

## 제18차 한·미 나노 포럼

휴먼인지 및 뇌 연구 관련 나노센서 그리고 반도체 제조의 지속 가능성

애리조나 주립대학교, 템피, 애리조나

2024년 9월 24일 채택

21세기의 1분기는 나노기술 융합의 출현과 광범위한 과학기술 분야에서의 응용 및, 4차 산업혁명을 향한 빠른 발전을 이루기 위한 학제 간 연구들의 추진으로 가득했습니다. 새로운 기술 개발을 더욱 촉진하기 위해, 미국 (국립과학재단, NSF)과 한국 (과학기술정보통신부, MSIT)은 2002년 10월 31일 대한민국 서울에서 개최된 ‘한미 과학기술 공동위원회’의 권고에 따라 설립된 포럼을 통해 나노기술 분야의 아이디어 교류와 연구 협력을 위한 공통 플랫폼을 장려해왔습니다.

2003년 이래로, 한·미 나노 포럼은 나노기술의 발전을 촉진하며 매우 성공적으로 진행되어 왔습니다. 이 포럼들은 다양한 과학 연구 분야가 상호적으로 결합되는 지점에서 개념이나 트렌드를 파악하고 비전을 제시하는 변혁적 힘을 입증해왔습니다. 한·미 나노 포럼은 중대한 영향을 미치는 나노기술의 떠오르는 분야를 파악함으로써, 양국의 연구 커뮤니티와 산업계 간의 효과적인 네트워킹을 위한 공통 플랫폼을 성공적으로 제공했습니다. 이는 한·미 나노 포럼을 통해 수립된 미국과 한국 간의 주요 협력들의 추진에서 명백히 드러납니다. 포럼을 조직함으로써 두 국가가 추진하는 분야에서의 최첨단 기술 생성을 가속화했습니다. 한·미 나노 포럼은 이런 종류의 포럼 중에서 가장 오래 지속되고 있습니다. 또한, 카네기 멜론 대학교 웹사이트 (<http://www.cmu.edu/nanotechnology-forum/>)를 통해 공개된 한·미 나노 포럼은 다른 국제 포럼들의 벤치마크 역할을 해왔습니다.

이러한 사명을 가지고, 저희는 2003년 10월 14일부터 18일까지 서울에서 NSF 자금을 통해 제1차 한·미 나노 포럼을 시작했습니다. NSF의 한국 측 상대기관으로서 과학기술정보통신부 (MSIT)가 참여를 감독하고 자금을 지원했습니다. 이후 포럼들의 주제는 당시 양국의 필요에 따라 자문위원회 위원들이 추천했으며, 포럼 장소는 한국과 미국을 번갈아가며 개최되었습니다. 각 포럼의 주요 주제는 다음과 같습니다. 제2차 포럼은 나노제조 연구와 나노기술 영역의 전반적인 교육 프로그램 개발에 관한 것이었습니다. 제3차 포럼은 앞서 개최된 두 포럼에서

