

# STI Brief

제3호 | 대기전해질 기반 공간 개방형 전지 개발



## I 서 론 1

- 1. 배경 및 필요성 ..... 1
- 2. 대기전해질 기술의 정의 및 범위 ..... 4
- 3. 대기전해질 기반 공간 개방형 전지 기술 ..... 7

## II 국내외 동향 12

- 1. 기술 개발 동향 ..... 12
- 2. 시장·산업 동향 ..... 18

## III 결 론 20

- 1. 시사점 ..... 20

## 참고문헌 21



# I 서론

## 1 배경 및 필요성

### 1 배경

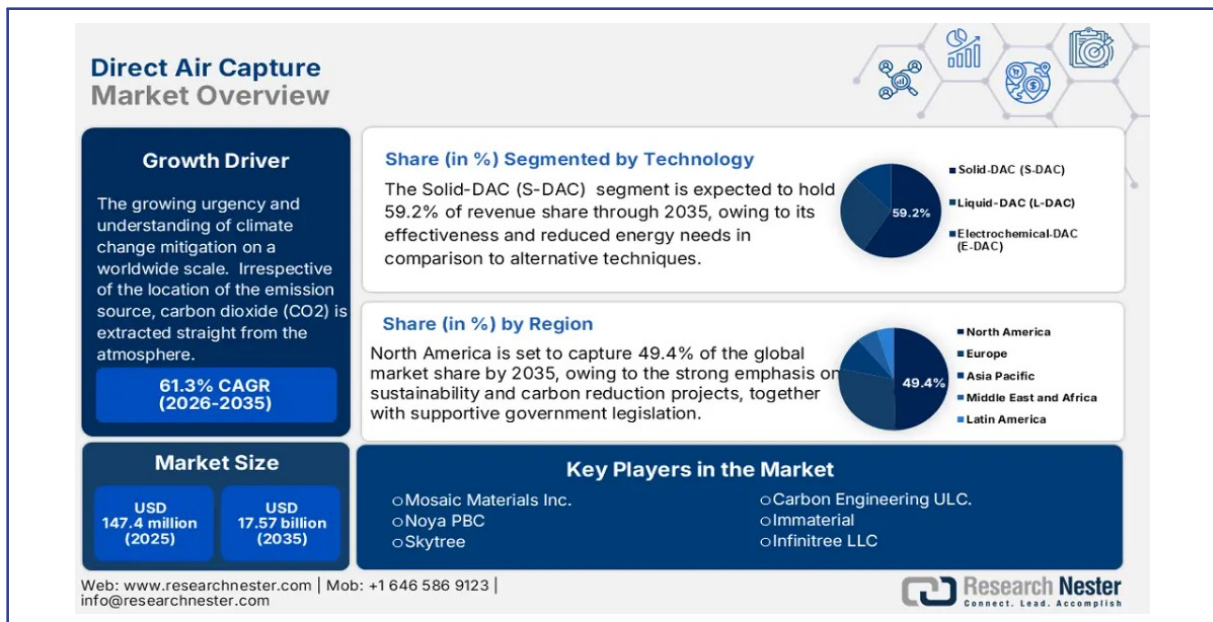
✚ 기존 전해 시스템은 밀폐형·고정식 구조의 제약으로 높은 에너지 소모와 공정 복잡성이 수반되며, 이에 따라 경제성 및 효율성 확보에 한계

- 밀폐형·고정식 전지 구조 중심의 기존 기술은 CO<sub>2</sub> 전달 효율, 반응 안정성, 운전 유연성 측면에서 구조적 한계에 직면
  - 전통적인 밀폐형 전해 시스템은 반응기 내부의 가스 확산, 반응 면적 확보, 반응 균질성 유지에 한계가 있어 대규모 적용 시 효율 저하 및 성능 변동성이 발생
  - 지속적인 운전 환경에서 성능 안정성 확보가 어려워 상업적 활용 단계로의 진입에 장애 요인으로 작용
- 에너지 소모와 공정 복잡성 문제로 실증·확산 과정에서 경제성 제약 발생
  - 현행 시스템은 높은 에너지 소모 구조와 복잡한 설비 구성으로 인해 운영비용이 증가하고, 규모 확장 시 비용 대비 성능 개선 효과가 제한되는 한계 확인
  - 이에 따라 파일럿 수준의 실증을 넘어 상업적 수준으로 확산하기 위한 경제성·효율성 개선 요구가 지속적으로 대두

✚ 기존 포집·운송 중심 CCUS가 비용, 입지, 사회적 수용성 측면에서 한계를 도출함에 따라 대기 중 CO<sub>2</sub>를 직접 전환·자원화하는 ‘직접 전환형’ 기술의 중요성 크게 부각

- 포집·이송 중심 CCUS 모델을 보완할 수 있는 ‘직접 전환형’ 기술에 대한 국제적 관심 증대
  - 기존 CCUS는 대규모 포집·이송·저장 인프라를 기반으로 추진되어야 하는 구조적 특성상 높은 비용, 입지 제약, 사회적 수용성 문제 등 한계 내재
  - 대기 및 주변 환경에서 직접 CO<sub>2</sub>를 활용하여 전환·자원화할 수 있는 기술이 현실적 대안으로 부상

- 재생에너지 기반 CO<sub>2</sub> 전환 및 탄소 자원화 기술과 연계 가능한 플랫폼 기술 요구 증가
  - 재생에너지 전력을 활용하여 CO<sub>2</sub>를 고부가가치 화학물질·연료로 전환하는 기술은 에너지 시스템 전환과 산업 경쟁력 강화에 동시 기여 가능
  - 이를 뒷받침할 범용적이고 확장성 높은 플랫폼 기술 확보가 국가 차원의 전략과제로 부상



출처 : Direct Air Capture Market Overview, Research Nester(2025)

### | 대기중 CO<sub>2</sub> 직접 포집 기술 시장 규모 |

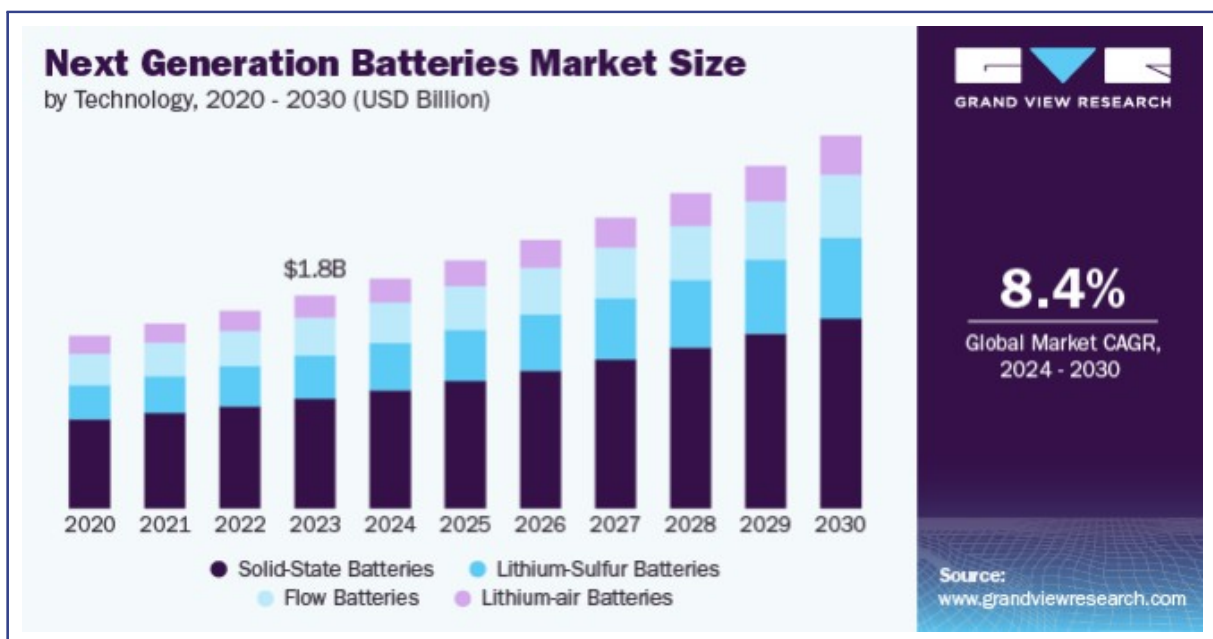
❖ 주요국은 탄소전환 기술을 국가 전략축으로 설정하고 집중 투자를 강화함에 따라, 기술 격차 확대에 적극 대응하고 글로벌 기술·시장 주도권 확보를 위해 종합적 기술전략 수립 및 체계적인 연구개발 추진 필요

- 주요국의 차세대 탄소 전환·전기화학 시스템 경쟁 심화
  - 주요 선진국은 CCUS, e-Fuel, 전기화학 전환 기술을 미래 에너지·산업 전략 핵심축으로 규정하고 대규모 투자 및 정책 지원 병행
- 국가 기술 주도권 확보 및 신산업 창출을 위한 선제적 연구개발 추진 필요
  - 단순한 기술 개발을 넘어 산업 적용, 시장 창출, 국제협력까지 연계된 종합적 기술 전략 수립 필요
  - 차세대 전환 기술 확보는 에너지 안보 강화와 함께 미래 신산업 생태계 조성의 핵심 기반으로 작용할 것으로 전망

## 2 필요성

❖ **재생에너지 연계 저탄소 전환 역량 강화 및 글로벌 주도권 확보를 위해, 대기 중 CO<sub>2</sub>를 직접 활용하면서 물질 전달 및 에너지 효율을 향상시킬 수 있는 차세대 대안 기술로서 ‘공간 개방형 전지’의 전략적 확보 필요**

