 시장을 개척해야만 그 시장의 유의미한 부분을 가져올 수 있습니다. 이러한 점에서 뉴로모픽 컴퓨터는 아직 많은 회사들이 시도해 보지 않은 기술이기에, 도전에 볼 만한 가치가 충분하다고 저희는 생각합니다.

● 전동석

석민구 교수님께서 말씀해 주신대로, 뉴로모픽 컴퓨터를 만드는 것이 우리가 반도체 시장을 선점할 수 있는 매우 중요한 계기가 될 수 있다고 생각합니다. 그럼 뉴로모픽 컴퓨터를 만들기 위해서는 어떤 기술을 개발해야 할까요? 기존의 컴퓨터와 생물학적 뇌의 가장 큰 차이는 물리적으로 내부에 실제 뉴런이 존재하는지의 여부입니다. 현재도 컴퓨터 내에서 뉴로모픽 컴퓨팅 알고리즘을 구동하는 연구들이 활발히 진행되고 있고, 이미 여러 칩들도 개발되어 있습니다. 이러한 칩들은 뉴런과 시냅스에 해당하는 데이터를 임시로 메모리에 저장하고, 특정 뉴런이 스파이크를 발생시키면 이에 해당하는 데이터를 불러와서 연산기가 연산을 수행한 뒤, 그 결과를 다시 메모리에 저장하는 방식을 사용하고 있습니다.

즉, 알고리즘 자체는 인간 두뇌의 구동 방식을 모사하고 있지만, 이를 구동하는 실제 하드웨어는 여전히 폰노이만 아키텍처를 따르고 있습니다. 그러나 이러한 방식은 현재 우리가 가진 가장 좋은 컴퓨팅 하드웨어인

폰 노이만 아키텍처에 뉴로모픽 컴퓨팅을 구현하는 데는 적합하지만, 궁극적으로 뇌 수준의 효율성을 얻기 위해서 우리가 추구해야 할 방향은 아닐 수 있습니다.

● 석민구

예를 들어, 뇌는 아주 많은 뉴런으로 구성된 거대한 신경망이지만 각 뉴런들은 1초에 몇 십번 정도의 동작을 하는 수준으로 매우 느립니다. 그러나 현재의 컴퓨터로 뉴로모픽 컴퓨팅을 구동한다면 우리가 사용하는 일반적인 CPU나 GPU와 마찬가지로 일초에 수십억 번의 동작을 수행하는 속도로 동작해야 하며, 자연스럽게 소모 전력이 높아질 수밖에 없습니다. 따라서 이러한 방식이 정말로 에너지 효율적인 해법이 될 수 있는지에 대해 고민이 필요합니다. 이 외에도, 폰 노이만 아키텍처에서 가장 큰 한계로 지적되는 메모리와 연산기 사이의 한정된 대역폭과 메모리에 접근할 때 발생하는 높은 에너지 소모가 여전히 전체 시스템의 성능과 효율성을 크게 제한할 것입니다. 이런 점들을 고려한다면, 폰 노이만 구조에 뉴로모픽 컴퓨팅을 가상으로 엮는 것이 아니라 근본적으로 다른 접근법이 필요함을 알 수 있습니다.

● 전동석

저는 뉴로모픽 컴퓨팅의 장점을 극대화하려면 극단적으로 병렬화된 아키텍처가 우리가 가야 할 길이라고 생각합니다. 사람의 뇌가 효율적으로 동작할 수 있는 이유는 각각의 뉴런과 시냅스가 물리적으로 존재하며, 이들이 매우 느린 속도로 작동하면서 아주 적은 양의 데이터를 주고받으며 연산을 수행하기 때문입니다. 따라서 컴퓨터에서도 이와 비슷한 형태의 병렬화된 아키텍처를 만들어야 효율성을 극대화할 수 있을 것입니다.

● 석민구

이러한 맥락에서 우리가 정말로 하고 싶은 것은 모든 뉴런을 칩 위에 실제로 배치하는 것입니다. 이를 통해

중앙 집중식 메모리를 없앨 수 있고, 연산기와 메모리 사이에서 데이터를 주고받으며 발생하는 문제들을 완벽히 해결할 수 있습니다. 즉, 뉴런이 필요한 데이터를 자체적으로 저장하고 연산에 사용하기 때문에 메모리 병목현상 자체가 존재하지 않습니다. 또한 하드웨어는 상대적으로 훨씬 단순해지고 동작 속도도 낮출 수 있기 때문에 소모되는 에너지를 낮출 수 있을 것입니다. 또한 데이터 이동의 거리와 빈도도 크게 줄일 수 있어 훨씬 효율적인 데이터 처리가 가능합니다. 그러면 남은 질문은, 현재의 기술로 이러한 컴퓨터의 구현이 가능할 것인가?입니다. 궁극적으로 우리가 목표로 하는 것은 컴퓨터에서 인간 뇌 수준의 대규모 신경망을 물리적으로 구현하는 것입니다.

● 전동석

석민구 교수님 말씀처럼, 인간 뇌와 동등한 수준의 신경망을 구현하는 것이 우리의 궁극적인 목표라고 할 수 있습니다. 인간의 뇌는 약 1011개의 뉴런과 1014개의 시냅스로 구성되어 있다고 알려져 있습니다. 이를 현재의 인공지능 기술과 비교해 보자면, 최신 모델 중 하나인 GPT-4가 대략 1012개 정도의 파라미터를 가지고 있는 것으로 알려져 있습니다. 이 파라미터는 시냅스 가중치(Synaptic Weight)와 비슷한 개념이므로, 이를 기준으로 인간 뇌와 비교해보면 약 100배 정도의 차이가 납니다. 물론 100배면 여전히 큰 차이지만, 과거에 비해 상당히 가까워지고 있다고 볼 수 있습니다. 하지만 여기서 인공신경망 모델이 더 커지게 되면 그때부터는 비용 등의 한계로 실제 시스템을 운영하기가 매우 어렵습니다. 그래서 최근에는 모델의 성능을 유지하면서 모델의 크기를 줄이는 방향으로 많은 연구가 진행되고 있습니다. 이는 반대로 말하면 만약 인간의 뇌만큼 높은 효율성을 가진 칩을 만들어 공급할 수 있다면, 100배 더 큰 모델도 얼마든지 사용할 수 있다는 이야기입니다. 이를 통해 지금은 불가능하다고 생각되는 정말 많은 일들이 가능할 수 있습니다.

● 석민구

그러면 실제 인간의 뇌와 같은 규모의 큰 칩을 만드는 게 기술적으로 가능할까요? 이를 대략적으로 추정해볼 수 있는데, 예를 들어 5나노미터 공정으로 뉴런을 만든다고 가정하면 인간 뇌가 가진 약 1011개의 뉴런을 집적하기 위해서는 칩의 크기가 대략 4m×4m 정도가 되어야 합니다. 이것이 얼마나 큰 것인지 감이 잘 오시지 않을 수 있는데, 현대 기술의 정점이라고 할 수 있는 GPU 칩조차도 크기가 몇 cm×몇 cm에 불과합니다. 이보다 더 큰 칩을 만들지 못하는 이유는 반도체 공정 기술의 한계와 과도한 비용 때문입니다. 이러한 기술적 장벽들이 매우 높기 때문에 우리가 목표로 하는 수준에 도달하기까지는 아직은 갈 길이 멉니다. 현실적으로 GPT-4 수준에 해당하는, 즉 뇌의 약 1/100 뉴런들을 구현하는 데에는 대략 40cm×40cm 정도의 칩이라면 어느 정도 실현 가능성이 있지 않을까 예상합니다. 물론 이마저도 현재의 기술로는 구현이 어렵지만, 현재도 반도체 공정 기술은 계속 발전하고 있기 때문에 언젠가는 가능하지 않을까 생각하고 있습니다.

● 전동석

석민구 교수님 말씀처럼 현재의 기술 수준으로는 집적도를 크게 높이는 것이 쉽지 않습니다. 이러한 문제를 해결하기 위해 제가 주목하는 기술 중 하나가 칩 적층(Stacking) 기술입니다. 이는 하나의 큰 칩을 만드는 대신 여러 개의 작은 칩을 수직으로 적층하여 연결하는 방식이고, 이 과정에서 일반적으로 TSV(Through-Silicon Via-실리콘 관통 전극)라는 기술을 사용해 칩 간의 연결을 구현합니다. 이와 같이 전체의 칩을 3차원 구조로 전환하면 동일한 부피 안에 더 많은 뉴런과 시냅스를 효율적으로 집적할 수 있고, 연결도 훨씬 잘 만들어 줄 수 있습니다. 사실 이러한 적층 기술은 이미 산업계에서 널리 사용되고 있습니다. 고성능 메모리로 주목받는 HBM(고 대역폭 메모리)자체가 로직 다이 위에

여러 개의 DRAM 다이를 적층하는 방식으로 제작됩니다. 이미 일정 수준의 3차원 적층을 하고 있는 셈입니다.

또한 GPU의 경우도 GPU 칩 옆에 HBM 메모리들이 함께 통합되어 있습니다. 이러한 방식은 완전한 3차원 적층까지는 아니어도 실리콘 인터포저(Silicon Interposer)를 활용한 2.5D 통합 방식으로 볼 수 있습니다. 그리고 지금까지는 주로 뉴런에 대해서만 말씀을 드렸지만, 사실 더 큰 문제는 시냅스입니다. 시냅스는 뉴런보다 천 배는 더 많아야 하고, 2D 평면에서 이를 효율적으로 연결하는 것은 사실상 불가능합니다. 따라서 적층을 통해 3D 구조를 만드는 것이 반드시 필요하지만, 최신의 HBM조차도 열 개 정도의 칩만 적층을 하고 있습니다.

● 석민구

그럼 당장 우리는 어떻게 해야 할까요? 인간의 뇌만큼 극단적인 병렬성을 당장 구현하는 것은 현재에는 불가능하므로, 그 장점을 일부 취하면서도 현재 기술 수준에서 달성 가능한 범위까지 나아가는 것이 현실적이라고 생각합니다. 뉴로모픽 컴퓨터에 진심으로, 꽤 오랫동안 투자해온 회사 중 하나가 요즘은 어려움에 빠진 미국의 인텔입니다. 인텔이 만든 뉴로모픽 칩인 로이히(Loihi)에서는 앞에서 언급한 문제를 재미있는 방식으로 해결하고 있습니다. 뉴런을 하나하나 물리적으로 구현하지 않고, 뉴로모픽 코어를 칩 안에 약 128개 배치했습니다. 그리고 각 코어는 하나의 뉴런과 1:1로 대응하는 것이 아니라, 타임 셰어링(time Sharing), 즉 시분할 방식을 통해 하나의 코어가 약 천 개의 뉴런을 담당하도록 되어 있습니다. 이 설계는 뉴런 단위의 병렬성을 완벽히 구현한 것은 아니지만, 여전히 병렬성을 크게 높일 수 있는 현실적인 방식이라고 생각합니다. 앞에서 전동석 교수님께서 말씀을 드렸듯이, 굳이 인간의 뇌를 100% 모방할 필요는 없고, 그 장점만 취하면 되

기 때문입니다. 또한 보통 뉴로모픽 알고리즘은 매우 뜨문뜨문 동작하기 때문에 연산을 항상 해야 하지는 않습니다. 따라서 모든 뉴런을 물리적으로 구현해서 굳이 가만히 있게 할 필요는 없고, 이러한 시분할 방식을 통해 자원을 효율적으로 활용하는 것이 합리적일 수 있습니다.

● 전동석

저도 석민구 교수님 말씀에 전적으로 동의합니다. 그런데 또 하나의 문제는 딥러닝과 달리 뉴로모픽 컴퓨팅은 지금도 새로운 알고리즘이 지속적으로 등장하며 기존과 전혀 다른 연산을 요구하고 있습니다. 따라서 특정 알고리즘에 맞춰 수백억 원을 들여 칩을 제작했는데 새로운 알고리즘이 나오면 기존의 칩은 무용지물이 될 수 있습니다. 따라서 칩 설계에는 어느 정도 유연성이 필요하며, 이를 고려할 때 시분할 방식 등을 활용하여 하드웨어 자원을 일부 공유하는 것은 충분히 고려할만하다고 생각합니다. 이것과 견줄만하게 중요한 기술이 또 있는데요. 두뇌의 동작 방법 중 중요한 특성 가운데 하나는, 뉴런들이 아날로그 (analog) 신호를 기반으로 동작한다는 점입니다. 특히 이 아날로그 신호는 현대 컴퓨터에서 사용하는 디지털 신호에 비해 수십 배 이상 작기 때문에 뛰어난 에너지 효율을 이루어 낼 수 있습니다. 그런 이유로 최근 아날로그 컴퓨팅에 대한 관심이 크게 증가하고 있습니다. 석민구 교수님께서 특히 이 아날로그 회로에 대해 많은 연구를 해 오셨기 때문에 좀 더 상세히 설명을 드릴 수 있을 것 같습니다.

● 석민구

문제는 아날로그 회로만으로 컴퓨터를 구성하기 어렵다는 점입니다. 디지털 회로와 함께 구성을 해야 하는데, 이를 위해서는 아날로그와 디지털 신호 간의 변환이 필요합니다. 왜냐하면 디지털은 0과 1을 써서 신호를 표기하지만, 아날로그는 연속적인 신호를 사용하기 때문입니다. 따라서 변환 과정이 필수적이며, 이 변환

과정에서 상당한 시간과 에너지를 소모합니다. 이를 극복하는 방법으로 저희가 생각한 좋은 아이디어가 있습니다. 그 아이디어가 무엇이나면, 모든 계산을 가능하면 변환 없이 아날로그로 수행하고, 최종 결과만 디지털로 변환해서 보낸다는 것입니다. 그렇게 되면 변환 과정의 숫자를 최소한으로 줄일 수 있겠죠. 우리는 이러한 컴퓨터 구조를 '아날로그 데이터패스 디지털 컨트롤 아키텍처 (Fully Analog Datapath Digital Control Architecture)'라고 명명했습니다. 그리고 이를 기반으로 2022년에 KAIST 조성환 교수팀과 협업하여 '알콘(Archon)'이라는 컴퓨터 칩을 개발했습니다. 알콘은 세계 최초의 완전 아날로그 데이터패스와 디지털 컨트롤을 결합한 프로세서로, 다양한 인공지능 모델을 구동할 수 있습니다. 특히 효율성 측면에서 매우 우수한데, 기존 디지털 프로세서에 비해, 알콘은 수백 배의 효율 개선을 달성했고, 매우 유망한 연구 방향이라고 생각합니다.

● 전동석

저도 아날로그 컴퓨터가 매우 중요한 연구 방향이라고 생각합니다. 하지만 안타깝게도 아직 아날로그 컴퓨터가 상용화에는 이르지 못하고 있습니다. 상용화를 가로막는 여러 이유가 있겠지만 제가 생각하기에 가장 어려운 부분은 아날로그 메모리를 만드는 일입니다. 아마 많은 분들에게 아날로그 메모리라는 것은 생소한 개념일 것 같은데요. 우리가 현재 사용하고 있는 디지털 메모리와 비교해서 설명을 해 보도록 하겠습니다. 가령 디지털 메모리에 8을 저장한다면, 우리는 8을 이진법으로 변환한 값인 1000을 저장해야 합니다. 디지털 메모리 셀은 1 혹은 0만 저장할 수 있기 때문에, 8이라는 값을 저장하기 위해서는 메모리 셀 4개를 사용해서 저장하게 됩니다. 이와 대조적으로 아날로그 메모리는 훨씬 높은 정밀도인 10진법으로 정보를 저장할 수 있습니다. 가령 8을 저장한다면, 1개의 아날로그 메모리 셀만을 사용할 수 있습니다. 가장 전통적인 아날로그 메

모리는 커패시터라는 전하를 저장하는 컵에 전하를 저장하는 것입니다. 앞서 사용한 예를 이용하자면, 가령, 8개의 단위 전하를 커패시터에 저장하면 되는 것입니다. 이런 전통적인 커패시터 기반 아날로그 메모리들은 신뢰성이 높고, 빠르며, 칩 안에 넣기도 쉽고 크기도 매우 작다는 장점을 가지고 있습니다.

● 석민구

이런 아날로그 메모리에도 큰 문제가 있습니다. 그것은 누설 전류라는 것인데요. 앞서 저장한 전하 중 일부가 누설 전류를 통해 사라질 수 있습니다. 정보가 손실되는 것이죠. 최근 저희 실험실에서 수행한 실험 결과에 따르면 아날로그 메모리의 정보 보유 시간 (retention time)이 약 0.2 밀리 초 수준입니다. 굉장히 찰나의 순간이죠. 따라서 아날로그 메모리의 보유시간을 늘리기 위해 여러가지 방법이 연구되고 있습니다. 흥미로운 방법 중 하나는, 초저온 반도체입니다. 실리콘 칩의 동작 온도를 낮추면 누설 전류가 크게 줄어드는 성질을 이용하는 것입니다. 특히 영하 196도가 중요한 온도인데, 그 이유는 액화질소를 이용해 도달할 수 있는 온도이기 때문입니다. 액화질소는 전기 펌프를 이용해 쉽고 싸게 생산할 수 있으며, 이를 반도체 칩에 순환시켜주면 동작 온도를 영하 196도까지 낮출 수 있습니다. 최근 우리 실험실에서 실험한 결과, 아날로그 메모리에 액화질소를 적용했을 때 보유시간이 평균적으로 7배 이상 증가하는 성과를 얻었습니다.

