

2026-GT-DC-059

GT 워싱턴DC 거점

GLOBAL TECH KOREA

Industrial Technology and Market Strategic Analysis Report

미 DOE 주도 차세대 배터리 R&D와
자율주행 실험실(SDL) 구축 동향

요약



➔ 미국의 국책 전략 자산화

- ▶ 미국 연방정부 및 에너지부(DOE)는 코발트 및 니켈 등 핵심 광물의 대외 의존도를 원천 차단하기 위해 대규모 국책 컨소시엄 (예시: LENS, DRX+, EaCAM 등)을 가동하고 있음
- ▶ 또한, 백악관 주도의 제네시스(GENESIS) 임무는 미래 국가 안보 플랫폼 개발에 박차를 가하고 있음

➔ 패러다임의 원천적 전환

- ▶ 글로벌 공급망 불안정성과 친환경 고에너지 밀도 기술 수요가 급증하는 2026년 현재, 에너지 저장장치(배터리) 신소재 R&D는 과거의 ‘에디슨식(Edisonian)’ 수동 “trial-and-error” 방식에서 탈피하여 AI 기반 자동화 플랫폼 (Self-Driving Labs) 중심으로 급격히 재편되고 있음

➔ 통합 인프라의 핵심 가치

- ▶ 자율주행 실험실(SDL)과 고성능 컴퓨팅(HPC)의 융합은 소재 발견 및 검증 타임라인을 크게 단축시켰으며, 이는 단순한 실험 자동화를 넘어 국가 R&D 경쟁력을 결정짓는 핵심 차별화 요소로 자리매김함

➔ 차세대 배터리 개발의 개요 및 중요성

- ▶ 에너지 주권 및 인공지능(AI) 안보의 핵심 하드웨어: 차세대 에너지 저장장치인 배터리 기술은 전기자동차(EV)의 주행거리를 결정짓는 전동화 동력원일 뿐만 아니라, 생성형 AI 인프라의 기하급수적 확대로 촉발된 하이퍼스케일 데이터 센터의 전력 그리드(Grid) 안정을 보장하는 최후의 물리적 방어선이자 국가 AI 안보의 핵심 하드웨어임
- ▶ AI 데이터 센터 전력 붕괴(Blackout)의 필수 완충재: 2026년 현재 초거대 AI 모델의 고성능 연산 및 대규모 데이터 처리를 위해 구동되는 인공지능 데이터 센터는 전력 피크 타임의 부하를 분산 (Peak Shaving)하여 AI 인프라에 24시간 무정전 전력 공급을 가능케 하는 대용량 BESS(Battery Energy Storage System) 원천 기술 개발의 중요성이 전례 없이 강조됨
- ▶ 온디바이스 AI 구동을 위한 초고밀도 에너지 원천: 초소형 가전부터 스마트폰, 첨단 인간형 로봇 (Humanoid)에 이르기까지 AI 엣지 연산 알고리즘이 내장됨에 따라, 하드웨어 단에서 순간적으로 발생하는 초고전력 소비(Peak Power Demand)를 안정적으로 감당할 수 있는 차세대 양·음극재 및 전해질 개발의 혁신이 강력히 요구됨
- ▶ 지능형 통합 전력 제어 시스템으로의 진화: 특히 데이터 센터의 열관리 및 공간 최적화를 위해 배터리 자체의 부피당 에너지 밀도를 극대화하는 동시에, 화재 위험성을 원천 배제하는 고체 전해질 및 인공지능 지능형 전력 제어(Intelligent BMS) 기술의 융합이 미래 첨단 산업의 필수 불가결한 생존 요소로 부각됨

➔ 차세대 배터리 시스템의 대표적 기술 예시

- ▶ 기존 리튬 이온의 기술적 한계를 초월하고 글로벌 시장 패권을 선점하기 위해 미국 국책 과제 및 핵심 연구단이 집중 투입된 대표적인 하드웨어 패러다임은 다음과 같음
 - DRX 배터리 (Disordered Rock-Salt Battery / 무질서 암염 구조 배터리): 기존 리튬 이온의 2차원 이동 통로를 확보하기 위해 필수적이었던 코발트나 니켈을 배제하고, 무작위 격자 구조 내에서 리튬이 3차원 0-TM(zero-transition-metal) 퍼콜레이션 경로를 통해 자유롭게 확산할 수 있는 소재임. 공급망 취약성이 높은 니켈과 코발트를 완전히 제거하는 대신 매장량이 풍부한 망간, 티타늄 등을 주원료로 사용할 수 있어 미국 에너지부(DOE)가 핵심 차세대 패러다임으로 집중 육성 중임
 - LMRO 배터리 (Lithium-Rich Manganese-Rich Oxide Battery / 리튬·망간 과량 산화물 배터리): 양극재 내부의 일반적인 전이금속 산화·환원 뿐만 아니라 고전압 환경에서 산소 음이온 레독스 활성화를 동시에 유도하여 가용한 중량당 용량과 에너지 밀도를 극단적으로 끌어올리는

기술임. 고가 원소를 차단하고 지구에 풍부한 망간을 극대화할 수 있으나, 가혹 사이클 조건 하에서의 비가역적 전압 강하 및 상전이 메커니즘 제어가 핵심 과제임

-**나트륨 이온 배터리 (Sodium-Ion Battery)**: 공급망 리스크가 높은 리튬 대신 지구상에 풍부한 소금의 주성분인 나트륨을 저장 이온으로 채택하는 기술임. 이온 반경이 커서 전극소재의 격자 팽창 제어가 요구되나, 원소 자체의 저렴한 단가 덕분에 제조 원가 하한선을 획기적으로 낮추고 국가별 자원 블록화 리스크에 대응할 수 있는 대안 플랫폼임