- (차세대 전기화학 전환 기술) 기존 밀폐형·고정식 전해 시스템의 성능 및 경제성 한계가 가시화됨에 따라, CO<sub>2</sub> 전달 효율·반응 안정성·운전 유연성 제약을 근본적으로 보완할 수 있는 차세대 전기화학 전환 기술 확보 필요
- (CCUS 대안 기술) 기존 CCUS의 비용·입지·수용성 한계가 가시화됨에 따라 대기 및 주변 환경의 CO<sub>2</sub>를 직접 활용하는 ‘직접 전환형’ 기술이 현실적 대안으로 부상하고 있으며, 이에 대한 핵심 기술 확보와 활용 기반 강화 요구 확대
- (구조적 강점) 공간 개방형 전지 기술은 공기 중 CO<sub>2</sub>와의 직접 접촉을 통해 물질 전달 효율과 반응 성능을 향상시키고, 저온·상온 운용으로 에너지 소비를 절감할 수 있는 구조적 강점을 갖춘 차세대 핵심 기술로 평가
- (산업 주도권 선점) 재생에너지 연계형 저탄소 전환 기술의 확보와 글로벌 CCUS·탄소전환 시장에서의 기술·산업 주도권 선점을 위해 대기전해질 기반 공간 개방형 전지 개발을 전략적으로 추진 필요성이 크게 증대



출처 : Next Generation Batteries Market Size, Grand View Research(2023)

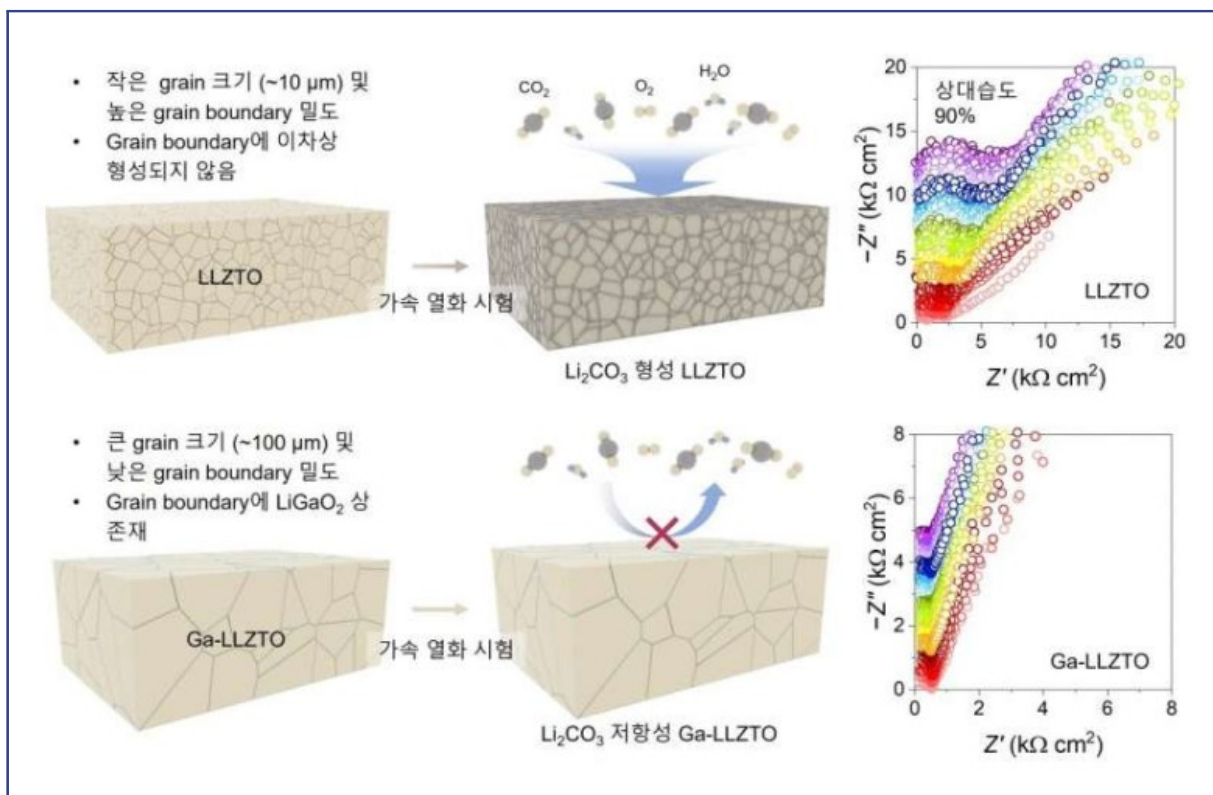
| 차세대 배터리 시장 규모 추이 |

## 2 대기전해질 기술의 정의 및 범위

### 1 기술 정의

❖ 대기전해질 기술은 대기 중 또는 주변 환경에 존재하는  $\text{CO}_2$ , 수분( $\text{H}_2\text{O}$ ), 산소( $\text{O}_2$ ) 등 기체 성분을 전해 시스템 내 전해질 또는 반응계에 직접 도입하여 전기화학적 전환 반응을 수행하는 기술

- 대기전해질 기술은 일반적으로 고체전해질 기술, 특히 대기 안정성이 향상된 고체전해질 개발 분야를 의미
- 기존 밀폐형·고정식 전해 시스템과 달리, 외부 대기와 직접 교환 가능한 개방형 구조를 기반으로 물질 전달 효율 향상, 운전 유연성 확대, 공정 단순화 및 경제성 제고를 동시에 달성하는 차세대 전기화학 전환 기술로 규정



출처: Ga 도입 LLZO 전해질의 수분 및 이산화탄소 노출 시 탄산 리튬 형성 억제 거동 및 리튬 이온 전도도의 보존, 교수신문(2022)

| 대기 노출에 안정적인 차세대 고체전해질 |

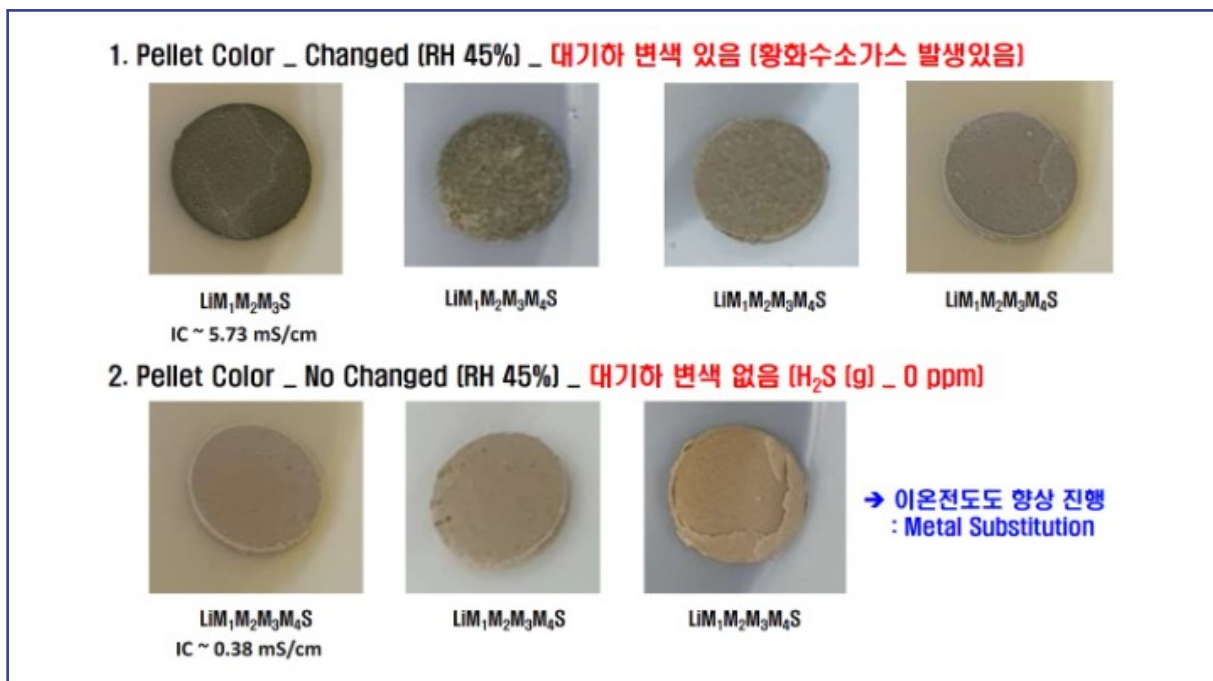


## 2 기술 범위

❖ 대기 안정형 고체전해질 소재 개발과 계면 안정성 확보 및 구조 설계 기술은 대기 민감도 한계를 극복하여 고체전해질의 실용화를 가속하는 동시에, 안정성과 신뢰성을 강화하는 기술로 구성

### ① 대기 안정형 고체전해질 소재 개발

- 수분·산소 민감도 저감 및 장기 안정성 확보 기술 개발
  - 대기중 수분·산소 노출시 발생하는 화학적 분해, 이온전도 저하, 표면 변성 등 성능 열화 요인을 체계적으로 규명하고, 노출 환경에서도 성능유지가 가능한 안정화 기술 확보 필요
- 장기간 노출 환경에서도 성능 열화 최소화 기술 확보
  - 실사용 환경을 고려한 장기 내환경성 평가 및 내구성 향상 기술을 통해, 소재의 신뢰성·재현성 강화
- 고체전해질 시스템별 최적화 기술 개발
  - 황화물계·산화물계·복합계 고체 전해질을 대상으로 표면 보호 코팅, 조성 최적화, 불순물 반응 제어 등을 통해 전도도·화학안정성·기계적 안정성을 종합적으로 개선하는 기술개발 포함



