2025년도 연구보고서
공모과제-01-01

탄소중립을 위한
강원형 수소 저장·운송 기술 확보방안

2025. 07.

삼척시탄소중립지원센터

SAMPYO Cement (주)삼표시멘트
시멘트산업사회공헌재단 Cement Industry Social Contribution Foundation
환경부
삼척시 SAMCHEOK CITY
KNU 강원대학교 KANGWON NATIONAL UNIVERSITY

제 출 문

○ 과 제 명 : 탄소중립을 위한 강원형 수소 저장·운송 기술 확보방안

○ 계약기간 : 2025년 04월 18일 ~ 2025년 07월 17일 (총3개월)

○ 계 약 일 : 2025년 04월 18일

○ 착 수 일 : 2025년 04월 18일

○ 완 료 일 : 2025년 07월 17일

상기와 같이 「2025 제1차 삼척시 탄소중립 연구과제 공모사업」의 최종 연구보고서를 제출합니다.

2025년 07월 17일

소 속 : 강원대학교 그린에너지공학과

직 위 : 교수

성 명 : 이 동 규 (인/서명)

삼척시탄소중립지원센터장 귀하

요 약 문

Ⅰ. 연구개요

본 연구는 강원도 지역의 지리적 · 산업적 특성과 글로벌 에너지 전환 흐름을 고려하여, 차세대 수소 저장 · 운송 기술의 적용 가능성과 실현 방안을 모색하였다. 기존 저장합금 및 금속 기반 시스템의 한계를 점검하고, 암모니아 등 화학적 캐리어 및 혁신적 상온 무전력 전환기술의 실증적 타당성을 검토하였다.

Ⅱ. 연구의 필요성 및 목적

강원도는 산악 · 해안 복합 지형과 분산된 산업 구조로 대규모 파이프라인 중심의 중앙집중식 인프라보다 유연한 저장 · 운송 시스템이 필요한 지역이다. 고온 · 고압이 요구되는 기존 방식 대신, 상온 · 상압에서 자원과 인프라를 효율적으로 활용할 수 있는 화학적 수소 캐리어(특히 암모니아 기반) 및 무전력 광전기화학 기술의 채택이 필수로 대두되고 있다. 본 연구는 이러한 전략 전환의 기술적·정책적 타당성 검증 및 실질적 로드맵 마련을 목표로 한다.

Ⅲ. 연구의 내용 및 범위

- 국내외 수소 저장 · 운송 기술의 최신 동향, 정책 환경, 시장성 분석
- 강원도 현황 및 기존 기술(BOG, 저장합금)의 구조적 한계 도출
- 암모니아, LOHC 등 차세대 화학적 캐리어의 적용성 및 실증사례 비교
- 해수와 태양광을 활용한 상온 무전력 암모니아-수소 전환 시스템 설계 및 실험적 개념 검증
- 핵심 전극 소재(광전극, 탄소 수소전극) 개발 및 통합시스템 실증

Ⅳ. 연구결과

- 기존 고온 암모니아 크래킹 대비, 해수 기반 광전기화학 시스템이 상온 · 무전력 조건에서 암모니아 분해와 고순도 수소 생성에 성공함을 실험적으로 확인
- $BiVO_4$ 기반 광전극 · 질소도핑 탄소 전극 등 고성능 · 내구성 소재 개발
- 암모니아의 99% 이상 질소 선택성과 무전력 조건 수소 발생 입증
- CO_2 포집 및 pH 안정화 등 탄소중립, 나아가 탄소네거티브 실현 가능성 실험적 검증

Ⅴ. 연구결과의 활용계획

- 강원도 수소 저장 · 운송 정책 로드맵 및 예타 · 실증사업 전략자료로 활용
- 동해 · 삼척 수소특화단지, 액화수소 · 암모니아 클러스터 구축 등 지역 산업 생태계 고도화 모델 제시
- 전국 단위 분산형 · 자립형 수소에너지 공급 솔루션, 탄소네거티브 그린수소 실증 플랫폼 추진의 기초자료로 제공
- 중소기업, 연구기관, 지방정부 대상의 기술이전, 실증연계 사업화에 적극 활용

<목 차>

제1장 서 론 ····· 1

1.1 연구배경 ····· 1

1.2 연구목적 ····· 1

1.3 연구범위 ····· 2

1.4 연구방법 및 추진체계 ····· 2

제2장 연구의 필요성 및 목적 ····· 4

2.1 기술 및 정책 환경 변화 ····· 4

2.2 강원도 수소 인프라 현황과 기술전환 필요성 ····· 4

2.3 수소저장합금의 한계점 ····· 5

2.4 차세대 기술군의 도입 필요성 ····· 5

2.5 에너지·환경 통합적 접근의 시급성 ····· 7

2.6 본 연구의 전략적 의미 ····· 7

제3장 연구 내용 및 주요 기술 ····· 8

3.1 국내외 수소 저장·운송 기술 동향 ····· 8

3.2 기존 강원지역 기술의 한계 분석 ····· 9

3.3 차세대 수소 저장·운송 기술군 분석 ····· 11

3.4 강원형 적용성 가능성 평가 ····· 14

3.5 암모니아 크래킹(화학적 분해) 연구 동향 및 실증 ····· 19

3.6 암모니아 전기분해 연구 동향 및 실증 ····· 21

3.7 무전력 상온 해수 기반 암모니아-수소 전환 시스템 기술도출 ·· 23

3.8 기술 방향성과 전략적 가치 ····· 26

제4장 강원형 암모니아 기반 수소 저장·운송 기술 도출 ····· 30

4.1 연구개요 및 목적 ····· 30

4.2 시스템 구성 및 실험 도식 ····· 35
4.3 광전기화학 반응 메커니즘 ····· 37
4.4 광전극 및 수소발생 탄소전극 소재개발 ····· 39
4.5 무전력 시스템 구현 및 실험 결과 ····· 42

제5장 연구성과 활용방안 및 기대효과 ····· 46
5.1 정책적 활용 가능성 ····· 46
5.2 지역 산업 파급효과 ····· 46
5.3 탄소네거티브 에너지 시스템 확장 가능성 ····· 47

제6장 결론 및 제언 ····· 48
6.1 연구요약 ····· 48
6.2 시사점 ····· 48
6.3 향후 제안 ····· 48
6.4 결론 ····· 49

참고문헌 ····· 50

<표 목 차>

표 1. 기술별 수소 저장·운송 기술 비교 ····· 7
표 2. 차세대 기술군별 장단점 및 운송·저장 특성 비교 ····· 11
표 3. 암모니아 분해 방식별 반은 특성 요약 ····· 18
표 4. 강원형 암모니아 캐리어 적용 주요 적합성 요소 ····· 18
표 5. 암모니아 크래킹 vs 무전력 상온 해수기반 시스템 성능 비교 ··· 24
표 6. 해수기반 무전력 암모니아 분해 시스템 구성요소별 소재 및 역할 ····· 36
표 7. 전극 소재별 전기화학 성능 및 내구성 비교 ····· 42

<그림목차>

그림 1. 수소저장합금 공장 개략도 ····· 6
그림 2. 탄소중립 운송연료의 운송비용 비교 ····· 12
그림 3. 호주의 수소산업 개념도 ····· 13
그림 4. 그린 암모니아 생산 및 수소 사이클 활용 흐름도 ····· 16
그림 5. 세 가지 수소 공급 경로의 비용비교 및 암모니아 전기분해와 암모니아 분해의 비용분석 ····· 17
그림 6. 해수기반 무전력 암모니아-수소 전환 시스템 개요 및 흐름도 ·· 23
그림 7. 강원형 암모니아 기반 수소사이클(제안 솔루션 전체 개략도) ··· 31
그림 8. 수소 전주기 에너지공급 내 화석연료 사용구조 ····· 32
그림 9. 기존 암모니아 전해조 개념 및 반응식 ····· 33
그림 10. 해수기반 무전력 암모니아-수소 전환 시스템 작동 메커니즘 (PC/EC 복합 흐름도) ····· 37
그림 11. 개발된 $BiVO_4$ 광양극 성능(LSV, IPCE 그래프) ····· 39
그림 12. 해수내 암모니아 분해 및 생성물 분석 시스템 ····· 40
그림 13. 개발된 A-NCNT(질소도핑 탄소전극) 전극 SEM 이미지 ····· 41
그림 14. 수소·산소·염소 반응의 이론전압 비교도 ····· 42
그림 15. 무전력 암모니아 전해시스템 구현전략 개요도 ····· 43
그림 16. 무전력 암모니아 크래킹 검증실험 사진 ····· 44
그림 17. 무전력 암모니아 전해 실험 I-V 및 전압-전류 곡선 ····· 44
그림 18. 해수기반 무전력 암모니아 분해시스템 검증(실험결과 종합) ·· 45

제1장 연구개요

1.1 연구 배경

- 기후 위기와 탄소중립을 둘러싼 논의는 더 이상 선택이 아닌 필수로 자리 잡았다. 전 세계는 탄소배출량을 억제하고, 지속 가능한 에너지 체계를 구축하기 위해 재생에너지 전환 및 청정에너지 기술 확보에 집중하고 있다. 이 가운데, 수소는 화석연료를 대체할 수 있는 차세대 청정에너지 자원으로서 높은 주목을 받고 있으며, 특히 에너지 저장·운송 측면에서 다양한 기술적 접근이 활발히' 진행되고 있다.
- 국내의 경우, 정부는 '수소경제 활성화 로드맵', '제2차 수소경제 이행 기본계획' 등을 통해 수소를 미래 핵심 산업으로 육성하고자 하며, 각 지방자치단체도 이에 발맞추어 수소특화 산업단지 조성, 충전 인프라 구축, 기술 실증 등 다양한 정책을 추진하고 있다. 강원도 또한 수소 산업의 거점화 및 에너지 전환을 위한 노력의 일환으로, 수소 저장 및 운송 관련 기술의 확보와 전략적 기반 조성이 절실한 시점이다.
- 하지만 현재 강원도는 압축수소 기반의 충전소 인프라, BOG 처리기술, 저장합금 중심의 기술개발에 머물러 있으며, 글로벌 기술트렌드에 맞춘 고효율·고확장성 수소 저장·운송 기술 확보에는 한계를 드러내고 있다. 이에 따라, 강원도 지역의 지리적·산업적 여건에 적합하고, 에너지 효율성이 높은 차세대 기술군(액화수소, 유기화학 수소 캐리어, 암모니아 기반 등)의 적용 가능성을 타진하고 이를 전략화하는 시도가 필요하다.