-**전고체 배터리 (All-Solid-State Battery)**: 이온 전도성을 가진 액체 전해질을 고체(황화물계, 산화물계, 폴리머 등)로 전면 대체하여 화재 및 폭발 위험성을 원천 배제하는 기술임. 고전압 안정성을 바탕으로 실리콘 혹은 리튬 메탈 음극과 매칭하여 부피당 에너지 밀도를 극대화할 수 있어 EV 및 고성능 AI 디바이스의 최우선 주류 후보로 꼽힘

-**수계 배터리 (Aqueous Battery)**: 가연성 유기용매 대신 물을 전해질의 주성분으로 사용하여 절대적인 화재 안전성을 확보하는 기술임. 물의 좁은 전압 분해 한계를 고농도 염 배합 기술로 확장하여 아연 및 망간 산화물과 연계 구동하며, 하이퍼스케일 데이터 센터 및 신재생에너지 그리드 연계형 초저가 대용량 에너지 저장장치(ESS)에 특화됨

-**리튬-황 배터리 (Lithium-Sulfur Battery)**: 양극재로 무겁고 비싼 전이금속 대신 가볍고 저렴한 황을, 음극재로 리튬 메탈을 사용하는 기술임. 이론적으로 기존 리튬 이온 배터리 대비 2~5배에 달하는 높은 중량당 에너지 밀도를 구현할 수 있어, 무게 민감도가 극도로 높은 도심항공교통(UAM), 드론 및 항공우주(Aerospace) 하드웨어의 차세대 동력원으로 집중 연구됨

-**레독스 흐름 배터리 (Redox Flow Battery)**: 전용 탱크에 저장된 액체 전해질(바나듐 등)의 화학적 산화·환원 반응을 통해 외부 스택에서 전기를 충·방전하는 시스템임. 전력 용량(탱크 크기)과 출력(스택 크기)을 완전히 독립적으로 설계할 수 있어 화재 위험이 없고 수명이 수십 년에 달하며, 대규모 장기 stationary 전력망 저장 인프라의 중추 역할을 담당함

➡ 가혹 환경 및 물리적 한계 요인

- ▶ 격렬한 체적 변화 및 구조적 분쇄 (Volume Expansion & Pulverization): 리튬 대안 소재인 나트륨 이온은 기존 리튬 대비 이온 반경이 약 34% 더 크기 때문에, 충·방전 시 호스트 격자 내부에서 상당한 수준의 격렬한 부피 변화를 유발하여 구조적 붕괴를 초래함. 이론 용량이 ~4,000 mAh/g에 달하는 실리콘 음극의 경우, 리튬 흡수 시 무려 300%에 달하는 극단적인 체적 팽창을 유발하여 전극 네트워크를 기계적으로 분쇄시키고 전기적 단락을 유발함
- ▶ 매퍼 인터페이스의 기계적 균열 (Mechano-Chemical Failure): 전고체 배터리에 사용되는 세라믹 이온 전도체는 충·방전 시 발생하는 높은 가혹 물리적 압력 하에서 미세한 구조적 스트레스 균열이 발생함. 이 균열 변형 자리를 따라 금속 덴드라이트(Dendrite)가 성장하여 치명적인 내부 단락을 유발함
- ▶ 용매 분해 및 가스 방출 (Gas Evolution): 고전압 환경(>4.5V)에서 작동하는 고용량 양극재의 경우 전해액과의 부반응으로 인해 산소 가스나 이산화탄소가 방출되어 배터리 내부가 부풀어 오르는 스웰링(Swelling) 현상이 심화됨

➡ 기존 에디슨식(Edisonian) 병목 현상과 패러다임 전환의 필요성

- ▶ 순차적 선형 검증의 한계: 기존의 소재 발견 방식은 인간 연구원의 직관에 의존하여 배합을 결정하고, 수동으로 소재 합성을 최적화하고, 합성된 소재의 믹싱, 코팅, 셀 조립을 거쳐 수 개월간의 총·방전 테스트를 거치는 선형적 구조를 가짐
- ▶ 기존의 선형 검증 방식은 새로운 소재의 발견, 합성, 특성 파악 및 최적화에 짧게는 수개월에서 길게는 10년 이상의 시간이 걸림
- ▶ 무한한 화학적 경우의 수(Combinatorial Explosion): 양극재 개발을 예로 들면, 양극재 전이금속 조합, 표면 코팅, 도핑, 입자 조절, 전극 조성 등을 모두 최적화 시 발생하는 경우의 수는 수십만 개를 상회함. 이를 인간이 '하나씩 바꾸는' 방식으로 전수 조사할 경우, 최종 상용화까지 평균 10~20년의 장기 타임라인이 소요됨
- ▶ 데이터 고립(Islands of Data): 기존 연구 환경에서는 실험의 실패 데이터(Negative Results)가 공유되지 않고, 개별 연구원의 노트나 기기 내에 고립되어, 무의미한 중복 실험이 반복되는 병목 현상이 지속되어 옴

➔ 미국 배터리 정책 과제 개요 및 추진 체계

- ▶ 국가 전략 자산화: 미국 연방정부 및 에너지부(DOE)는 첨단 배터리 기술을 단순한 산업 부품이 아닌 국가 안보 및 경제적 주권을 좌우하는 전략 자산으로 통합 관리함
- ▶ 다기관 연합의 거대 생태계: 개별 대학이나 단일 기업 중심의 파편화된 자금 지원을 전면 지양하고, 국립연구소를 허브로 삼아 학계와 민간 제조사가 긴밀히 결합된 대규모 정책 컨소시엄(Consortia) 중심의 추진 체계를 확립함