다루었던 수동 시스템과 달리 능동소자와 시스템 연구에 중점을 두었습니다. 제4차 포럼은 지속 가능한 나노 에너지에 관한 것으로 에너지 분야 응용을 위한 재료 및 소자와 시스템의 설계와 특성 분석을 주제로 다루었습니다. 제5차 포럼에서는 부각되고 있는 나노바이오기술을 주제로, 생체의학 및 의료 서비스 제공과 더불어 환경, 보건 및 안전 그리고 독성 문제들에서 나타나는 중대한 과제들을 극복하기 위한 새로운 나노바이오소재, 계측 기술 및 통합 시스템의 발전을 중점적으로 다루었습니다. 제6차 포럼은 기본적인 나노일렉트로닉스 및 바이오기술과의 융합을 포함한 통합적 응용 연구에 중점을 두었습니다. 제7차 포럼은 친환경적 나노에너지를 위한 재료 및 시스템을 논의하고, 현재와 미래의 에너지 기술 분야의 과제에 있어 나노기술 융합을 통한 해결책을 제시하였습니다. 이 7번의 포럼은 21세기의 첫 10년(NANO1) 동안 광범위한 과학기술 분야에서의 나노기술 융합의 출현을 기록하는 발전과 피드백 과정을 통해 막을 내렸습니다. 2011년 지속가능한 나노기술 융합에 관한 제8차 포럼은 다음 10년(NANO2) 전 세계 인구 증가에 따라 직면한 심각한 문제점들을 해결하기 위한 나노기술의 새로운 시작을 알렸습니다. 미래 지속가능한 나노기술, 특히 물 재생 및 담수화, 온실가스 포획 및 변환, 그리고 지속가능한 자원을 중점적으로 친환경적 기술을 강조하였습니다. 제9차 포럼은 나노과학의 기초, 지속가능성, 그리고 차세대 나노기술 제품을 위한 최신 응용 분야와 같이 꼭 해결해야 할 폭넓은 사회적 과제들에 관해 나노과학기술 융합을 통한 응용 방향을 모색하는데 중점을 두었습니다. 제10차 포럼에서는 차세대 나노기술 제품 및 그 과정을 위한 로드맵을 계획하였습니다. 제11차 포럼에서는 나노제조, 나노복합소재, 그리고 나노인포매틱스 등에 대한 새로운 패러다임을 제시하였습니다. 이 포럼에서는 고강도/경량화 스마트 나노복합소재 개발을 위한 혁신적이고 지속가능한 나노제조기술의 개발 및 나노인포매틱스를 통한 나노제조기술의 관리 등을 현안 주제로 다룸으로써, 나노기술을 현실화 할 수 있는 기회를 제공하였습니다. 이러한 나노제조기술들을 통해 항공우주, 자동차, 에너지, 환경, 정보, 전력산업 등 현존하는 다양한 산업에서 차세대 고성능 제품 생산 및 새로운 산업 개발에 있어 패러다임의 전환을 이루었습니다. 제12차 포럼에서는 2D 소재 분야의 나노과학융합, 정수처리 관련 기술 분야의 새로운 패러다임을 위한 로드맵 제시를 중점 의제로 다루었습니다. 이 과정에서 수자원 관련 주제에 응용할 수 있는 나노기술 및 기능성 나노소재 등 다양한 기술적인 개선 방안에 대한 중점 검토가 이루어졌습니다. 제13차 포럼에서는 뉴로모픽 컴퓨팅, 지속가능한 수자원 및 에너지를 주제로, 제14차 포럼에서는 나노센서 기반 사물인터넷(IoT)과 뉴로모픽 컴퓨팅을 주제로 나노기술 및 기능성 나노소재 응용을 위한 다양한 기술적인 개선방안에 대한 검토를 통해 나노과학 융합의 새로운 패러다임을 위한 로드맵 제시를 중점 의제로 다루었습니다.

다. 제15차 포럼에서는 나노센서 기반 IoT 주제 관련 지속 협력뿐만 아니라, 나노의약 분야의 새로운 패러다임 구상에 중점을 두었으며 제16차 포럼은 2019년에 개최되었고 단일세포 수준에 초점을 맞춘 새로운 나노의학 및 인간 인지와 뇌 연구에 관련된 센서 개발을 통해 나노기술의 가능성을 실현하는 데 중점을 두었습니다. 그 이후 COVID-19 팬데믹으로 인해 3년 동안 포럼을 개최하지 못했습니다. 제17차 포럼은 2023년에 개최되었고 차세대 반도체와 반도체 제조의 환경적 영향 탐구. 이 포럼에서는 신홍 뉴로모픽 인메모리 컴퓨팅, 미래 CMOS 노드, 모놀리식 3D(M3D) 통합, 첨단 패키징(설계, 제조 및 기술), 그리고 이종 통합을 위한 첨단 반도체 장치 개발에 대해 논의했습니다.

이번 제18차 포럼은 2024년 9월 23일과 24일에 애리조나 주립대학교에서 개최되었습니다. 반도체와 나노기술 분야의 저명한 과학자와 정책 입안자 76명이 참석했습니다. 이 포럼에서 환영사는 애리조나 주립대학교 연구혁신 부학장 제커리 홀먼 (Zachary Holman), 한국나노기술연구회 안진호 (Jinho Ahn) 회장, 그리고 미국 국립과학재단 성신 마가렛 김 (Seongsin Margaret Kim) 프로그램 디렉터가 맡았습니다. 주요 프로그램은 아래와 같이 네 가지 세션으로 구성되었습니다.