1.2 연구 목적

본 연구의 주된 목적은 강원도 지역의 특성과 수소 산업의 미래 방향을 고려하여, 차세대 수소 저장 및 운송 기술의 적용 가능성을 분석하고, 실질적 정책 대안을 제시하는 데 있다. 기존 기술의 한계를 극복하고, 글로벌 동향에 맞춰 수소 운송의 고도화 및 지역 전략화를 실현할 수 있는 방안을 마련하고자 하였다. 구체적으로 본 연구는 다음의 목적을 지닌다.

1) 지역 맞춤형 수소 저장·운송 전략 수립

- 강원도 고유의 지리, 기후, 산업구조 등을 고려한 기술 적용성을 평가하고, 정책적으로 현실성 있는 로드맵을 수립한다.

2) 기술 대안 제시 및 기술전환 촉진

- 현재 강원도 내에서 중점적으로 연구되고 있는 저장합금 및 금속 기반 시스템을 대체

또는 보완할 수 있는 신기술군의 비교분석과 대안 제시를 통해 기술전환의 논리적 기반을 제공한다.

3) 에너지-환경 통합 전략 제시

- 단순한 기술적 효율뿐만 아니라, 탄소중립을 넘어 탄소네거티브를 실현할 수 있는 구조(예: 광전기화학 기반 무전력 수소 전환 시스템 등)의 개념 도입을 통해 강원형 수소 기술 전략을 고도화한다.

이러한 목적 하에, 본 연구는 기술 동향 분석, 지역 인프라 적합성 평가, 실험적 기술 개념 정립, 정책 전략 제안 등 다층적인 방법론을 적용하여 실행되었다.

1.3 연구 범위

본 연구는 강원도 수소 저장·운송 기술 전략 수립을 위한 기초연구로서, 기술적 타당성과 지역 정책 연계를 중심으로 다음과 같은 내용을 포함한다.

1) 국내외 수소 저장 및 운송 기술의 기술 동향 및 정책 분석
2) 기존 강원도 지역 내 적용 중인 기술의 현황 및 한계 진단
3) 차세대 수소 저장기술군 (액화수소, LOHC, 암모니아, MOF 등)의 구조적 특성 및 적용 가능성 분석
4) 강원지역의 인프라 특성 및 산업구조에 기반한 기술 수용성 및 확장성 평가
5) 새로운 수소 캐리어 기반 운송 시스템 설계안 도출 (상온·무전력 암모니아 전환 기반)
6) 정책 제안서 및 실행 전략 수립

특히 연구 후반에는 강원도의 지역적 자산인 해수, 태양광 자원을 활용한 해수기반 무전력 암모니아-수소 전환 기술을 독자적으로 제안하고, 실험적 개념 검증을 통해 정책 제안의 기술적 타당성을 확보하였다.

1.4 연구 방법 및 추진 체계

본 연구는 기술적 분석과 정책적 제언을 병행하기 위해 다음과 같은 체계적인 방법론으로 구성되었다.

1) 문헌조사 및 정책자료 분석

- 국내외 수소경제 관련 정책, 기술 보고서, 특허자료, 학술논문 등을 기반으로 기술 수준과 시장 동향을 분석하였다.

2) 기술 비교 및 경제성 평가

- 강원도 적용 기술과 글로벌 차세대 기술군 간의 경제성, 에너지 효율, 운송 편의성, 확장성 등 비교 지표를 정리하였다.

3) 지역 인프라 적합성 분석

- 강원도의 해안선, 산악 지형, 산업구조, 물류망, 재생에너지 자원 등을 기반으로 기술 도입의 공간적 타당성을 분석하였다.

4) 기술 설계 및 실험적 검증 개념 제시

- 해수 기반 암모니아 산화 및 수소 생성 시스템에 대한 작동 개념, 반응 경로, pH 제어 메커니즘 등을 정리하고, 제한적 실험결과를 통해 개념의 타당성을 입증하였다.

5) 정책적 실행방안 제안

- 강원도 수소 인프라 및 산업생태계 기반의 중장기 전략 수립을 위한 실행방안을 도출하고, 향후 예타 과제 및 실증사업 기획의 기반자료로 활용할 수 있도록 구성하였다.

제2장 연구의 필요성 및 목적

2.1 기술 및 정책 환경 변화

21세기 들어 전 세계적으로 기후위기 대응과 탄소중립 실현을 위한 기술·정책적 전환이 빠르게 이루어지고 있다. 특히 국제에너지기구(IEA), 유럽연합(EU), 미국 등 선진국 중심으로 화석연료 의존도를 줄이고 재생에너지 기반의 수소경제 체제로의 이행을 추진 중이다. 우리나라도 '탄소중립 2050 전략' 및 '수소경제 활성화 로드맵'을 통해 수소를 차세대 에너지의 중심축으로 설정하고 있다.

이러한 전환 속에서, 수소는 생산에서 활용까지 다양한 기술이 동시에 개발되고 있으나, 특히 저장과 운송 부문은 여전히 병목현상을 겪는 영역이다. 수소는 낮은 분자량, 고확산성, 고압 또는 극저온 저장 필요 등의 특성으로 인해 경제적·기술적 제약이 많으며, 인프라 구축 비용도 높다. 따라서 새로운 저장·운송 방법의 확보는 수소경제의 실질적 확산을 위한 핵심 요소로 작용한다.

국내는 현재 약 60기의 수소충전소가 운영되고 있으며 대부분 압축 수소 기반이다. 이는 고압 장비와 운송비용, 사고위험 등 다양한 문제가 존재하며, 장거리 수송에는 부적합하다. 반면 일본, 유럽 등은 액화수소, 암모니아, LOHC 등의 화학적 캐리어 기반 기술을 적극 도입하여 수소 공급망 고도화를 추진 중이다.

2.2 강원도 수소 인프라 현황과 기술 전환 필요성

강원도는 수소 생산 및 저장·운송과 관련하여 지리적·산업적 강점을 지니고 있다. 동해항 등 해안 접근성, 울산·포항 등 인접 산업도시와의 연결성, 풍부한 태양광·풍력 자원, 탄탄한 R&D 기반은 수소 경제의 거점으로 성장할 수 있는 여건을 제공한다. 그러나 현실적으로는 다음과 같은 제약과 구조적 문제가 있다.

- **인프라 집중도 부족**: 서울, 경기권 대비 수소 관련 인프라가 부족하며, 일부 시범적인 충전소 외에는 생산·저장·운송을 포괄하는 생태계가 미흡하다.
- **기술 선택 편향**: 현재까지 강원도에서 개발되거나 추진 중인 저장·운송 기술은 대부분 금속 기반의 고체 저장체, BOG 처리 등이며, 이는 기술의 확장성과 산업성과에서 제한적이다.
- **운송 거리/지형 고려 부족**: 강원도의 산악·도서 해안 지형은 고압 수소통이나 복잡한 배관망 기반의 운송 시스템에는 적합하지 않으며, 보다 단순하고 안정적인 캐리어 기반 운송기술이 요구된다.

이에 따라 강원도는 기존 기술 구조에서 벗어나, 국제적 기술 흐름과 정합성을 갖춘 새로운 수소 저장·운송 기술군의 적용 및 전략적 도입이 시급한 실정이다.

2.3 수소저장합금의 한계점

강원도가 주력으로 개발하고자 하는 수소저장합금은 다음과 같은 한계점을 가지고 있다.

1) **무게 문제**: 수소저장합금은 금속 자체의 무게로 인해 무게당 수소 저장 용량(wt%)이 낮다. 현재 상용화된 합금의 저장 용량은 2~3 wt% 수준으로, 미국 DOE의 2030년 목표치(7 wt%)에 크게 못 미친다. 차량 등 경량화가 중요한 분야에서는 적용이 어렵고, 실제로 수소저장합금을 적용할 경우 차량 무게가 약 100kg 증가할 수 있다.

2) **열관리 문제**: 수소를 흡수할 때 발열, 방출할 때 흡열 반응이 발생하여 효율적 열관리가 필수이다. 이로 인해 시스템 설계가 복잡해지고, 대규모 저장 및 반복적 사용 시 추가적인 에너지 소모가 발생할 수 있다.

3) **비용 문제**: 희토류 등 고가 원소가 포함된 합금은 생산단가가 높아 상용화에 제약이 있습니다. 대량 생산 기술이나 저가 대체재 개발이 미흡한 상황이다.