➔ 핵심 국가 연구 컨소시엄별 세부 프로파일링

- ▶ LENS 컨소시엄 (Low-cost Earth-abundant Na-ion Storage)
 - 주관 기관 및 인프라: 아르곤 국립연구소(ANL) 주도하에 6개 국립연구소 및 8개 대학 등 총 14개 파트너 기관 연합. 5년간 5,000만 달러 규모의 연방 예산 투입
 - 참여 기관 리스트: Argonne National Laboratory, Brookhaven National Laboratory, Lawrence Berkeley National Laboratory, Pacific Northwest National Laboratory, Sandia National Laboratory, SLAC National Accelerator Laboratory, Florida State University, University of California San Diego, University of Houston, University of Illinois Chicago, University of Maryland, University of Rhode Island, University of Wisconsin-Madison, Virginia Tech
 - 주요 전략 및 핵심 소재: 대외 의존도가 높은 리튬을 전면 배제하고, 지구상에 풍부한 나트륨 기반의 고에너지 밀도 양·음극재 및 최적화된 비수계 에스테르/에테르 전해질 시스템을 개발함
 - 특징 및 해결 과제: 코발트·니켈 프리 층상계/폴리아이온 양극 설계. 하드 카본 음극의 초기 쿨롱 효율을 극대화하고 최종적으로 2-Ah 스케일의 파우치 셀 제조 공정까지 직접 검증하는 엔드-투-엔드 시스템을 지향함

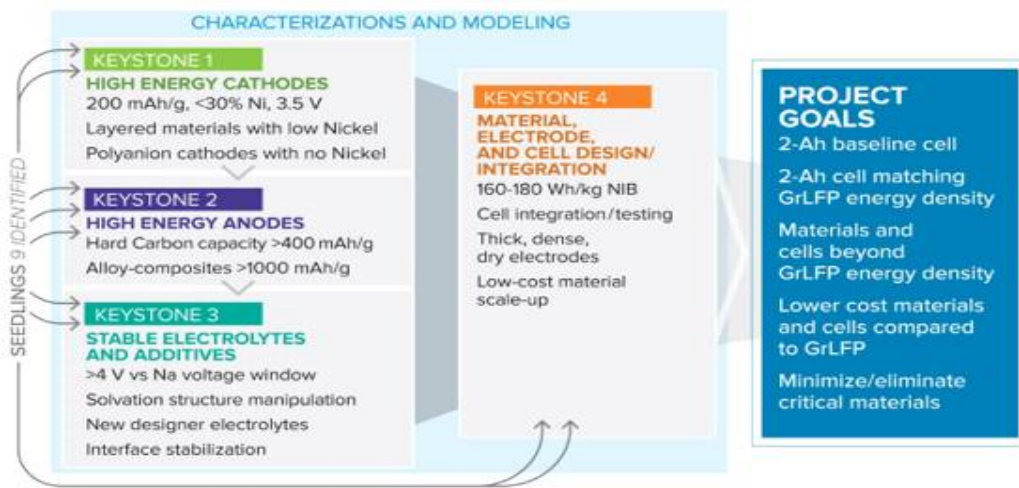


그림 1 LENS 컨소시엄의 연구개발 목표 및 전략 모식도 (<https://www.anl.gov/lens/research-and-programs>)

➡ DRX+ 컨소시엄 (Disordered Rock-Salt)

- ▶ 주관 기관 및 인프라: 로렌스 버클리 국립연구소(LBNL) 주도, Gerbrand Ceder 및 Guoying Chen 등 세계 최고 수준의 배터리 석학 전격 참여
- ▶ 참여 기관 리스트: Lawrence Berkeley National Laboratory, Oak Ridge National Laboratory, Argonne National Laboratory
- ▶ 주요 전략 및 핵심 소재: 기존 리튬 이온의 2차원 이동 통로를 확보하기 위해 필수적이었던 코발트 전이금속을 없애고, 가격이 저렴하고 지구상에 풍부한 망간을 기반으로한 무질서 암염 구조(DRX) 소재 개발
- ▶ 특징 및 해결 과제: 공급망 취약 소재인 니켈과 코발트를 100% 배제하는 대신, 매장량이 풍부한 망간과 티타늄을 주원료로 채택함. 초기 고전압 사이클 시 발생하는 산소 가스 방출 및 높은 초기 오버포텐셜 문제를 제어함. 또한, 물질의 낮은 전기전도도로 인해 다량으로 들어가는 탄소 첨가의 양을 줄일 수 있는 전극 제조 기술을 개발함

➡ EaCAM 컨소시엄 (Earth-abundant Cathode Active Materials)

- ▶ 주관 기관 및 인프라: 아르곤 국립연구소(ANL) 주관, Jason Croy 디렉터 중심의 고에너지 밀도 양극소재 개발 컨소시엄
- ▶ 주요 전략 및 핵심 소재: 리튬-망간 리치 층상계 소재의 레거시를 이어받아, 고전압 작동 환경에서 구조적 변형을 원천 차단하는 리튬 과량 스피넬 아키텍처 고도화
- ▶ 특징 및 해결 과제: 고전압 충전 시 발생하는 고질적인 비가역적 전압 강하 및 결함 확산을 억제함. 망간 원자의 전해액 용출을 차단하여, 단가를 기존 니켈 리치 대비 \$80/kWh 수준으로 낮추면서도 동등 이상의 고에너지 밀도를 구현하는 데 초점을 맞춤

➔ ESRA 허브 (Energy Storage Research Alliance)

- ▶ 주관 기관 및 인프라: DOE Office of Science가 지정한 최상위 에너지 혁신 허브 중 하나로 아르곤, 버클리, PNNL 국립연구소가 삼각 축을 형성. Shirley Meng이 디렉터 총괄
- ▶ 참여 기관 리스트: Argonne National Laboratory, Lawrence Berkeley National Laboratory, Pacific Northwest National Laboratory, Columbia University, Duke University, Massachusetts Institute of Technology, Princeton University, University of California San Diego, The University of Chicago, University of Houston, University of Illinois Chicago, University of Illinois Urbana-Champaign, University of Michigan, Xavier University of Louisiana
- ▶ 추진 체계 및 매트릭스 아키텍처: 특정 배터리 셀의 점진적 개량을 넘어, 혁신적인 소재 발견 가속화를 위해 3대 과학 추동축(Scientific Thrusts, ST)과 이를 지원하는 크로스컷(Crosscutting Endeavors) 매트릭스 아키텍처를 가동함

◆ 3대 과학 추동축 (Scientific Thrusts):