출처 : 인켄스社, 전고체 배터리용 고체전해질 파일럿 생산, 전자신문(2024)

| 대기안정형 고체전해질 대기 노출 시 색 변화 |

## ② 계면 안정성 확보 및 구조 설계 기술

- 대기 노출 환경에서도 안정적인 전극-전해질 계면 형성
  - 전극-전해질 계면에서 발생하는 화학반응, 계면변질, 가스 발생 등 문제를 최소화하고, 대기 노출조건에서도 전기화학적 안정성을 확보할 수 있는 계면 제어기술 확보 필요
- 계면저항 감소 및 장기 신뢰성 강화를 위한 구조 설계
  - 계면 저항 저감, 이온 전달 경로 안정화, 전극 접촉 안정성 강화 등을 위한 정밀 구조 설계 및 최적화 기술 개발
- 보호층 및 기능성 인터페이스 기술 개발
  - 보호층(Interface Layer)적용, 계면 반응 완충층 설계, 기능성 코팅 기술 등을 통해 장기 운전 시 안정성·내구성·신뢰성을 지속적으로 유지할 수 있는 시스템 구현 필요



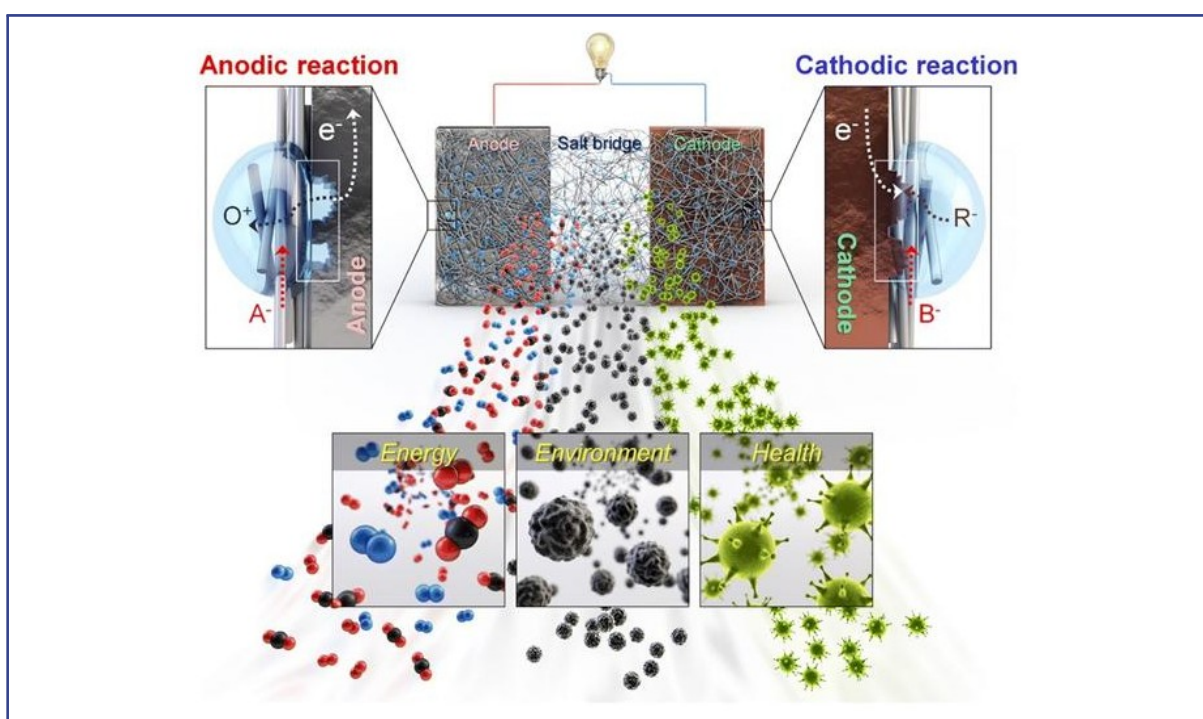
출처 : KERI, 전고체 전지의 중간층을 통해 안정성 넘어 대용량-대면적 구현, 한국전기연구원(2025)

| 중간층 구조 설계 기술 기반 전고체전지 안정성 확보 사례 |

### 3 대기전해질 기반 공간 개방형 전지 기술

❖ (정의) 대기과 직접 접촉 가능한 개방 구조를 기반으로 CO<sub>2</sub> 및 수분 등 대기 성분을 전지 반응계에 직접 유입하여 전기화학적 전환을 수행함으로써, 물질 전달 효율·반응 성능·에너지 효율을 동시에 향상시킬 수 있는 차세대 전기화학 전환 기술

- (핵심원리) 전해질 역할을 하는 고체 물질이 이온 전도성을 가지며, 전극 주변의 공간이 개방되어 대기 중의 활성 기체가 전극 반응에 직접 참여할 수 있도록 설계된 기술
- (구조적 특징) 전지 시스템의 전극 중 하나(보통 양극)가 외부 공기와 직접 접촉할 수 있도록 설계되어, 액체 전해질 대신 공기 중의 산소 등 기체 형태의 반응물을 적극적으로 활용
- (차별점) 기존 전지는 이온 전도와 반응 계면 형성을 위해 전극이 액체 전해질에 완전히 잠기도록 밀봉하는 구조인 반면, 이 기술은 이러한 고전적인 구조를 탈피



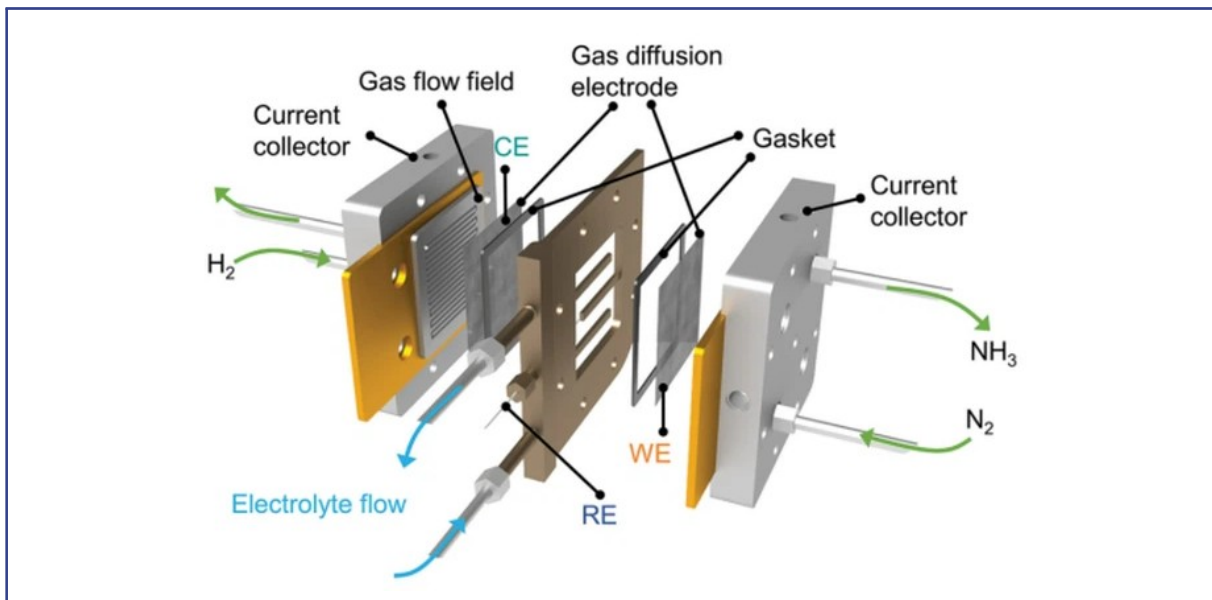
출처: 공간개방형 전기화학 셀의 구동원리 및 활용, 특허뉴스(2024)

| 공간 개방형 전기화학 셀의 구동원리 및 활용 모식도 |

## ❖ (범위) 대기 중 CO<sub>2</sub>, 수분, 산소 등 기체 성분을 별도의 고농도화·정제 공정 없이 전지 시스템에 직접 도입하여 전기화학적 전환을 수행하는 개방형 전해 시스템 기술군

### ● 대기기체 직접 활용 전해 시스템 기술

- (개념) 대기 중 CO<sub>2</sub>, 수분, 산소 등 기체 성분을 별도의 정제·고농도화 과정 없이 전해질 또는 반응계에 직접 도입하여 전기화학적 전환을 수행하는 기술
- (주요 기술요소) 가스 확산 전극(GDE<sup>1)</sup>), 다공성 반응층 설계 기술 및 고체·젤·이온전도막 기반 전해 구성체 및 물질 전달 최적화 기술
- (기술적 의의) 포집·이송·정제 공정 축소에 따른 시스템 단순화 및 비용 절감 및 분산형·현장형 탄소전환 시스템 실현을 위한 핵심 기반기술로 평가