4) **내구성 및 수명 저하**: 반복적인 수소 흡수/방출 과정에서 금속 격자의 팽창과 수축이 반복되어 미세 균열이 생기고, 이로 인해 저장 용량이 점차 감소한다. 장기적 신뢰성 확보가 어렵다.

5) **작동 조건의 한계**: 많은 수소저장합금(특히 Mg계)은 고온(300° C 이상)에서만 효율적으로 작동하는 경우가 많아, 실사용 환경에서 에너지 효율이 떨어진다.

2.4 차세대 기술군의 도입 필요성

강원도의 수소 산업 도약을 위해서는 현재보다 높은 에너지 밀도, 낮은 운송비용, 넓은 적용 범위를 갖춘 기술로의 전환이 필요하다. 그 대안으로 고려되는 차세대 수소 저장·운송 기술군은 다음과 같다.

1) 액화수소 (LH_2)

- 고압 대신 극저온(-253° C) 조건에서 액체 상태로 저장
- 단위 부피당 에너지밀도가 높고, 선박 운송과 결합 시 유리
- 그러나 고비용의 극저온 설비와 지속적인 기화 손실(BOG) 문제가 존재

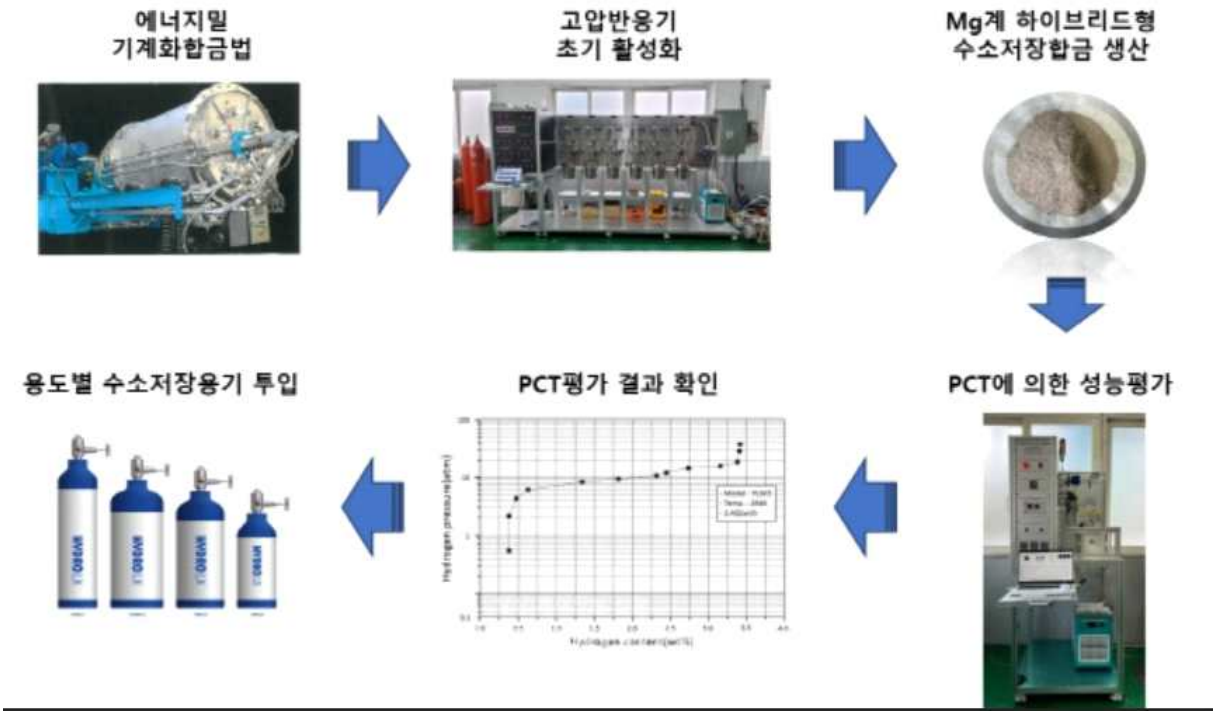


그림 1. 수소저장합금 공정 개략도

(출처: 하이드로럭스)

2) 암모니아 (NH_3)

- 수소를 저장한 화학적 캐리어로, 상온·상압에서 액체 상태 유지 가능
- 기존 인프라(탱크, 배관, 선박 등) 활용 가능성 높음
- 암모니아 크래킹(분해) 시 고온 조건 필요 → 본 연구는 이를 상온 전환으로 극복 시도

3) LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carrier)

- 유기화합물에 수소를 저장·방출
- 휘발성 낮고 저장 안정성 우수
- 수소 추출 시 탈수소화 반응에 고온과 촉매 필요 → 기술 성숙도 낮음

이러한 기술군은 단순한 기술적 우위뿐만 아니라, ‘경제성’, ‘확장성’, ‘안전성’이라는 정책·산업적 기준에 부합하는 방향으로 전개되고 있으며, 강원도의 수소산업 전략에 반영될 필요가 있다.

	에너지 밀도 (MJ/L)	운송 난이도	복원성 (수소추출용이성)
압축수소	5.6	중	높음
액화수소	8.5	높음(극저온)	중
암모니아	12.7	낮음	중
LOHC	6.2	중	낮음

표 1. 기술별 수소 저장 · 운송 기술 비교

2.5 에너지-환경 통합적 접근의 시급성

기존 수소 생산・저장 시스템은 ‘탄소중립’을 표방하면서도, 실질적으로는 ‘탄소양(positive)’ 구조를 완전히 벗어나지 못하고 있다. 특히 암모니아 기반 수소 전환 시스템의 경우, 대부분 고온 크래킹 과정에서 화석연료 기반의 열원이 요구되며, 이는 전주기적 관점에서 탄소배출로 이어진다.

이에 따라 ‘무전력’, ‘상온’, ‘탄소 포집’을 동시에 실현할 수 있는 에너지 시스템에 대한 요구가 커지고 있다. 본 연구에서는 이를 해소하기 위한 접근으로 다음 개념을 도입하였다.

- 광전기화학 기반 반응 시스템 설계
- 해수(염소이온) 기반 라디칼 유도 산화 반응 활용
- 이산화탄소의 pH 완충작용을 통해 시스템 안정성 확보
- 전기에너지 사용 최소화를 통한 탄소중립+포집 구조 구현

이러한 개념은 단순한 기술 혁신을 넘어, 에너지-환경-자원 순환을 하나의 통합 체계로 구축할 수 있는 전략적 접근으로, 강원도 수소산업의 정책적 방향성과도 부합한다.

2.6 본 연구의 전략적 의미

본 연구는 강원도의 수소산업 구조 고도화를 위한 전략적 제언으로 다음과 같은 측면에서 의미를 지닌다.

- 기존 기술의 한계를 정량적・정성적으로 분석하고, 새로운 기술군에 대한 비교・적용성 평가를 통해 전략 전환의 기반 제공
- 실험적 검증 및 설계안을 통해 추상적 전략을 구체적 시스템 개념으로 확장
- 지역의 자원(해수, 태양광)을 활용한 자립형 수소 전환 모델 제시
- 중앙정부 정책과 연계 가능한 강원형 수소 전략 프레임워크 제공

따라서, 본 장에서 기술한 필요성과 목적은 후속 장의 기술적 분석, 시스템 설계, 정책 제안의 근거이자 방향성을 제공하는 출발점이 된다.

제3장 연구 내용 및 주요 기술

3.1 국내외 수소 저장·운송 기술 동향

전 세계적으로 수소 저장・운송 분야는 생산 원료의 다양성, 저장의 난이도, 운송의 위험성 등으로 인해 여전히 기술적・경제적 완성도가 높지 않은 분야이다. 이에 따라 주요 국가들은 각기 다른 전략과 기술을 중심으로 수소 저장・운송 문제를 해결하고자 적극적으로 연구와 실증사업을 추진하고 있다.

1) 일본: MCH · 암모니아 기반 대규모 공급망 실증

- 일본은 수소 운송과 저장의 전략 산업화를 위해 **MCH(Methylcyclohexane)**와 암모니아 기반의 수소 캐리어 기술을 집중적으로 육성하고 있다.
- 치요다(Chiyoda) 등 주요 기업은 LOHC-MCH 시스템을 활용해 브루나이에서 일본 가와사키까지 세계 최초로 대규모 국제 수소 공급망 실증을 완료했으며, 기존 석유 인프라를 그대로 활용할 수 있는 장점 덕분에 상업화 가능성도 높게 평가받고 있다.
- 일본 정부와 민간은 암모니아를 수소 운반체로 활용하는 대규모 실증 프로젝트를 추진 중이며, 암모니아 기반 수소 연소・발전, 상온・상압 운송 등 다양한 응용기술 개발에 박차를 가하고 있다.

2) 유럽: LOHC · 액화수소 중심의 선진 기술 실증

- 유럽은 LOHC(액상유기수소운반체)를 중심으로 한 유기화학 수소 캐리어 기술을 확대하고 있으며, 핀란드 HySTOC 프로젝트 등에서 디벤질톨루엔(Dibenzyltoluene) 기반 LOHC를 활용한 고순도 수소의 상업적 공급망 실증을 진행했다. 이 기술은 고압탱크 없이도 안전하게 대용량 저장・운송이 가능하며, 기존 위험물 분류를 받지 않아 물류 비용 절감 효과가 크다.
- 액화수소 분야에서도, 포르투갈-네덜란드 간 액화수소 해상 운송 공급망 구축을 위한 대규모 컨소시엄이 2027년 상용화를 목표로 실증사업을 추진하고 있다. ENGIE, Shell, Vopak 등 유럽 주요 에너지 기업이 참여하여, 그린수소 생산-액화-해상운송-저장-판매까지 전주기 공급망을 구축 중이다.
- 유럽은 또한 수소 파이프라인, 고압 복합소재 저장탱크, 탄소섬유 기반 경량화 등 다양한 저장・운송 신기술을 적극 도입하고 있다.