- ST 1: 용매화 아키텍처 (Solvation Architecture)
 - 핵심 목적: 나노 가둠(Nano-confinement) 상태에서 발생하는 이온 수송, 이온 선택성 및 계면 화학의 특이 물성을 규명하기 위해 '탈용매화(Desolvated) 전해질'의 미지 상태를 개척
 - 5개년 목표: 용매화 구조의 정밀 제어를 통해 계면 반응성, 이온 선택도 및 방향성 수송 (Directional Transport)에 대한 분자 수준의 제어력 확보.
- ST 2: 소프트 매터 오믹스 구현 (Enabling Soft Matter Omics)
 - 핵심 목적: 유기 고분자 전극 소재의 지식 공백을 해소하고, 거대 시공간 스케일에서 발생하는 소프트 이온 전도체의 동적 거동, Electro-chemo-mechanical 현상 및 이종 계면의 신규 메커니즘 규명
 - 5개년 목표: 복잡한 전기화학 셀 내에서 멀티전자 레독스 역량 및 초이온 전도(Superionic Transport) 특성을 발현하는 기능성 유기 분자 구조의 동적 메커니즘을 정량화.
- ST 3: 이온 안무 제어 (Ion Choreography)
 - 핵심 목적: 기존의 단일 이온 이동(Single-ion motion) 및 제한적인 고체 프레임워크 섭동 (Perturbation) 모델을 초월하여, 구동 이온(Working ion), 대위 이온(Counter ion), 그리고 고체 격자(Framework ion) 간의 '정밀하게 조직된 상호작용(Choreographed Interactions)'을 이해하고 유도
 - 5개년 목표: 전하 운반체들의 협동적 이동(Cooperative Movements)을 통해 bulk 및 계면에서의 목표 이온 수송을 비약적으로 촉진하는 동시에 원치 않는 부반응을 억제

◆ 핵심 크로스컷 (Crosscutting Endeavors):

- 크로스컷 1: 소재 가속화 플랫폼 (Materials Acceleration Platform, MAP)
 - 최첨단 인공지능(AI)과 로봇 기반의 자동화 합성 및 고속 특성 분석 인프라를 활용하여 신소재 발견 사이클을 혁신적으로 압축
- 크로스컷 2: 상관성 특성 분석 (Correlative Characterization)
 - 핵아르곤 연구소의 APS(Advanced Photon Source) 및 버클리 연구소의 ALS(Advanced Light Source) 차세대 가속기 업그레이드 인프라를 활용. 이를 통해 이온과 물질 간의 동적 충돌 및 상호작용을 전례 없는 시공간 해상도로 실시간 관측

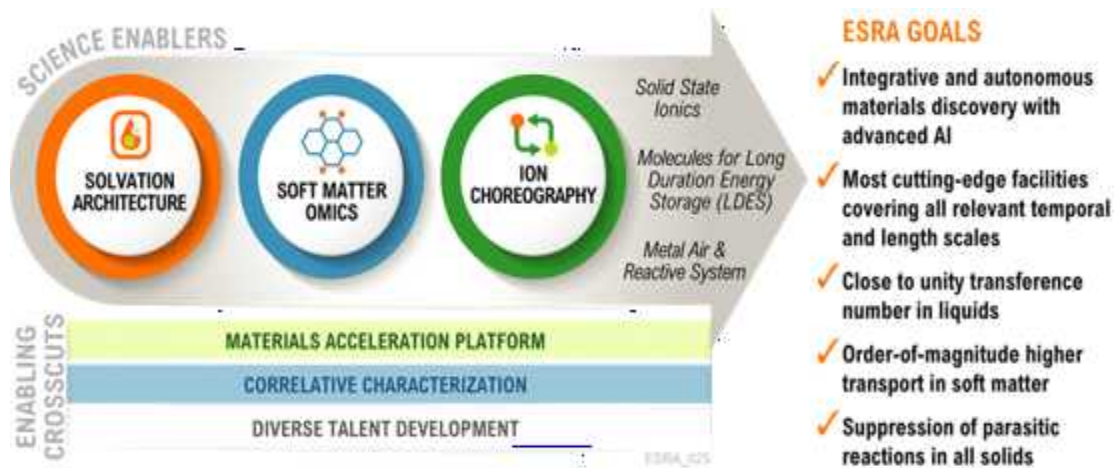


그림 2 ESRA Hub의 연구개발 목표 및 전략 모식도 (<https://energystoragera.org/research/>)

➡ ABC 허브 (Aqueous Battery Consortium)

- 주관 기관 및 인프라: 미국 에너지부(DOE) Office of Science 산하 최상위 에너지 혁신 허브 중 하나임. 스탠퍼드 대학교(Stanford University)를 주관 본부 허브로 삼고 SLAC 국립 가속기 연구소(SLAC National Accelerator Laboratory)가 공동 운영 체제를 구축함. 미국 및 캐나다 전역의 15개 최상위 연구 기관, 31명의 배터리 석학, 엔지니어 및 물리학자가 유기적으로 결합된 메가 공조 연합체임. 디렉터는 글로벌 배터리 및 나노 재료 분야의 권위자인 Yi Cui 교수가 총괄 지휘함
- 참여 기관 리스트: Stanford University, SLAC National Accelerator Laboratory, Army Research Laboratory, California State University, Long Beach, FAMU-FSU College of Engineering, North Carolina State University, Oregon State University, San José State University, U.S. Naval Research Laboratory, University of California, Los Angeles, University of California, San Diego, University of California, Santa Barbara, University of Maryland, The University of Texas at Austin, University of Waterloo

▶ 추진 체계 및 매트릭스 아키텍처: 생성형 AI 데이터 센터의 급격한 전력 과부하 차단 및 친환경 그리드 자급화를 위해 6대 과학 목표(Scientific Aims, Aim 1~6)와 이를 전면 스크리닝 및 지원하는 3대 크로스컷 테마(Crosscutting Themes, Crosscut 1~3)의 입체적 매트릭스 협력 체계를 가동함