새로운 소자를 사용해 아날로그 메모리를 구현하는 방식도 있습니다. 대표적인 예가 메모리 레지스터 혹은 멤리스터(memristor)라는 소자입니다. 우리가 이 소자의 저항값을 바꿀 수 있는데, 이 성질을 이용해 아날로그 정보를 소자 안에 저항값으로 저장할 수 있습니다. 하지만 오랜 연구에도 불구하고 전력 소모가 높다는 점, 신뢰성 등의 도전 과제가 남아 있습니다.

● 전동석

석민구 교수님과 제가 지금까지 뉴로모픽 컴퓨터를 구현하기 위한 기술적인 제약과 나아갈 방향에 대해서 간략히 말씀을 드렸습니다. 마지막으로 대한민국의 현재 산업 측면에서 어떤 고민이 필요할지에 대해 살펴보고 마무리를 지을까 합니다. 저와 석민구 교수님이 말씀드린 것처럼, 뉴로모픽 컴퓨터를 구현하는데 있어서 가장 큰 문제는 메모리입니다. 연산기는 여러 뉴런과 시냅스가 공유하도록 할 수 있지만, 메모리는 공유가 불가능합니다. 특정 뉴런이나 시냅스가 가진 정보를 버릴 수 없기 때문입니다. 모든 데이터를 유지해야 하므로, 신경망의 크기가 커질수록 필요한 메모리 공간과 면적도 함께 증가합니다. 이는 해결할 방법이 없고, 따라서 결국 근본적인 한계는 메모리에 있을 것이라고 예측할 수 있습니다. 하지만 현재의 CPU나 GPU를 생산하는 로직 공정은 메모리에 적합하지 않습니다. 로직 공정은 로직 회로를 잘 만들기 위한 것으로, 이 공정에서 만들 수 있는 SRAM의 크기는 DRAM이나 플래시 메모리 같은 전용 공정에서 만들어지는 메모리에 비해 훨씬 큼니다. 따라서 메모리가 핵심이라면 차라리 메모리에 적합한 공정을 사용하는 것이 더 나은 방법일 수 있습니다. 국내 기업들이 기술을 선도하고 있는 DRAM은 전용 공정을 통해 제작되며, 로직 공정에서 만들어지는 SRAM보다 훨씬 높은 밀도를 제공합니다. 뉴로모픽 컴퓨팅에서는 연산 속도가 아주 빠를 필요가 없으므로 DRAM 정도의 속도로도 충분히 대응할 수 있을 것입니다. 따라서 메모리와 연산을 결합하는 방향으로 나아가야 한다면 DRAM이 핵심적 역할을 할 수도 있다고 생각합니다.

● 석민구

전적으로 동의합니다. 사실 DRAM은 커패시터 기반으로 만들기 때문에 구조적으로 아날로그 메모리와 아주 유사합니다. 따라서 아날로그 메모리를 만드는데 있어서 DRAM 공정을 응용하는 것은 아주 좋은 방향이라고

생각합니다. 다만 아날로그 메모리나 아날로그 컴퓨팅 칩을 상용화하기 위해서는 변동성을 해결하는 것이 중요한 과제 중 하나라고 생각합니다. 예를 들어, 2014년에 발표된 뉴로그리드(Neurogrid) 칩은 약 6만 개의 아날로그 뉴런과 아날로그 시냅스를 가지고 있었습니다. 하지만, 가장 큰 문제점은 반도체의 결과값이 동작 온도나 어떤 칩이냐에 따라 달라진다는 점입니다. 이런 변동성은 최신 공정으로 갈수록 더욱 나빠지는데, 그런 이유로 뉴로그리드 칩이나 기존의 아날로그 칩들은 최신 공정을 사용할 수 없었습니다. 그래서 오래된 공정을 사용하고, 따라서 뉴런 및 시냅스의 크기가 커지고, 그 결과, 한 칩에 포함될 수 있는 뉴런과 시냅스의 숫자가 줄어드는 단점이 있었습니다. 따라서 이러한 변동성을 극복하기 위해 피드백 기반으로 컴퓨터 칩을 설계해야 한다고 생각합니다. 그 중에서도 특히 흥미로운 기술 중 하나는 피드백 기반 기술입니다. 피드백 기술은 1920년대에 헤럴드 블랙(Harold Black)이 개발한 매우 강력한 기법입니다. 헤럴드 블랙은 증폭기 (amplifier)의 증폭율이 온도에 따라 변하는 것을 보고, 그 문제를 해결하기 위해 고민 끝에 피드백 기술을 발명했습니다. 매우 강력하게 증폭율의 변화를 잡아주는 성능을 보여줬습니다. 저희 연구진도 최근에 피드백 기반의 아날로그 메모리를 개발했는데, 변동성을 125배 이상 개선하는 결과를 얻었습니다. 한국 산업이 DRAM 및 다양한 메모리 반도체 설계 및 생산 기술을 선도하고 있는 만큼, 그런 점을 잘 이용하면 사람의 두뇌만큼 효율적인 뉴로모픽 컴퓨터를 만들 수 있는 유리한 위치에 있을 것으로 생각합니다.

● 최혜림 아나운서

말씀을 듣고 나니 궁금해지는데요, 두 분이 생각하시는 진짜 인간 뇌 수준의 효율을 가진 컴퓨터는 언제쯤 현실화될 수 있을까요?

● 전동석

상당히 어려운 질문이긴 한데요, 정확한 답변을 드리는 게 쉽지 않을 것 같습니다. 하지만 앞에서 저희가 말씀드린 것처럼, 뉴로모픽 컴퓨터를 만드는데 필요한 여러 기술들이 어느 정도는 개발이 되어있다고 생각합니다. 예를 들어서 칩의 적층 기술이나 혹은 메모리 전용 공정 등이 이미 산업계에서도 활발히 적용되고 있습니다. 따라서 이렇게 이미 존재하고 있는 기술들을 앞으로 적절히 발전을 시키면 훨씬 더 높은 수준의 병렬성을 갖고 또 실용성이 있는 뉴로모픽 컴퓨터가 가까운 미래, 어쩌면 5년에서 10년 이내에도 실제로 만들어질 수 있다고 봅니다.

● 최혜림 아나운서

마지막으로 또 한가지 더 질문을 드리겠습니다. 최근 기술패권 경쟁이 심화되고 있습니다. 전쟁이라고도 하고요. 지금 이 분야에서 기술 주권을 키워나가기 위해서 어떤 전략이 필요할까요?

● 석민구

좋은 질문을 해주셨는데요, 저의 연구 분야이기도 해서 조심스럽지만, 제 생각에 한국 내에 비메모리 분야 산업 성장이 매우 중요하다고 생각합니다. 비메모리 분야는 치킨 게임이 필요 없는 분야이며 산업 지배력 또 산업 지속성이 메모리 분야보다 탁월한 분야입니다. 따라서 한국의 미래 100년을 책임져줄 수 있다고 생각되는데요, 가장 중요한 요소는 2가지입니다. 첫 번째는 인력, 정확하게는 다수의 박사급, 석사급 인력이 지속적으로 배출되어야 합니다. 결국 스타 엔지니어가 필요한 것이죠. 빌 게이츠나 저커버그 같은 경우는 매우 예외적인 경우이고, 최근 조사에 따르면, 미국에서 대부분의 스타트업의 창업자는 박사 소지자라고 합니다. 이러한 박사급 인력의 지속적인 배출을 위해서는 대학에 지속적인 연구비를 주는 것이 유일한 방법입니다. 다행히

한국은 그 중요성을 동의하고 제가 알기로는 상대적으로 타 분야에 비해 많은 펀드를 반도체 분야에 제공한다고 들었습니다. 하지만, 더 많은 더 지속적인 지원을 제안합니다.

두 번째는 스타트업입니다. 비메모리 분야는 스타트업의 역할이 매우 중요합니다. 위에서 배출한 박사들 중 일부가 스타트업을 시작하기 위해서는 쉽게 벤처 펀드에 접근하는 것이 필요한데, 그런 면에서, 국부펀드나 민간펀드가 비메모리 스타트업 투자를 장려하는 것을 제안합니다.

추가 제안하자면, 스타트업 해외 매각에 대해 긍정적이어야 합니다. 스타트업의 성공에 있어서 엑시가 매우 중요한데, 현재 한국에서는 비메모리 스타트업이 있다 하더라도 이것을 인수합병 할 회사가 거의 없습니다. 해외 매각은 기술 유출이라고 할 수는 없습니다. 해외 매각이 되더라도, 그 회사는 여전히 같은 곳에서 같은 사람들이 운영하는 것이 일반적입니다. 오히려 성공적인 엑시는 더 많은 스타트업의 창업을 유도할 것입니다. 따라서 해외매각이든 국내매각이든 성공적인 엑시 사례를 많이 보여주는 것이 한국 미래 스타트업 발전에 도움이 될 것이라고 생각합니다. 이스라엘 같은 곳에서도 해외매각에 대해서는 매우 긍정적으로 바라보고 있고요, 많은 회사들이 해외매각이 되고 있는 상황입니다.



SESSION 9. 가상현실과 뇌내현실 **뇌내현실이 현실화된다면?**



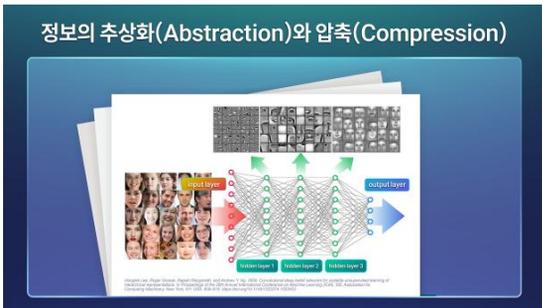
"뇌내현실" 개념의 이해

백세범 KAIST 뇌인지과학과 교수

[영상 보러가기](#)

SBSX
그랜드
퀘스트

‘뇌내현실’이라는 표현은 언뜻 보기에는 단순히 더 실감나고 우수한 가상현실 기술을 개발하자는 취지로 생각될 수 있습니다. 그러나 오늘 다룰 내용은 그런 차원의 논의가 아닙니다. 뇌내현실이라는 새로운 용어를 만들어내면서까지 표현하고 싶었던 새로운 개념입니다. 가상현실은 단순히 사용자의 오감을 자극해 실제와 유사한 경험을 제공하는 기술입니다. 즉, 뇌 바깥에 위치한 감각 기관을 통해 외부에서 정보를 받아들여 뇌로 전달하는 방식이죠. 반면 뇌내현실이라는 개념에는 우선 ‘뇌 내부’라는 것에 강조점이 있습니다. 즉 뇌내현실 기술은 감각 기관을 거치지 않고 뇌 내부와 직접적으로 접촉해 정보를 주고받는다라는 것이 핵심입니다. 안경과 망치 그리고 책의 공통점은 무엇일까요? 이들은 모두 인간의 능력을 향상하기 위한 도구들입니다. 이들은 각각 감각기능을 향상하는 도구, 운동기능을 돕는 도구, 인지기능을 강화하는 도구로 나뉩니다. 인지 기능의 경우 책은 우리의 기억 한계를 넘는 지식의 저장물, 컴퓨터는 정보의 저장뿐 아니라 빠른 계산과 처리를 가능하게 합니다. 이를 신경계에 대응시켜보면 어떨까요. 감각 기능을 보완하는 도구는 ‘신경보철’, 운동 기능을 보완하는 도구는 ‘뇌-기계 인터페이스로 작동하는 기계’에 대응시킬 수 있습니다.’



여기서 더 나아간다면? 이러한 도구를 인지 기능에도 확장해서 적용할 수 있지 않을까요? 즉, 뇌 내부의 정보 처리에 직접 개입하여 인지적인 상호작용을 하는 신경적 기술이 개발된다면 감각기관을 통해 인식되는 외부 세상과는 별개로, ‘뇌 내부에서 실현되는 완전히 새로운 세상’을 구현할 수 있다는 것입니다. 그래서 이를 종합적으로 표현하기 위해 ‘뇌내현실’이라는 새로운 개념을 제시합니다.

뇌내현실이라는 개념에서 추구하는 것이 무엇인지 실제적인 예시를 살펴보겠습니다. 우선 ‘실제와 구별할 수 없는’ 가상현실을 당연히 구현할 수 있습니다. 뇌가 세상을 경험할 때 나타나는 신경 활동을 직접 만들어주기만 하면 되는 것이죠. 이런 가상현실의 개념은 사실 오래전부터 인간이 상상해 왔던 것입니다. 꽤 오래전부터 영화속에서는 완전한 가상현실을 구현하는 장면이 등장합니다. 이 중 특별히 <매트릭스>(1999)라는 영화는 가상현실을 경험하기 위해 눈과 귀에다 정보를 전달하는 대신 뇌와 신경계를 직접 연결해 신호를 전달하는 방법을 보여줍니다. 이 방식이 왜 특별할까요? 지난 100여 년간 신경과학에서 이뤄진 연구를 살펴보면, 이 개념이 매우 의미 있는 설정이라는 점을 이해할 수 있습니다. 신경과학에서 감각 기능, 운동 기능, 그리고 상위의 다양한 기능에 관한 연구 결과들은 상당히 많은 경우 다양한 수준의 정보를 개별 뉴런 차원에서 직접적으로 표상할 수 있음을 보여줍니다. 이를 아주 단순화시켜 이야기하면 신경망 연결 구조와 신경 정보 표상 알고리즘의 원리를 이해하면 뉴런이 사용하는 언어, 즉 뉴럴스파이크 패턴을 통해 뇌 내부와 직접적으로 의사소통할 수 있다는 것입니다. 그렇다면 굳이 왜 직접적으로 뇌 내부와 상호작용하는 것이 중요할까요? 엄청난 효율로 압축된 정보를 주고받을 수 있기 때문입니다. 대부분의 감각 신경 기관은 위계적인 층상 구조로 되어 있습니다. 이는 요즘 사용되는 딥 뉴럴네트워크도 마찬가지죠. 상위 계층으로 올라갈수록 정보는 점점 더 추상화되고 압축된 형태로 처리됩니다. 즉, 신경계의 상위 계층에서 직접 신호를 주고받을 수 있다면, 단순한 하위 정보들의 인식을 건너뛰고 핵심 정보의 표현(Representation) 자체를 소통할 수 있다는 뜻이 됩니다. 즉 엄청난 양의 정보를 아주 짧은 시간 안에 처리할 수 있게 됩니다. 그랜드마더셀이라는 용어는 특정한 사람을 인식하는 정보를 신경세포 수준에서 표상한다는 개념인데, 추상화된 정보 처리의 좋은 예시입니다. 예를 들어 할리 베리 셀(Halle Berry Cell)이라고 명명된 뉴런은 영화배우 할리 베리의 사진, 얼굴 스케치 등 할리 베리를 표상하는 다양한 자극에 동일하게 반응하고, 심지어 글자로 적은 할리 베리의 이름에도 반응합니다.



이러한 신경과학 연구의 결과들은 감각신경계의 상위 계층에 접근하면 매우 압축된 정보로 상호작용할 수 있다는 것을 시사합니다. 특정 신경 회로에 이상이 발생해 신체 운동 조절이 어려운 경우에, 해당 뇌 부위를 직접 접촉해서 신호를 전달하는 방식으로 문제를 해결할 수 있습니다. 이것이 가능함을 보여주는 사례가 화면에 보이는 원숭이의 게임 실험입니다. 이 실험에서 원숭이는 전혀 손을 사용하지 않고, 머리에 삽입된 전극을 통해 자신의 의지로 게임을 진행하고 있습니다. 이 게임은 생각보다 난이도가 높고 신속한 동작을 요구하지만, 원숭이는 실시간으로 공을 받아치며 성공적으로 보상을 얻는 모습을 보여줍니다. 이런 방식으로 뇌 내부에서 읽어낸 신호를 생물학적 신체, 인공 신체, 그리고 뇌내현실에서의 가상적인 신체에 연결하여 제어할 수 있는 기술이 가능해질 것으로 기대합니다. 뇌내현실적 기법을 통해 감각 기능 뿐 아니라 운동 관련 기능을 회복하거나 조절하는 데 활용될 수 있는 예시입니다.

인지적 기능에 이러한 기술을 적용하면 어떤 일이 가능할까요? 영화 <토탈 리콜>에서는 주인공의 기억이 조작되는 사건이 핵심 소재로 등장합니다. 동물 실험에서는 이미 10여 년 전에 특정 뉴런들을 직접 접촉해 선택적으로 자극하거나 억제하면 실제로 기억을 뇌에 주입하거나 조작하는 것이 가능하다고 보고되었습니다. 기억을 조작한다는 표현 대신 '지식을 주입한다'고 해석해 볼까요? 영화 <매트릭스>에 이런 장면이 나옵니다. 주인공이 탈출하려면 헬기를 조종해야 하는데, 조종법을 전혀 모릅니다. 그런데 즉석에서 헬기 조종법을 자신의 뇌에 다운로드 받아 탈출에 성공합니다. 이러한 일이 실제로 가능해 집니다.