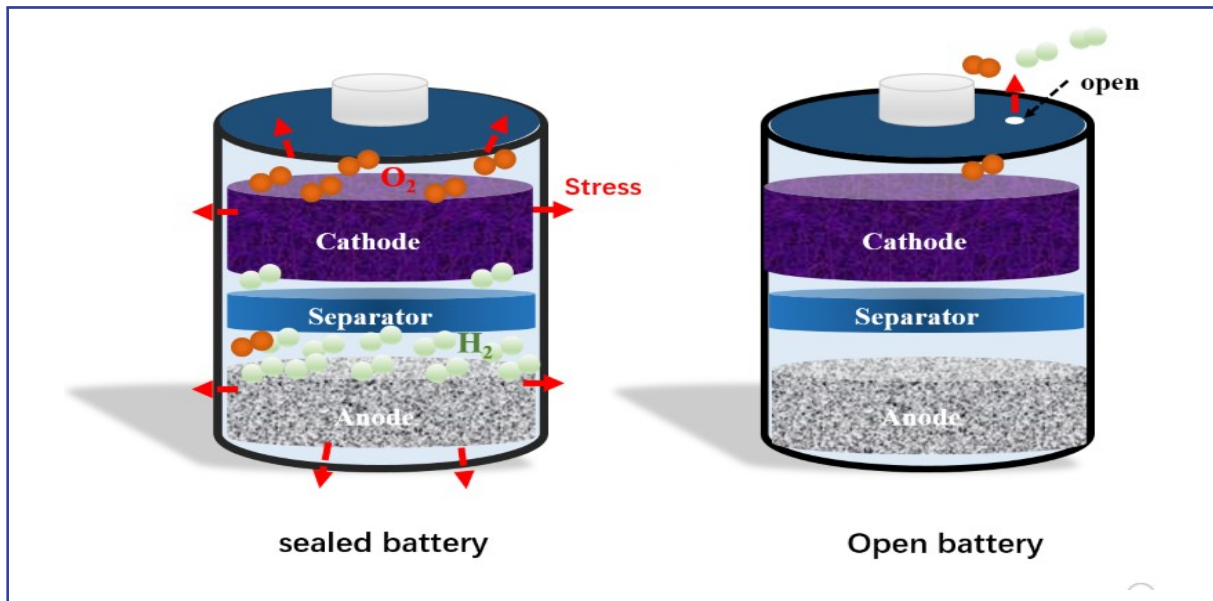
출처 : Continuous-flow electrosynthesis of ammonia by nitrogen reduction and hydrogen oxidation, Science(2023)

### | 가스 확산 전극을 활용한 전기화학셀 구성요소 |

### ● 공간개방형 및 반개방형 전지 구조 기술

- (개념) 전극 또는 전해질 일부가 대기와 물리적으로 접촉하도록 설계된 개방형 또는 선택적 기체 투과 구조의 전지 시스템
- (주요 기술요소) 완전개방형, 반밀폐형, 선택적 개방형 등 구조설계 기술 및 기체 교환 효율·안정성·내구성을 동시에 확보하기 위한 구조 최적화 기술
- (기술적 의의) 기존 밀폐형 전지 구조의 물질 전달 한계 보완 및 다양한 환경조건에서도 적용 가능한 유연한 시스템 설계 기반 마련

1) 기체 상태 물질(CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> 등)을 전극 내부로 효과적으로 확산시켜 전기화학 반응이 안정적으로 일어나도록 설계된 다공성(多孔性) 전극



출처 : Comparison between sealed battery and open battery, Maryland Univ.

### | 밀폐형 전지와 공간개방형 전지 비교 |

#### ● 전환·생산 기능 전기화학 반응계 기술

- (개념) 개방형 전지구조를 기반으로 CO<sub>2</sub> 전환, 수소생성, 산소발생 및 환원 등 다양한 전기화학적 전환 기능을 수행하는 반응시스템
- (주요 기술요소) CO<sub>2</sub> 전환 반응 선택성 제어 및 고부가 화합물 생산 기술 및 재생에너지 연계 전력 활용 기반 화학·에너지 변환 플랫폼화 기술
- (기술적 의의) CCUS, 탄소자원화, 수소경제 정책과 전략적 연계 가능하며, 저탄소·친환경 화학산업 전환의 핵심수단으로 활용 기대

#### ● 운전 효율 및 안정성 확보 기술

- (개념) 대기 조건 변화에도 안정적으로 성능을 유지할 수 있도록 효율·내구성·정밀제어체계를 확보하는 기술
- (주요 기술요소) 온도·습도·CO<sub>2</sub> 농도 변동 대응 제어 및 보정 기술 및 전극 열화 방지, 반응 선택도 유지, 전해질 및 셀 수명 안정화 기술
- (기술적 의의) 실증·상용화 단계에서 신뢰성 확보를 위한 필수 기술 및 산업 현장 적용 확대를 위한 운전 안정성 확보 기반 마련



## | 대기전해질 기반 공간 개방형 전지 기술 개발 사례 - (출처)한국연구재단 보도자료('24.7) |

논문명	Aeroelectrolyte for atmospheric open electrochemical cells
저널명	Energy & Environmental Science
키워드	Gas-involved electrochemical reaction (기체기반 전기화학반응), Open electrochemical cell (공간개방형 전기화학 전지), Aeorelectrolyte (대기전해질), Nanofiber salt-bridge (나노섬유 염다리), Three phase boundary (삼상계면)
DOI	10.1039/D4EE01252F
저 자	류○희 교수(교신저자/숙명여자대학교), 임○지 석사과정생(제1저자/숙명여자대학교)

**1. 연구의 필요성**

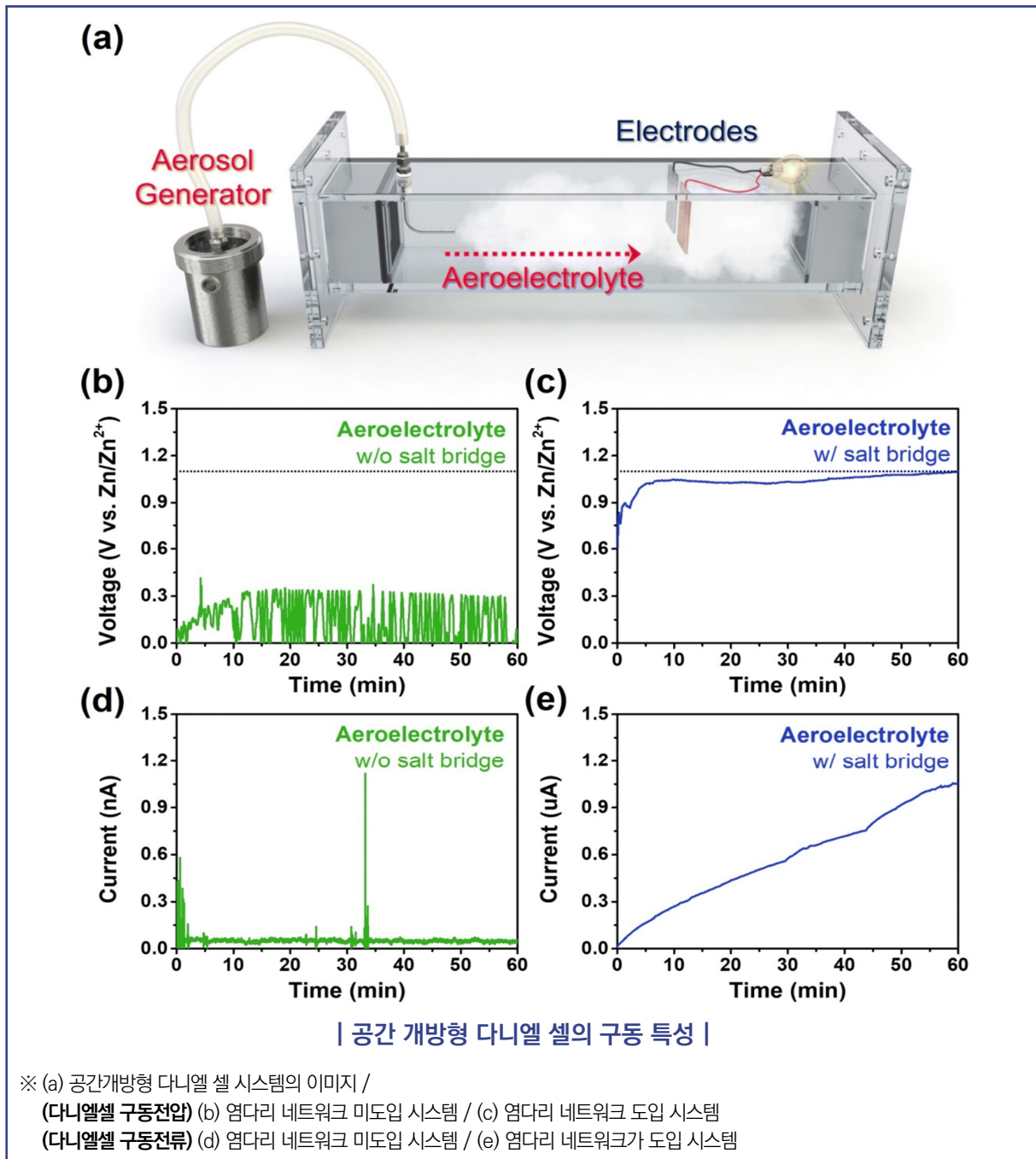
- 기체 소모·발생 반응을 활용한 전기화학적 에너지 및 환경 시스템의 수요가 급증하고 있으며, 온실가스 포집·전환, 수전해, 연료전지, 금속-공기전지 등은 기체 상태 물질을 전기화학 반응으로 변환하는 대표적 응용 분야로 부상
- 일반적 전기화학 전지는 액체전해질을 사용하고 전극을 전해액에 완전히 담지하는 구조를 가지나, 기상 반응의 경우 액체전해질의 낮은 기체 용해도로 인해 기체 반응물의 전극 확산 및 물질 전달이 제한되고, 고체전극-액체 전해질-기체반응물이 동시에 접촉하는 삼상계면 형성이 어려워 반응 속도가 크게 저하되는 구조적 한계 보유
- 기체 소모 반응에서는 반응 기체의 전해액 내 확산 및 전극 전달을 위해 외부 압력 기반 퍼징이 요구되고, 기체 발생 반응에서는 생성 기체가 전극 표면에 기포 형태로 잔존하여 반응 활성도를 저하시키는 문제가 지속적으로 보고
- 따라서 이상적인 기상 물질 기반 전기화학 전지 구현을 위해서는, 전극 간 공간을 차지하며 기체 이동을 방해하는 액체전해액을 최소화·배제하고, 기체 반응물·생성물이 자유롭게 이동 가능한 공간 개방형 맞춤형 전기화학 전지 시스템 설계가 필요