◆ 6대 과학 목표 (Scientific Aims):

- Aim 1: 전해질 핵심 목적: 수계 전해질의 전압 안정성 창(Voltage Stability Window)을 열역학적 수소/산소 분해 한계치 이상으로 전격 확장하는 원천 기술 확보
- Aim 2: 음극 핵심 목적: 철, 아연, 망간 등 지구에 풍부한 저가 금속 음극 표면에서 일어나는 가역적 전착 및 탈리 메커니즘 규명
- Aim 3: 양극 핵심 목적: 수계 배터리 가동 시 양극 활물질 내부에서 유도되는 양성자 결합 공정의 근본적인 수송 메커니즘 확립
- Aim 4: 계면 핵심 목적: 통전 구동 상태 하의 고체-액체 인터페이스의 국소적 구조 및 화학 조성을 나노스케일로 규명
- Aim 5: 부식 핵심 목적: 수계 전해질 상시 노출 환경에서 유발되는 전극 물질 및 집전체의 부식 열화 메커니즘 제어
- Aim 6: 아키텍처 핵심 목적: 핵 생성 및 모폴로지 배향성을 구조적으로 제어할 수 있는 고성능 3차원 전극 아키텍처 설계

◆ 핵심 크로스컷 (Crosscutting Themes):

- 크로스컷 1: 소재 디자인 및 합성: 수계 배터리 구동계 내에 매립되는 기판(Substrates), 스캐폴드(Scaffolds), 표면 코팅층 및 고안정성 전해질 구조를 원자 수준에서 제어하여 전착 금속 및 산화물 상의 열역학적 정밀 합성 공정 개발
- 크로스컷 2: 이론 및 시뮬레이션: 전해질 벌크 상의 솔베이션 구조 모델링부터 전기화학 계면 및 이종 인터페이스, 전극의 기하학적 결정 성장 패턴 및 최종 거시적 배터리 셀 성능 예측에 이르기까지 발생하는 고차원 전기화학 공정의 제일원리 계산 및 전산 해석 모형 확립
- 크로스컷 3: 특성 분석 기술: 방대한 시공간 스케일을 관통하며 수계 배터리 구동 중 발생하는 이온 이동, 전기화학적 부반응 및 가스 발생 메커니즘을 실시간 분석 기법을 통해 종합적·입체적으로 추적 및 정량화

➡ MUSIC EFRC (Mechano-Chemical Understanding of Solid Ion Conductors)

- ▶ 주관 기관 및 인프라: 미국 에너지부(DOE) Basic Energy Sciences (BES) 산하 제6세대 에너지 프론티어 연구센터(EFRC) 중 하나임. 미시간 대학교 앤아버 (University of Michigan at Ann Arbor)를 주관 본부 허브로 가동함. 퍼듀, MIT, UIUC, UT 오스틴, 조지아 텍, 프린스턴, 노스웨스턴 대학교 및 오크리지 국립연구소(ORNL)를 포함한 총 10개 최상위 연구기관, 16명의 핵심 연구책임자 (PI), 35명 이상의 신진 연구원(Early Career Researchers)이 유기적으로 결합된 매가 연합체임. 총 1,032만 달러 규모의 연방 국책 연구 예산이 직접 투입되며, Jeff Sakamoto 교수가 총괄 디렉터를, Neil Dasgupta 교수가 부디렉터를 맡아 지휘함
- ▶ 참여 기관 리스트: University of Michigan, Purdue University, University of California Santa Barbara, Massachusetts Institute of Technology, University of Illinois Urbana-Champaign, The University of Texas at Austin, Georgia Tech, Princeton University, Northwestern University, Oak Ridge National Laboratory
- ▶ 추진 체계 및 매트릭스 아키텍처: 청정에너지 시스템용 세라믹 이온 전도체의 프로세싱 및 전기화학적 동역학 기저에 존재하는 복잡한 화학-기계적 융합 현상을 규명하고 제어하기 위해 3대 핵심 연구 추동축(Research Thrusts 1~3)과 이를 관통하는 융합 이론 및 초정밀 분석 크로스컷 테마를 가동함

◆ 3대 핵심 연구 추동축

- Thrust 1: 세라믹 이온 전도체 계면 및 상간 영역에서의 전기화학-기계적 결합 규명
핵심 목적: 매립된 세라믹 이온 전도체 계면 내부에서 발생하는 응력 응집, 물질 수송 kinetics 및 전기화학 반응 속도론 간의 다차원적 상호작용을 물리적으로 명확히 규명
- Thrust 2: 세라믹 이온 전도체 기반 전기화학 시스템의 재료 열화 경로 규명
핵심 목적: 고체 전해질 기반 전기화학 소자 구동 시 발생하는 결함 및 파손의 근본 원인을 원자 수준에서부터 메조스케일 영역에 이르기까지 추적 분석.
- Thrust 3: 세라믹 이온 전도체의 합성, 공정 및 제조 과학
핵심 목적: 미가공 화학 가루 분말 상태에서부터 소결 및 성형을 거쳐 최종 배터리 부품 및 컴포넌트 구조체로 변환되는 전 제조 공정의 화학적 물리적 경로를 규명

◆ **크로스컷 테마 (Cross-Cutting Themes):**

- 이론 전산 및 기계학습 계산: Donald Siegel (UT 오스틴) 교수 주도하에, 세라믹 이온 전도체 분자 간 결합 고유의 mechano-chemical 섭동 특성을 제일원리 및 분자역학으로 해석하여 스트레스와 변형률이 격자 내 이온 수송에 미치는 영향력을 예측
- 원자 스케일 특성 분석: Miaofang Chi (오크리지 국립연구소) 박사 주도하에 초정밀 TEM 및 고해상도 Micro-CT 기술을 결합, 복합 고체 전해질 분말 입자가 치밀화 전착되는 과정과 계면 파손 거동을 나노미터 시공간 스케일로 정밀 시각화 피드백 처리.
- 유체 및 흐름 셀 시스템으로의 도메인 확장: 전고체 배터리를 넘어 수송 현상이 엄격하게 제한되는 유체 및 흐름 셀 시스템 아키텍처로 연구 도메인을 확장하여 고체 막의 화학적 지속성을 동시 스크리닝