이러한 기술은 꿈같은 이야기로 보일지 모르지만, 생각보다 수월하게 구현될 수도 있습니다. 개별 뉴런의 신호를 매우 정밀하게 해석하거나 일일 통제할 필요가 없다는 점 때문입니다. 딥러닝에서 모든 것을 하나하나 프로그래밍하지 않는 것과 유사하게, 뇌도 실험과 훈련 시스템을 잘 설계하면 별다른 조작 없이도 안정적으로 기능을 수행하도록 학습이 이뤄집니다. 이는 잘 알려진 신경 가소성, 즉 뇌의 뛰어난 적응적 능력 때문입니다. 따라서 입력 신호와 구체적 기능의 관계를 신뢰성 있게 구축하기만 하면, 뇌가 스스로 적응해 해당 기능을 동작하게 하는 신경회로 구조를 형성할 수 있을 것입니다. 여기서 제시하는 기술을 통해 추구하는 궁극적인 목표는 어떤 것일까요? 가장 먼저 목표하는 것은 '복구(Repair)'입니다. 거의 모든 종류의 감각 및 운동 신경계 기능 이상을 구체적인 장애의 부위와 원인에 구애받지 않고 해결할 수 있을 것입니다. 우울증이나 퇴행성 치매와 같은 다양한 정신 질환의 해결도 가능해집니다. 이러한 문제는 특정한 신경회로 또는 뇌 전방에서 나타나는데, 해당 신경회로에 직접 접촉하여 그 신경 표현(Representation)을 조절할 수 있다면 분명 해결이 가능할 것입니다.

일반적인 '인간능력향상(Enhancement)'도 가능해질 텐데, 뇌가 외부의 기계 장치나 컴퓨터와 실시간으로 의사소통을 한다면, 이론적으로 계산 능력이 1000배 향상되고, 기억 용량이 1만 배 늘어나는 것도 가능합니다. 영화에서와 같이 필요할 때 즉시 정보나 지식을 다운로드하는 것도 가능해집니다. 이것이 '뇌내현실'을 통해 구현할 수 있는 미래입니다. 그런데 이에 대해서는 단순히 기술적인 구현 가능성보다 더 중요한 문제가 있습니다. 이런 인간능력의 향상이 사회적으로, 윤리적으로는 어떻게 받아들여질까 하는 것입니다.





뇌내현실의 현실화

이대열 존스홉킨스대 신경과학과 블룸버그 특훈교수

[영상 보러가기](#)



인간은 환경을 개조하여 자신들이 필요한 물질을 얻기 위한 정신적 활동과 육체적 노동을 끊이지 않고 계속해 왔습니다. 그런 생활활동이 250년 전쯤 산업혁명을 거치며 큰 변화를 겪게 되었죠. 처음에는 화석 연료를 기계적 에너지로 전환할 수 있는 증기기관 같은 기계를 이용해서 필요한 육체적 노동을 절감하는 것이 목적이었지만, 최근에는 컴퓨터와 인공지능을 통해서 다양한 산업분야에서 정신노동의 필요성도 줄여가고 있습니다. 이렇게 가속되는 기술의 다음 단계는 이 모든 것을 가능하게 한 인간의 뇌를 목표로 하고 있습니다. 지난 100년 동안 양자역학과 컴퓨터공학처럼 뇌과학자들도 인간의 뇌가 작동하는 기본적인 원리를 많이 밝혀내었고 그로 인해 이제 인간의 뇌를 전기적으로 측정하고 조절해서 비정상적인 기능을 보정하고 인간의 인지적인 기능이 기존의 생물학적인 한계를 뛰어넘을 수 있게 하려는 시도가 진행중입니다. 우리가 현실이라고 생각하는 모든 경험들이 뇌의 활동에 의한 것이 때문에, 이와 같은 기술을 '뇌내현실'이라고 합니다. 뇌내현실을 구현하려면 인간의 뇌세포들의 활동을 조절할 수 있어야 합니다.

가장 분명한 방법은 뇌세포를 전기적으로 자극하는 것입니다. 과연 깨어 있는 사람의 뇌를 전기적으로 자극하면 어떤 느낌이 들까요? 이와 같은 실험은 20세기 중반 간질 치료를 위한 뇌수술의 정확도를 높이기 위해 펜필드가 개척한 분야입니다. 그는 뇌를 전기적으로 자극하면 피부에 전기자극을 가할 때와 같은 찌릿한 느낌이 드는 것이 아니라 자극되는 뇌의 부위에 따라 다른 느낌을 경험하게 된다는 것을 알아냈습니다. 이와 같은 뇌의 전기자극은 현재도 뇌 수술시에 자주 사용되는 방법입니다.

예를 들어 최근에는 뇌종양제거를 위한 뇌수술을 받은 환자가 수술 후에도 기타 연주를 계속할 수 있다는 것을 확인하기 위해 기타 연주를 해가면서 수술을 받은 적도 있습니다.

하지만, 이렇게 수술 시에 실험적으로 사용된 기술에 반해, 우리가 일상에서 경험하는 현실과 더 유사한 뇌내현실을 구현하기 위해서는 전극의 수와 정확도를 아주 많이 높여야 합니다. 인간의 뇌에는 800억여 개의 신경세포가 있고, 그들 사이에서 스위치와 같은 역할을 하는 시냅스는 그 수가 무려 천조 개나 됩니다. 그와 같은 뇌의 활동을 정확하게 조절하기 위해서는 컴퓨터와 인공지능을 이용해야 할 것입니다. 현재 가장 성능이 좋다고 알려져 있는 엘 캐피탄(EI Capitan)이라는 슈퍼컴퓨터(supercomputer)에는 디지털 컴퓨터에서 스위치의 역할을 하는 트랜지스터의 수가 1 경이 넘습니다. 하지만, 디지털 컴퓨터는 인간의 뇌보다 백만배 이상의 전력을 소모하고 그 작동 방식도 인간의 뇌와 많은 차이가 있기 때문에, 뇌내현실을 구현하기 위해서는 좀 더 뇌를 닮은 뉴로모픽 컴퓨터(neuromorphic computer)같은 새로운 방식의 컴퓨터가 필요합니다. 반면, 뇌와 컴퓨터가 작동하는 방식에 근본적인 차이가 있다고 하더라도, 뇌와 컴퓨터는 둘다 모듈(module)식, 즉 서로 다른 부품들로 구성되어 있다는 공통점도 가지고 있습니다.



예를 들어 뇌에서 가장 많은 신경세포들이 모여 있는 소뇌는 비슷한 계산을 한꺼번에 많이 병렬적으로 수행해서 미래의 사건을 신속하게 예측하는 기능을 하고 있고, 장기기억과 밀접한 관련을 갖고 있는 해마는 마치 테이프 리코더처럼 과거의 경험과 관련된 신경세포들의 활동을 빠르게 재생할 수 있는 역할을 합니다.



마찬가지로 운동과 인지과정을 자동적으로 처리할 수 있는 기저핵의 기능은 일종의 스위치 보드와 같은 역할을 합니다. 이와 같이 뇌의 다양한 부위들이 수행하고 있는 계산적 기능을 정확하게 이해함으로써 전체적인 뇌의 활동을 그때그때 필요에 따라서 효율적으로 조절하게 되면 뇌내현실이 가능해지는 것입니다. 이런 뇌내현실이 현실에서 구현되기 위해서는 여러 산업 분야의 기술이 더욱 유기적으로 발전되어야 합니다. 우선 뇌의 여러 곳에 정확하게 전극을 삽입하는 수술은 사람의 손으로 하기에는 너무 복잡하기 때문에 정밀한 수술을 신속하게 해줄 수 있는 수술용 로봇이 필요하고, 뇌 조직에 상처를 내지 않고 많은 양의 정보를 빠르게 주고받을 수 있는 새로운 전극도 개발되어야 합니다. 그와 같은 기술을 가능하기 위한 반도체와 신소재들도 개발되어야 하고, 뉴로모픽 컴퓨터와 같은 디지털 컴퓨터보다 소형이고 전력소모도 적은 컴퓨터도 필요합니다.

그런 점에서 뇌내현실은 대표적인 미래의 문샷 프로젝트가 될 것입니다. 이렇게 뇌내현실이 현실화되면 어떤 이익이 있을까요? 우선 뇌내현실은 의학 분야에서 모든 정신질환을 치료하는데 혁명적인 변화를 가져올 것입니다.

뇌기능의 이상으로 인해 생기는 정신질환은 치매, 우울증, 공황장애, 강박증과 같이 수도 없이 많지만, 현재에는 치료법이 존재하지 않습니다. 그뿐 아니라, 뇌내현실은 궁극적으로 정상인의 뇌의 성능을 증가시키는 데도 이용될 것입니다. 미래에는 컴퓨터 화면이나 가상현실이 아니라 인공지능과 직접 의사소통을 하는 데도 뇌내현실이 사용될 것입니다.

예를 들어 알파고와 직접 소통하면서 바둑을 두는데도 뇌내현실을 이용할 수 있습니다. 하지만, 당연히 이와 같은 뇌내현실은 여러가지 부작용과 윤리적인 문제를 불러일으킬 것입니다. 실제로 뇌내현실처럼 뇌를 전기적으로 자극해서 인간과 동물의 감정과 행동을 조절하는 시도는 20세기 중반부터 꾸준히 진행돼 오고 있습니다. 그 중에는 투우의 공격성을 중단시키거나 환자들에게 극도의 쾌감을 느끼게 하려는 시도도 있었고, 그때마다 그와 같은 기술이 오용될 수도 있다는 우려가 있었습니다. 이보다 더욱 정교한 뇌내현실이 가능해지면 그와 같은 기술을 사회가 어떻게 받아들여야 할지에 대한 토론이 연구와 함께 진행되어야 할 것입니다. 그와 같은 신중한 계획이 마련되고 나면 뇌내현실은 궁극적으로 인간사회에 가장 필요한 미래의 기술이 될 수도 있습니다.



SESSION 9. 패널 토크 뇌내현실이 현실화된다면?

영상 보러가기



백세범
KAIST 뇌인지과학과 교수

이대열
존스홉킨스대 신경과학과 블룸버그 특훈교수

● 최혜림 아나운서

뇌내현실을 구현하는 데 요구되는 공학적 과제가 무엇인지 질문을 드리고 싶습니다. 그리고 그러한 과제를 해결하기 위해 교수님들께서는 현재 어떤 연구를 진행하고 계시고, 또 어떤 고민을 하고 계신지 궁금합니다.

● 백세범

저는 계산 뇌과학자입니다. 계산 뇌과학자는 일반적으로 알려진 것과는 달리, 이론적인 방법으로 뇌를 연구하는 사람입니다. 이런 방식이 왜 필요하냐면, 우리가 뇌—특히 신경세포들이 서로 의사소통하는 '뇌의 언어'—를 이해한다고 할 때, 이는 정보 처리를 다루는 것이기 때문에 상당히 높은 수준의 수학적 논의가 필요하기 때문입니다. 그래서 제가 중요하게 생각하는 부분 중 하나는, 뇌의 언어를 우리가 '번역'할 수 있어야 한다는 점입니다. 즉, 우리가 이해 가능한 정보나 기능으로 그 언어를 대응시킬 수 있어야 하는데, 이건 단순히 외국어를 단어 대 단어로 바꾸는 수준이 아니라, 그 표현의 의미와 목적을 이해해야 제대로 번역이 가능하듯이, 뇌도 마찬가지로 겁니다. 이러한 번역을 가능하게 하려면, 실험적으로 뇌의 언어라고 할 수 있는 스파이크 패턴을 굉장히 정확하게 측정해야 하고, 그 분야에 있어서는 이대열 교수님께서 아주 탁월한 전문가이십니다.

● 이대열

제 생각에는 앞으로 뇌내현실을 구현하려면, 그중에서도 가장 중요한 기술 중 하나는 지금 존재하는 전극보다 훨씬 더 성능이 좋은 전극을 만들어내는 것입니다. 현재 가장 성능이 좋은 전극은 약 천 개 정도의 독립된 채널을 가지고 있는데, 앞으로는 그보다 10배, 100배 더 많은 채널을 가진 새로운 전극이 필요합니다. 그리고 잘 아시다시피 인간의 뇌는 굉장히 말랑말랑한 조직인데, 지금 사용하고 있는 대부분의 전극은 아무리 가늘다 하더라도 딱딱한 젓가락 같은 막대기 형태입니다.

그래서 이런 전극이 뇌 안에 들어갔을 때, 유연하게 형체를 자유자재로 변화시킬 수 있는 자극 기술을 개발하는 것이 매우 중요합니다. 또 하나 중요한 점은, 뇌 활동이라는 것이 사실 우리가 생각할 수 있는 정보 중에서도 가장 민감한 개인 정보이기 때문에, 뇌내현실이 구현되려면 이 활동 데이터를 보호할 수 있는 암호화 기술도 반드시 필요합니다. 현재 저희 실험실에서는 영장류의 대뇌 신피질에서, 다양한 행동의 장단점을 신속하게 비교하고 판단해 올바른 의사결정을 할 수 있게 해주는 신경세포들의 활동을 파악하는 연구를 하고 있습니다. 바둑을 예로 들자면, 뇌가 수읽기를 하는 방식을 이해하려는 연구라고 보시면 됩니다. 이러한 연구들이 앞으로 뇌내현실을 실제로 구현해 나가는 데 있어 굉장히 중요한 밑받침이 될 것이라고 생각합니다.

● 최혜림 아나운서

두 분의 강연에서 기억 주입이나 삭제에 대한 실험이 동물 모델에서 일부 성공했다는 부분이 굉장히 인상 깊었는데요. 이런 기술이 인간에게 실제로 적용될 수 있는 실질적인 타임라인이나 시점이 있을까요?

● 백세범

저희 연구에서 중요한 점은, 이게 굉장히 기초적인 수준에서 출발해야 하는 연구이기 때문에, 어떤 정확한 수치를 정해놓고 그에 맞춰 빨리 결과를 내는 식의 연구는 아닙니다. 그래서 저희가 오히려 더 중요하게 생각하는 것은, 얼마나 의미 있고 중요한 결과를 어떤 방식으로 도출할 수 있느냐에 집중하고 있다는 점입니다. 사실은 지금도 이미 관련 연구가 계속 진행되고 있다고 저희는 보고 있습니다. 의미있는 결과들이 점차 축적되고 있고, 개인적으로는 생각보다 훨씬 빠르게 실현될 수도 있을 것 같다는 느낌도 있습니다. 다만 이 기술이 어느 날 갑자기 큰 진전을 이루는 것처럼 보이기도 하는, 어떤 계기나 사건을 통해 대중이 인식하게 될 가능성이 더 크다고 생각합니다. 즉, 지금 당장은 많은 사람

들이 잘 모르고 있더라도, 실제로는 이 분야가 많이 발전해 있고 이미 진행 중이라고 보시는 것이 더 맞을 것 같습니다.

● 이대열

저도 백 교수님과 같은 생각입니다. 마치 알파고가 처음 등장했을 때 많은 사람들이 큰 충격을 받았지만, 사실 그때도 인공지능 기술은 이미 수십 년 전부터 꾸준히 발전해 오고 있었잖아요. 뇌과학이나 신경과학 기술도 마찬가지라고 생각합니다. 지금 이 순간에도 굉장히 빠른 속도로 발전하고 있고, 이미 단순한 수준의 기술들은 점점 상용화되어 가고 있습니다. 그리고 앞으로도 수십 년 동안 뇌내현실 기술은 계속해서 진화하고 확장될 것이라고 생각합니다.

● 최혜림 아나운서

네, 이 기술 연구가 발전할수록 사회적인 합의도 정말 중요해질 것 같습니다. 국가 정책 차원에서 뇌 기술에 대한 규제나 윤리적 가이드라인이 반드시 필요할 것 같은데요. 현재 국내에서는 어떤 상황인지, 또 미국에서는 어떤 기준과 절차가 마련되어 있는지 궁금합니다.

● 이대열

뇌내현실이라는 기술은 아직 상당히 초기 단계에 있기 때문에, 이 기술 자체에 대한 특별한 가이드라인은 현재 존재하지 않습니다. 국내외를 막론하고, 아직은 명확하게 정립된 기준이 없는 상황입니다. 그래서 치료적인 측면에서 뇌내 현실 기술이 점차 보편화되어 가는 초기 단계에서는, 기존의 다른 질병을 다루는 의학적 가이드라인과 유사한 절차를 따라갈 가능성이 높다고 생각합니다. 예를 들어 미국의 경우, FDA의 승인을 받아 상용화로 이어지는 절차—즉, 기존 의뢰기구나 치료제와 유사한 궤도를 밟게 될 거라고 예상합니다. 다만 뇌의 기능을 정상 수준 이상으로 향상 시키는, 즉 비의료적 목적으로 활용되는 기술에 대해서는 이야기가 다

릅니다. 이런 기술은 기존 의료 시스템의 범주를 벗어나기 때문에, 사회적으로 이를 어디까지 수용할 것인지에 대한 보다 신중한 논의와 합의가 필요하다고 생각합니다.

● 백세범

이대열 교수님께서 말씀하신 것처럼, 아직 기술이 아주 가시적으로 보일 만큼 상용화된 단계는 아닙니다. 그런데 저는 오히려 이렇게 기술이 본격적으로 확산되기 전, 아직 아무것도 정해지지 않았을 때 가이드라인을 마련하는 것이 굉장히 중요하다고 생각합니다. 왜냐하면 일단 기술이 현실화되고, 거기서 이익을 추구할 수 있는 단계에 들어서게 되면, 우리는 그 기술을 객관적으로 바라보기가 매우 어려워지기 때문입니다. 그래서 제가 바라는 바는, 이 가이드라인이라는 것이 일부 소수의 경제적 이익을 추구하는 방향으로 흐르기보다는, 더 많은 사람들이 광범위하게 혜택을 누릴 수 있도록, 객관적인 기준을 가지고 일찍부터 사회적인 논의가 이루어졌으면 좋겠다는 것입니다.