**2. 연구내용**

- 본 연구는 고전적 전기화학 전지 구조에서 벗어나 개방된 대기 공간 내에 전해액을 에어로졸 형태로 직접 분사하는 신개념의 전기화학 전지 시스템 개발
  - 기존 전기화학 전지는 전극이 전해액에 담지된 형태이지만 본 연구에서 개발한 시스템은 대기중 개방된 전극이 다수의 대기전해질 미세입자와 만나 전기화학반응을 일으키는 새로운 전기화학 전지 폼팩터 제시
- 공간개방형 전기화학 셀구조에서는 전극간 단락으로 이온 이동이 불가능하며, 전극/전해질 계면에서의 전하촉적으로 인해 지속적인 전기화학반응 불가
  - 이를 해결하기 위해 연구진은 전극간 이온 이동을 위한 나노섬유형태의 염다리 네트워크 도입이 필요하여 동 문제를 해결
- 고전적 다니엘 전지를 변형하여 액체 전해질이 담긴 욕조없이 전극사이에 공간개방된 구조에서도 대기 전해질 및 나노 섬유 염다리 구조를 이용하여 전기화학반응이 잘 일어났음을 규명 및 다양한 변수를 조절하여 시스템 반응 매커니즘 규명

**3. 연구성과 및 기대효과**

- 연구팀이 개발한 대기전해질 기반 공간개방형 전기화학 전지 시스템은 내부전극 및 전해액, 기체반응 물 등 셀 구성요소를 제어함에 따라 다양한 전기화학기반 에너지/환경시스템으로 적용 가능
  - 예를 들어 금속-공기전지, 연료전지, 수전해, 이산화탄소 전환 등 다양한 에너지·환경 시스템 응용으로 적용 가능
- 이밖에도 미세먼지와 대기 환경 오염물 포집·전환반응이나 코로나 바이러스와 같은 대기내 생체오염물질 감지 및 바이러스 제거와 같은 대기 보건 용도로도 활용이 가능



## II

## 국내외 동향

## 1

## 기술 개발 동향

- ✦ 대기 전해질 기반 공간 개방형 전지에 대한 국가별 연구 동향은 아직 초기단계로서, 국가별 클러스터가 형성되지 않고, ‘에어로 전해질 컨셉’과 ‘금속-공기전지·가스확산 전극 연구’ 중심으로 분산

## 1

## 미국

- ✦ 美 국립과학재단(NSF)의 지원을 받는 여러 대학 연구팀은 주로 금속-공기 전지 (Metal-air batteries)와 연료 전이에 사용되는 기체확산전극(GDE<sup>2)</sup>) 설계 개선 연구에 집중

- (구조 효율화) 대기 개방형 구조를 통한 효율 증대

- (주요내용) 산소 환원 반응(ORR<sup>3)</sup>)과 산소 발생 반응(OER)의 효율을 높이기 위해 전극이 대기에 직접 노출되는 개방형 구조 설계가 주를 이룹니다. 이를 통해 공기(산소)의 접근성을 최적화하여 반응 속도 향상 도모

- (공기극 문제) 개방형 공기극 문제해결을 위한 집중 연구

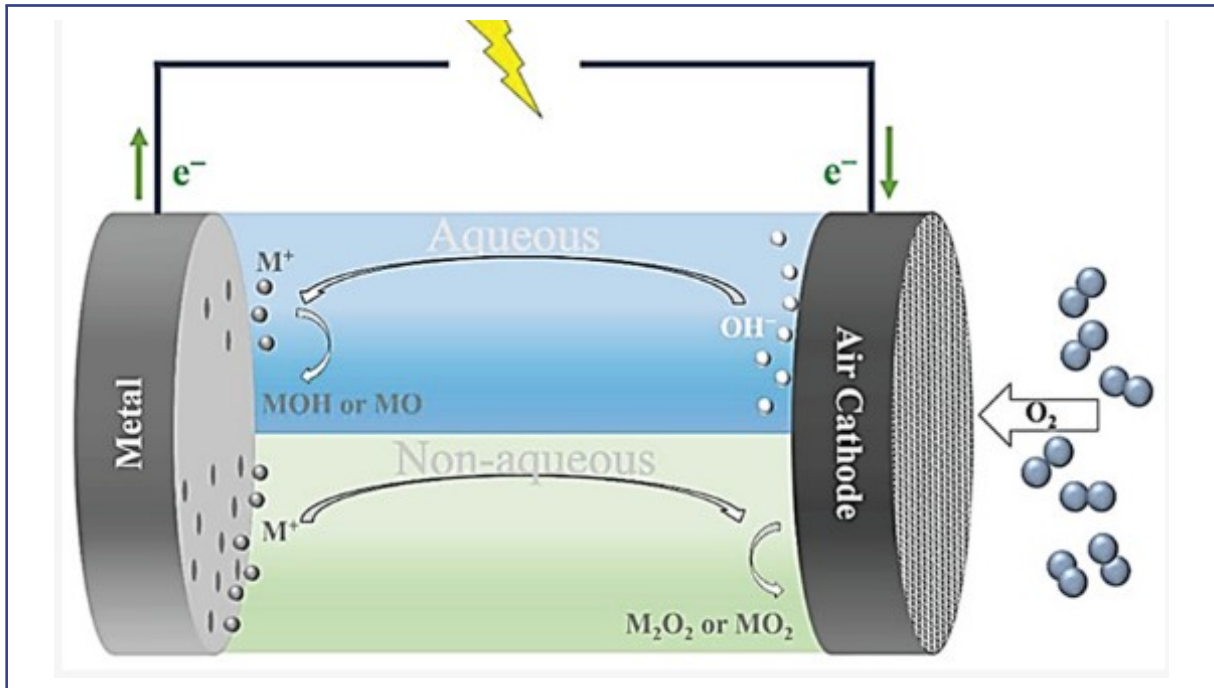
- (주요내용) 아연-공기전지(Zn-air)나 리튬-공기전지(Li-air)와 같은 개방형 시스템은 공기 중 이산화탄소로 인한 탄산화 및 전해질 증발 문제에 취약하여 다음 기술 개발 집중

- (나노구조 전극) 표면적을 극대화하고 반응 효율을 높이면서도 부수적인 문제에 대한 내성을 갖추도록 설계
- (보호막 개발) 전극 표면이나 시스템 전반에 보호막을 적용하여 외부환경요인(CO<sub>2</sub>, 수분 변화 등)으로부터 전극 및 전해질 보호와 수명을 연장

2) 기체 반응물(주로 O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> 등)이 전해질과 촉매에 효과적으로 전달되도록 설계된 다공성 전극으로, 연료전지, 금속-공기전지, CO<sub>2</sub> 전환 셀 등에서 삼상계면(기체-액체-고체)을 극대화

3) 산소환원반응(ORR, Oxygen Reduction Reaction)은 전기화학에서 산소(O<sub>2</sub>)가 전자를 받아 환원되는 과정으로, 연료전지·금속-공기 전지·대기 개방형 전지 등에서 공기극(캐소드) 반응의 핵심





출처 : The Mechanics of a Metal-air Battery, EEPower

### | 금속- 공기 배터리 모식도 |

## 2 독일

독일은 금속-공기 시스템, 충전 가능성 및 전해질 안정화, 연구기관 협력체계 중심 실험, 기초, 응용 연구가 활발하게 진행

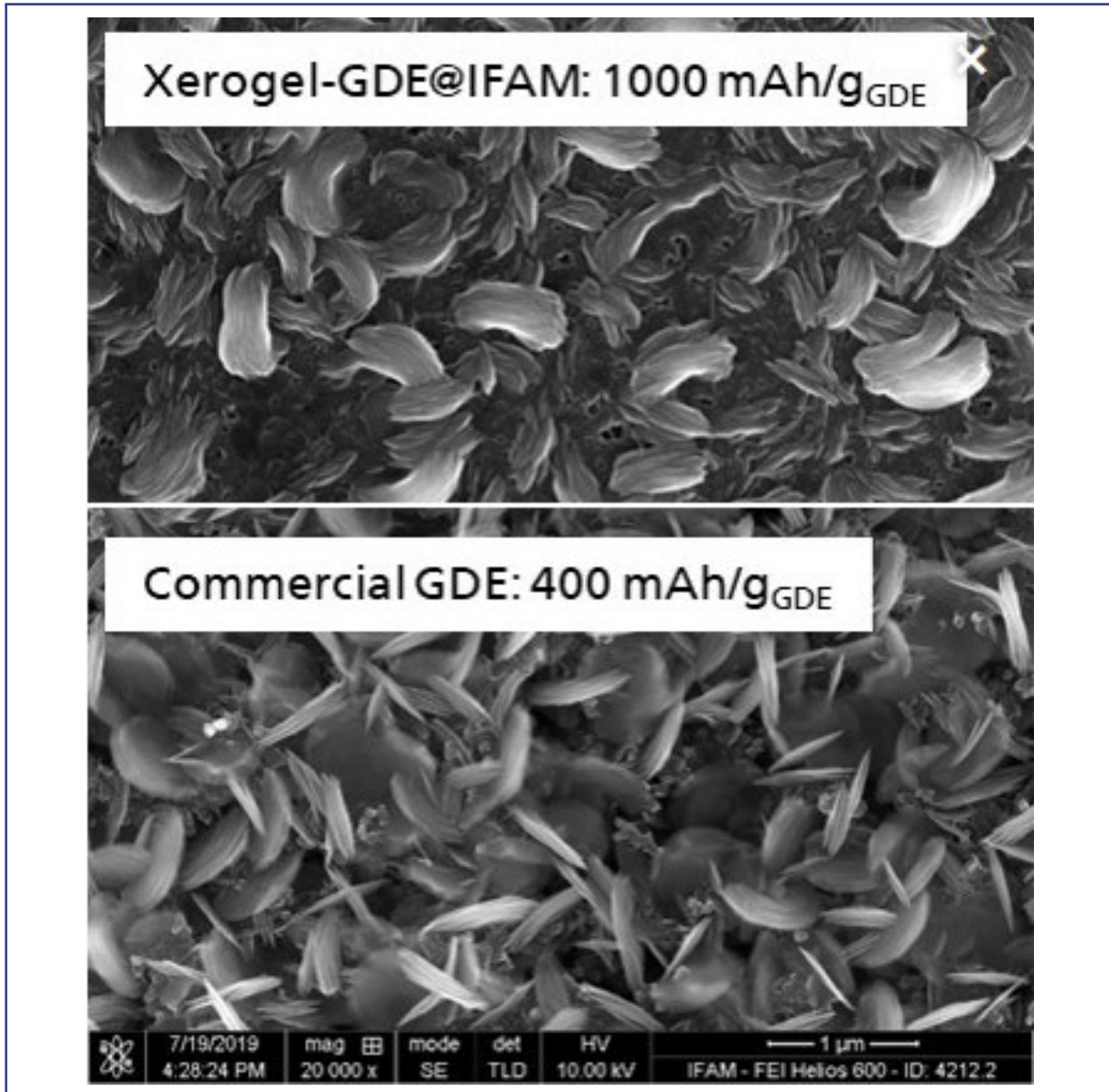
### ● Zn-air, Fe/Al/Mg-air 등 다양한 금속-공기 시스템 연구