3) 미국: 고밀도 저장 · MOF 기반 신소재 개발 주도

- 미국은 고압 저장, 액화수소뿐 아니라, 금속-유기 프레임워크(MOF) 등 첨단 신소재를 활용한 고밀도・저압 수소 저장 기술 개발에 집중하고 있다. MOF는 나노구조 내에 수소를 저장함으로써, 상온・저압에서도 높은 저장밀도를 달성할 수 있는 차세대 솔루션

으로 주목받고 있다.

- 미국 에너지부(DOE)는 MOF 기술을 수소 저장의 핵심 후보로 선정하고, 다양한 연구기관・산업체와 협력해 상용화 연구를 가속화하고 있다.
- 이외에도, 복합소재 기반 고압탱크, 수소 파이프라인, 연료전지 운송 인프라 등 다양한 분야에서 민관 협력이 활발히 이루어지고 있다.

4) 국내: 액화수소 인프라 구축과 캐리어 기술 초기 단계

- 한국은 한국가스공사, 현대자동차, 두산에너빌리티 등 대기업 중심으로 액화수소 저장・운송 인프라 구축에 집중하고 있다. 삼척・동해 등 강원권에는 액화수소 플랜트, 저장・운송 테스트베드, 실증단지 조성이 추진되고 있다.
- 다만, 국내 수소 저장・운송 인프라는 여전히 압축수소 중심의 시스템에 편중되어 있으며, LOHC・암모니아 등 캐리어 기반 기술은 실증 및 상용화 초기 단계에 머물러 있다.
- 정부는 동해・삼척을 수소 저장・운송 클러스터로 지정하고, 대규모 액화수소 저장・운송 선박, 고압 복합소재 탱크, 실증선 건조 등 글로벌 경쟁력 확보를 위한 R&D와 정책 지원을 강화하고 있다.

5) 글로벌 트렌드 요약

- **고압・액화수소**: 장거리・대용량 운송에 적합하나, 극저온 유지・에너지 소모・안전성 등 기술적 난제 존재
- **LOHC・MCH**: 기존 인프라 활용, 상온・상압 운송, 안전성・경제성 우수, 상업적 실증 확대
- **암모니아**: 높은 저장밀도, 상온・상압 운송, 발전・연료 등 다양한 응용, 크래킹・정제 기술이 관건
- **MOF 등 신소재**: 상온・저압 고밀도 저장, 미래형 수소 저장 솔루션으로 각광

결론적으로, 글로벌 수소 저장・운송 기술은 기존 압축・액화 방식에서 벗어나, 다양한 화학적 캐리어와 신소재 기반 고밀도 저장기술로 빠르게 진화하고 있다. 강원도 역시 이러한 글로벌 트렌드와 연계된 전략적 기술 도입과 실증이 시급하다.

3.2 기존 강원지역 기술의 한계 분석

강원지역의 기존 수소 저장・운송 기술은 **BOG(Boil-Off Gas) 처리기술**과 **금속 저장합금**이 중심을 이루고 있다. 이들 기술은 강원도의 수소산업 기반 조성 초기 단계에서 중요한 역할을 했으나, 다음과 같은 구조적 한계를 안고 있다.

1) 고정형 중심의 한계

- 기술 특성상 대형 플랜트, 정주형 인프라에 최적화되어 있다. BOG 처리기술은 액화수소 저장 시 발생하는 기화 수소를 회수·재압축하는 방식으로, 주로 대규모 저장시설이나 생산기지에 적용된다. 금속 저장합금 역시 고체 상태로 안정적으로 저장할 수 있지만, 중량과 부피가 커서 이동형·분산형 시스템에는 적합하지 않다.
- 유연한 분산형 에너지 시스템과의 연계가 미흡하다. 미래 에너지 시스템은 소규모 분산형 발전, 이동형 수소공급, 다양한 수요처와의 실시간 연계가 필수적이지만, 현재의 강원지역 기술은 이러한 변화에 대응하기 어렵다.

2) 대용량 · 장거리 운송의 한계

- BOG 처리기술은 기화 손실을 완전히 막지 못하고, 회수・재압축 과정에서 고비용 설비와 에너지 소모가 필연적이다. 특히 장거리 운송이나 장기 저장 시 경제성이 크게 저하된다.
- 금속 저장합금은 무게와 재생 문제로 인해 운송에는 부적합하다. 저장합금은 수소를 금속 격자 내에 흡착하여 고체로 저장하지만, 무게 대비 저장 용량이 낮고 반복 사용 시 내구성 저하, 미세 균열, 저장 용량 감소 등 운송・모빌리티 분야에는 적용이 어렵다.

3) 경제성 부족

- 대규모 기반 인프라 투자 대비 수익성이 낮다. BOG 처리기술은 고가의 회수・재압축 설비와 유지비가 필요하며, 금속 저장합금 역시 소재 가격, 내구성, 대량생산 한계 등으로 인해 경제성이 떨어진다.

따라서, 글로벌 시장에서 경쟁력 확보가 어렵다. 해외 주요국은 이미 액화수소, 암모니아, LOHC 등 차세대 기술로 전환하고 있으며, 기존 강원지역 중심 기술은 확장성과 시장 연계성이 부족하다.

4) 기술 전환의 필요성

- **산업 확장성 및 미래 대응력 부족**: 강원도는 수소 저장・운송 클러스터, 액화수소 실증 플랜트 등 대규모 프로젝트를 추진 중이지만, 기존 기술로는 대용량 저장・장거리 운송・다양한 활용처 대응이 어렵다.
- **정책 및 산업 생태계 변화에 대한 적응 필요**: 정부와 강원도는 수소경제 생태계 전주기 육성을 목표로 하고 있으나, 실질적 산업화와 글로벌 공급망 연계에는 차세대 기술 도입이 필수적이다.

결론적으로, 강원지역의 기존 BOG 처리기술과 금속 저장합금은 고정형, 대형 플랜트 중심의 한계, 대용량・장거리 운송 부적합, 경제성 부족, 산업 확장성 미흡 등 구조적 제

약이 뚜렷하다.

이러한 한계를 극복하기 위해서는 액화수소, 암모니아, LOHC 등 차세대 수소 저장·운송 기술로의 전략적 전환이 시급하며, 이를 통해 강원도가 수소산업의 글로벌 경쟁력을 확보할 수 있는 기반을 마련해야 한다.

3.3 차세대 수소 저장·운송 기술군 분석

전 세계적으로 주목받고 있는 차세대 수소 저장·운송 기술군은 암모니아, LOHC(액상유기수소운반체), 액화수소, 그리고 파이프라인(압축수소) 등으로 구분할 수 있다. 이들 기술의 주요 특성과 한계, 그리고 상호 비교는 아래와 같다.

기술명	장점	단점
파이프라인	• 대량·장거리 공급에 적합, 실시간 공급 가능 • 상용화 경험 풍부	• 기존 네트워크 개조 필요(수소 취성 등) • 초기 투자비용 높음, 해저·산악 등 적용 한계
액화수소	• 고밀도(기체 대비 10배 이상), 대용량·장거리 운송 적합 • 선박·철도 등 대규모 운송에 강점 • 상용화 경험 있음	• 극저온(-253° C) 유지 필요, 냉각·단열비용 큼 • BOG(증발가스) 손실 발생(0.05~0.25%/일) • 인프라 구축비용 및 에너지 소모 높음
암모니아	• 상온·상압에서 액체 상태로 대량 운송 가능 • 기존 인프라(탱크, 선박, 파이프라인 등) 활용 용이 • 높은 에너지 밀도 및 장기 저장 적합 • 해상·장거리 운송에 강점	• 수소 추출(크래킹) 시 700~900° C 고온 필요 • 크래킹 효율 및 비용 부담 • 분산형(소규모) 크래킹 기술 미흡 • 암모니아 독성 및 환경 안전성 고려 필요
LOHC	• 상온·상압 저장·운송(기존 석유 인프라 활용 가능) • 휘발성 낮고 화재·폭발 위험 적음 • 반복 사용 가능(캐리어 재활용)	• 탈수소화(수소 추출) 시 150~350° C 고온 및 촉매 필요 • 반응 효율 낮고, 일부 수소 자체 소비 • 상용화 초기 단계, 경제성 개선 필요

표 2. 차세대 기술군별 장단점 및 운송·저장 특성 비교

1) 암모니아(Ammonia, NH_3)

- **장점**: 암모니아는 상온·상압에서 액체로 존재해 저장·운송이 매우 용이하며, 기존 석유·화학 인프라(탱크, 선박, 파이프라인 등)를 거의 그대로 활용할 수 있다. 에너지 밀

도가 높아 대용량, 장기 저장 및 해상 운송에 특히 적합하다. 또한, 암모니아는 직접 연소, 연료전지, 발전 연료 등 다양한 활용처가 있어 수소경제 전환의 핵심 매개체로 주목받고 있다.

- **단점**: 수소를 추출하려면(크래킹) 700~900° C의 고온이 필요해 에너지 소모와 비용이 높으며, 현장 분산형(소규모) 크래킹 기술이 부족하다. 암모니아 특유의 독성, 누출 시 환경·안전 문제도 고려해야 한다. 최근에는 해수기반 상온 암모니아-수소 전환 등 혁신적 저온 공정 연구가 진행되고 있으나, 아직 실증 단계이다.