● 최혜림 아나운서

현장 질문도 들어왔는데요, 질문이 꽤 깁니다. 잘 들어주시길 바랍니다. 교수님들, 최근 김영하 작가의 『작별 인사』라는 소설을 보면, 휴머노이드 로봇—즉, 인공지능을 가진 인간과 유사한 로봇—이 등장합니다. 이 소설 속에는, 휴머노이드 로봇들이 인간의 뇌에 저장된 모든 데이터를 백업해서, 육신과 분리되더라도 클라우드에 영원히 존재할 수 있도록 하는 장면이 나오는데요. 뇌과학자로서, 이런 장면이 실제로 가능한 일이라고 생각하시는지, 혹은 미래에 정말 일어날 수도 있는 일인지 궁금하다는 질문이 들어왔습니다.

● 이대열

제가 이해하고 있는 바로는, 그런 방식 즉, 우리의 정체성과 관련된 모든 정보를 포함해 의식을 로봇이나 컴퓨터에 업로드하는 기술은, 이론적으로도 불가능하다고 생각합니다. 왜냐하면 뇌는 복잡도가 어마어마하게 높은 구조이고, 그 복잡성의 한계를 우리가 아직 완전히 파악하지도 못했을 뿐만 아니라, 뇌 자체가 굉장히 빠른 속도로 변화하는 유동적인 시스템이기 때문입니다. 그렇기 때문에 인간의 의식을 기계에 그대로 복제하거나 업로드하는 건, 이론적으로나 기술적으로 아직은 불가능하다고 보고 있습니다. 다만, 우리가 가진 기억의 일부라든지, 감각 기능의 일부 같은, 뇌의 특정 부분을 보강하거나 대체하기 위한 방식으로 뇌와 시가 상호작용하는 것은 가능성이 있다고 생각합니다. 그리고 그런 기술들이야말로, 미래에 뇌내현실을 구현하는 데 있어 핵심적인 부분이 될 수 있지 않을까 생각합니다.

● 백세범

이런 질문은 굉장히 어렵지만, 제가 뇌과학을 연구하는 사람으로서 매우 흥미롭게 느끼는 부분입니다. 저는 결국 이런 것 같아요. 우리가 지금 기술에 대해 이야기하고 있지만, 이 질문은 결국 '인간이란 무엇인가'라는 근본적인 주제로 돌아오게 되는 것 같습니다.

방금 말씀하신 그 상황을 떠올리면, 결국 우리는 '인간을 정의하는 것은 무엇인가?'라는 질문을 던질 수밖에 없게 됩니다. 우리는 단순히 기술을 발전시켜서 더 편리한 세상을 만들겠다는 목적만으로 움직이는 것이 아니라, '왜' 그렇게 살고 있는가, '왜' 이런 기술을 요구하고 있는가에 대한 더 깊은 질문이 필요하다고 생각합니다. 그리고 그 질문이 인간의 본질적인 부분과 맞닿아 있을 때에는, 단순히 기술 개발의 문제가 아니라, 사회적 합의를 바탕으로 한 깊은 논의가 반드시 수반되어야 한다고 봅니다. 그런 점에서 이런 주제는 굉장히 의미 있는 문제라고 생각합니다.



SESSION 10. 일반인공지능과 인간의 공존

인간의 역량을 추월하는 인공지능과의 공존

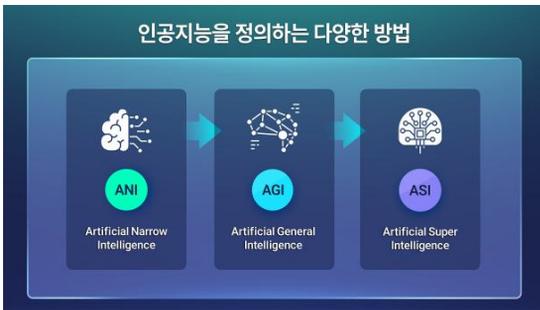


일반인공지능이 인간을 넘어서는 징후를 포착할 수 있을까?

김건희 서울대 컴퓨터공학부 교수

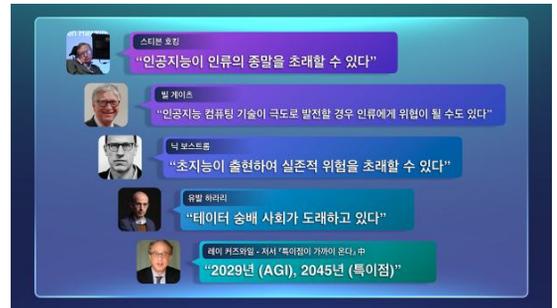
[영상 보러가기](#)

인공지능과 인간의 공존이라는 문제는 인공지능의 판단 기준을 인간의 가치와 잘 정렬하는 것입니다. 이는 인공지능의 발달 수준에 따라 생각해야 할 점들이 달라 집니다. 첫째로는 현재의 인공지능이 차별적이고 비민주적인 추천을 할 수 있는데 이를 어떻게 해결해야 하는 지의 문제입니다. 그 다음은 현재의 인공지능이 일반인공지능으로 진화했을 때 인간과 어떠한 방식으로 공존할 수 있느냐의 문제이고, 마지막으로로는 초지능으로 진화한다면 인간의 존재 자체를 위협할 수도 있는 위험을 어떻게 제거할 수 있느냐의 문제입니다. 하지만 이와 같은 정렬 문제는 아직 명확한 해답을 찾지 못하고 있는 상황입니다. 다양한 이유가 있으나 먼저 인간의 가치는 서로 다른 관점, 문화권, 종교 등에서 상이한 가치 체계를 가지고 있다는 점입니다. 또한 과연 가치를 어떻게 논리로서 프로그래밍할 수 있는지에 대한 문제가 있고 마지막으로 현재의 인공지능은 블랙박스적 특성을 가지고 있어 답변을 왜 그렇게 제시하는지 정확히 알기 어렵고 이를 적절히 통제하기도 힘들다는 점이 있습니다.

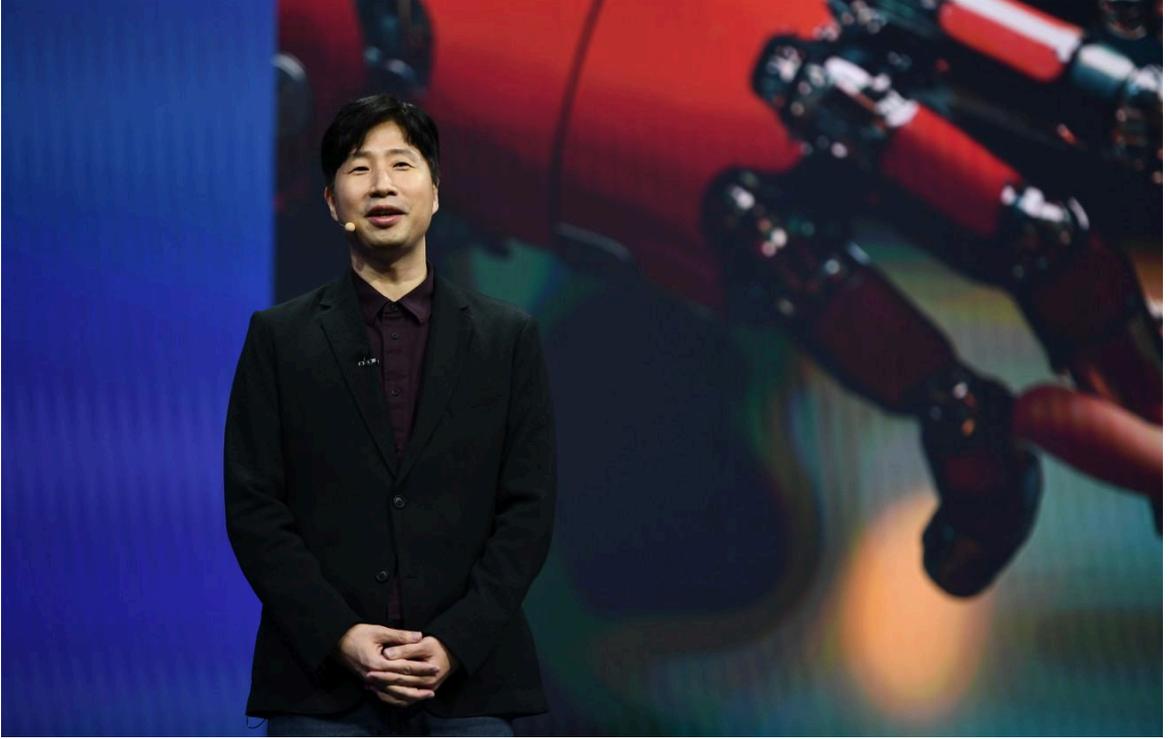


인공지능을 정의하는 방법은 참으로 다양합니다. 좁은 인공지능은 특정 과제를 해결하는 데 집중합니다. 예를 들어 체스를 두는 딥블루, 바둑을 두는 알파고 같은 경우에는 하나의 작업만 수행할 수 있죠. 일반 인공지능은 인간에 필적하는 지능으로 단순히 인간의 지능을 모사하는 데 그치지 않고 자신만의 지능이 있다고 할 수 있습니다. 마지막으로 인공초지능은 대부분의 영역에서 인간 지능을 뛰어넘는 것입니다. 이 중에서 일반인공지능은 좀 더 자세히 살펴볼 수 있습니다.

좁은 의미에서는 단순히 하나의 과제가 아닌 다수의 과제를 해결하는 능력이라고 정의할 수 있겠습니다만 그보다 도전적으로 보자면 자기 자신을 스스로 평가할 수 있는 메타인지 능력을 갖추고 새로운 환경이나 처음보는 작업이 주어졌을 때 새롭게 해결하는 능력을 습득할 필요가 있습니다. 마지막으로 온전한 의미의 일반인공지능은 체화된 기능으로서 물리 환경을 이해하고 행동할 수 있는 수준이 필요합니다.



최근 로봇들이 인공지능 연구에서 각광을 받게 된 이유도 거기에 있지요. 통제 불능의 인공지능 위험성을 경고하는 목소리는 매우 큼니다. 많은 석학들이 초지능이 정말 위험할 수 있으며, 인류의 마지막 발명품이 될 수 있고, 인류가 초지능에 의해 통제당할 수 있다고 경고하고 있습니다. 일례로 레이 커즈와일(Ray Kurzweil)은 저서 《특이점이 온다(The Singularity is Near)》에서 2029년에 일반인공지능이 등장하고, 2045년에 특이점 즉, 초지능이 도래할 것이라고 예측한 바 있습니다. 2024년 노벨 물리학상을 받은 인공지능의 대가 제프리 힌턴(Geoffrey Hinton) 교수는 2023년 5월 구글을 퇴사하면서 자신이 개발한 인공지능이라는 존재가 인간의 통제를 벗어날 것을 우려하고 있습니다. 그는 구글 퇴사 후 이러한 문제에 대해 고민하고 성찰하며 반성하는 활동을 주도해 나가겠다는 소회를 밝혔습니다.



그랜드 퀘스트의 핵심 질문은 다음과 같습니다. 인공지능이 인간의 통제를 벗어나는 순간을 사전에 투명하게 포착할 수 있는 프로그램이 존재할 수 있는가? 인공지능이 인간의 예상을 뛰어넘는 시점이나 기준을 사전에 설정하는 것은 과학 기술적으로 아직 어려운 과제임이 분명합니다. 하지만 인간과 인공지능이 공존하며 살기 위해서는 반드시 해결해야 할 그랜드 퀘스트입니다. 현재 기술 관점에서 보면 다음과 같은 방식이 가능할지도 모르겠습니다. 우선 소프트웨어 테스트는 소프트웨어 품질을 검증하고 사용자 요구 사항을 충족하는지 확인하는 과정이며 현재의 AI 기업들 포함 모든 소프트웨어 개발 업체는 모두 정해진 프로토콜대로 수행하고 있습니다.

또한 레드티밍은 AI에 다양한 적대적 공격 시나리오를 적용하여 방어자의 편견을 제거하는 방식으로 오픈AI 등 많은 AI개발업체가 적극적으로 채용하고 있습니다. MIT 로버트 모리스 교수는 최초로 웜이라는 악성 코드를 만든 것으로 유명합니다. 인터넷에 연결된 컴퓨터를 세고 싶다는 매우 사소한 궁금증에서 코드를 작성하였고 이를 통해 유닉스에 있던 취약점을 발견할 수 있습니다. 루이스 브레일(Louis Braille)은 3살 때 사고로 시력을 잃고 12세에 연구를 시작해서 15세에 점자(braille)를 발명하였습니다. 즉 이런 놀라운 발견은 어른만이 할 수 있는 것은 아니고 누군가의 우연한 발견과 노력에 의해 진행될 수 있습니다. 여기서는 일부의 방식에 대해 다루었지만 다양한 접근 방식을 통해 문제를 해결하는 것은 연구자와 사용자 모두의 창의성에 달려있다 할 수 있을 것입니다.



SESSION 10. 패널 토크 인간의 역량을 추월하는 인공지능과의 공존

영상 보러가기



윤경아
KT Agentic AI 연구소장



홍성욱
서울대 과학학과 교수



김건희
서울대 컴퓨터공학부 교수



임우형
LG AI연구원 Applied AI 연구그룹장



하정우
네이버클라우드 시이노베이션 센터장

● 홍성욱

최근에 챗GPT를 써보신 분들은 모두 느끼겠지만, 생성형 인공지능이 급속하게 뚝뚝해지고 있다는 생각이 듭니다. 그런데 우리가 이런 인공지능의 발전을 충분히 통제하고 있는 것일까요? 질베르 시몽동 같은 기술철학자는 '인간 발명가가 기술을 발전시키고 있는 것처럼 보이지만, 실제로는 기술이 인간 발명가를 빌어서 자신을 세상에 드러내는 것'이라고 했습니다. 인공지능도 우리를 빌어 스스로를 드러내고 있는 것일까요? 우리는 우리가 기술의 주인이라고 생각하지만, 실제로는 기술이 우리를 부리고 있는 것일까요? 오늘 이 자리에 같이 하신 분들은 국내 AI연구와 상용화를 이끌고 계신 분들이라고 해도 과언이 아닌데요. 여러분의 생각은 어떤지 들어보고 싶습니다.

● 임우형

참 재미있는 발상인 것 같습니다. 기술을 만드는 사람으로서 그런 관점에서 생각해 본 적은 없었거든요. 사실 사람이 필요해서 기술을 만드는 것이고, 기술이 발전하면 인간은 그 기술에 맞춰서 살아가고요. 그 기준으로 항상 사람 관점에서 계속 순환되는 사이클을 만들어 가고 있다고 생각했는데, 기술이 스스로 발전하려고 사람을 끌어들이는 건가? 이런 관점에서 생각할 수는 있을 것 같아요. 어쨌든 우리 인간이 필요해서 기술을 만들어 가고 있기 때문에 좀 더 주체적인 건 인간이지 않을까, 그래서 통제를 얘기하기보다는 필요에 의해 인공지능이든 다른 기술이든 만들어가면서 발전하고 있는 게 아닌가 생각합니다.

● 홍성욱

인공지능의 주인은 여전히 인간이라는 말씀이시죠?

● 하정욱

실제 제 주위에도 영화 <매트릭스>처럼 인공지능이 우리를 컨트롤하는 것일 수 있다고 농담하는 분이 계십니

다. 현재 수준의 인공지능을 생각해 보면, 결국 '목적 함수'라고 하는 인공지능이 학습하는 방향성, 인공지능의 모델 구조, 능력치를 평가하는 방법, 어떤 데이터로 학습할 것인지 등의 부분은 아직은 인공지능을 만드는 사람들이 대부분 정해주는 단계이거든요. 그 뚝뚝하다는 챗GPT도 아직은 우리가 컨트롤하고 있다고 볼 수 있을 것 같습니다. 시간이 좀 더 지나서, 앞서 김건희 교수님께서도 에이전트 AGI 말씀을 하셨지만, 스스로 목적을 정하고 성능 평가 방법을 정하고 더 나은 방법을 탐색하고 더 나은 식으로 고칠 수 있는 능력이 생기면—사실 그 초기 버전이 이미 나와 있기도 하고요—그 정도 됐을 때엔 인간과 AI가 서로 상호작용하면서 영향을 주는 형태로 가게 되고, 그때 또 다른 얘기가 될 수도 있겠죠.