- 금속-공기 전지는 공기(산소)를 양극(Cathode)로 사용하는 개방형 전기화학시스템으로, 공기반응 인터페이스 및 전해질 안정성이 핵심 이슈
- 독일 연구 동향은 특히 충전성, 안정성 향상, 촉매/공극 물질 디자인, Zn-air와 다른 금속 조합(Mg, Fe, Na)으로 확대되는 경향

### ● 충전 가능성 및 전해질 안정화 연구

- Li-air나 Zn-air는 이론적으로 높은 에너지 밀도를 갖지만, 전해질 안정성과 공기 중 CO<sub>2</sub>/수분 반응 제어가 연구 과제로 대두
- 독일에서는 비수계 전해질 설계, 촉매 산소 전환 반응(ORR/OER) 활성화, 공극의 장기 성능 향상 연구가 활발

- 산업-학계 협력 체계를 바탕으로 다차원 연구(실험, 기초, 응용) 추진
  - (실험 및 기초연구) 헬름홀츠 네트워크 및 대학협력을 바탕으로 다양한 연구기관들이 전해질 및 고체/액체 계 전지 기술 선도 연구를 연합하여 추진
  - (응용연구) 산업계-스타트업간 연계에 경쟁력을 갖추고, 차세대 배터리 소자에 대한 공정/제조 기술 진화 및 금속-공기, 고체전지 계열로 확장할 수 있는 응용기술 개발 선도



출처 : SEM image of the gas-diffusion electrode (GDE) after discharge in an aprotic Li/O<sub>2</sub> cell, Fraunhofer IFAM

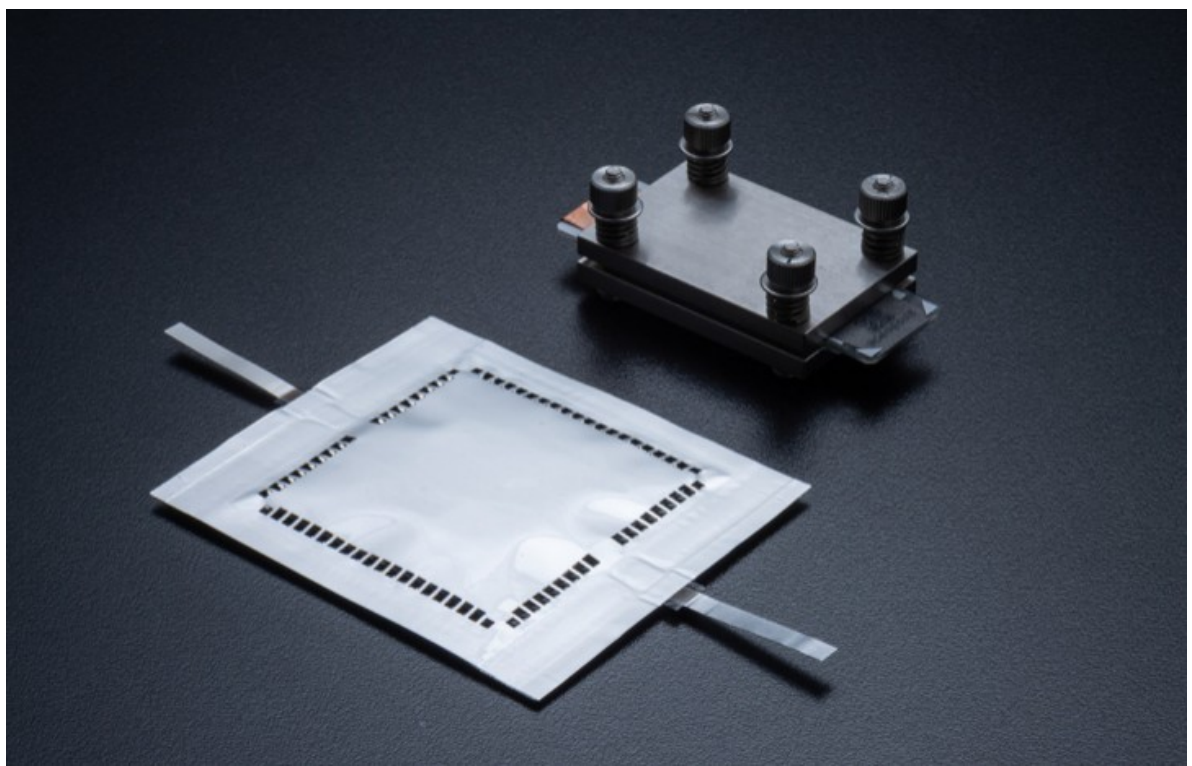
| 비프로틱 Li/O<sub>2</sub> 전지에서 방전 후 GDE의 주사전자현미경(SEM) 이미지 |

### 3 일본

✚ 일본은 전통적으로 전지, 전기화학 소재를 기반으로 한 연구 인프라가 강하며, 금속-공기 전지부터 리튬-공기 전지, 촉매/전극 구조 혁신까지 폭넓은 연구 진행

- 일본 NIMS<sup>4)</sup> 중심의 리튬-공기(Li-air) 시스템 연구

- 리튬-공기 전지의 실용화 수준 성능 확보를 위한 연구 추진 중, 최근 전극 구조 최적화 및 다공성 탄소전극 개발을 통해 기존 원형 셀 단계를 넘어 1 Wh급 리튬-공기 전지 스택 구현 성과 도출



출처 : 1-Wh-class stacked lithium-air battery, NIMS(2025)

#### | 1Wh급 리튬-공기 공기 전지 테스트 셀 |

- 리튬-공기 연구의 구조적·재료적 부문에 대한 연구 추진

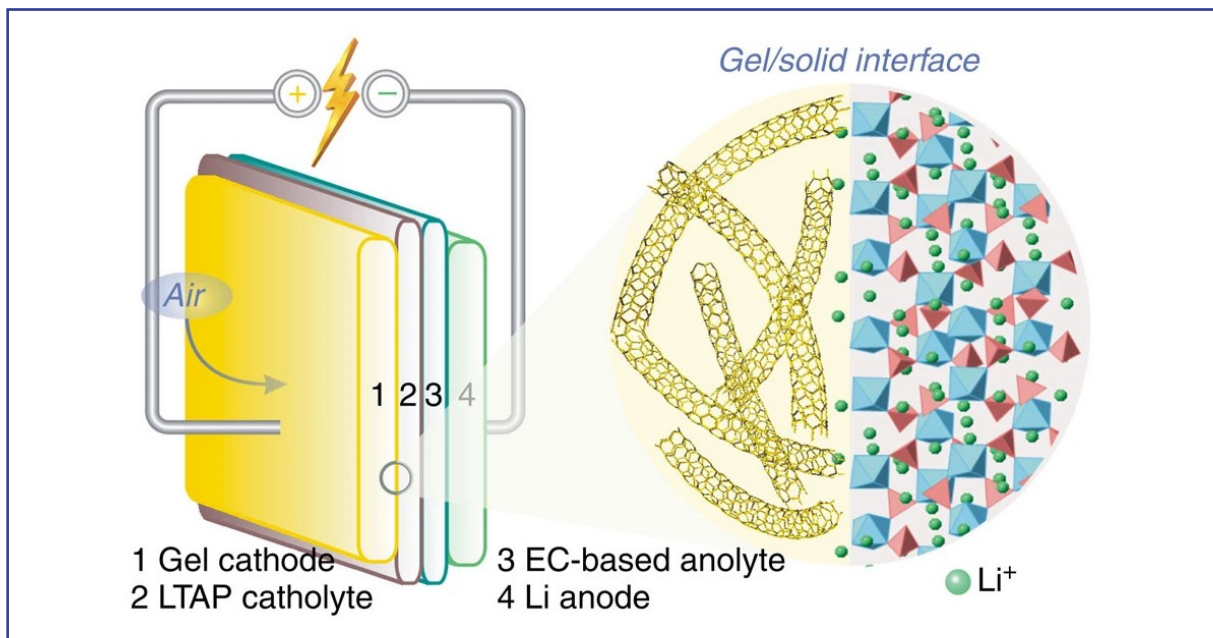
- 리튬-공기 전지는 본질적으로 개방형 전기화학시스템으로써, 공기, 전해질, 전극이 만나는 계면 설계가 기술적 핵심
- 기공구조(Pore structure) 설계로 산소확산 최적화, 전해질 및 반응 생성물( $\text{Li}_2\text{O}_2$  등) 제어, 사이클 성능개선을 중심으로 연구 추진