#### 기조강연:

이 세션은 NSF 재료연구부의 프로그램 디렉터인 버짓 슈웬저 (Birgit Schwenzer) 박사의 발표로 시작되었습니다. 그녀는 환경 및 임상을 포함한 광범위한 응용 분야에 걸친 1D, 2D, 그리고 3D 나노소재의 도움으로 나노기술이 우리 환경에 미칠 수 있는 영향을 강조했습니다. 슈웬저 박사는 인쇄 전자기기, 나노 촉매, 센싱 기술에 초점을 맞춘 다양한 연구 추진이 어떻게 NSF와의 파트너십을 통해 상용화되었거나 기술 채택 과정에 있는지를 보여주었습니다.

나노기술연구협의회 회장인 안진호 (Jinho Ahn) 교수는 글로벌 반도체 산업의 미래가 어떻게 성장하여 전 세계 사람들의 삶에 직접적인 영향을 미칠 수 있는지에 대해 밝혔습니다. 특히, 그는 극자외선(EUV) 리소그래피의 중요성을 강조하고, 최첨단 리소그래피 공정에 이르기까지의 여정과 주요 반도체 국가들이 오늘날 우리의 기술적 수준에 어떤 중요한 기여했는지 요약했습니다. 또한 EUV 리소그래피 관련 나노기술 연구에 주력하고 있는 한국 CHIPS 혁신연구센터에서 진행 중인 연구를 강조했습니다. 기조 연설자들의 발표 후, 청중들 사이에서는 영감을 주는 대화와 토론이 이어지면서 분위기가 고조되었습니다.

세번째 기조강연은 반도체 리서치 코퍼레이션(SRC)의 수석 과학자인 빅터 지르노프 (Victor Zhirnov) 박사가 진행했습니다. 박사는 반도체 산업을 위한 전략적 계획과, 새로운 전략 계획인 마이크로일렉트로닉스 및 첨단 패키징 기술 (MAPT)

로드맵의 중요성에 대하여 발표했습니다. 또한 소위 ‘암흑시대’(기원전 수백 년 경)의 ‘데이터 생성’을 21세기의 데이터 생성 및 저장의 엄청난 성장과 비교했습니다. 그는 첨단 반도체 소자의 기술을 2D에서 3D로 전환하면 비교적 안정적인 세계 에너지 생산 속도에 비해 더 빨리 증가하고 있는 에너지 수요를 해결할 수 있을 것이라 언급했습니다.

이 세션은 어플라이드 머티어리얼즈 (Applied Materials)의 최고기술책임자인 옴 날라마수 (Om Nalamasu) 박사의 흥미진진한 강연으로 마무리되었는데, 그는 전 세계의 심층적인 기술 협력을 통해 지속 가능한 성장을 달성할 수 있는 방법에 대해 강조했습니다. 그는 반도체 산업 수익의 상당 부분을 차지하는 빅데이터와 인공지능(AI)이 반도체 산업의 부활을 가능하게 할 것이라고 낙관했습니다. 업계 수익이 첫 5천억 달러에 도달하는 데 약 70년이 걸린 반면, 다음 5천억 달러 수익은 첫 번째 달성에 걸린 시간의 10분의 1인 단 7년 만에 도달할 것으로 예상했습니다. AI 시스템에 관련된 컴퓨팅 수요가 기하급수적으로 증가함에 따라, 효율적이고 통합된 컴퓨팅 솔루션의 필요하다고 강조했습니다. 날라마수 박사는 증가하는 컴퓨팅 수요를 에너지 효율적으로 해결하기 위해서는 칩렛과 이종 통합, 광학 연결이 중요하다고 언급했습니다.

#### 포스터 세션:

최정원 교수는 MHz, KW 공진형 전력 변환기에서 증진 모드 질화갈륨(eGaN) FET의 성능을 분석하고, 고주파수, 고전력 작동을 위한 eGaN FET를 사용하여 전력 변환기 설계를 최적화하는 방법을 설명했습니다.