그림 3 MUSIC EFRC의 연구개발 모식도 (<https://musicefrc.engin.umich.edu/>)

[표 1 미국 배터리 컨소시엄 국책 과제의 주요 테마]

국책 컨소시엄	주관기관	지원기관	주요테마
LENS 컨소시엄	아르곤 연구소	DOE/CMEI	나트륨 전지
DRX 컨소시엄	버클리 연구소	DOE/CMEI	무질서 암염 구조
EaCAM 컨소시엄	아르곤 연구소	DOE/CMEI	리튬-망간 리치 층상
ESRA Hub	아르곤 연구소	DOE/BES	전고체/메탈-에어/유기물 전지
ABC Hub	스탠포드 대학	DOE/BES	수계 전지
MUSIC EFRC	미시간 대학	DOE/BES	전고체 전지

* CMEI: 중요 광물 및 에너지 혁신 사무국 (Office of Critical Minerals and Energy Innovation)

* BES: 기초 에너지 과학 (Basic Energy Sciences)

➔ 페루프 능동 학습 (Closed-Loop Active Learning) 알고리즘 메커니즘 및 미래 연구의 혁신성

- ▶ **인간 개입의 제로화 (Zero-Human Intervention):** 자율주행 실험실 (Self-Driving Labs, SDL)의 핵심은 인공지능이 자율적으로 차세대 가설을 수립하여 실험 계획을 설계하고, 이를 연동된 하드웨어 로봇 시스템이 물리적 합성 및 전착을 수행하며, 축적된 데이터가 인간의 개입 없이 AI의 하이퍼파라미터를 실시간 업데이트하는 완전한 '페루프(Closed-Loop)' 구조의 확립에 있음
- ▶ **Dynamic Exploration & Exploitation Balancing:** AI 핵심 엔진은 현재까지 확보된 고충실도 데이터 영역 중 성능이 기 검증된 안정적 조성 주변을 미세 조정하여 수율을 쥐어짜내는 개발(Exploitation) 연산과, 데이터 분산(Uncertainty) 및 인공지능 모델의 예측 오차가 가장 커서 미지의 영역으로 남아있는 공백 공간을 과감히 찢어보는 탐색(Exploration) 연산을 수학적 획득 함수를 통해 실시간 최적 제어함
- ▶ **미래 과학 기술 연구에서 AI와 자동화가 핵심 필수 자산인 이유:** 2026년 현재 글로벌 기술 패권 경쟁 구도 하에서 AI와 자동화의 결합은 단순한 '실험실 수동 노동의 기계화'를 넘어, 국가 제조업 및 에너지 안보의 성패를 좌우하는 파괴적 혁신 요소로 작동하며 다음과 같은 원천적 가치를 창출함
 - 인간 인지 능력의 물리적 한계 및 조합 폭발(Combinatorial Explosion)의 원천적 극복: 차세대 양극재(DRX, LMRO) 및 고체 전해질 인터페이스 최적화와 같이 변수가 수십 가지에 달하는 복합계는 탐색 공간의 크기가 수십만~수백만 개로 확장함
 - 이는 인간 연구원의 직관, 경험, 그리고 육체적 노동력만으로는 전수 조사가 물리적으로 불가능한 영역임. AI의 초고속 다차원 확률 연산과 로봇의 24시간 무인 가동 성능이 결합되어야만 이 거대한 화학적 경우의 수를 논리적으로 돌파할 수 있음
 - 타임라인의 파괴적 압축을 통한 초격차 신시장 선점(Time-to-Market 혁신): 하이퍼스케일 AI 데이터 센터의 급격한 전력 확충 및 탄소중립 공급망 블록화에 대응하기 위해서는 신소재 발굴 속도가 시장의 요구 조건과 동기화되어야 함
 - 기존의 수동 Edisonian 방식이 가진 10~20년의 장기 개발 주기는 미래 청정 하드웨어 산업에서 도태를 의미함. AI 자율 주행 실험실은 수십 년의 선형 검증 과정을 단 며칠에서 몇주의 병렬·능동적 연산 스케일로 압축 시현함으로써, 국가 간 기술 격차를 복리 형태로 벌리는 초격차 창출의 유일한 경로임
 - 실패 데이터(Negative Results)의 자산화: 기존 인간 중심의 연구 환경에서는 '실패한 실험 레시피'가 논문이나 보고서에 기록되지 않고 사장되어 무의미한 중복 실험이 반복되는 고질적 병목을 겪어옴
 - 반면, 자동화 시스템은 로봇의 미세 진동, 주변 대기 습도, 실패한 전해질 배합 결과 등 모든 하위 메타데이터를 규격 프로토콜로 누락 없이 정밀 맵핑함. 이 축적된 데이터셋은 국가 독자적 과학 파운데이션 모델을 고도화하는 핵심 인프라 연료이자, 대외 유출이 불가능한 국가 고유의 전략적 지식 자산으로 기능함

➡ 주요 국립연구소별 자율주행 실험실 인프라 구축 현황

▶ 로렌스 버클리 국립연구소 (LBNL)

-FORUM-AI (Foundation Models Orchestrating Reasoning Agents to Uncover Materials Advances and Insights) 플랫폼: 가설 수립부터 시뮬레이션, 로봇 실험, 고충실도 데이터 분석에 이르는 연구 전 주기를 자율 통제하는 최초의 엔드-투-엔드 풀스택 시스템. 화학 구조 및 제조 프로토콜을 설계하는 생성형 AI, 사유 프로세스를 활성화하여 물리·화학적 난제를 스스로 추론하고 원시 데이터를 자율 해석하는 추론 모델, 과학자를 대리하여 가상 연산을 호출하고 A-Lab 등 실제 실험실 로봇 제어 언어(ROS Script)와 액추에이터 액션을 직접 집행하는 에이전트형 모델의 동적 통합을 통해 소재 과학 고유의 복잡성과 불확실성을 완전 제어함