4) National Institute for Materials Science

#### 4 중국

❖ 중국은 셀·반응기 수준에서 공기 및 플루가스를 직접 처리할 수 있도록 구조를 과감히 개방형으로 설계하고, 대기 조건에 직접 대응하는 기술개발을 적극적으로 추진

- 고체 전해질 반응기(SSER) 하나 안에서 주변 공기(ambient CO<sub>2</sub>)를 포집하고, 연속 전기분해를 통해 유용 물질로 전환하는 개념 제시
  - 고체 전해질층을 통해 이온전도를 안정적으로 유지하면서, 대기·혼합가스가 반응기에 직접 접촉하도록 설계하는 방식
  - 또한 내부에 CO<sub>2</sub> 포집과 전기환원 단계를 연속 배치한 직렬(연속) 전기분해 구조를 구현함으로써, 대기 조건에서도 고효율 탄소전환이 가능한 개방형 전기화학 시스템 구축
- 폴리(Phenazine sulfide)를 고체 전극으로 사용하는 하이브리드 유동전지에서 pH-swing<sup>5)</sup>을 이용해 공기 중 CO<sub>2</sub>를 직접 포집하는 방식으로 연구 추진
  - O<sub>2</sub> 민감 전극을 분리 설계함으로써 대기 조건에서도 운용이 가능하며, 공기 직접 연계 개방형 전지와 CO<sub>2</sub> 포집 기능이 통합된 차세대 전기화학 시스템으로 평가



출처 : A reversible long-life lithium-air battery in ambient air, Nature Communication

#### | 리튬-공기 전지의 모식도 |

5) pH 변동을 이용한 흡착·탈착(포집·방출) 구동 방식



## 5 한국

❖ 국내에서는 △ 전기화학 대기반응·DAC 연계형 기초·응용 연구, △ GDE 기반 개방형 셀 연구, △ 대기전해질 기반 공간 개방형 전지 시스템 개발, △ 대기 노출 금속-공기 전지 연구를 중심으로 동향 형성

### ● 전기화학 대기반응·DAC 연계형 기초·응용 연구

- 대기 중  $\text{CO}_2$ · $\text{O}_2$ ·수분 등 기체 성분을 직접 활용하는 전기화학 반응 메커니즘, 삼상계면(고체/액체/기체) 형성 조건, 기체 확산·전달 제한 해소 등을 중심으로 기초 연구 진행
- $\text{CO}_2$  포집·전환(DAC+전기환원), 산소 환원·발생(ORR/OER), 가스 센서 및 환경 전기화학 응용을 위한 셀 구조·반응 설계 연구가 일부 대학·출연연에서 수행 중

### ● 가스 확산 전극(GDE)· $\text{CO}_2$ 전환 전지 기반 부분 개방형 셀 연구

- $\text{CO}_2$  전환(전기화학적  $\text{CO}_2\text{RR}$ ) 및 수전해·연료전지 분야에서, 기체 공급·배출을 위한 가스 확산 전극(GDE), 다공성 전극 구조, 기체 채널 설계 연구가 진행
- 현재는 대부분 전해질 탱크·셀 내부가 기본적으로 “밀폐형” 구조이나, 기체 채널·기체 공급부에 반개방적 요소를 도입해 공기·플루가스<sup>6)</sup> 활용 효율을 높이는 방향으로 발전

### ● 대기전해질 기반 공간 개방형 전지 시스템

- 전극 주변 공간을 액체 전해질 욕조에서 꺼내 공간을 개방(open structure) 하고, 공기 중에서 부유하는 에어로졸 형태의 ‘대기전해질(aeroelectrolyte)’을 전극에 직접 분사·접촉시키는 새로운 전기화학 셀 구조 제시
- 전극 간에는 1차원 다공성 염다리(salt-bridge nanofiber)를 도입해, 공간 개방 상태에서도 이온전도 경로를 유지하면서 안정적인 전기화학 반응 구현

### ● 대기 노출형 금속-공기 전지·차세대 이차전지 연구

- 차세대 고에너지 이차전지인 리튬-공기 전지(Li-air), 리튬- $\text{CO}_2$  전지, 나트륨이온 전지 등에서 고성능 전극·촉매·전해질 소재 개발
- 특히 리튬-공기 전지에서 대기 조건에서의 구동 안정성을 높이기 위한 촉매·전극 구조 설계, 바이오 기반 촉매<sup>7)</sup>를 활용한 고효율·저비용 산소 전극 촉매 개발 선도

6) 발전소, 산업용 보일러, 제철·시멘트 공정 등에서 연료(석탄·가스·석유 등)를 연소한 후 배출되는 연소 배기가스

7) 헤모글로빈, 포피린, MOF 등

## 2

## 시장·산업 동향

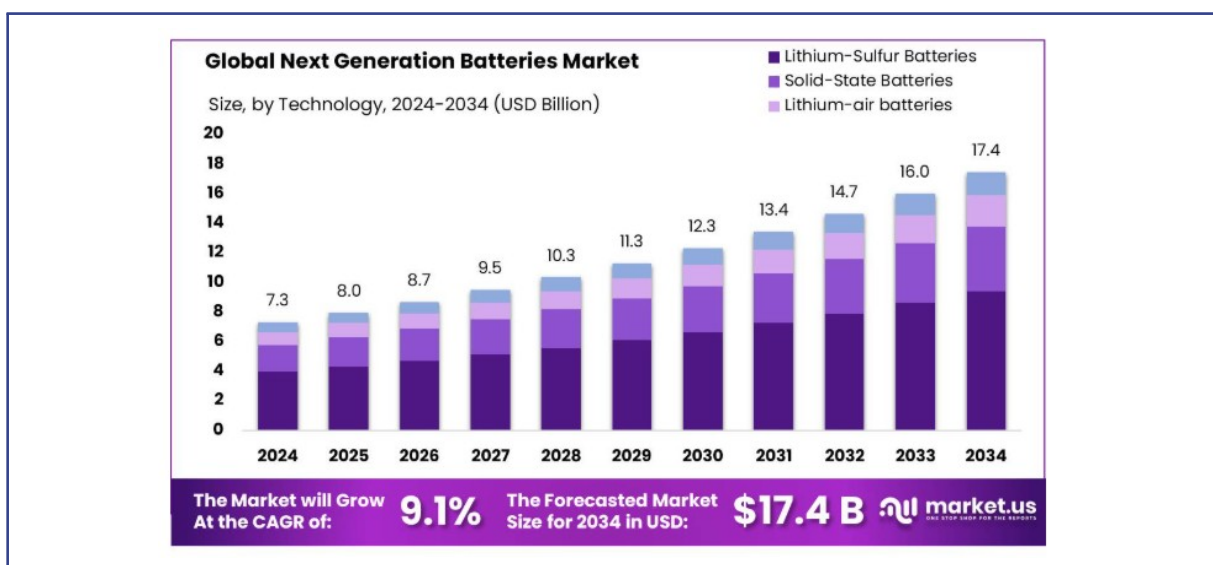
❖ 대기 전해질 기반 공간 개방형 전지 기술은 아직 개념·원천기술 단계로, 단기간내 독립적인 시장 형성보다는 차세대 전지·탄소전환 전기화학 시스템의 연구 흐름 속에서 기술축 형성

● 시장형성 측면에서의 대기 전해질 기반 공간 개방형 전지기술

- 현재는 TRL 2~4 수준의 연구 중심 단계로, 대규모 상용화 수요가 직접적으로 존재하기보다는 “기술 잠재력 검증 및 응용 방향 탐색 단계”에 해당
- 동 기술은 독립된 시장으로 자리 잡기보다는 CCUS, 차세대 전지 분야를 보완·지원하는 하위 기술군으로 인식

❖ 글로벌 차세대 배터리 시장은 2025년 약 73억 달러에서 2034년 174억 달러 수준으로 성장할 것으로 전망되며, 2025년~2034년기간 동안 연평균9.1% 성장률 기록 예측

- 차세대 배터리 시장은 전기차(EV) 및 재생에너지 분야를 중심으로 고도화된 에너지저장 기술 수요가 지속적으로 확대됨에 따라 안정적 성장세
- 산업 전반과 정부 정책이 친환경 에너지 전환을 가속화함에 따라, 고성능·고효율 에너지저장 기술의 중요성 점차 증대
  - 특히 전고체 배터리, 리튬-공기, 나트륨 이온 등 차세대 배터리 기술은 기존 리튬이온 배터리 대비 높은 에너지 밀도, 향상된 안전성, 우수한 성능을 제공함으로써 시장 채택 본격화