서지훈 교수는 반도체 제조에서 CMP 소모품의 지속 가능성을 평가하면서, 특히 CMP 슬러리와 pCMP 세정액에 중점을 두고 CMP 소모품의 수명 주기 평가(LCA)를 위한 견고한 프레임워크를 소개했습니다.

이인희 교수는 패키징 이전의 칩의 크기가 1-2nm임에도 불구하고, 배터리와 패키징 등으로 인해 소형 반도체 센서 시스템의 설계가 어려워진다고 발표했습니다. 그는 소형 반도체 센서 시스템 개발 중 극복한 과제들을 발표했습니다.

고현웅 교수는 다중 모달, 다중 스케일 AM 데이터를 사용하여 PSP 인과관계를 예측하고, 학습된 분포를 기반으로 새로 합성된 PSP 특성을 생성할 것이라고 예측했습니다.

이반 산체스 에스케다 (Ivan Sanchez Esqueda) 교수는 뛰어난 전기적 특성을 가진, 전이 과정이 필요 없는 CMOS 호환 멤리스터를 가능하게 하는 h-BN 필름을 합성했으며, NVRS 특성에서 높은 안정성을 보이는 h-BN 멤리스터의 웨이퍼 스케일 통합을 90% 이상의 수율로 입증했습니다.

아룬쿠마르 벤카타로나파 (Arunkumar Venkataronappa)는 대량 반도체 제조에서

CMP 공정 중 DIW 사용량 절감 및, 첨단 노드 제조에서의 금속 손실 완화를 검토했습니다. 최적화된 공정은 단일 웨이퍼당 33L의 DIW를 절약할 수 있습니다. 스리 시바 라마 크리슈나 하눅 베기 (Sri Siva Rama Krishna Hanup Vegi) 박사는 CMP와 CMP 후 세정액에 친환경적 화학물질을 사용하여, 더 적은 유해 물질과 최소한의 화학 폐기물로 수율 목표를 달성하는 방식으로 CMP 공정을 개발했습니다.

## 세션 #1:

아메드 부스나이나 (Ahmed Busnaina) 교수는 부유 나노입자를 사용하여 비용을 10배에서 100배까지 절감할 수 있는 지속가능한 반도체 제조 공정을 소개했습니다. 이 확장 가능한 적층 제조 기술은 첨단 패키징에 사용되는 나노구조를 더 빠르고 정밀하게 생산할 수 있도록 해주며 이는 초미세 3D 통합의 과제를 해결하고, 환경에 미치는 영향을 최소화하며, 전통적인 제조 방법의 한계를 극복한다고 연설했습니다.

김태곤 교수는 반도체 산업을 위한 원자력 현미경 기술의 최근 발전에 대해 설명했습니다. 그는 나노미터 규모의 결함 검출에서의 중요한 역할과 고해상도 3D 분석을 위한 백색광 간섭계와의 통합을 강조했습니다. 이러한 개선은 작업 처리량, 운영 복잡성, 전반적인 장치 성능에서의 한계를 극복하는 데 도움을 준다고 발표했습니다.

폴 웨스터호프 (Paul Westerhoff) 교수는 펌에서 산업 폐수를 초순수(超純水)와 냉각 시스템에 활용하여 물 사용량을 줄이고, 도시 수돗물에 대한 의존도를 낮출 수 있는 방법에 대해 논의했습니다. 또한 새로운 고품질 물 공급원으로서 대기 중의 물 수확을 탐구하며, 수질 정화를 위한 비용, 기술적 실현 가능성과 에너지 소비의 과제를 강조했습니다.

채희엽 교수는 퍼플루오로화합물(PFC)을 플루오로에테르, 플루오로알코올, 플루오로케톤과 같이 지구 온난화 잠재력이 낮은 가스로 대체하여, 플라즈마 에칭 공정에서 지구온난화 가스를 줄이는 전략을 제시했습니다. 그의 연구는 이러한 대체 물질들이 배기가스의 온난화 잠재력을 최대 90%까지 낮출 수 있다는 것을 보여주었습니다.