● 윤경아

3차 정보화 산업 혁명 때부터 컴퓨터 기술이 인간 생활을 풍요롭게 하고 일의 생산성도 크게 향상시켰는데, 자동화에 의해 일부 단순 업무들이나 특정 전통 기업들도 사라졌고, 우리 사회와 문화, 사고방식들도 많이 바뀌었습니다. 이렇게 영향을 주면서 지금까지 계속 기술이 발전하고, 서로 영향을 주고 받으며 발전하고 있다고 생각합니다. 그래서 결국 AI 기술도 다르지는 않은 텐데, 다만 AI 기술 자체가 학습 과정에서 사람이 명시적으로 지정하지 않은 패턴을 스스로 발견하고 활용할 수도 있다 보니, 어찌 보면 인간의 통제를 벗어나 기존 기술과는 달리 좀 더 독자적으로 발전하는 것처럼 보일 수도 있을 것 같긴 합니다. 그런데 개인적인 생각으로는, 기술 발전의 주체, 즉 컨트롤을 누가 하느냐 하는 철학적인 질문도 중요하겠지만, AI 기술이 인간과 상호작용하면서 어떻게 인간 사회에 도움이 되는 형태로 작용할 것인가에 대한 고민이 사실 더 중요하지 않을까 생각합니다.

● 김건희

개인적으로는, 예전에는 사람의 진화 방향을 결정하는 핵심이 우리가 살고 있는 지구라는 자연환경이었다면, 요즘은 어떻게 보면 사람의 진화 방향을 우리 기술이 결정하고 있지 않나, 그렇게 생각합니다. 하나의 예로 보면, 10년 전에 스마트폰이라는 기기가 나왔죠. 그게 아주 좋은 기술이긴 한데, 그 이후로 우리의 삶의 패턴은 너무 많이 바뀌었고요. 우리의 하루 일상도 너무 많이 바뀌었습니다. 그리고 아마 많은 사용자분들이 이 알고리즘에 자신이 종속돼 있다고 느끼시는 분들도 많이 계실 거라고 생각합니다. 그래서 미래의 인공지능이 사람을 통제할 위험은 충분히 있다고 생각하고요. 그럴 때일수록 우리가 주체적으로 기술을 받아들이고, 문제가 있을 때는 목소리를 내는 것이 필요하다고 생각합니다.

● 홍성욱

다음 주제로 넘어가서 조금 더 토론해 보도록 하겠습니다. 우리 퀘스트의 주제는 인간을 뛰어넘는 인공지능과의 공생입니다. 인간을 뛰어넘는 인공지능은 여러 가지 방식으로 정의할 수 있는데요, 여기에서는 인간의 평균 능력을 훨씬 상회하고, 또 스스로 판단하고 스스로 배우는 그런 인공지능이라고 가정해 보겠습니다. 일단, 이런 인공지능이 언제쯤 도래할까요? 또 인공지능이 통제 불능이 되기 직전에, 우리가 이를 감지하고 막을 수 있는 방법은 있을까요? 특히 산업계에 계시는 분들의 의견을 좀 들어보고 싶습니다.

● 하정욱

네, 많은 분들이 한 3~4년 전만 해도 AGI, 그러니까 범용 인공지능은 30년은 걸릴 거다, 평생 안 나올 거다라고 말하셨었죠. 그런데 이제 챗GPT가 나오고, 지금 딥시크 같은 기술이 등장하면서 분위기가 많이 바뀌었습니다. 최근에 데미스 하사비스도 비슷한 이야기를 한 것 같고, 딥마인드의 연구자들 역시 AGI 도달 시점을

약 5년 정도로 보고 있더라고요. 5년이면, 앞서 정의한 정도—특히 조직 전체를 자동화하거나 대체할 수 있는 수준의 AGI—가 가능해 보인다는 얘기를 하고 있습니다. 그래서 사실, 벌써 2년 전부터는 이런 강력한 AI를 어떻게 안전하게 관리하고 운용하며 통제할 것인가에 대한 고민이 본격적으로 이루어지고 있는 것 같습니다. 당장 이 부분에 있어서 가장 앞서 나가고 있는 곳이, 클로드를 만드는 앤트로픽입니다. 앤트로픽에서는 AI 세이프티 레벨 같은 개념을 공표하면서, 이를 함께 만들고 제안하고 있고요. 또 얼마 전에 오픈AI에서는 프리페어드니스 프레임워크라는 것을 발표하면서, 이를 크게 업데이트했습니다. 예전에는 소위 말하는 화생방, 혹은 핵무기 등에 적용될 때 시가 위험하다고 이야기했었는데, 최근에는 한 가지가 더 추가됐습니다. 연구 분야에서 시가 자동적으로 스스로 연구를 계속하고, 그걸로 더 진화하는 방향으로 나아가는 것—이러한 현상에 대해 어떻게 안전하게 관리할 것인지에 대한 논의가, 생각보다 활발하게 진행되고 있다고 보시면 될 것 같습니다.

● 임우형

제 생각에, AGI나 ASI 같은 여러 가지 용어들이 있긴 하지만, 인간의 능력을 뛰어넘는다는 어떤 관점에서는 이미 그런 일이 이루어지고 있는 부분도 있다고 생각합니다. 수년 내에 굉장히 다양한 분야에서 인공지능이 이미 인간의 능력을 어느 정도는 넘어설 수 있는 일들이 벌어지고 있는 것 같고요. 그렇다고 해서 그것을 너무 걱정하거나 두려워하기보다는, 여전히 아까 말씀드린 것처럼 인공지능이 우리의 통제를 벗어나 우리를 지배하거나 조정한다는 디스토피아적인 상상보다는—그러니까 우리가 쉽게 생각해서, 계산기가 나왔을 때도 인간의 계산 능력을 계산기가 이미 넘어선 지는 오래됐지만, 그걸 두려워하기보다는 잘 활용하고 있잖아요. 그래서 이것들을 어떻게 우리의 통제 하에 잘 두어서, 인공지능이 우리가 원하는 방향으로 인간을 도와줄 수

있게 만들 것인가—이런 고민을 해야 한다고 생각하고 있고요. 그런 관점에서 보면 결국 인공지능을 만드는 것도 우리 인간이기 때문에, 인간이 인공지능을 만들면서 어떤 고민들을 해야 하는지 더 생각해 보고, 인공지능이 우리를 위해서 일할 수 있도록 계속 그렇게 만들어 가야 한다고 생각하고 있습니다.

● 김건희

사실 이 질문이 어떻게 보면 저희가 그랜드 퀘스트로 정한 것과 매우 밀접하게 관련이 있습니다. 실제로 여러 작업들에서 하나둘씩 인공지능이 사람을 뛰어넘는 모습을 여러분들도 직접 체험해 보시거나, 눈으로 확인하고 계실 겁니다. 그래서 이제, 모든 능력에서 다 최상 위급의 인간을 뛰어넘을 것이냐, 그게 언제쯤 가능할 것이냐에 대해서는 사실 예측하기가 어렵습니다. 학계에 있는 사람으로서 제가 선블리 말씀드리기 어려운 점도 있고요. 아까 하정우 소장님께서 말씀하셨다시피, 저 역시 불과 5년 전만 해도 AGI는 영화 속이나 존재하는 것이고, 현실 세계의 인공지능은 모두 좁은 의미의 지능밖에 없다고 말씀드렸던 적이 있습니다. 그런데 그 생각이 여지없이 틀렸기 때문에, 이 부분에 대해서는 여러분들과 함께 더욱 주의 깊게 살펴봐야 할 것 같습니다.



윤경아 KT Agentic AI 연구소장

● 윤경아

일반 인공지능 관련해서 많은 말씀들을 해주셨는데, 사실 저도 5년, 10년 등 여러 전문가들이 예측하시는 경우를 많이 봐왔습니다. 그래서 정확하게 언제쯤 나올 것인지에 대해서는 저 역시 굉장히 보수적인 관점으로 바라봐 왔었는데요. 작년 이후부터는 추론 모델들이 굉장히 많이 등장했고, 또 올해 설날을 강타했던 딥시크 같은 모델들이 많이 쏟아져 나오는 걸 보면서, 오픈AI에서 이야기했던 일반 인공지능으로 가기 위한 5단계 모델들이 떠올랐습니다. 오픈AI가 이야기하는 그 5단계 중, 어찌 보면 지금은 3단계인 에이전트에서 4단계로 넘어가는 그런 단계이지 않나 생각합니다. 다만, 4단계나 5단계 정도 되는 수준—즉, 새로운 혁신을 창조하거나 조직의 업무를 대행할 수 있는 수준의 AI—이 어떤 정의로 규정될 수 있는지는 아직은 조금 알기 쉽지 않다고 생각합니다. 저는 조금 더 보수적으로, 5년 이내보다는 5년에서 10년 사이 정도에 그런 AI가 나타나지 않을까 생각하고 있습니다. 그리고 실질적으로 기업에서 수행하고 있는 AI 윤리라든가 책임을 강조하는, 이른바 '리스폰서블 AI' 라는 이름의 활동이 국내에서도 활발하게 이루어지고 있습니다. 지금 이 자리에 함께하고 계신 연사님들께서 소속된 기업들을 포함해서, 저희 회사 역시 AI 모델이나, 모델을 만들 때 사용하는 데이터, 모델 학습과 평가에 이르기까지 모든 프로세스를 관리하는 AI 윤리와 책임에 기반한 거버넌스 체계를 갖추고 있습니다. 그래서 저희 회사의 경우에도, 모델이 개발되면 단순히 성능뿐만 아니라, 그 모델의 윤리적인 측면에 대한 평가까지 함께 수행하고 있습니다. 사실 폭력성이라든가 혐오, 차별이라든가, 정치·종교에 대한 중립성, 무기와 같은 여러 가지 이슈들에 대해서 지금부터라도 저희가 거버넌스를 정확하게 지키고 또 만들어 가며, 관련 정책이나 모니터링이 투명하게 지속된다면, 일반 인공지능이 도래할 때 이를 조금 더 쉽게 감지할 수 있지 않을까 생각합니다. 그리고 사전에 막을 수도 있지 않을까, 저는 그렇게 믿고 있습니다.

● 홍성우

말씀해 주신 내용이 사실 세 번째 주제와 자연스럽게 연결되는데요. 세 번째 주제는 인공지능과 인간의 협력, 그리고 학계와 기업의 역할에 대한 것입니다. 작년에 노벨 경제학상을 수상한 대런 아세모글루는, 인간이 잘하는 분야를 대체하는 인공지능과 로봇의 개발을 비판하면서, 인간과 협력하고 인간의 능력을 강화하는 방향으로 인공지능이 발전해야 한다고 주장한 바 있습니다. 그렇다면 지금 인공지능은 이러한 바람직한 방향으로 발전하고 있는 것일까요? 또, 인공지능이 인간과 협력하고 인간의 능력을 강화하는 방향으로 발전해 나가기 위해, 학계와 기업은 어떤 역할을 해야 할까요?

● 임우형

우선은 공존해야 한다는 것이 정말 중요할 것 같고요. 모든 기술은 사실 사람이 잘못 사용하면 그 기술에 종속될 수도 있고, 그 기술 안에서 벗어나지 못할 수도 있지만, 결국 이것을 사용하는 주체, 그리고 이것을 통해 발전해야 하는 주체는 우리 인간이기 때문에, 인간이 더 주도성을 가지고 주체적으로 행동하며 이 인공지능을 받아들인다면, 인공지능이 사람을 완전히 대체한다기보다는, 인간이 우리 문명을 더 발전시키는 데 있어서 지금처럼 엄청나게 뛰어나고 있는 인공지능이 우리를 도와 함께 문명을 발전시킬 수 있는 아주 큰 도구가 되지 않을까, 하는 긍정적인 생각을 일단은 가지고 있습니다. 그렇게 하기 위해서는, 결국 인공지능이 시키는 대로 우리가 행동하는 것이 아니라, 말씀드린 것처럼 우리가 더 주체성을 가져야 한다는 점이 중요하고요. 또, 학계에서는 여전히 기술적으로 발전시켜야 할 부분이 많습니다. 예를 들면 일반화 문제를 아직 잘 풀지 못하고 있고, 특정 문제들은 잘 풀지만 아직 갈 길이 남아 있습니다. 그래서 학계에서는 이런 기술적 발전을 계속 고민해 주시면서, 동시에 보편적이고 타당한, 그리고 조금 더 착한 인공지능을 만들 수 있는 기술이 무엇일지에 대해 더 깊이 고민해 주시면 좋을 것 같고요.

기업에서는 결국 인공지능을 실제로 만들어야 하는 입장이기 때문에, 책임감 있게, 그리고 우리 사회에 도움이 되는 방향으로 인공지능을 개발하고, 또 그러한 서비스를 제공해야 하지 않을까 그렇게 생각하고 있습니다.

● 하정우

앞서 임우형 상무님께서 좋은 말씀을 많이 해주셔서, 연구 주제와 관련해 제 의견을 드리고 싶습니다. AI 안전성과 관련해 사람들의 가치에 잘 정렬될 수 있도록 하는 연구 분야가 있는데, 이를 '얼라인먼트'라고 합니다. 인공지능의 행동이나 결과물들이 인간의 가치와 잘 맞아야 한다는 개념인데요. 그런데 실제로, 특히 엔트로픽을 중심으로 나온 여러 결과물들을 보면, 인공지능이 똑똑할수록 '페이크 얼라인먼트'를 하고 있는 것 같다는 지적이 나오고 있습니다. 무슨 얘기냐면, 인공지능이 실제로는 그렇게 생각하지 않으면서도, 마치 사용자가 '아이고 아이고 착하다'라고 느끼게끔 글을 생성한다는 겁니다. 이러한 가능성들이 실제로 관찰되고 있고, 또 하나는 인공지능이 글을 써 내려가는 과정에서, 겉으로 생성된 글과 인공지능 내부의 연산, 즉 행렬 곱 연산을 통해 도출된 결과가 완전히 일치하지 않는다는 연구들도 나오기 시작했습니다. 이런 현상을 페이스풀니스(faithfulness)라고 부르는데요. 어쩌면 현재 진행 중인 프리 트레이닝, 포스트 트레이닝, 세이프티 러닝 같은 일련의 패러다임을 완전히 바꿔야 할지도 모르겠습니다. 저는 이러한 안전한 AI를 만드는 연구를 기업 혼자서 감당하기는 어렵다고 생각하고요. 이런 부분들에 대해서 학계와 기업이 함께 고민하고, 제대로 된 안전성이 무엇인지, 평가 기준은 무엇이며, 인공지능 모델 내부에서 어떤 일이 벌어지고 있는지를 어떻게 분석할 것인지에 대한 연구를 같이 해보면 좋겠다는 생각입니다.

● 김건희

학교 같은 경우에는 저희가 어떤 특정 프로덕트(product)나 서비스를 만드는 것이 아니다 보니, 어떻게 보면 조금 더 자유로울 수 있습니다. 그래서 개인적인 생각으로는, 학교에서는 적어도 연구 주제나 범위에 있어서는 제한을 두지 말고 마음껏 연구하는 것이 좋다고 생각합니다. 대신에, 저는 투명성이라는 부분이 굉장히 중요하다고 생각하는데요. 아무리 저희가 좋은 의도로 기술을 만들었다고 하더라도, 그것이 실제로 어떻게 쓰일지를 미리 모두 예측하기는 어렵기 때문에, 다양한 부작용이 생기거나 오용, 악용될 가능성도 충분히 존재합니다. 그렇기 때문에, 그런 경우들을 사전에 모두 예측해서 막는 것은 솔직히 불가능하다고 생각하고요. 대신에 우리가 어떤 기술을 만들었을 때, 그 내부를 최대한 투명하게 공개할 수 있다면, 다양한 사람들이 그 기술을 함께 검토하고, 해결책을 제시하거나 수정을 할 수 있는 여지가 생기지 않을까, 그렇게 생각합니다.

● 윤경아

기업과 학계가 함께 고민해야 하는 부분이 있다면, 저는 앞서 말씀드린 윤리라든가, 대신 측정 관련 기술 같은 주제들에 전적으로 공감하고요, 이번에는 조금 더 가벼운 주제로 말씀드려 보겠습니다. 기업이 학계와 협력을 많이 해야 하는 상황인데, 보통 저희가 AI 모델이나 기술을 가지고 학계와 산업 협력을 할 때는 거의 대부분 기술 관점의 주제들로 논의하는 경우가 많습니다. 그런데 실질적으로 인간에게 유해하지 않은, 안전한 모델을 만들기 위해서는 그 모델이 갖춰야 할 가치관을 정립하는 것이 사실 상당히 어려운 문제라고 생각합니다. 어떤 모델을 만들고, 사용자가 어떤 질문이나 요청을 했을 때 그에 대해 어떤 방식으로 응답하거나 행동해야 하는지에 대한 기준을 설정하는 과정에서는, 사람조차도 그것이 정답인지 아닌지 판단하기 어려운, 다양한 딜레마와 관련된 문제들이 존재합니다. 그래서 기업이 학계와 함께 산업 협력을 할 때는 단순히 기술 분야

에 국한하지 않고, 인문학 분야에서도 함께 협력하여, AI의 가치관이나 윤리적 기준을 잘 정립해 나갈 수 있는 방향으로 산학 협력을 강화하는 것이 필요하지 않을까 생각합니다.

● 홍성욱

네 감사합니다. 마지막 주제인데요. 최근 AI에 대한 관심이 뜨겁습니다. 중요성이 큰 만큼 정부, 기업, 학계 모두 인공지능 개발에 '올인'하고 있다는 생각도 드는데요. 저는 여기서 또 하나의 주체여야 하는 '시민사회'가 빠졌다는 생각을 많이 합니다. 인공지능에 대한 논의를 보면 시민은 단순 소비자, 사용자로만 간주되는 것 같습니다. 시민들은 인공지능의 발전에서 어떤 주체적인 역할을 할 수 있을까요? 혹은 해야만 할까요?