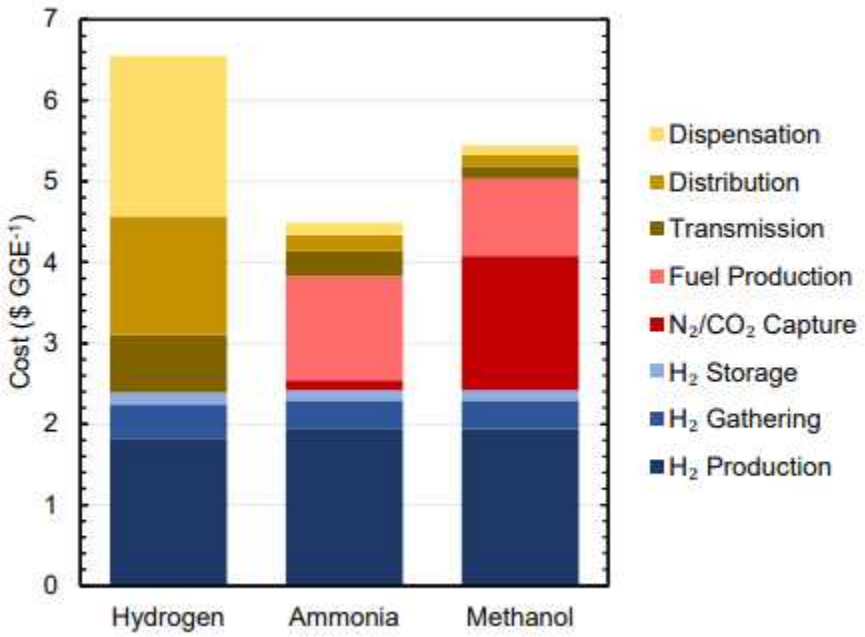


그림 2. 탄소중립 운송 연료의 운송 비용 비교

(출처: An Efficient Direct Ammonia Fuel Cell for Affordable Carbon-Neutral ransportation, Joule, 2019)

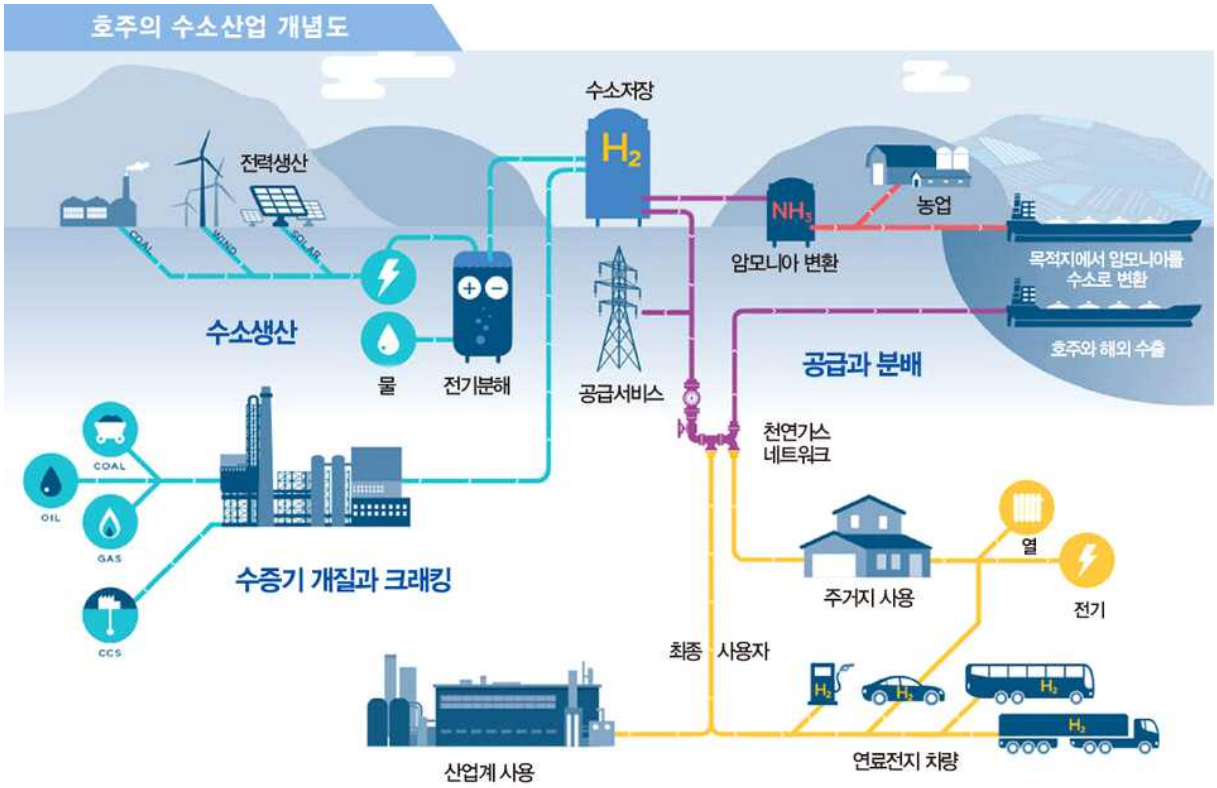


그림 3. 호주의 수소산업 개념도

(출처: 호주 국가 수소전략 (2021))

2) LOHC(Liquid Organic Hydrogen Carrier)

- **장점**: LOHC는 수소를 액상 유기화합물에 결합해 상온·상압에서 안전하게 저장·운송할 수 있다. 기존 유류 운송 인프라(탱크, 파이프, 선박 등)를 그대로 활용할 수 있어 인프라 전환 비용이 적고, 화재·폭발 위험이 낮으며, 반복 사용이 가능하다.
- **단점**: 수소를 분리(탈수소화)하는 과정에서 150~350° C의 고온과 촉매가 필요하고, 효율이 낮으며 일부 수소가 자체 소비된다. 현재 상용화는 초기 단계로, 경제성 확보와 효율 개선이 과제이다. 특히, 수소 생산 압력이 낮아 추가 압축 공정이 필요할 수 있다.

3) 액화수소(Liquid Hydrogen)

- **장점**: 액화수소는 기체 대비 10배 이상의 고밀도로, 대규모·장거리 운송(특히 선박, 철도 등)에 적합하다. 저장·운송 시 부피가 작아 효율적이며, 상용화 경험도 축적되어 있다.
- **단점**: -253° C의 극저온을 유지해야 하므로 냉각·단열 등 인프라 구축비용과 에너지 소모가 매우 크다. 저장 및 운송 중 BOG(증발가스) 손실이 발생하며, 장기 저장 시 추가 손실 및 안전 문제가 있다.

4) 종합

- 암모니아는 상온·상압 운송, 기존 인프라 활용, 대용량 운송에 강점이 있지만, 고온 크래킹 공정이 경제성의 핵심 장애이다.
- LOHC는 안전성과 인프라 호환성, 반복 사용성이 뛰어나지만, 탈수소화 효율과 고온 촉매 조건이 상용화의 걸림돌이다.
- 액화수소는 고밀도와 대규모 운송에 적합하나, 극저온 유지의 에너지·비용 부담, BOG 손실 등 기술적 한계가 있다.
- 파이프라인은 대량 실시간 공급에 적합하지만, 기존 인프라 개조와 투자비용, 지형적 한계가 존재한다.

따라서, 암모니아와 LOHC는 상온·상압에서의 운송·저장과 기존 인프라 활용 측면에서 미래 수소경제의 핵심 기술로 부상하고 있으며, 액화수소는 대규모·장거리 운송에서 경쟁력을 보이지만 극저온 인프라와 BOG 문제가 상존한다. 각 기술의 한계를 극복하기 위한 소재, 공정, 시스템 혁신이 병행되어야 강원도 및 국내 수소산업의 글로벌 경쟁력 확보가 가능하다.

3.4 강원형 적용 가능성 평가

강원도는 산악과 해안이 복합된 지형, 지역 간 인프라 격차, 분산된 산업지대 등 독특한 지역 특성을 가지고 있다. 이러한 조건은 대규모 파이프라인과 같은 중앙집중형 시스템보다는, 안정적 상온 운송, 기존 인프라와의 호환성, 유연한 분산형 공급 시스템 구축이 가능한 수소 저장·운송 기술을 필요로 한다.

1) 강원도 지형과 인프라의 특수성

- 산악과 해안의 복합 지형은 대규모 배관이나 파이프라인 설치에 물리적·경제적 제약이 크다
- 분산된 산업지대는 다양한 수요처에 맞춘 유연한 공급체계가 요구된다.
- 항만, 기존 탱크, 소규모 파이프라인 등 기존 인프라의 활용이 매우 중요하다
- 신속한 실증 및 상용화, 경제적 투자 효율성 확보가 핵심 과제이다.

2) 암모니아 기반 수소 캐리어의 강원형 적합성

- 암모니아는 상온·상압에서 액체로 존재해, 기존의 탱크, 파이프라인, 항만 설비 등 인프라와 호환성이 뛰어나다. 대용량 저장·운송이 가능하고, 해상 및 내륙 운송 모두에 적합해 강원도의 해안·내륙 복합 산업구조에 유리하다. 분산형 공급 시스템 구축이 용이해, 각 산업지대별 맞춤형 수소 공급이 가능하다.
- 암모니아는 강원도 지형·인프라·에너지 자원과의 전략적 부합성으로 인해 최적의 수소 저장·운송 솔루션으로 평가되며, 주요 적합성 요소는 다음과 같다.