-A-Lab 시스템: AI의 처방전을 입력받아 작동하는 물리 로봇 실험실. 고체 분말 자동 분주 로봇, 고온 가열 챔버 가마, 위상 동정을 위한 자동 회절(XRD) 측정 스테이션이 일체화되어 인간 연구원의 손길 없이 신소재 합성을 연속 수행함

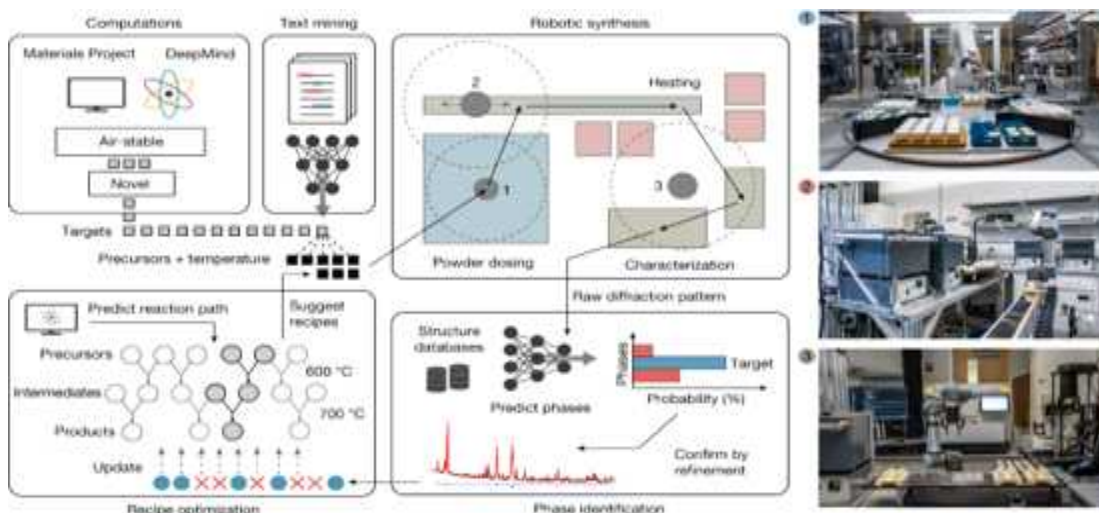


그림 4 버클리 연구소의 A-Lab 연구 플로우 및 모식도 (Nature 624, 86-91 (2023))

▶ 아르곤 국립연구소 (ANL)

-Polybot: 첨단 유기 전자 고분자(전도성 고분자, 신축성 헬스케어 소자 등) 연구에 특화된 무인 실험실 인프라로, 인공지능과 고성능 컴퓨팅(HPC)을 융합해 소재의 화학적 합성, 박막 가공, 특성 분석 및 데이터 해석 전 주기를 인간의 개입 없이 자율 가동함

-Chemspeed 합성 로봇, 블레이드 코팅 및 열처리 유닛, 다채널 전기화학·전기적·기계적 분석 장비가 독립된 모듈로 구성되어 있으며, 자율 주행 바퀴형 로봇과 다축 로봇팔이 결합된 이동형 로봇이 모듈 간 샘플 이송을 스스로 수행하며 완전한 물리적 폐루프(Closed-Loop)를 형성함



그림 5 버클리 연구소의 A-Lab 연구 플로우 및 모식도 (Nature 624, 86-91 (2023))

▶ 태평양 연안 북서부 국립연구소 (PNNL)

- MIRAL 자율주행 실험실 운영: 인공지능(AI)과 실험실 자동화를 결합한 MIRAL (Material Innovation through Robotics & AI Laboratory) 플랫폼을 가동함. 두 개의 AI 유도형 고처리량 자동화 장비를 기반으로 수계 및 비수계 전해질 연구를 무인화하여, 과거 수개월이 걸리던 합성, 스크리닝, 특성 분석, 배터리 최적화 작업을 단 하루 만에 수행 가능해짐
- 머신러닝 알고리즘과 첨단 소프트웨어 제어를 통해 하루에 수백 번의 실험을 자율적으로 집행함. 이를 통해 물리학 기반(Physics-informed) 데이터셋을 구축하여 실험 설계를 지속적으로 개선하고 오차를 줄임
- 복잡한 화학적 물성 데이터를 체계적으로 관리·예측하는 지능형 데이터베이스를 활용함. 수천 개의 실험용 유기 분자와 레독스 흐름 배터리, 리튬 이온, 나트륨 이온용 액체 전해질의 화학 구조, 용해도, 전기전도도 및 최종 배터리 셀 성능을 분석하고 자율 예측함

▶ 오크리지 국립연구소 (ORNL)

- INTERSECT 이니셔티브 (Interconnected Science Ecosystem): INTERSECT 이니셔티브는 분산 되어 있던 첨단 실험 분석 장비, 자율주행 모바일 로봇실험실, 엣지 컴퓨팅 디바이스, 그리고 오크리지의 세계 최고 수준 엑사스케일 슈퍼컴퓨터(Frontier) 및 파쇄 중성자원(SNS) 자원을 단일 하드웨어·소프트웨어 연합 플랫폼으로 유기적 직결하는 범연방 '스마트 미래 실험실' 프레임워크임
- One-ORNL 계산 인프라 기반의 3대 핵심 지향점 (Core Enablers): 다양한 과학 도메인과 시설 간의 장벽을 허물고 확장 가능한 공통의 보안 계산 인프라(One-ORNL Computational Infrastructure)를 제공함으로써 다음 세 가지 핵심 역량을 무인 구현함:
 - o 첨단 컴퓨팅·장비 연동형 자율주행 실험: 고성능 연산 시스템과 최첨단 과학 장비, 특수 연구 시설을 엣지 신경망으로 직결하여 가설 수립부터 물리적 집행까지 인간 개입 없이 자율 구동함
 - o 다중 도메인 및 다중 모달 실험: 기존의 단일 분석 단계를 넘어 다양한 연구 도구와 도메인을 복합 결합함으로써, 데이터의 시공간적 시너지와 차세대 과학 접근 패러다임 전환을 유도함
 - o AI/ML 및 엣지 기반 실시간 피드백 최적화: 구동 중인 실험 장비 말단에서 데이터 생성과 동시에 실시간 분석 및 파라미터 보정 피드백을 가동하여 실험의 정확도와 수율을 극대화함