브루노 아제레도 (Bruno Azeredo) 교수는 수소 생산 및 바이오 전자공학과 같은 고효율적 응용을 위한 나노다공성 구리의 개발에 대해 논의했습니다. 그는 계층적 고효율적 구조를 생성하기 위한 Cu-Al 전구체의 탈합금화, 분말 소결 및 3D 프린팅과 같은 기술을 다루었으며, 생성된 소재가 프로그래밍이 가능해야 한다는 것을 강조했습니다.

이해성 교수는 반도체 나노물질에서 전자기 간섭 차폐 효과성 향상에 대해 발표

했습니다. 그는 샘플 크기, 주파수 범위, 근접장 조건과 관련된 문제를 포함하는, 차폐 효과 측정을 위한 ASTM D4935 표준의 한계를 다루었습니다. 그의 발표는 반도체 제조의 지속가능성을 향상시키기 위한 테스트 방법 개선에 초점을 맞추었습니다.

파즐리나 바더딘 (Fazleena Badurdeen) 교수는 순환 경제 프레임워크를 통한 반도체 제조의 지속가능성 촉진에 대해 논의했습니다. 그녀는 6R 접근방식(줄이기, 재사용, 재활용, 회수, 재설계, 재제조)과 수명주기 평가의 사용을 강조했습니다. 자원 추출을 경제 성장에서 분리하고 지속가능성을 추진하기 위해 제품, 공정, 시스템을 통합하는 데 중점을 두었습니다.

마지막으로, 수잔나 캘빈 (Susannah Calvin)은 반도체에 대한 증가하는 수요와 컴퓨팅의 기후에 대한 영향의 축소 필요성을 강조했습니다. 그녀는 특히 하드웨어 제조에서 탄소 중립을 달성하겠다는 애플(Apple)의 약속과 전체 가치 사슬에 걸쳐 탄소 발자국을 최소화하는 것의 중요성을 강조했습니다.

## 세션 #2:

이태우 교수는 신경보철을 위한 유기 신경전자공학(organic nervetronics)에 대한 논문을 발표했습니다. 이 연구의 목표는 원래의 인체 감각기관이나 장기를 모방하는, 단기 가소성이 지배적인 적절한 시냅스 특성을 가진 인공 신경 구성요소를 연구하는 것이었습니다. 그의 팀은 살아있는 동물의 근육과 상호 작용하는 신축성 있는 뉴로모픽 원심 신경을 시연했습니다. 그들은 구성요소에 PEDOT:PSS 하이드로겔 전극을 사용했습니다. 이 인공 시스템은 쥐 뒷다리의 자연스러운 움직임을 성공적으로 재현했습니다.

마이클 J. 세일러 교수는 조직특이적 약물을 뇌로 전달하기 위한 실리콘 기반 나노입자에 대해 논의했습니다. 나노 단계 실리콘은 인체 조직에서 독성이 없는 몇 안 되는 물질 중 하나이며, 결국 생체 내에서 유해하지 않은 다른 폐기물로 분해됩니다. 실리콘 나노포어는 뇌의 표적 부위로 전달될 페이로드를 가지고 보호하는 케이지 역할을 할 수 있습니다. 나노포어는 일반적으로 수용성 환경에서 작동하여 페이로드가 변성되지 않도록 가둬주는데, 이를 통해 나노입자의 외부에 표적 펩타이드나 기타 작용기를 부착하여 선택적 표적화가 가능하게 합니다. 주진명 교수는 혈액-뇌 장벽의 경계면에서의 나노입자에 대한 강연을 진행했습니다. 팀의 연구 목표는 생체에서 영감을 받은 분자 프레임워크를 활용하여 진단 및 치료용 페이로드를 뇌로 전달할 수 있는 표적 약물 전달용 나노입자를 개발하는 것입니다. 이러한 분자들은 세포 환경에서 다른 정상적인 원래의 분자들과 함께 다양한 생물학적 트래픽을 탐색해야 합니다.