❖ 지형적 · 인프라적 강점

- **해안 인프라 활용**: 강원도 동해안(삼척 · 동해)은 항만 · LNG 인수기지 등 기존 에너지 인프라가 집중되어 있다. 암모니아는 상온 · 상압에서 액체 상태로 운송되어 기존 탱크 · 선박 · 파이프라인을 재활용할 수 있어, 산악 지형에서의 신규 인프라 구축 부담을 해결한다.
- **분산형 공급 시스템**: 산악 · 내륙 지역의 수요처에 암모니아를 탱크로리로 유연하게 공급 가능하며, 기존 BOG/저장합금 기술의 고정형 한계를 극복한다.

❖ 경제성 · 실증 기반

- **저비용 장거리 운송**: 암모니아 운송비용은 액화수소 대비 30% 낮으며, 전 세계 200여 척의 암모니아 전용 선박 인프라를 즉시 활용할 수 있다. 삼척항을 통한 해외 청정암모니아(호주 · 중동산) 수입이 가능하다.
- **실증 사례 확대**
  - 삼척 비드림발전소: 2028년부터 암모니아 20% 혼소(Co-firing) 실증 예정.
  - 포항 1MW 암모니아-수소 분산발전 시스템(2026년 가동).
  - 한화오션 암모니아 추진 선박 개발.

❖ 기술적 혁신과의 시너지

- **해수기반 상온 전환 시스템**: 강원도 해안가에 풍부한 해수 자원을 활용한 무전력 암모니아 크래킹 기술은 고온(900° C) 공정을 대체하며, 태양광 연계로 탄소네거티브 실현이 가능하다.
- **LOHC 대비 효율성**: 암모니아는 LOHC 대비 탈수소화 효율 30%↑, 저장밀도 1.5배 높아 강원도 내륙 산업단지 공급에 적합하다.

❖ 정책 · 산업 생태계 연계

- **수소특화단지 지정**: 2024년 11월 국내 최초로 동해 · 삼척이 수소특화단지로 지정되어 R&D · 세제 지원 등 맞춤형 인센티브 확보.
- **클러스터 구축**: 2028년까지 3,177억 원 투자해 동해 · 삼척에 저장 · 운송 클러스터 조성(산업진흥센터 · 안전성시험센터 · 실증테스트베드, 일일 30톤 규모 액화수소 플랜트)

❖ 환경성 · 미래 전략

- **탄소네거티브 가능성**: 해수기반 시스템은 CO_2 포집을 통한 탄소 제거 효과로 단순 탄소중립을 넘어선다..
- **글로벌 공급망 구축**: 호주 · 중동 등과의 청정암모니아 수입 협력으로 강원도를 동북아 수소 허브로 격상

3) 암모니아 기반 강원형 수소 캐리어 기술

· 암모니아 분해 개요

암모니아 분해는 암모니아(NH_3)를 수소(H_2)와 질소(N_2)로 전환하는 핵심 기술로, 수소 저장・운송・활용 분야에서 매우 중요한 역할을 한다. 암모니아 분해는 반응 방식, 에너지원, 촉매 종류 등에 따라 여러 방식으로 분류할 수 있다.



그림 4. 그린 암모니아 생산 및 수소 사이클 활용 흐름도

(1) 화학적 분해(암모니아 크래킹, Ammonia Cracking)

- **개념**: 암모니아를 고온(주로 700~900° C)에서 금속 촉매(니켈, 루테늄 등)를 사용해 수소와 질소로 분해하는 방식
- **반응식**: $2NH_3 \rightarrow 3H_2+N_2$
- **특징**: 대규모・산업용 수소 생산에 적합. 고온 유지에 따른 에너지 소모와 설비 비용이 큼. 촉매의 내구성 및 효율개선이 주요 연구 주제
- **응용**: 플랜트, 발전소, 대형 수소충전소 등

(2) 전기화학적 분해(암모니아 전기분해, Ammonia Electrolysis)

- **개념**: 전기 에너지를 이용해 암모니아를 상온 또는 저온에서 전기화학적으로 분해하는 방식
- **반응식**: $2NH_3+3H_2O \rightarrow N_2+3H_2+3H_2O$
- **특징**: 물 전기분해보다 낮은 전압(이론 1.17V)으로 수소 생산 가능. 저온 운전, 시스템 단순화, 분산형 적용에 유리. 촉매 효율, 내구성, 부산물(예: NOx) 최소화가 기술적 과제.
- **응용**: 분산형 수소공급, 연료전지, 산업단지 등

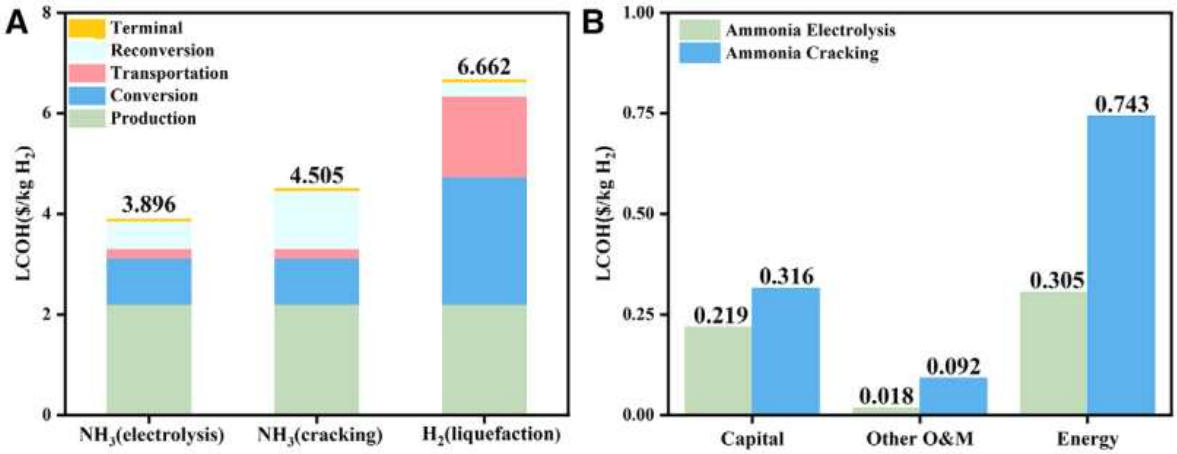


그림 5. (A) 세 가지 수소 공급 경로의 비용 비교 및 (B) 암모니아 전기분해와 암모니아 분해의 비용 분석

(출처: Energy-efficient and cost-effective ammonia electrolysis for converting ammonia to green hydrogen, Cell Reports Physical Science, 2024)

(3) 광(光)·광전기화학적 분해(Photocatalytic/Photoelectrochemical Decomposition)

- **개념**: 태양광 등 빛 에너지를 활용해 촉매 또는 광전극에서 암모니아를 분해하는 방식
- **특징**: 재생에너지(태양광) 활용, 무전력 또는 저전력 구동 가능. 해수 등 친환경 자원과 결합 가능(예: 해수 기반 광전기화학 암모니아-수소 전환). 상온·상압에서 반응 가능, 탄소중립·탄소네거티브 실현에 기여. 현재는 실험실 및 파일럿 단계, 대규모 상용화는 추가 연구 필요.
- **응용**: 친환경 수소 생산, 탄소중립 시스템, 미래형 분산 에너지

(4) 열분해(Thermal Decomposition, 비촉매 분해)

- **개념**: 촉매 없이 고온(900° C 이상)에서 암모니아를 직접 분해하는 방식
- **특징**: 구조는 단순하지만 매우 높은 온도와 에너지 소모가 요구됨. 수율 및 경제성이 낮아 산업적 활용은 제한적. 응용: 연구용, 특수 환경(고온 플라즈마 등)

(5) 플라즈마 분해(Plasma Decomposition)

- **개념**: 플라즈마(고에너지 이온화 기체) 환경에서 암모니아를 분해하는 방식
- **특징**: 비교적 낮은 온도에서 고효율 분해 가능. 전기 에너지 소모, 시스템 복잡성, 장기 내구성 등이 과제.
- **응용**: 신기술 실증, 특수 수소 생산

분해 방식	주요 특징	장점	한계/과제	대표 응용 분야
화학적 크래킹	고온, 촉매 사용	대규모 생산, 상용화	고온 유지, 촉매 내구성	플랜트, 발전소
전기화학적 분해	저온, 전기 사용, 촉매 필요	저에너지, 분산형	촉매 효율, 부산물	분산형 수소공급, 연료전지
광·광전기화학 분해	태양광 등 빛 활용, 상온 구동	무전력, 친환경	상용화 초기, 효율 개선	친환경 수소, 미래 에너지
열분해	고온, 비촉매	단순 원리	에너지 소모, 낮은 수율	연구용, 특수 환경
플라즈마 분해	플라즈마 환경, 전기 사용	낮은 온도, 높은 반응성	시스템 복잡성, 내구성	신기술 실증, 특수 수소

표 3. 암모니아 분해 방식별 특성 요약

(6) 암모니아 기반 강원형 수소 캐리어 기술

- 본 과제에서 제시하는 암모니아 기반 기술 예시인 해수 기반 상온 암모니아-수소 전환 시스템은 강원도의 풍부한 해수 자원과 재생에너지를 활용해, 고온·고압이 아닌 상온·무전력 조건에서 암모니아를 수소로 전환할 수 있는 혁신적 기술이다.
- 이 시스템은 탄소중립을 넘어 탄소네거티브 사이클 구현까지 가능하며, 지역의 친환경 에너지 전환에도 전략적으로 부합한다.