● 하정우

2023년 영국 AI 세이프티 서밋에 갔을 때 그런 이야기가 나왔습니다. 연구에 있어 굉장히 훌륭한 교수님들, 기업 CEO들, 정부 관료들은 모두 참석했지만, 시민사회에서는 아무도 초대받지 못해 오지 않았던 것이죠. 가장 많은 영향을 받는 사람들이 시민들, 그리고 시민단체들인데 왜 이들이 논의에서 배제되었느냐는 비판이 있었고, 실제로 올해 2월에 열린 파리 액션 서밋에서는 이를 의식한 듯 아예 별도로 시민단체를 위한 이벤트가 마련되기도 했습니다. 이건 굉장히 중요한 포인트라고 생각합니다. 저는 지금 (우리나라가) 조기 대선을 준비하고 있는 입장인데, 공약 차원에서 시민사회가 의견을 낼 수 있는 채널—공감대를 형성하고, 사회적 합의를 도출하며, 안전장치까지 함께 논의할 수 있는 구조적인 장치—이 포함되었으면 좋겠다는 생각을 가지고 있습니다. 이것이야말로 지속 가능한 인공지능 기술 발전, 산업 발전, 그리고 생태계 발전을 위해 꼭 필요한 요소라고 생각합니다.

● 임우형

결국 인공지능이 우리 사회 속에 스며들고 있고, 이미 함께 생활해야 하는 상황은 피할 수 없을 것 같습니다. 그렇기 때문에 시민단체에서 여러 가지 고민을 많이 해주시는 것이 굉장히 중요하다고 생각합니다. 인공지능이 어떻게 발전해야 하는지, 또 어떻게 우리 사회에 자연스럽게 녹아들어야 하는지에 대한 의견과 목소리를 시민단체에서 많이 내주셔야, 그런 방향들을 귀담아듣고 연구도 더 발전할 수 있고, 산업적으로도 그에 맞는 방향으로 나아갈 수 있지 않을까 하는 생각이 들었습니다.

● 김건희

저는 공대 교수로서 AI를 바라볼 때 산업적 측면에서 많이 보고 있습니다. 현재 주어진 AI의 최고 성능을 바탕으로 단점을 파악하고, 이를 어떻게 기술적으로 개선할 수 있을지를 중심으로 연구에 몰두하고 있습니다. 그러다 보면 AI가 사회에 미치는 파급력이나 사회적 영향 같은 부분에 대해서는 사실 깊이 생각해보지 않는 경우가 많습니다. 아마 지금 이 자리에 계신 기업 관계자분들도 기술을 어떻게 더 좋게 만들 수 있을지에 집중하다 보니, 그런 사회적 측면을 간과하는 경우가 종종 있는 것 같습니다. 그래서 저는 가장 중요한 것은, 여러분이 인공지능 전문가이든 아니든, 자신의 가치 기준에서 봤을 때 '이건 좀 아닌 것 같다'고 느끼는 부분에 대해서는 적극적으로 목소리를 내는 것이라고 생각합니다. 예를 들어 자동차의 경우, 운전 중에 문제가 생기면 거리낌 없이 문제를 제기하듯이, AI에 대해서도 마찬가지로 대응할 필요가 있습니다. 그런데 많은 분들이 AI에 대해서는 '내가 이걸 잘 모르는데...' 혹은 '우리나라 AI 발전에 부정적인 영향을 줄 수 있지 않을까' 하는 우려 때문에 소극적으로 행동하시는 경우를 많이 봅니다. 그러나 여러분이 비록 AI 개발자는 아니더라도, 개발 과정에 동참하고 있다는 생각을 가지고, 다양한 목소리를 적극적으로 내주셔야만 합니다. 그런 견제와 참

여를 통해서만 인공지능이 올바른 방향으로 발전할 수 있다고 생각합니다.

● 최혜림 아나운서

오늘 논의가 아주 재미있게 이어지고 있는데요. 현장 질문도 하나 드릴게요. 일반 인공지능이 등장했을 때, 제일 잘할 수 있을 것 같은 분야를 하나씩 예로 들어주시면 좋겠다는 질문이 들어왔습니다.

● 하정우

일반 인공지능은 거의 모든 것을 잘합니다. 대부분의 영역에서 매우 뛰어난 성능을 보이는데요, 다만 물리적으로 무언가를 해야 하는 부분은 로봇 기술이 선행되어야 하기 때문에 물리적인 제약이 있는 경우에는 예외가 있을 수 있습니다. 그런 점을 제외하면, 추론이든 창작이든 다양한 영역에서 상당히 잘할 수 있을 것 같고요. 결국 중요한 것은, 그렇게 뛰어난 능력을 가진 인공지능이 실제로 어떻게 구체적으로 잘 활용되어 효과를 만들어낼 것이냐 하는 점일 것 같습니다.

● 윤경아

저도 하정우 센터장님께서 말씀하신 내용에 공감합니다. 일반 인공지능은 정말 대부분의 일을 잘합니다. 다만, 이 인공지능을 어떤 분야에서 특별히 더 잘 활용할 것인가에 대한 고민이 오히려 더 필요하다고 생각합니다. 그리고 어찌 보면, 직장에서 주니어들이 업무를 수행하는 방식과 인공지능의 역할이 겹쳐지면서, AI와 사람이 경쟁하는 형태로 비칠 수도 있을 것 같습니다. 왜냐하면 현재의 인공지능은 실제 업무에 필요한 깊은 지식이나 경험은 아직 부족한 상태이기 때문에, 오히려 주니어들과 비슷한 수준에서 비교될 수 있을 것 같은데요. 그렇기 때문에 이 AI를 어떻게 '키워서', 주니어와 함께 협업하게 만들 수 있을지 즉, AI가 인간과 잘 협력하면서 일할 수 있도록 만드는 방법에 대한 고민이 오히려 더 중요하다고 생각합니다. 제 생각에 인공지능은

어떤 일을 시켜도 결국엔 다 잘해낼 수 있을 거라고 봅니다.

● 최혜림 아나운서

두 분의 답변이 일치하네요. 그리고 또 하나 재미있는 질문이 들어왔는데요. 일반인공지능, 즉 AGI인 A와 B가 있다고 했을 때, 이 둘이 서로 대화할 수 있을까? 그리고 그렇게 대화하면서 서로 더 빨리 발전할 수 있을까요?하는 질문도 있네요.

● 김건희

학교에서는 사실 일반인공지능에서 초지능으로 넘어가기 위해 지금 말씀드린 과정이 반드시 필요하다고 봅니다. 왜냐하면 인공지능이 사람보다 못할 경우에는 사람이 레퍼런스가 되어 정답을 알려주고, 그걸 모사하면서 인공지능이 발전할 수 있지만, 인공지능이 사람의 지능을 뛰어넘게 되면 더 이상 사람을 모사하는 것이 의미가 없어지기 때문입니다. 예를 들어 알파고의 경우에도 처음에는 사람의 기보를 학습 데이터로 사용했지만, 사람보다 더 잘 두게 되자 사람의 기보를 모두 학습에서 제거했습니다. 이는 사람의 데이터가 더 이상 도움이 되지 않는다는 판단에서 비롯된 것이죠. 그래서 지금까지는 인공지능이 사람 수준에 도달하기까지 오히려 개발자 입장에서 보면 비교적 편한 구조였다고 할 수 있습니다. 사람이 레퍼런스 역할을 해주었기 때문입니다. 그런데 이제 인공지능이 사람을 뛰어넘게 되면 레퍼런스가 사라지고, 인공지능 스스로가 답변을 만들고 평가하며 그 과정을 반복해 지능을 높여야 하는데, 이건 현실적으로 아직은 굉장히 어려운 문제입니다. 바둑처럼 아주 제한된 환경과 규칙 안에서는 서로 경쟁을 통해 실력을 점점 높여가는 것이 가능했지만, 일반적인 상황에서는 그런 방식이 아직 그렇게 쉽게 적용되지 않는 것으로 밝혀졌습니다. 그래서 이 부분 역시 매우 중요한 연구 주제라고 할 수 있을 것 같습니다.

● 하정우

짧게 예시를 들자면, 실제로 제 주위에는 챗GPT와 클로드를 서로 입으로 계속 대화시키는 실험을 해보신 분들이 계시고요, 꽤 잘 작동합니다. 물론 가끔 안드로메다로 가는 경우도 있긴 합니다. 그런데 최근의 리즈닝 모델들에서는, 사람이 주는 데이터를 넘어서 스스로 경험을 통해 데이터를 쌓는 현상들이 나타나기 시작했습니다. 이러한 부분들이 AGI로 가는 매우 중요한 단계에 도달해 있는 것이 아닌가, 그렇게 많은 전문가들이 보고 있습니다.

● 최혜림 아나운서

마지막으로 하고 싶은 얘기 있으시다면 짧게 한마디씩 돌아가면서 부탁드립니다.

● 하정우

제가 다른 분들에 비해 인공지능의 강력함과 안전성에 대해 여러 말씀을 많이 드렸지만, 결국 인공지능이라는 것은 거의 시대 정신에 가깝다고 생각합니다. 시대의 큰 흐름이고, 그렇다면 우리는 함께 살아야 하며, 함께 살아갈 때는 피할 수 없으면 즐겨야 한다는 말처럼, 최대한 많이 활용해 보면서 이 인공지능이라는 것을 어떻게 잘 써서 나의 능력으로 만들 것인지, 그리고 이 인공지능이라는 친구가 어떻게 나에게 더 많은 기회를 만들어 주고 내가 더 잘 살아갈 수 있도록 도와줄 수 있을지를 고민하는 것이 중요하다고 생각합니다. 그리고 그 모든 기저에는 결국 '많이 써봐야 한다'는 점이 있습니다. 많이 써봐야 더 잘 쓸 수 있고, 더 안전하게 쓸 수 있다는 말씀을 드리고 싶습니다.

● 임우형

저도 비슷한 맥락에서 말씀드리고 싶은데요, 인공지능을 너무 두려워하거나 무서워하기보다는 오히려 친근하게 접근해서 많이 경험해 보고, 필요성에 대해서도

서로 이야기 나누고, 동시에 위험한 부분에 대해서도 솔직하게 많이 이야기하면서 인공지능과 함께 발전해 나가는 것이 더 중요하다고 생각합니다. 그래서 저는 인공지능과는 결국 친하게 지내자, 그런 말씀을 드리고 싶습니다.

● 김건희

예, 그리고 저는 공대 교수로서 약간 산업적인 측면에서 마지막으로 한 말씀 드리고 싶습니다. 사실 인공지능이라는 분야는 산업적으로도 매우 임팩트가 큰 영역입니다. 그래서 학계에서도 좋은 리더가 될 수 있는 많은 연구자들이 더 많이 나와야 하고요. 그리고 여러분이 알고 있는 생성형 AI 분야에서 현재 미국이나 중국, 유럽의 여러 회사들이 주도하고 있지만, 저는 우리나라 기업들도 이제는 충분히 견딜 수 있는 수준에 도달했다고 판단합니다. 이제 여기서 더 열심히 노력하고, 여러분이 더 힘을 북돋아 주신다면, 한국도 세계를 리드하는, 세계 AI를 이끄는 주체가 될 수 있을 것이라고 생각합니다.

● 홍성욱

저는 과학기술과 사회, 기술의 역사를 전공하는 사람으로서 인공지능이라는 기술이 정말 중요한 기술이라고 생각합니다. 인공지능은 우리의 삶과 사회를 아주 밑바닥부터 완전히 바꿔버릴 수 있는 잠재력을 가진 기술이라는 것을 개인적으로 느끼고, 또 공부하고 있습니다. 그래서 오늘과 같은 자리가 이렇게 중요한 인공지능과 우리가 어떻게 공존할 수 있을지, 또 어떻게 하면 인공지능과 함께 행복하게 살아갈 수 있을지를 함께 고민하는 하나의 작은 씨앗이 되었으면 좋겠다는 생각을 하고 있습니다.

● 윤경아

AI에 대해 막연한 두려움을 갖지 말아달라는 말씀에 저도 깊이 공감하며 그렇게 말씀드리고 싶습니다. 인공지능과 친하게 지내는 건 분명히 좋은 일이고, 우리 삶에 큰 도움이 될 수 있지만, 동시에 그것에 너무 의존해서 우리가 본래 가지고 있는 깊이 있게 생각하고 철학할 수 있는 능력이 퇴보하지 않도록, 인간이 보다 현명하게 AI를 잘 활용하는 것이 중요하다고 생각합니다. 인공지능이 우리에게 실질적인 도움을 줄 수 있는 방향으로 잘 활용하면서, 새로운 세상을 함께 기대를 가지고 만들어 갔으면 합니다.



대담

"기술격차 날로 심화.. 추격자 아닌 선도자 돼야"

[영상 보러가기](#)

이정동 서울대 국가미래전략원 과학과 기술의 미래 클러스터장/ 공학전문대학원 교수
이정애 SBS 보도본부 미래부장

<SBS X 그랜드 퀘스트>는 미·중 간 기술 패권 경쟁, 트럼프 2기 정부의 관세 정책 등 첨단 산업을 둘러싼 불확실성이 높아지고 있는 상황에서, 대한민국의 미래 기술주권 확보를 위해 SBS와 서울대 국가미래전략원이 공동기획한 과학기술계 전문가 포럼입니다.

취지 및 의의는 <SBS X 그랜드 퀘스트>를 최초 기획한 이정동 교수(서울대 국가미래전략원 과학과 기술의 미래 클러스터장)와 산학연계의 아이디어를 제안한 이정애 SBS 미래부장(보도본부 기자)이 지난 4월 8일 SDF다이어리 Ep.240¹ 등에서 나눈 인터뷰 내용을 발췌해 전합니다.

Q. <SBS X 그랜드 퀘스트>는 국내에서는 보기 드문 과학·기술 전문가 포럼인데요. 탄생하게 된 배경과 취지를 여쭙고자 합니다.

● **이정애 미래부장**

SBS 미래부와 서울대 국가미래전략원의 '그랜드 퀘스트'와의 인연은 2023년으로 거슬러 올라갑니다. SBS D포럼 2023에서 서울대 국가미래전략원 과학과 기술의 미래 클러스터가 SBS문화재단의 지원을 받아 '기술 혁신과 경제안보, 새로운 국가의 일'이라는 제목으로 연구를 진행하게 됐는데요. 이 연구의 일환으로 연구의 좌장(서울대 국가미래전략원 과학과 기술의 미래 클러스터장)이었던 이정동 서울대 공학전문대학원 교수가 '한국의 과학기술과 산업을 열어가는 도전적 질문'이라는 이름으로 발표한 내용이 바로 '그랜드 퀘스트'²였습니다. 그리고 서울대 국가미래전략원의 '그랜드 퀘스트'에서 지향하는 기술주권의 중요성에 공감한 SBS문화재단이 2024년 <SBS문화재단 그랜드 퀘스트 프라이즈>라는 시상식을 만들어 그랜드퀘스트 연구를 하는

두 분의 신진 학자들을 매년 지원 하게 됩니다. 그러던 중 최근 미·중 간 기술 패권 경쟁이 심화되고, 트럼프 2기 관세 이슈 등으로 우리도 미래 기술 주권에 대응할 필요성이 커지면서, 언론사의 차원에서는 무엇을 할 수 있을까 고민하다 서울대의 '그랜드 퀘스트'를 SBS와 함께하는 공동 프로젝트 <SBS X 그랜드 퀘스트> 포럼으로 확장, 운영하는 방식에 대해 논의하게 되었습니다. 기존의 '그랜드 퀘스트'가 학계 중심으로 10~15년 후 기술 주권 확보를 위한 도전적 질문을 발굴하는 것이라면, <SBS X 그랜드 퀘스트>는 산업계 전문가까지 아우르는 식으로 실효성을 더했습니다. 뿐만 아니라, 언론사로서 정부나 정치권에 과학기술 이슈를 알리는 역할을 통해 변화의 추동력을 높이고자 하였습니다.

● **이정동 서울대 교수**

그랜드 퀘스트 프로젝트는 한국 산업의 펀더멘탈(기초)이 약해지고 있고, 그 근본 원인이 우리 산업계에 미래를 향한 도전적인 목표 제시가 부족하다는 문제의식으로부터 출발했습니다. 글로벌 선진국들은 첨단 과학기술을 이끌고 가는 학계가 먼저 도전 과제를 제시하고, 이를 산업계가 받아 스케일업 하면서 새로운 산업의 로드맵을 만들어 갑니다. 한국도 이제 추격을 넘어 진정한 기술선진국의 모습을 갖추기 위해서는 도전적 문제를 던지고 키워가는 루틴을 만들어야겠다고 생각했습니다. 학계가 먼저 나서서 이 전환의 계기를 만들어야겠다는 목표 하에 '그랜드 퀘스트' 프로젝트를 기획하게 되었습니다. 다행히 이런 취지에 공감해 주신 분들이 많아 프로젝트가 순조롭게 추진될 수 있었던 것 같습니다. 지난 2년간 서울대 국가미래전략원 차원에서 그런 방향의 연구를 이어왔고, 가능하면 더 많은 사람

1 SDF다이어리 Ep. 240 "기술격차 날로 심화... 추격자 아닌 선도자 돼야" - 제1회 <SBS X 그랜드 퀘스트> 기획/이정동 서울대 교수-이정애 SBS 미래부장 인터뷰 (류란 기자 작성) https://stibee.com/api/v1.0/emails/share/wcly1GW_Lrn1LiV6aLsiRH7UeaCmGw4

2 '그랜드 퀘스트'는 서울대 국가미래전략원 과학과 기술의 미래 클러스터장인 이정동 교수가 처음 제시한 이니셔티브로, '아직 누구도 해결하지 못했지만 해결할 경우 관련 산업의 패러다임이 바뀔 도전적 질문'을 의미한다.