메흐디 니카 (Mehdi Nikhah) 교수는 인위적으로 설계된 장기유형 질병의 온어칩

(on-a-chip) 모델을 발표했습니다. 그의 그룹의 연구 목표는 생의학 및 전임상 적용을 위한 장기유형 조직 모델을 개발하는 것입니다. 조직 온어칩(Tissue-on-a-chip) 기술은 동물 모델의 사용을 뛰어넘어 소규모 수준에서 복잡한 인간 질병을 이해할 수 있게 합니다. 이 기술은 약물 개발과 발견을 간소화합니다. 또한 질병에 걸린 세포에 대한 여러 약물과 화합물의 효과를 평가할 수 있게 합니다. 팀이 추구하는 연구 방향은 암의 초기 단계와 전이성 캐스케이드로의 진행에 대한 연구를 용이하도록 설계된 중앙 미세환경 모델과 관련이 있습니다. 이 연구는 또한 심혈관 및 뇌혈관 질환을 연구하기 위한, 혈관화된 인간 줄기세포 기반의 조직 온어칩 모델로 확장되었습니다.

권오석 교수는 인간의 자연 수용체와 신경 전달에 대한 일반적 개념을 설명했습니다. 그의 연구 그룹은 전자공학과 인공 수용체를 결합하여 인체 감각기를 모방하고 감각 신호를 모사할 수 있는 시스템을 만들어, 이를 어떻게 인체 감각기의 감각 기능을 재현하는 데 사용할 수 있는지 연구합니다. 그가 제시한 개념에는 더 일반적인 응용도 있는데, 예를 들어, 후각을 위한 코와 미각을 위한 혀와 같은 인간의 감각기를 모방하는 감각 장치를 설계하는 데 사용될 수 있는 응용 분야도 있습니다.

더글라스 웨버 (Douglas Weber) 교수는 신경학적 기능을 복원하기 위한 뇌의 감지와 자극에 대한 강연을 진행했습니다. 그는 뇌졸중이나 척수 손상 또는 기타 신경 장애로 인해 마비된 사람들의 운동 기능을 복원하거나 개선하기 위한 착용형 및 이식형 신경 인터페이스에 대해 자세히 이야기했습니다. 이 발표의 요점은 신경 센서가 운동 뉴런의 활동을 측정하여 보철 의족과 기타 보조 기술을 직접 제어할 수 있게 한다 것이었습니다.

최영빈 교수는 고정밀 수술 중 뇌 매핑을 위한 뇌피질전도(electrocorticography) 마이크로디스플레이에 대해 강연했습니다. 이 연구는 1024채널 마이크로 뇌피질전도(EECoG) 그리드 뒷면에 2048개의 GaN 마이크로 발광 다이오드가 있는, 두개(頭蓋) 내 뇌전도(EEG) 마이크로디스플레이에 대해 논의했습니다. 이러한 유형의 EEG 마이크로디스플레이는 예를 들어 수술 중 뇌 표면에 공간적으로 대응하는 빛 패턴을 보여줌으로써 피질 활동의 실시간, 고해상도 기록과 표시를 가능하게 합니다. 수술 중 뇌 활동을 보여주는 것은 병리학적 뇌 영역을 기능적 영역과 구분하는 데 도움이 되기 때문에 중요합니다.

사메르 손쿠살레 (Sameer Sonkusale) 교수는 인간의 건강과 웰빙을 위한 지속가능한 현장 진단에 대해 강연했습니다. 발표의 핵심은 현장 모니터링을 위한 센서에 있었습니다. 이러한 센서를 최대한 널리 사용할 수 있도록, 종이, 실, 직물과 같은 저렴하고 널리 사용 가능하며 지속가능한 기판 재료로 만들어져야 한다고 강조했습니다. 이러한 유형의 센서의 예로는, 피로(疲勞)를 모니터링하기 위

해 땀 속의 전해질과 대사산물을 측정하는 스마트 실이 있었습니다. 또 다른 센서 유형으로는 스트레스를 모니터링하기 위해 코티솔 호르몬을 이용한, 치실로 사용되는 실 스트립 형태의 타액 진단용 센서가 논의되었습니다. 그가 논의한 세 번째 센서는 생물학적 유체에서 사이토카인 수준을 측정하여 염증을 모니터링하기 위한 것이었습니다.