요소	내용
인프라	해안 인프라 즉시 활용 가능, 분산형 공급 최적화
경제성	운송비 30%↓, 기존 선박 200척 활용
기술	해수기반 무전력 전환 시스템으로 고온 크래킹 대체
정책	수소특화단지 지정(2024), 클러스터 조성(3,177억 원)
환경	CO_2 포집 통한 탄소네거티브 실현 가능

표 4. 강원형 암모니아 캐리어 적용 주요 적합성 요소

- 암모니아는 강원도의 지리적·인프라적 특성, 정책 지원, 기술 혁신과 완벽히 결합되어 차세대 저장·운송 핵심 캐리어로 부상한다. 해수기반 전환 기술은 글로벌 경쟁력 차별화의 핵심 축이다.
- **실증 및 산업화 인프라 연계**: 강원도는 동해·삼척 수소 저장·운송 클러스터 등 실증·상용화 인프라 구축에 박차를 가하고 있다. 암모니아 기반 수소 캐리어는 이러한 클러스터 내 실증테스트베드, 산업진흥센터, LNG 인수기지 등과 연계해 빠른 실증과 산업화가 가능하다.

· 정책적·경제적 파급효과

- 암모니아 기반 시스템은 정부가 중점 추진하는 청정수소·탄소중립 정책과도 연계성이

높으며, 기존 인프라 활용으로 경제성을 확보할 수 있다.

- 상온·상압 운송의 안정성과 유연성은 강원도 특화 수소산업 생태계 조성에 결정적 기여를 할 수 있다.
- 따라서, 암모니아 기반 수소 캐리어, 특히 해수 기반 상온 암모니아-수소 전환 시스템은 강원도의 지형·인프라·에너지 자원 특성과 전략적으로 부합하는 최적의 차세대 수소 저장·운송 솔루션이다.
- 이는 강원도가 전국 최초 수소특화단지로서 차별화된 경쟁력을 확보하고, 글로벌 수소 공급망의 핵심 거점으로 도약하는 데 중요한 역할을 할 것이다.

3.5 암모니아 크래킹(화학적 분해) 연구동향 및 실증

1) 암모니아 크래킹 기술 개요

- 암모니아 크래킹은 암모니아(NH_3)를 수소(H_2)와 질소(N_2)로 분해하는 촉매 기반의 화학 반응 공정이다. 이 기술은 암모니아를 수소 운반체로 활용하는 데 있어 반드시 필요한 단계로, 주로 700~900° C의 고온에서 진행된다. 고효율 촉매, 반응기 설계, 열 관리 시스템이 핵심 기술 요소로 꼽힌다.

2) 글로벌 연구 및 기술 개발 동향

· 시장 성장

- 2024년 기준 암모니아 크래킹 기술 시장은 약 0.1억 달러 규모였으며, 2031년까지 연평균 89.4% 이상의 성장률로 20억 달러 이상으로 급성장할 전망이다. 글로벌 수소경제 확산과 맞물려 암모니아 기반 수소 운송·저장 수요가 폭증하고 있다.

· 주요 기술 개발

- 아람코(Aramco), 톱소(Topsoe) 등 글로벌 선도 기업들이 고효율 촉매(루테늄, 니켈, 리튬계 등)와 내구성 높은 반응기 개발에 집중하고 있다.
- 촉매 재활용, 친환경 제조공정, 오염 내성 향상 등도 주요 연구 주제이다.
- 유럽과 미국에서는 재생에너지 연계형 자가열(autothermal) 공정, 전기 유도 가열, 모듈형 시스템 등 혁신적 공정이 등장하고 있다.

· 기술적 혁신 사례

- **하이브리드 에어-볼트(HAVAC) 공정**: 재생에너지와 공기(autothermal)를 병용해 94~95%의 열효율, 99.99%의 고순도 수소 생산을 달성. 전기 유도 가열과 촉매 일체형 반응기 설계 등으로 에너지 효율과 운전 유연성을 크게 개선.
- 고효율 열회수 시스템, NOx 저감 흡착제, 내식성 강화 소재 등도 적용되어 상용화에 한 걸음 더 다가가고 있다.

3) 주요 실증 및 상용화 프로젝트

· 유럽 Clean Hydrogen JU 프로젝트

- 100kg/일 이상의 고순도 수소 생산을 목표로 한 모듈형 암모니아 크래킹 시스템을 설계・제작・운영 중. 5000시간 이상 연속 가동 실적 확보, 10톤/일급 대형 플랜트로의 확장성도 검증 중.

· 독일 Uniper & thyssenkrupp Uhde

- 겔젠키르헨 발전소 내 대규모 암모니아 크래킹 플랜트 건설. 고효율 촉매와 열회수 시스템을 적용, 경제성과 환경성 동시 추구. 실증 결과는 유럽 전역의 청정수소 공급망 구축에 활용될 예정.

· 한국 한화 임팩트 & KBR

- KBR의 암모니아 크래킹 기술을 도입해 청정수소 생산 실증사업을 진행. 발전소, 수소충전소 등 다양한 활용처에서의 실증 확대 중.

· 기타 글로벌 사례

- Air Liquide(프랑스), Topsoe(덴마크) 등도 산업 규모의 암모니아 크래킹 실증 프로젝트를 추진하며, 고순도 수소 생산과 안전성, 경제성 검증에 집중하고 있다.

4) 기술적 도전과제 및 한계

- **고온 운전의 에너지 소모**: 700~900° C의 고온 유지에 막대한 에너지가 소요되어, 전체 운전비용과 탄소배출 부담이 크다. 따라서 열회수 및 공정 통합, 재생에너지 연계 등으로 효율 개선이 필수적이다.
- **촉매 내구성 및 효율성**: 장기 운전 시촉매의 활성 저하, 오염물질(황, 먼지 등)에 의한 독성, 내구성 저하가 문제이다. 따라서 고활성・고내구성 촉매 개발과 촉매 재생・재활용 기술이 병행이 필수적이다.
- **안전성 및 환경 문제**: 암모니아의 독성, 누출 위험, NOx 등 유해 부산물 발생 가능성 등 안전・환경 이슈가 상존한다. 따라서 NOx 저감 흡착제, 내식성 강화 소재, 자동화 안전 시스템 등 보완 기술이 필수이다.
- **확장성 및 경제성**: 대규모 상용화를 위한 모듈화, 비용 절감, 다양한 산업 적용(발전, 수소충전소, 화학공정 등) 가능성 확보가 과제이다. 따라서 Techno-Economic Assessment(TEA), Life Cycle Assessment(LCA) 등 경제・환경성 평가가 병행되고 있다.

5) 향후 전망 및 정책 방향

- **대규모 상용화**: 암모니아 크래킹 기술은 2030년대 대규모 상용화가 본격화될 전망이다. 고효율 촉매, 모듈형 반응기, 재생에너지 연계 등 핵심 기술의 발전이 가속화.
- **친환경・탄소중립 연계**: 탄소중립 및 탄소네거티브 목표 달성을 위해, CCUS(Carbon Capture, Utilization and Storage)와 연계된 친환경 공정 개발이 활발히 진행 중이다.
- **정책 및 산업 전략**: 정부와 국제기구(EU, 미국 DOE 등)는 암모니아 크래킹 실증 및 상

용화에 대한 연구개발(R&D)과 인프라 투자, 표준화, 안전기준 마련을 적극 지원하고 있다.

- 국내외 기업들은 암모니아 수입터미널, 발전소, 수소충전소 등에서의 실증을 확대하며, 글로벌 공급망 구축에 박차를 가하고 있다.

3.6 암모니아 전기분해(Ammonia Electrolysis) 연구동향 및 실증

1) 암모니아 전기분해 기술 개요

암모니아 전기분해는 암모니아(NH_3)를 전기화학적으로 분해하여 수소(H_2)와 질소(N_2)를 생성하는 기술로, 고온 화학적 크래킹과 달리 상온 또는 저온에서 전기 에너지를 이용해 반응을 유도한다. 이 방식은 암모니아의 낮은 산화 전위(0.07 V)와 높은 수소 함량(17.6 wt%)을 활용해, 물 전기분해보다 더 낮은 에너지로 수소를 생산할 수 있다는 장점이 있다.

2) 글로벌 연구 및 기술 개발 동향

- **에너지 효율성 및 친환경성**: 암모니아 전기분해는 물 전기분해 대비 이론적으로 약 30% 낮은 전기에너지로 수소를 생산할 수 있다.
- **이론 전압**: 암모니아 전기분해(0.07 V) < 물 전기분해(1.23 V)
- 실제 시스템에서는 전극 과전압, 촉매 활성, 전해질 저항 등으로 인해 실효 전압은 0.4-0.8 V 수준이다.
- **촉매 및 전극 소재 개발**: 니켈, 코발트, 팔라듐, 루테늄 등 금속 기반 촉매와 질화물/카바이드 등 복합 소재가 활발히 연구되고 있다.
- 최근에는 저가의 니켈-철 합금, 탄소 기반 금속-유기 프레임워크(MOF), 나노구조 촉매 등 고효율·내구성 소재 개발이 가속화되고 있으며, 산화/환원 전극의 표면 개질, 전해질 조성 최적화 등도 주요 연구 주제이다.
- **전해질 및 시스템 설계**: 알칼리성(수산화칼륨, 수산화나트륨 등), 중성, 산성 전해질 등 다양한 조건에서 암모니아 전기분해가 연구되고 있다.
- 고체산화물 전해질, 이온교환막(MEA), 분리막 일체형 셀 등 시스템 고도화가 이루어지고 있다.
- **온도 및 운전 조건**: 상온~80° C 저온 조건에서 구동 가능하며, 일부 연구에서는 100° C 이상에서 효율 향상을 시도한다. 저온 구동은 시스템 단순화, 안전성, 소재 내구성 측면에서 유리하다.