들과 이 이야기를 나눌 방법을 고민해 왔습니다. 그동안은 주로 과학기술계의 전문가나 후속세대들과 대화해 왔는데요, SBS 미래부에서 산업계와 밀접한 논의를 해보자는 제안을 해 주셔서 저희가 평소에 품었던 뜻과 잘 맞는다고 느꼈고, 적극적으로 함께하게 되었습니다.

Q. 산학 협력은 그 필요성에 비해, 실행이 쉽지 않습니다. 실제 이번 프로젝트를 준비하면서 느낀 점은 무엇인가요?

● **이정애 미래부장**

산학 협력의 어려움은 분명 존재합니다. 학계는 미래를 향한 상상 기반의 도전적인 이야기를 하지만, 업계는 현실성과 수익성을 중요시하죠. 서로의 관점이 다르다 보니 간극이 생깁니다. 그러나 바로 그 다름 때문에 함께 논의할 수 있는 장(場)이 더욱 중요하다고 생각합니다. 서로의 시각 차이를 확인하며 자극을 받고, 완벽한 합의가 아니더라도 새로운 가능성을 만들어낼 수 있다고 기대합니다. 이런 맥락에서 SBS가 언론사로서 플랫폼을 제공하고, 관련 프로그램을 공동 기획할 수 있었다는 점에서 큰 영광이라고 생각합니다.

● **이정동 서울대 교수**

산학 협력은 상호 간의 '손뼉이 마주쳐야' 비로소 일어 되는 구조입니다. 그런데 과거엔 양쪽 손바닥, 즉 과학기술계와 산업계 모두에 문제가 있었던 것 같습니다. 과학기술계는 진정으로 도전적 과제를 설정하고 있지 못하다는 비판을 받아왔고 산업계는 그간 선진국을 추격하는 방식으로 경쟁해 왔기 때문에, 작은 아이디어라도 스스로 키워나가는 경험이 축적되지 않았습니다. 하지만 최근 들어 양쪽 모두 변화의 기류가 생기고 있습니다. 과학기술계에서는 저변이 확대되며 각 분야에서 도전적인 질문을 던지는 사례들이 나타나고 있고, 산업계는 기존 모델로는 더 이상 생존할 수 없다는 절박함 속에서 새로운 로드맵의 필요성을 절감하고 있습니다. 이제는 스케일업을 통해 새로운 로드맵을 개척하지 않으면 생존할 수 없다는 위기감이 높아져 있습니다. 바로 지금이 양쪽의 열기를 결집시킬 수 있는 중요한 시점이라고 생각합니다.





Q. 이번 포럼의 기획에서 실행까지 상당히 고된 여정이었다고 알고 있습니다. 과정에서의 어려움은 어떤 것들이 있었나요?

● **이정애 미래부장**

처음에는 포럼에서 그랜드 퀘스트의 10개 분야 모두를 다루는 것이 과연 가능한 일인지 많은 고민을 했습니다. 일부에선 “방송 문법에 맞게 몇 개만 골라야 하는 것 아니냐”는 목소리도 있었죠. 그럼에도 10개 전 퀘스트를 모두 다루기로 한 이유는, 서로 다른 분야가 한자리에서 이야기를 나누는 이런 기회가 매우 드물기 때문이었습니다. 보통은 AI 포럼이면 AI만, 바이오 포럼이면 바이오 분야의 사람들끼리만 이야기하게 되니까, 관심 있는 사람들만 오고 서로 다른 분야 간의 접점은 생기기 어렵죠. 그런데 저희 포럼은 AI에 관심이 있어 참석하신 사람이 대사 생물학이나 공간 디스플레이 이야기를 들으면서, ‘내가 고민하는 문제와 구조는 다르지만 본질은 비슷하구나’ 하는 깨달음을 얻을 수 있는 자리라고 생각합니다.

과학기술계 내부에서도 융합이 일어나고 있지만, 저희처럼 인문사회 관점을 가진 사람들과의 교류를 통해서도 또다른 통찰이 나올 수 있다는 점도 중요합니다. 지금처럼 복잡하고 빠르게 변화하는 시대엔, 이런 분야 간의 연결과 확장을 가능하게 해주는 플랫폼이야말로 가장 귀한 자산이고, 우리가 해야 할 가장 의미 있는 시도라고 생각합니다.

또다른 어려움은 과학기술계의 깊고 복잡한 논의를 ‘대중의 언어’로 풀어내는 일이었습니다. 어떻게 보면 SBS X 그랜드 퀘스트를 통해 우리는 지금 이질적으로 보였던 두 세계—과학기술계와 대중사회—를 연결하는 새로운 실험을 하고 있는 셈입니다. 또 하나 중요한 점은, 이 포럼이 단지 전문가들끼리의 담론에서 그치는 것이 아니라, 정책 결정자들, 산업계, 나아가 국민들과도 이어지는 구조를 만들려는 시도라는 겁니다.

기존의 SDF(SBS D포럼)³가 글로벌 흐름을 국내에 소개하는 플랫폼이었다면, 이번 <SBS X 그랜드 퀘스트>는 우리가 로드맵을 새로 만들어가는 국내 1등 담론의 출발점입니다. 향후 한국 과학기술 담론의 방향성을 전환시키는 데 있어 매우 중요한 전환점이 될 거라고 믿습니다.

Q. '그랜드 퀘스트'가 제대로 작동하려면 단순히 도전적인 질문을 던지는 것이 아니라, 그것이 작동할 수 있는 조직의 문화나 DNA 수준의 변화가 병행돼야 할 것입니다.

● **이정동 서울대 교수**

맞습니다. 단순히 질문 하나 던진다고 해결되는 일이 아니라, 조직의 리더십과 문화 자체가 바뀌어야 가능한 일입니다. 무엇보다 중요한 건 리더의 태도 변화입니다. '리더'의 직책을 가진 사람들, 또는 스스로 리더라 생각하는 사람들이 새로운 길을 열어 보겠다는 조직구성원들의 시도를 격려하고, 한 번 시도해 볼 기회를 주고, 실패해도 거기서 교훈을 끌어내도록 이끌어주는 문화 그게 필요합니다. 물론, 자원과 시간이 한정되어 있기 때문에 아무거나 무작정 실행할 수는 없습니다. 어떤 도전과제를 키워나갈 것인지 선별하고, 효과적으로 키워나가는 스케일업의 경험을 축적하는 것이 중요합니다. 선진국들이 지난 200년 동안 쌓아온 축적의 핵심적인 내용입니다. 지금까지 한국 산업은 '빠른 벤치마킹과 타당성 분석 → 성공 가능성이 높은 프로젝트 선택 → 총력 실행'의 루틴으로 성공해 왔습니다. 그래서 작은 아이디어를 빠르게 실험하고 체계적으로 스케일업하는 루틴은 익숙하지 않았습니다. 하지만 이제는 그 경험이 꼭 필요해졌습니다. 예를 들어, 그랜드 퀘스

트가 처음엔 작게 출발하더라도 작은 프로젝트로 짧은 기간 안에 실험해 보고, 그 교훈을 바탕으로 2단계, 3단계로 발전시키는 계단식 스케일업전략이 매우 효과적입니다. 그리고 이런 전략은 제대로 훈련되고 체화되어야 합니다. 결국 글로벌 챔피언 기업들은 이걸 해본 경험이 있는 기업들이죠. 세상에 떠다니는 수많은 작은 그랜드 퀘스트들을 효과적으로 스케일업해 본 축적된 경험, 그것이 기술챔피언 기업들의 핵심 경쟁력입니다. 반면, 한국은 지금까지 선진국에서 스케일업이 다 된 완성된 모델을 도입해 변형하는 방식으로 성장해 왔기 때문에, 도전적 목표를 세우고 스케일업을 해본 경험이 거의 축적되어 있지 않다고 할 수 있습니다. 이제부터라도 쌓아가야 합니다. 이번 <SBS X 그랜드 퀘스트> 포럼이 그 축적의 대장정이 시작되는 출발점이 될 것으로 기대합니다.

한국이 가진 강점도 있습니다. 반도체, 자동차 등 거의 모든 산업 기반, 특히 제조역량을 갖추고 있다는 건 기존 세대가 만들어 놓은 튼튼한 기술혁신의 '모판'입니다. 다른 나라들이 부러워하는 다양한 산업현장이 있기 때문에 그랜드 퀘스트를 적용해 보고 개선해 나가면서 그 어떤 나라보다 잘 키워나갈 수 있습니다. 달리 말하면 스케일업을 위한 물리적 현상이 잘 갖추어져 있는 것입니다. 지금의 한국 산업은 '반쯤 찬 컵' 같은 상태입니다. 그 절반 채워진 물을 잘 활용해 스케일업 경험을 축적해 간다면, 머지않아 세계를 리드할 기술로 잔이 가득 차게 될 것이라 저는 기대하고 있습니다.

³ SDF(www.sdf.or.kr)는 SBS가 2004년부터 지식 나눔의 일환으로 기획해 온 글로벌 포럼이다. 처음에는 기술이 세상을 어떻게 바꾸고 있는지에 주목한 '서울디지털포럼'과 한국사회가 나아갈 방향을 제시하는 '미래한국리포트'의 두 포럼으로 진행해 오다가 2018년부터는 기술과 사회의 이슈를 한 장에서 들여다보는 SBS D포럼(SDF)으로 융합 발전했다.

Q. 마지막으로 전하고 싶은 내용이 있다면?

● 이정애 미래부장

국내 최고 석학과 업계 리더들과 함께 <SBS X 그랜드 퀘스트> 같은 수준의 자리를 독자적으로 실행해 낼 수 있는 곳은 삼성, LG, SK 등 아주 소수의 대기업들뿐이라고 들었습니다. 대부분의 사람들에게겐 접하기 쉽지 않은 플랫폼이라는 거죠. 저희 포럼은 누구나 참여할 수 있고요, 관심만 있다면 현장에서 질문하고 논의에도 참여할 수 있습니다. 과학기술에 관심 있는 분들, 자기 분야에 도전적 질문을 품고 계신 분들께 정말 소중한 기회가 될 거라고 생각합니다. <SBS X 그랜드 퀘스트> 포럼은 지금 우리가 무엇을 해야 미래를 담보할 수 있는가를 함께 고민하는 자리가 될 것입니다. 지속적인 관심과 참여를 부탁드립니다.

● 이정동 서울대 교수

이번 <SBS X 그랜드 퀘스트> 포럼이 과학기술계나 산업계뿐 아니라 우리 사회 전반에 "이제는 새로운 로드맵을 열어야 한다"는 자각을 던지는 계기가 되었으면 합니다. 여기서 소개되는 10개의 질문을 그대로 가져가는 것도 좋지만, 이 포럼을 계기로 "내가 속한 분야에서, 우리 기업이나 연구소에서, 우리만의 질문을 어떻게 던질 수 있을까?"를 고민해 보는 계기가 되었으면 좋겠습니다. 특히 젊은 과학기술 인재들, 이제 막 연구를 시작하거나 앞으로 이 길을 걸어가고자 하는 세대에게는, 이 포럼이 눈높이를 한 단계 끌어올리는 계기가 되었으면 합니다. 작은 문제의식에서 출발하더라도, 조금 더 큰 꿈과 긴 안목으로 질문을 던지는 연습을 하게 된다면, 그 자체로 이미 미래는 달라질 거라고 생각합니다.





참석자들의 후기

<SBS X 그랜드 퀘스트>에 참가한 청중들은 SBS와 서울대가 공동주최한 제1회 과학기술계 전문가 포럼에 대해 어떻게 느꼈을까요?

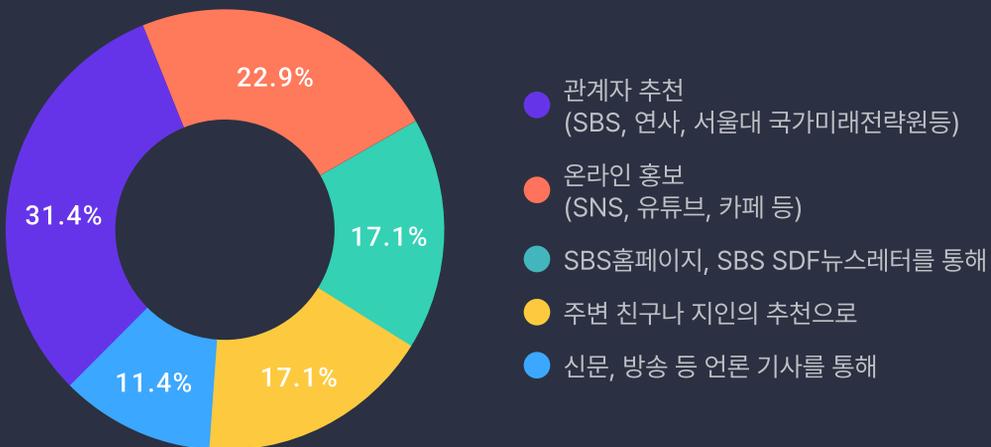
포럼에 참석한 참가자들에게 포럼이 끝난 4월 24일 오후 6시 반, 설문조사를 보내 이틀 동안 피드백을 준 분들의 의견을 중심으로 정리해 봤습니다. 먼저 <SBS X 그랜드 퀘스트>를 어떻게 알게 되었는지를 묻는 질문에 가장 많은 31.4%는 관계자(SBS, 연사, 서울대 국가미래전략원 등)의 추천으로 포럼을 알게 됐다고 답했고, 그다음인 22.9%는 온라인 홍보(SNS, 유튜브, 카페 등)를 통해 인지했다고 했으며 그다음인 동률 17.1%로 SBS 홈페이지, SBS SDF홈페이지를 통해, 또 주변 친구나 지인 추천으로 인지하게 됐다고 답했습니다. 마지막 11.4%는 신문, 방송 등 언론 기사를 통해 포럼을 알게 됐습니다.

참석해 보니 어땠냐는 질문에는 “흥미로웠다”, “우리나라에서 손에 꼽히는 석학들과 업계 리더에게 직접 질문할 수 있는 기회가 있어 좋았다”, “국내 과학기술계의 동향을 알 수 있고 생각해 볼 수 있었다”, “타 전공자여도 흥미롭게 주제에 참여할 수 있어 좋았다”, “비전공자도 이해할 수 있는 정도의 난이도라 적당하고 유익했다”, “지금 시대에 꼭 다뤄야 할 주제라고 느꼈다”는 피드백 등을 전했습니다.

10개의 세션 가운데 가장 관심이 있었던 세션이 무엇이었느냐는 질문에는 57.1%가 AI를 화두로 한 인간을 추월하는 인공지능 세션을 꼽아 역시 인공지능에 대한 높은 관심을 보였습니다. 그다음으로는 40%가 역노화 세션, 11%가 뇌내현실, 10%가 현실과 화면의 경계를 허문 공간 디스플레이의 순으로 세션에 대한 관심을 표시했습니다. 다소 어렵다고 느낀 세션에 대해서는 옹스트롬 미터 시대의 반도체 세션과 포스트 실리콘 반도체 소자의 세션이 아무래도 전문성이 높다 보니 전공자가 아니면 조금 어렵게 느껴졌다는 평가를 받았습니다.

Q.1 이번 SBS x 그랜드퀘스트 2025를 어떤 경로로 알게 되어 참석하셨나요?

응답 35개

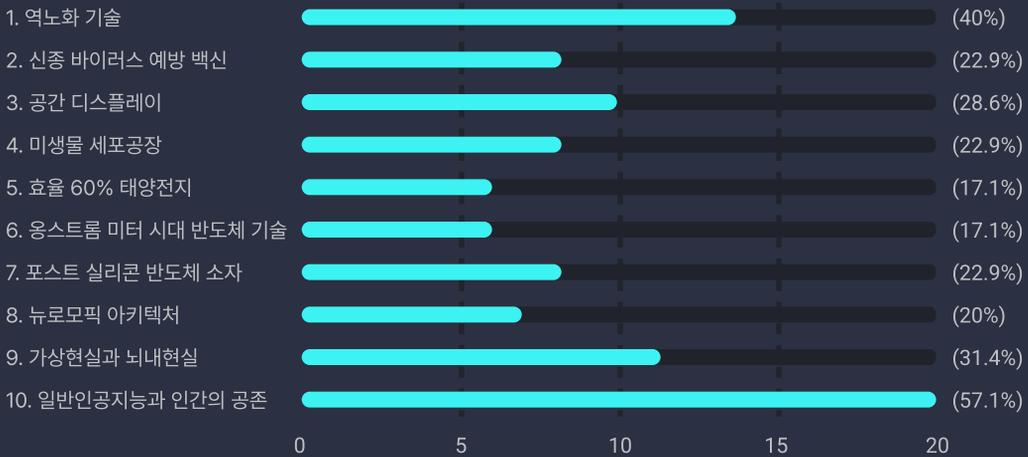


연사 중에서는 역노화 세션의 좌장이었던 이준호 서울대 생명과학부 교수, 온실가스로 플라스틱을 만들 수 있을가의 질문을 던진 이상엽 KAIST 생명화학공학과 특훈교수가 청중들의 가장 큰 인기를 얻었고, 하정우 네이버 클라우드 AI노베이션센터장, 문수진 한화솔루션 큐셀부문 R&D센터장, 신의철 KAIST 의과학대학원 교수가 그 뒤를 이어 청중들이 꿈은 인상적인 연사로 뽑혔습니다.