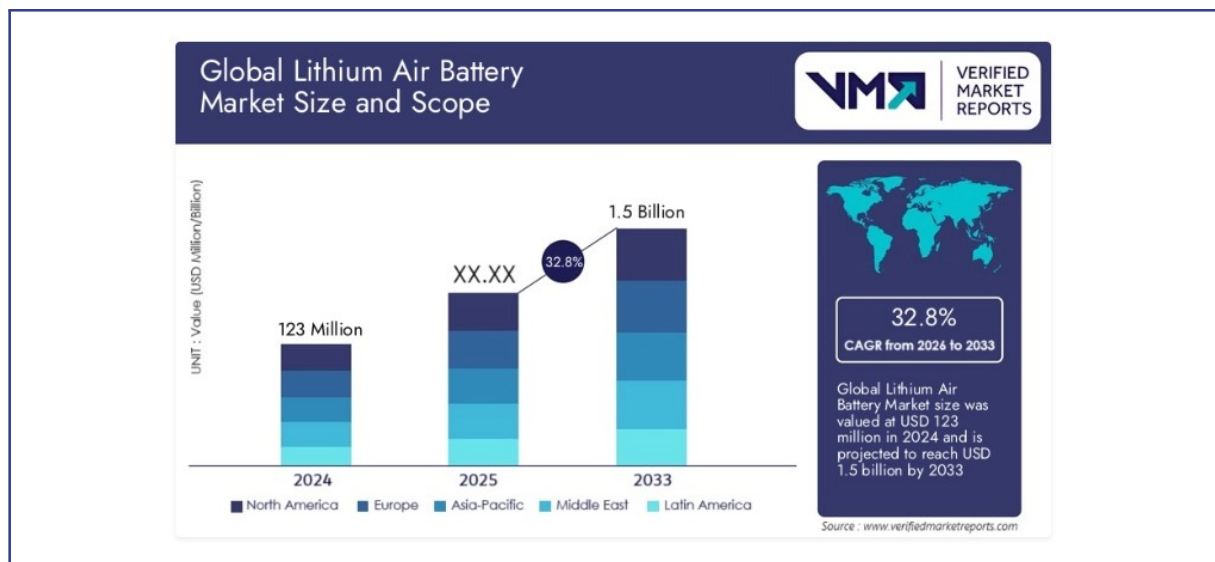


출처 : Global Next Generation Batteries Market, Market.US(2025)

| 글로벌 차세대 배터리 시장 규모 |

❖ 차세대 배터리 시장 중 대기전해질과 연계된 분야로는 리튬-공기 배터리 시장이 형성되어 있으며, 해당 시장은 2024년 약 1억 2,300만 달러 규모로 평가되고, 2033년까지 약 15억 달러 수준으로 성장할 것으로 전망

- 리튬 공기 배터리 시장은 에너지 저장 산업 내에서 신흥 부문으로, 기존의 리튬 이온 배터리에 비해 높은 에너지 밀도 및 저렴한 비용이 잠재력
- 2023년 기준, 리튬-공기 배터리 시장 매출 비중은 북미가 35%로 가장 큰 비중 차지, 아시아·태평양 지역 30%, 유럽 20%, 라틴아메리카 10%, 중동·아프리카 5%를 각각 점유
  - 특히 아시아·태평양 지역은 전기차(EV) 및 재생에너지 응용 수요 증가에 힘입어 가장 빠르게 성장하는 핵심 시장으로 평가



출처: Global Lithium Air Battery Market Size and Scope, Verified Market Report(2024)

#### | 글로벌 리튬-공기 배터리 시장 규모 |

❖ 국내 차세대 배터리 시장은 현재 급성장 중이며, 정부 목표상 2030년까지 글로벌 점유율 25% 달성과 함께 전고체 배터리 등 다양한 혁신 기술 기반 시장 주도권 확보 목표

- 국내 이차전지 시장 자체는 2027년까지 약 10조원 규모로 성장할 것으로 예측되며, 연평균 19.5% 성장세가 예측
- (차세대 배터리 기술 개발) 정부는 제8차 국가첨단전략산업위원회(25.11월)에서 전고체 등 차세대 배터리 산업기술 및 원천기술 R&D 재원 투입 계획을 발표하며 지원계획 수립
  - 특히 리튬-메탈, 리튬-공기, 나트륨 기반 이차전지 등 차세대 원천기술 확보를 위해 2025년부터 2030년까지 총 974억 원 규모의 투자 추진

## III 결 론

### 1 시사점

#### ❖ “대기전해질 기반 공간 개방형 전지”는 CCUS·차세대 배터리를 관통하는 플랫폼 기술축으로 설정 필요

- 기존 CCUS 모델의 비용·입지·수용성 한계, 기존 밀폐형 전해 시스템의 물질전달·에너지 효율 한계를 동시에 보완할 수 있는 직접 전환형 전기화학 플랫폼으로서 전략적 가치 보유
- 재생에너지 전력, CO<sub>2</sub> 전환, 금속-공기·리튬-공기 전지 기술을 하나의 공간 개방형 전지 아키텍처로 통합하는 “교차 기술축(cross-cutting technology)”으로 정의하고 개발 필요

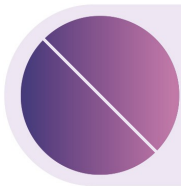
#### ❖ 현재는 기술·시장 측면에서 원천 선점 단계에 위치한 만큼, 국가 주도의 명확한 방향성 설정을 통해 향후 잠재적 기술 경쟁력과 시장 주도권의 선제적 확보를 위한 전략적 대응 필요

- 글로벌 시장이 아직 특정 국가나 기업 중심으로 고착되지 않은 개방 경쟁 구간에 해당하며, 기술 정의와 연구 범위 설정에 따라 향후 시장 구조와 산업 표준이 재편될 가능성이 높은 만큼, 국가 차원의 명확한 방향성 설정을 통해 선제적 선점 전략 추진 필요
  - △ 기술개념 및 표준 선점, △ 연구개발 주도권 확보, △ 중장기 시장 리더십 기반 마련 등을 선제적으로 달성 필요

#### ❖ 고체전해질·계면 안정화 연구와 대기전해질 기반 개방형 전지 간 전략적 연계 중요

- 전고체 배터리 R&D(전고체, 중간층 구조 설계 등)와 대기전해질 기반 전지 R&D를 동일 연구 포트폴리오 및 프로그램 체계 내에서 기획·운영하여 기술 축적 및 확산 동시 달성
- 소재·계면·제조 인프라를 공동 활용하는 컨소시엄·플랫폼 체계 구축을 통해 연구비·장비 투자 효율성 극대화 및 중복 투자 최소화
- 이를 통해 향후 산업화 단계에서 전고체-대기전해질-금속공기 전지 등 차세대 전지 간 기술 전환 비용 최소화 및 상호 확장성과 산업 경쟁력 강화를 동시에 확보할 수 있는 구조 마련 필요





## 참고문헌

### 1. 학술 논문 및 저널

Lim, E. J., Ryu, H. et al., "Aeroelectrolyte for Atmospheric Open Electrochemical Cells," Energy & Environmental Science, 2024.

DOI: <https://doi.org/10.1039/D4EE01252F> <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2024/ee/d4ee01252f>

Bruce, P. G., et al., "A Reversible Long-Life Lithium-Air Battery in Ambient Air," Nature Communications.

DOI: <https://www.nature.com/articles/ncomms3657>

Zhang, X., et al., "Continuous-flow electrosynthesis of ammonia by nitrogen reduction and hydrogen oxidation," Science, 2023.

DOI: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adf2463>

Christensen, J., et al., "The Mechanics of Metal-Air Batteries," EEPower Technical Review.

DOI: <https://eepower.com/technical-articles/the-mechanics-of-a-metal-air-battery/>

NIMS (National Institute for Materials Science, Japan), Lithium-Air Battery Research Program Reports (1-Wh class stacked lithium-air battery)

DOI: <https://www.nims.go.jp/eng/news/press/2025/01/202501150.html>

KERI 한국전기연구원, "전고체 전지의 중간층 구조 설계를 통한 안정성 및 대면적 구현 연구," 2025 보도.

DOI: <https://www.keri.re.kr>

### 2. CCUS·탄소전환·재생에너지 연계 정책 및 기술보고서

IEA (International Energy Agency), CCUS in Clean Energy Transitions – Global Outlook Report.

DOI: <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>

IPCC, AR6 Mitigation of Climate Change – Carbon Removal & Utilization Chapters.

DOI: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>

U.S. Department of Energy (DOE), Carbon Capture, Utilization & Storage Strategic Vision.

DOI: <https://www.energy.gov/fecm/carbon-capture-utilization-and-storage>

European Commission, CO<sub>2</sub> Utilisation and Green Fuels Strategy Documents.

DOI: <https://energy.ec.europa.eu>

### 3. 전고체 배터리·차세대 배터리 정책 및 기술자료

Government of Japan (METI), Next-Generation Battery Strategy – Solid-State Battery Roadmap.

DOI: <https://www.meti.go.jp/english/press/>

European Battery Alliance / EU Commission, Strategic Action Plan on Batteries.

DOI: [https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/industry-sectors/energy-intensive-industries/european-battery-alliance\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/industry-sectors/energy-intensive-industries/european-battery-alliance_en)

산업통상자원부, 차세대 배터리 R&D 및 산업전략 관련 자료(국가첨단전략산업·전고체 배터리)

DOI: <https://www.motie.go.kr>

과학기술정보통신부, 차세대 이차전지 원천기술 투자계획(2025~2030)

DOI: <https://www.msit.go.kr>

### 4. 시장·산업 동향 보고서(Next-Generation Batteries / DAC / Lithium-Air)

Grand View Research, Next Generation Batteries Market Report (2023-2034).

DOI: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/next-generation-batteries-market>

Market.US, Global Next-Generation Battery Market Outlook (2025).

DOI: <https://market.us/report/next-generation-batteries-market/>

Verified Market Research, Global Lithium-Air Battery Market Size & Scope (2024-2033).

DOI: <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/lithium-air-battery-market/>

Research Nester, Direct Air Capture Market Overview (2025).

DOI: <https://www.researchnester.com/reports/direct-air-capture-market/4797>

### 5. 국내 연구기관 및 학계자료

한국연구재단(NRF), 대기전해질·공간개방형 전기화학 셀 관련 연구성과 보도자료(2024.7)

DOI: <https://www.nrf.re.kr>

전자신문, 전고체 배터리 고체전해질 파일럿 생산 및 대기안정성 관련 기사(2024).

DOI: <https://www.etnews.com>

한국에너지기술연구원(KIER), CO<sub>2</sub> 전환·전기화학 시스템 관련 기술보고서.

DOI: <https://www.kier.re.kr>