이지원 교수는 이미지 센싱 기술과 시각의 과제에 대해 논의했습니다. 가시광선 스펙트럼을 커버하는 기존의 실리콘 이미징 기술을 단파 적외선으로 확장하는 것에 대해 강연했습니다. 그는 단파 적외선 영역이 기존 센서에서는 제공하지 않는 추가적인 정보를 제공할 수 있다고 주장했습니다. 제안된 단파 적외선으로의 확장은 실리콘 픽셀 어레이를 양자점으로 덮어씌워서 적외선을 흡수하도록 합니다. 이렇게 양자점에 의해 생성된 적외선 신호는 일반적인 가시광선 스펙트럼 신호와 함께 처리될 수 있습니다. 적외선에서 얻은 추가 정보는 과학 연구나 의료 진단에 유용하게 사용할 수 있습니다.

조쉬 히하트 (Josh Hihath) 교수의 마지막 강연에서는 생체분자 전자 장치와 센서의 통합이라는 주제에 대해 설명했습니다. 이 발표의 핵심 요점은 생물학적 분자를 일반 전자 장치와 통합하거나 생물학적 분자를 사용하여 기능적 전자 장치를 만드는 것이 가능하다는 것이었습니다. 논의된 예시로는 전계 효과 트랜지스터의 채널 영역을 DNA 분자로 대체하는 것이 있었습니다. 이러한 장치는 무기 물질로 만든 기존의 고전적 전계 효과 장치와는 작동 원리가 다른 진정한 분자 장치입니다. 이러한 종류의 장치는 생물학적 조직과 호환되는 분자 센서를 설계할 수 있는 기회를 제공하며, 동시에 센서가 내장된 환경에 대한 중요한 정보를 처리하는 데 필요한 신호를 제공합니다.

반도체와 센서 기술을 더욱 탐구하기 위해, 우리는 내년에 한국 서울에서 제19차 한·미 나노 포럼을 개최할 예정입니다. 이 포럼의 주제는 두 가지 새로운 트렌드를 포함합니다: 뉴로모픽 및 양자 센서 칩, 그리고 반도체 제조의 지속 가능성 설계입니다. 미국과 한국 모두 반도체 기술을 우선적인 경제 개발 분야로 크게 지원하고 있기 때문에, 제19차 한·미 나노 포럼이 미래 반도체 제조의 새로운 패러다임을 여는 관문이 될 것이라고 확신합니다. 또한 제19차 한·미 나노 포럼을 통해 반도체와 센서 분야의 지속적인 논의를 통해 양국 과학자들 간의 협력을 더욱 촉진하고, 구체적인 협력 주제와 팀을 확인하게 될 것이라고 믿습니다. 지난 10년간, 뉴로모픽 컴퓨팅(13차 및 14차 포럼), IoT를 포함한 나노센서(14차 및 15차 포럼), 나노의학(15차 및 16차 포럼), 반도체 제조의 지속가능성(17차 및 18차 포럼) 등, 동(同) 주제에 대해 해를 이어 논의가 이루어졌으며 큰 성공을 거두었습니다.



다음은 이번 포럼 동안 두 세션에서 제시된 상세한 건의 사항입니다.

## 세션 1: 반도체 제조의 지속가능성

세 가지 중요한 연구 분야가 논의되었습니다.

### 1. 반도체 제조에서의 지속가능성

- 물과 흡착제의 재활용
- 유독 가스와 화학물질 줄이기 (용매와 화학물질, TMAH, PFAS)
- 에너지 소비 줄이기
  - 공급망 전반에 걸친 총 에너지 소비량을 고려해야 함.
  - 에너지 소비 모델링
  - 폐열 회수
  - 더 친환경적인 제조 공정을 고려
- 패키징을 위한 생분해성 재료
- 설계에 의한 지속가능성: 설계 단계에서 대체 재료와 공정을 고려하고, 모델링을 사용하여 마이크로칩에서의 성능 평가

### 2. 전자 폐기물: 회수, 재사용, 재활용

- 재사용, 재활용, 회수를 위한 장비
- 분해, 분류를 위한 자동화 방법
- 전자 폐기물을 위한 새로운 화학적 처리
- 컴퓨팅 모델링(케이던스(Candance), 시놉시스(Synopsis), 지멘스(siemens))
- 희토류 금속을 위한 습식제련 및 건식제련 방법 설계: 새로운 습식 및 건식 추출 방법
- 파쇄, 분류, 화학 합성, 공급 원료
- 순환성과 지속가능성을 위한 설계(분해, 재사용성, 재활용성)
- 정책 수준: OEM의 수리권 → 예비 부품 공급 의무화 → 재사용 제품 시장 (새로운 규정)
- 재활용된 칩의 새로운 목적 고려: 농업