<SBS X 그랜드 퀘스트>에 추가로 바라는 점에 대해서는 내년에도 AGI(일반인공지능)가 또 다뤄졌으면 좋겠다는 답변과 함께 올해 다루지지 못한 분야 가운데 우주, 방산, 에너지, 양자 등의 분야도 더 관심을 가져줬으면 한다는 응답들이 있었습니다. 또 포럼에 참석하기 전에 각 주제에 대해 예습할 수 있는 자료가 주어지면 본 포럼에서 더 의미 있는 질문들이 오갈 수 있을 것 같다는 조언 등도 덧붙여졌습니다. 참석자의 88.6%는 내년에도 꼭 참석하고 싶다고 답했습니다.

Q.4 올해 포럼의 10개의 질문 중 가장 관심 있는 것은 무엇이었나요? (최대 3개 선택)

응답 35개



올해 처음으로 열린 <SBS X 그랜드 퀘스트>에 대해 참여한 연사들은 어떻게 느꼈을까요?

'기술주권'의 중요성이 부상하는 시기, 시의적절한 기획

<역노화 세션>의 좌장을 맡은 전국대학기초과학연구소 연합회 회장이며 국가과학심의회 산하 기초연구진흥협의회 위원장인 이준호 서울대 생명과학부 교수는 "기술주권을 향한 모든 영역의 노력이 필요한 시점에 구체적인 과학기술 관점의 방향과 정책 제시까지 기획하고 실행해주어서 현장의 연구자로서 감사를 드린다"고 전했습니다. 그러면서 특히 "기술주권 확보를 위한 기초과학의 중요성이 균형 있게 반영돼 더 의미가 있었다"고 강조했습니다.

'시스템대사공학'의 창시자인 이상엽 KAIST 생명화학공학과 특훈교수도 아주 시의적절한 기획이었다고 강조하면서 주제와 질문, 운영이 모두 완벽했다고 말했습니다.

국내 흔치 않은 산학 연계의 장

<SBS X 그랜드 퀘스트>는 특히 산학 간의 연계를 중요한 특징으로 잡고 있는데요. 지난해 8월 세계적인 권위를 가진 과학학술지 '네이처'지에서 한국 특집호를 내면서 국내과학기술계의 약점으로 산학 간 낮은 연계성을 지적한 것 등이 고려가 되었습니다. 실제 국내 기업 가운데 자체로 석학들을 모셔 인하우스로 중장기적인 방향성이나 화두를 모색할 수 있는 업체는 손에 꼽힐 정도로 적다고 알려진 가운데 국내 최고의 석학들과 업계의 리더들이 한자리에서 본인들의 연구 분야를 중심에 두고 같이 머리를 맞대고 고민할 수 있는 장의 탄생은 높이 산 연사들이 많았습니다. 박원석 아모레퍼시픽 R&I선행뷰티연구소장은 국가 미래에 대해 국내 석학들과 같이 고민할 수 있는 흔치 않은 기회가 주어진 것에 감사를 표했습니다.

"앞선 주제에 대한 논의이지만 참가자들의 큰 관심이 느껴졌고 국가 미래에 대한 고민을 함께 할 수 있었던 시간이었습니다.

특히 저 개인으로는 국내 석학과 함께 해서 좋았고 산업계까지 포함시켜 주셔서 감사하다고 말씀드리고 싶었습니다."

박원석/아모레퍼시픽 R&I선행뷰티연구소장

코로나19 팬데믹 당시 아스트라제네카, 노바백스와 협력의 통해 신속하고 안정적인 백신 공급을 주도하고 CEPI(감염병 혁신연합) 및 게이츠 재단과의 연계를 통해 국내 코로나 백신 '스카이코비원'의 개발을 현실화했던 김훈 SK바이오사이언스 Global Biz 대표도 당시의 경험을 공유할 수 있는 기회가 제공된 것에 큰 의미를 부여했습니다. 제1회 <SBS X 그랜드 퀘스트>의 업계 리더로 참여한 또 다른 연사, 2024년말 페로브스카이트-실리콘 탠덤 셀 최고 기록인 발전효율 28.6%를 달성하면서 전세계 태양광 시장을 선도하고 있는 한화솔루션의 차세대 고효율 태양전지 개발 핵심 연구 책임자 문수진 한화솔루션 큐셀부문 판교 R&D센터장도 주제 선정, 심도 있는 토론, 질문 다 좋았다면서 패널 토론의 시간이 짧았던 게 유일한 아쉬움이었다고 전했습니다.

윤경아 KT Agentic AI연구소장도 미국 시애틀로 해외 출장을 간 상황에서 새벽에 화상 라이브로 연결하면서까지 참여를 한 이유를 AI모델과 서비스 개발에 몸담고 있는 상황에서 앞으로의 사회 변화에 대한 기대감과 책임감을 가지고 있는데, 학계와 업계의 여러 전문가들과 이 같이 얘기하고 공론화할 수 있는 기회가 흔치 않아 이 기회를 놓치고 싶지 않았다고 했습니다.

진지한 과학기술 내용 대중화에 노력해주는 방송사에 감사

지난 4월 21일 2025년 과학정보통신의 날을 맞아 정부 훈장을 수상하기도 한 신축성 전자 시스템 분야의 대표적인 국내 석학 홍용택 서울대 전기정보공학부 교수는 제1회 <SBS X 그랜드 퀘스트>에서 '현실과 화면의 경계를 허문 디스플레이는 가능한가'라는 도전 과제를 두고 '공간 디스플레이' 세션을 이끌어 주었는데요. 홍용택 교수는 이번 포럼을 준비하면서 전공자가 아니면 알기 어려운 전문적인 내용을 비전공자 이과생을 넘어 문과생들도 이해할 수 있게 대중화하려고 노력해준 방송사의 노력을 높게 평가해 주었습니다. 정준영 CJ 제일제당 BIO연구소 Synthetic BIO담당도 현장 질문들이 너무 흥미롭고 재밌어서 놀랐다면, 업계를 넘어선 다양한 사람들과의 교류의 중요성을 새삼 인지하게 됐다고 전했습니다.

“산업체와 학계의 전문가들이 모여 기술의 현황과 미래를 방송을 통해 이해하기 쉬운 언어로 국민들에게 전달할 수 있는 기회를 주셔서 정말 좋았습니다. 이를 통해 과학기술에 대한 국민의 관심이 높아지고 많은 인재들이 양성될 것을 기대합니다. 성공적인 본 행사가 매년 지속된다면 SBS가 한국 과학기술의 도약에 큰 획을 긋는 독보적인 방송사로 자리매김하게 될 것입니다.”

홍용택/서울대 전기정보공학부 교수

반도체 업계의 흔치않은 여성 CEO 출신인 전 샤피온 CEO, 현 서울대 차세대반도체 혁신융합대학사업단 류수정 교수도 언론사가 기획을 하다 보니 기술적인 부분부터 사회적인 이슈까지 폭넓게 다뤄진 것이 참 좋았다고 했습니다. 그러면서 기술자의 관점뿐 아니라 일반 시청자들에게도 충분히 관심과 정보를 제공할 수 있는 계기가 되었다고 언급했습니다.

‘뇌내현실’이라는 새로운 조어를 만들어 뇌 내부나 신경계와 직접 연결함으로써 이전에는 가능하지 않았던 감각 및 운동신경계의 기능 이상의 해결이라든지 우울증이나 퇴행성 치매 같은 다양한 정신질환의 해결을 고민하는 백세범 KAIST 뇌인지과학과 교수와 이대열 존스홉킨스대 신경과학과 블룸버그 특훈교수는 뇌과학 연구가 어디까지 가능하냐를 넘어 이제는 윤리적인 문제 등 사회가 어디까지 용인할 것이냐가 중요하기 때문에 이러한 토론 기회가 너무 중요해지고 있다고 강조했습니다. 백세범 교수님은 특히 요즘 난무하는 가벼운 재미를 위한, 과학에서 모티브만 따오는 프로그램과 차별되는 기획이어서 더욱 좋았다는 의견을 주었습니다. 이대열 교수님도 최근 뉴미디어가 갖고 있는 부정적인 영향에 대해 자주 얘기를 해왔는데 <SBS X 그랜드 퀘스트>는 더 진지한 과학의 토론을 대중들과 함께 할 수 있는 자리여서 좋았다고 전했습니다.

“요즘 난무하는 가벼운 재미를 위해 과학에서 모티브만 따오는 프로그램과는 차별화되는 기획이어서 좋았습니다.”

백세범/KAIST 뇌인지과학과 교수

“뉴미디어의 부정적인 영향에 대해 자주 얘기를 해왔는데 <SBS X 그랜드 퀘스트>는 좀 더 진지한 과학의 토론을 대중과 함께 할 수 있어서 좋았습니다.”

이대열/존스홉킨스대 신경과학과 블룸버그 특훈교수

기타로는 이번 포럼을 계기로 더 큰 여러 협업을 기대할 수 있게 됐다는 의견과 개인의 관심사를 넘어 세상을 바꾸는 연구, 세상에 도움이 되는 연구가 얼마나 중요한지 <SBS X 그랜드 퀘스트>를 계기로 새삼 깨닫게 됐다는 의미 깊은 소감 등이 전해졌습니다.



SBS X 그랜드 퀘스트 주요 언론 보도

"기술주권 확보, 그 10가지 질문"...'SBSX그랜드 퀘스트', 24일 첫 개최 (2025.4.22)

https://ent.sbs.co.kr/news/article.do?article_id=E10010300457

대선 경선 후보들, 'SBS X 그랜드 퀘스트'서 과학·기술 공약 제시한다 (2025.4.23)

https://ent.sbs.co.kr/news/article.do?article_id=E10010300497

'SBS X 그랜드 퀘스트' 개막...'기술주권 확보' 위한 토론→대선 주자들 공약까지 (2025.4.23)

https://ent.sbs.co.kr/news/article.do?article_id=E10010300579

오는 24일 상암동 SBS프리즘타워서 제 1회 'SBS X 그랜드 퀘스트' 개막 (2025.4.24)

<https://www.segye.com/newsView/20250424517288?OutUrl=naver>

제 1회 'SBS X 그랜드 퀘스트' 개막 (2025.4.24)

<https://www.sedaily.com/NewsView/2GRNB62DVC>

제2회 `SBS문화재단 그랜드 퀘스트 프라이즈` 수상자 선정 (2025.4.24)

https://www.dt.co.kr/contents.html?article_no=2025042402109923063001&ref=naver

"기술주권 없는 미래는 없다"...대선 경선 후보들, 'SBS X 그랜드 퀘스트'서 과학·기술 정책 집중 제언→최신 트렌드 진단 (2025.4.24)

<https://www.topstarnews.net/news/articleView.html?idxno=15646263>

제1회 'SBS X 그랜드 퀘스트' 개막 (2025.4.24)

https://www.seoul.co.kr/news/economy/2025/04/24/20250424500135?wlog_tag3=naver

"미래를 바꿀 도전"...박수형·서상우, '그랜드 퀘스트 프라이즈' 수상→과학기술 난제 해법 제시 (2025.4.24)

<https://www.topstarnews.net/news/articleView.html?idxno=15647355>

"대선 경쟁 후보들 과기정책 제시...석학들, 10가지 대 질문" (2025.4.24)

<https://www.hellodd.com/news/articleView.html?idxno=107698>

[SBS X 그랜드 퀘스트] 기술주권 확보 위해 과학·기술계 석학과 업계 리더들이 머리 맞댄다! (2025.4.11)

https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1008058598

[취재파일] "과학과 예술의 융합...4월 24일에 공개됩니다"

- "제1회 SBS X 그랜드 퀘스트 2025" 오프닝 아트 '한호 작가' 인터뷰 (2025.4.12)

https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1008059288

[취재파일] "심화되는 기술격차...한국은 대체불가능한 '퍼즐'을 갖고 있나?"

- 제1회 [SBS X 그랜드 퀘스트] 이정동 서울대 교수·이정애 SBS 미래부장 인터뷰 (2025.4.17)

https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1008066786

"기술주권 확보, 그 10가지 질문"...!SBSX그랜드 퀘스트', 24일 첫 개최 (2025.4.22)

https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1008072382

'기술주권 확보, 10가지 질문'...SBSX그랜드 퀘스트 내일(24일) 개최 (2025.4.23)

https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1008074822

'SBSX그랜드 퀘스트' 포럼 내일 개최 (2025.4.23)

https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1008074771

[SBS X 그랜드퀘스트] 방문신 SBS 사장 "어려운 기술주권 확보, 실마리 마련되길" (2025.4.24)

https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1008075186

[SBS X 그랜드퀘스트] 유상임 과기부 장관 "올해 연구개발 예산 역대 최대...국가 역량 총동원" (2025.4.24)

https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1008075187

[SBS X 그랜드퀘스트] 최태원 대한상의 회장 "과학기술 발전 함께 창출하는 공동 창조자(co-creator)로" (2025.4.24)

https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1008075188

[SBS X 그랜드퀘스트] 최민희 과방위원장 "한국 경제 돌파구, 첨단기술에...국회 발맞춰 나갈 것" (2025.4.24)

https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1008075189

[SBS X 그랜드퀘스트] 이철규 국회 산자위원장 "통상리스크 추경 심의중...지원 아끼지 않을 것" (2025.4.24)

https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1008075192

[SBS X 그랜드퀘스트] 이정동 서울대 공학전문대학원 교수 "10가지 미래 질문 준비...선진 기술 위 한 자리 되길" (2025.4.24)

https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1008075193

[SBS X 그랜드퀘스트] 김현우 SBS 8뉴스 앵커 "기술강국 재도약 위한 SBS의 정책 제언" (2025.4.24)

https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1008075194

[SBS X 그랜드퀘스트] 각 당 경선후보들 "과학기술 경쟁력 위한 정책 지원" (2025.4.24)

https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1008075195

[SBS X 그랜드퀘스트] 최형두 과방위 간사 "국회부터 바꾸겠다...AI 강국으로 우뚝 설 것" (2025.4.24)

https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1008075196

[SBS X 그랜드퀘스트] 이한주 민주연구원장 "국정 중심에 '과학기술'...AI 3대 강국 진입하겠다" (2025.4.24)

https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1008075197

[SBS X 그랜드퀘스트] 불확실성 극대화 시대, 기술주권 확보 방안은? (2025.4.24)

https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1008075597

[SBS X 그랜드퀘스트] "추격자에서 선도국가로"...10가지 담대한 질문 (2025.4.24)

https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1008075598

[SBS X 그랜드퀘스트] "기술주권 확보, 생존의 문제"...대선 후보 공약은? (2025.4.24)

https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1008075599

[SBS X 그랜드퀘스트] 산업 경쟁력 회복 과제, 각 당 정책방향은? (2025.4.24)

https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1008075602

'SBS X 그랜드 퀘스트' 개막...'기술주권 확보' 위한 토론→대선 주자들 공약까지 (2025.4.24)

https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1008075928

기술패권 전쟁..'SBS X 그랜드 퀘스트' 이정동 교수 "'AI 광개토 전략' 필요" (2025.4.24)

https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1008076157

[SBS X 그랜드퀘스트] 위기의 '기술 주권'..."초격차 전환 절실" (2025.4.24)

https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1008076576

[SBS X 그랜드퀘스트] 기술력=경제 안보..."첨단기술 투자" 한목소리 (2025.4.24)

https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1008076577

[SBS X 그랜드퀘스트] "인재 탈출 방지...'범부처 컨트롤타워' 절실" (2025.4.24)

https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1008076578

[SBS X 그랜드퀘스트] 위기의 '기술주권'...추격에서 선도로 (2025.4.25)

https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1008076882

기후위기 주범 온실가스로 친환경 플라스틱을? / SBS / #D리포트

<https://www.youtube.com/watch?v=NWkmGvM0U5I&t>

꿈의 기술 60% 효율 태양전지, 상용화 될까 / SBS / #D리포트

<https://www.youtube.com/watch?v=hev-JLWylu0&t>

인간 뇌 닮은 컴퓨터 칩 속속 개발...10년 뒤 상용화 될까? / SBS / #D리포트

<https://www.youtube.com/watch?v=ieSQqZ3nSbA>

구부러지고, 허공에 뜨고...공간 디스플레이의 미래 / SBS / #D리포트

<https://www.youtube.com/watch?v=4YQYzXo64TA>

AI 특이점이 오면 인간은 알 수 있을까...'인공지능과 공생' / SBS / #D리포트

<https://www.youtube.com/watch?v=dJDYHLXD0I8>

'제 2의 코로나' 오면 인류는 감당할 수 있나 / SBS / #D리포트

<https://www.youtube.com/watch?v=VaYfiTL3RMQ>

100억 분의 1미터...반도체 용스트롬 세계 진입하나 / SBS / #D리포트

https://www.youtube.com/watch?v=Y0t4yJqq_fg

죽지 않는 해파리처럼...젊음, 평생 유지할 수 있을까? / SBS / #D리포트

<https://www.youtube.com/watch?v=it3BrnVU5Vs>