- ▶ 국가 최고 과학 디렉티브 발령: 2025년 11월 24일 백악관 대통령 행정명령을 통해 공식 발령된 국가 인공지능 기반 과학 혁신 가속화 계획. 미국 에너지부(DOE)가 중앙 컨트롤 타워를 맡아 범국가적 역량을 결집함
- ▶ American Science and Security Platform: 맨해튼 프로젝트의 긴급성과 아폴로 계획의 스케일을 벤치마킹하여, 전국의 연방 국가 실험실 인프라와 고성능 연산 자산, 그리고 지난 수십 년간 축적된 연방 정부의 미공개 연구 데이터를 인공지능 학습용 데이터셋으로 강제 통합하는 클라우드 인프라임
- ▶ 이를 통해 국가가 직접 통제하는 보안형 과학 전용 파운데이션 모델을 구축하여 미국의 전반적인 과학·공학 생산성을 향상시키고 차세대 핵심 기술을 미국 영토 내에 묶어두는 독점 자산화 전략을 취함
- ▶ 2026년 2월, DOE Under Secretary Dr. Darío Gil의 주도하에 수립된 실행 지침에서 "AI 기반 자율주행 실험실 구현" 및 "기능 예측형 소재 설계"가 최상위 인프라 과제로 전격 지정됨
- ▶ AI 기반 자율주행 실험실 및 기능 예측형 소재 설계는 배터리 소재 개발뿐 아니라 자연과학 및 공학에 전방위적으로 활용되어 미국의 R&D를 가속화할 것으로 기대됨

➔ 패러다임 시프트의 본질

- ▶ '속도와 자산'의 초격차 시대-수동적 시행착오의 시대 종언: 과거 인간 연구원의 직관과 수동 노동에 의존하던 '에디슨식(Edisonian)' 연구 방법론은 다차원 변수가 복합 작용하는 차세대 배터리(DRX, LMRO 등)의 조합 폭발(Combinatorial Explosion) 한계에 직면함
- ▶ 시간의 압축과 시장 선점: AI 기반 페루프 능동 학습 (Closed-Loop Active Learning)과 무인 자율주행 실험실 (SDL)의 융합은 10~20년이 소요되던 소재 개발 주기를 획기적으로 압축할 수 있음. 이는 단순한 연구 효율화를 넘어 초격차 신기술을 글로벌 시장에 내놓는 'Time-to-Market'의 원천적 대전환을 의미함
- ▶ 실패의 자산화: 기존 연구 환경에서 사장되던 '실패 데이터 (Negative Results)'가 로봇 공학과 규격 프로토콜을 통해 고충실도 (High-Fidelity) 메타데이터셋으로 100% 자산화되면서, 국가 간 인공지능 파운데이션 모델의 인프라 연료 격차를 복리로 벌리는 핵심 동인으로 자리 잡음

➔ 글로벌 배터리 시장 및 공급망 패권 구도 변화 — 에너지 주권과 AI 안보의 결합:

- ▶ 생성형 AI 데이터 센터의 급격한 전력 확충 요구와 온디바이스 AI의 고출력 피크 전력 수요는 차세대 배터리를 단순한 전장 부품이 아닌 국가 AI 안보 및 무정전 전력 공급의 최후 방어선으로 격상시킴
- ▶ 미국 주도의 기술 봉쇄 장벽: 백악관의 제네시스(GENESIS) 임무와 'American Science and Security Platform'은 미국의 연방 국가 실험실 하드웨어 역량을 '공동 표준 노드'로 강제 통합함. 이를 통해 니켈·코발트·리튬의 대외 의존도를 원천 배제한 Earth-abundant 원소(망간, 티타늄, 나트륨, 황 등) 기반 원천 지식과 IP를 미국 영토 내에 독점 바인딩하려는 안보 전략이 고도화되고 있음

➔ AI기반 자동화 연구실 상용화 확산을 가로막는 주요 기술적·제도적 장벽

- ▶ 데이터 프로토콜 파편화와 데이터 고립: 다국적 기기 벤더사 간의 하드웨어 언어 및 데이터 포맷 파편화는 범연방 AI 여러 모델 통합의 일차적 병목 요인임. 이를 FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) 규격으로 표준화하는 소프트웨어 중개 계면 고도화 비용이 지속 증가하고 있음
- ▶ 안전 및 위험 예측 시스템의 부재: 무인 AI 알고리즘이 미지 영역을 과감히 탐색(Exploration)하는 과정에서 인간이 검증하지 않은 전해질/양극 조합의 급격한 열역학적 폭발, 독성 가스 방출 위험을 실시간 차단할 '물리 기반 인공지능 안전 가이드레일' 확보가 시급함

GLOBAL TECH KOREA

Industrial Technology and Market Strategic Analysis Report

미 DOE 주도 차세대 배터리 R&D와 자율주행 실험실(SDL) 구축 동향

발 행 일 2026년 8월

발 행 처 한국산업기술진흥원 워싱턴DC 사무소

작 성 자 김해겸, 로렌스 버클리 국립연구소

※ 본 자료에 수록된 내용은 한국산업기술진흥원의 공식 견해가 아님을 밝힙니다.

※ 본 자료의 내용은 무단 전재할 수 없으며, 인용할 경우 반드시 원문 출처를 명시하여야 합니다.

GLOBAL TECH KOREA

Industrial Technology and Market Strategic Analysis Report