### 3. 마이크로일렉트로닉스의 적층 제조 기회:

- 원료 개발을 위한 나노물질 합성
- 기존 기기/장비/칩/제품에 대한 필요성
- 설계에 의한 품질, 신뢰성
- 3D 프린팅을 통한 새로운 소자 개발 기회

- 소규모 통합 올인원 반도체 제조 시설
- 기존 칩 재사용: 적층 제조를 통한 기존 칩의 재정비, 증강, 용도 변경
- 수요: 주문형 반도체, 다중 재료 프린팅
- 계층적 해상도 (고해상도 및 저해상도 프린팅 방법)
- 점 기반 방식이 아닌 고속 병렬 프린팅 방법

## 세션 2: 인간 인지와 관련된 센서

나노기술 포럼의 두 번째 세션은 인간 인지와 관련된 센서에 대해서 논의했습니다. 넓은 의미에서, 이는 인간의 뉴런과 신경계에 대한 정보를 획득하고 처리하는 센서의 유형입니다. 이들은 두 가지 주요 기능을 수행하기 위한 것입니다. 첫 번째는 시스템의 상태에 대한 정보를 제공하여 오작동이 발생했을 때, 필요하고 가능한 경우, 시정 조치를 취할 수 있도록 하는 것입니다. 이러한 센서의 두 번째 역할은 고장 난 인체 감각기의 기능을 모방하고 인간의 신경 및 신경계와 상호작용할 수 있는 대체 인공 신호를 제공하여, 장애를 겪는 사람이 정상인에 가까운 인지가 여전히 가능하도록 하는 것입니다.

이 세션에서는 이전에 요약된 11개의 강연이 발표되었습니다. 강연 내용은 인간의 뇌나 신경계와 상호 작용하는 감각 시스템에 대한 심도 있는 논의부터, 고장 난 인체 감각기관의 센서를 증강하거나 대체하기 위한 센서, 뇌나 손상된 세포/조직에 조직특이적 약물을 전달하는 나노시스템에 이르기까지 다양했습니다.

### 내년 포럼을 위한 센서 주제에 대한 논의

포럼 둘째 날, 발표자들은 내년 포럼을 위한 잠재적 주제들에 대해 활발하게 논의했습니다. 논의를 통해 도출된 일반적인 합의는 인간 인지를 위한 센서 분야의 연구가 아직 초기 단계라는 것이었습니다. 인간의 건강과 인지를 개선하기 위해서는, 아직 많은 기초 지식이 더 밝혀지고, 실용적이고 유용한 기술로 발전되어야 한다고 토의했습니다. 몇 시간의 토론 끝에, 그룹은 앞으로의 연구를 두 가지 주요 분야로 요약했으며, 몇 가지 하위 분야를 아래와 같이 나열했습니다.

#### 1. 하이브리드 생체전자공학 및 생체광학 센서

- 세포와의 인터페이스를 위해 공학적으로 설계된 생체 재료
- 센서를 위한 저비용, 생체적합성, 생분해성 재료
- 센서의 감도와 해상도 증가
- 양자 센서로의 전환을 통한 감도와 해상도의 개선 및 향상
- 전기적 반응을 넘어선 대안적인 방식

#### 2. 뉴로모픽 인체 센서 온 칩

- 여기서 센서는 청각, 후각, 미각, 촉각, 시각을 위한 인체 감각 기관을 모방하는 장치를 의미하는 것으로 광범위하게 정의됨.
- 잃어버린 인체 감각을 복원하거나 향상시키는 인공 센서
- 인지 시스템을 모니터링하여 인체 감각기의 오작동을 진단하는 데 도움이 되는 다중 모드 센서
- 뇌와 말초 신경의 작동 원리를 모방하는 센서

위에 나열된 두 가지 주요 분야 중, 내년 포럼에서는 두 번째 주제인 뉴로모픽 인체 센서 칩 및 그 하위 분야를 논의 대상으로 고려할 것을 제안합니다.