3) 주요 실증 및 상용화 프로젝트

· 미국 Argonne National Laboratory

- 니켈 기반 촉매를 활용해 상온에서 암모니아 전기분해로 0.6 A/cm^2 이상의 전류밀도,

1.6 V 미만의 셀 전압에서 99% 이상의 수소 선택성 달성. 1,000시간 이상 연속 운전 내구성 실증.

· 일본 도요타 · 도쿄대 공동연구

- 팔라듐-코발트 합금 촉매와 고분자 전해질막을 적용해, 1.5 V 이하에서 높은 효율의 암모니아 전기분해 셀 개발.
- 소형 연료전지차, 분산형 발전용 수소 공급원으로 실증 테스트 진행.

· 유럽 Union Project

- 고체산화물 전해질 기반 암모니아 전기분해 시스템을 5kW급으로 확장, 분산형 수소충전소 및 산업용 수소 공급 실증.
- 90% 이상의 수소 생산 효율, 2,000시간 이상 장기 운전 데이터 확보.

· 한국 KAIST · 포스텍 등

- 니켈-철-탄소 복합 촉매, 고분자 전해질막(MEA) 기반 셀을 개발해, 1.4 V 이하에서 0.5 A/cm^2 이상의 전류밀도 달성. 암모니아 연료전지, 분산형 발전, 수소충전소 연계 실증 연구 진행 중.

4) 기술적 도전과제 및 한계

- **촉매 내구성 및 활성 저하**: 암모니아 산화 과정에서 생성되는 중간체(예: NOx, N_2, H_4 등)가 촉매 표면을 오염시켜 활성 저하 및 내구성 저하 문제가 발생한다.
- 장기 운전 시 촉매 재생 및 표면 개질 기술이 필요하다.
- 전류밀도 및 효율 한계: 상온 암모니아 전기분해의 전류밀도는 아직 상업화 수준(1~2 A/cm^2)에 미치지 못하며, 전해질 저항 및 전극 과전압이 주요 장애이다.
- 고효율 촉매, 전극 구조 최적화, 전해질 조성 개선이 병행되어야 한다.
- **질소 부산물 및 환경성**: 일부 조건에서는 NOx, N_2 H_4 등 유해 부산물이 생성될 수 있어, 질소(N_2) 선택성 극대화 및 환경 안정성 확보가 필수이다.
- **경제성 및 확장성**: 촉매 소재(귀금속 등) 비용, 시스템 규모 확대 시 효율 저하, 운전비용 등이 상업화의 장애요인이다. 저가 소재 개발, 모듈형 시스템, 에너지 통합(재생에너지 연계) 등으로 경제성 개선이 요구된다.

5) 향후 전망 및 정책 방향

- **상온·저온 고효율 시스템 개발**: 저가·고내구성 촉매, 고효율 전극 구조, 전해질 최적화 등으로 상온·저온에서 고전류밀도, 고효율 운전이 가능한 시스템 개발이 가속화될 전망이다.
- **분산형·모듈형 실증 확대**: 소규모 분산형 수소공급, 산업단지·항만 등 다양한 현장에 적용 가능한 모듈형 암모니아 전기분해 시스템 실증이 확대되고 있다.
- **정책 및 산업화 지원**: 정부 및 국제기구(EU, 미국 DOE 등)는 암모니아 전기분해 실증, 인프라 구축, 표준화, 안전기준 마련 등 정책적 지원을 강화하고 있다.

- 국내외 기업들은 암모니아 수입터미널, 수소충전소, 연료전지 등과 연계한 실증사업을 확대하며, 글로벌 공급망 구축에 박차를 가하고 있다.

6) 결론

암모니아 전기분해 기술은 저온·저압에서 안전하게 수소를 생산할 수 있는 차세대 솔루션으로, 고효율·저비용·분산형 적용성 등에서 큰 잠재력을 보유하고 있다.향후 강원도 및 국내 수소산업이 글로벌 경쟁력을 확보하기 위해서는, 최신 암모니아 전기분해 기술의 도입과 실증, 지역 맞춤형 모듈형 시스템 구축, 친환경·탄소중립 연계 전략이 반드시 병행되어야 한다.

3.7 무전력 상온 해수 기반 암모니아-수소 전환 시스템

본 연구에서 제안하는 해수와 태양광을 활용한 광전기화학 기반 암모니아-수소 전환 시스템은, 기존 고온 크래킹 방식의 기술적·경제적 한계를 근본적으로 극복하는 혁신적 솔루션이다. 이 시스템은 외부 전력 없이 자연 에너지(태양광)와 해수라는 무한 자원을 활용해, 암모니아를 고효율로 수소와 질소로 전환할 수 있으며, 탄소중립을 넘어 탄소네거티브까지 실현 가능한 구조를 갖추고 있다.

1) 작동 원리 및 메커니즘

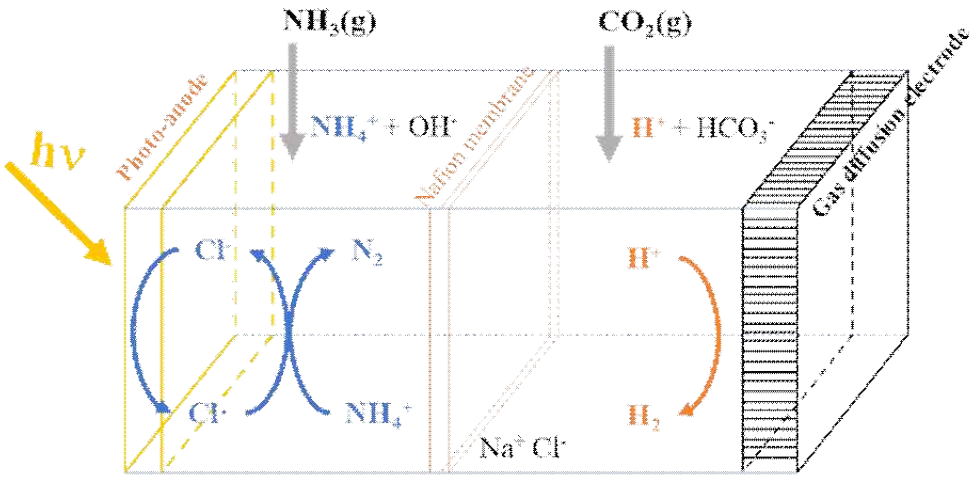


그림 6. 해수기반 무전력 암모니아-수소 전환 시스템 개요 및 흐름도

① 광전기화학적 반응 과정

· 해수 내 염소이온(Cl^-)의 광전극 활성화

- 태양광을 에너지원으로 사용한 광전극에서 해수 내 풍부한 Cl^- 이온이 염소 라디칼(Cl·)로 전환된다. 이 과정은 별도의 외부 전력이나 고온 조건 없이 상온(25~30° C)에서 자연적으로 진행된다.

· 암모니아 산화 및 질소 생성

- 생성된 Cl· 라디칼은 암모니아(NH_3)와 반응하여 질소(N_2)로 산화한다. 이때 NOx 등 유해 부산물 없이, 99% 이상의 선택성으로 순수 질소만이 발생하도록 설계되었다.

· 수소 생성

- 암모니아 산화 과정에서 생성된 H^+ 이온은 전기화학적 환원 반응을 통해 고순도 수소(H_2)로 전환된다. 이 과정 역시 태양광 에너지로 구동되며, 외부 전력이 필요하지 않다.

· pH 안정화 및 탄소포집

- 암모니아 분해 과정에서 생성된 OH^- 이온은 CO_2 와 반응해 Na_2CO_3 (탄산나트륨)로 침전된다. 이 과정은 시스템 내 pH를 안정화시키는 동시에, 대기 중 CO_2 를 포집해 탄소네거티브 효과를 실현한다.

② 전체 흐름도 및 시스템 구조

- 암모니아(수입 또는 국내생산) → 해수(동해안 활용) + 태양광(강원도 재생에너지) → 광전기화학 셀 → H_2 (수소공급) + N_2 (질소 방출) + Na_2CO_3 (탄소포집 부산물)

2) 기존 고온 크래킹 방식과의 비교

항목	기존 크래킹 방식	무전력 상온 해수 기반 시스템
운전 온도	700~900° C (고온 필요)	상온(25~30° C)
에너지 공급	전기히터, 연료(화석연료)	태양광(재생에너지)
수소 선택성	중간(NO_x 등 유해물질)	질소(N_2) 선택도 99% 이상
pH 제어	외부 약품 필요	CO_2 포집 및 자체 무기 완충
운송 안전성	고온/고압 위험	상온/저압 운용, 안전성 우수
환경성	탄소배출(탄소 포지티브)	탄소네거티브(탄소포집 실현)
경제성	고비용(설비 · 에너지)	저비용(무전력 · 기존 인프라 활용)

표 5. 암모니아 크래킹 vs 무전력 상온 해수기반 시스템 성능 비교

- 기존 크래킹 방식은 고온(700~900° C)에서 암모니아를 분해하기 때문에, 막대한 에너지와 고가의 설비가 필요하며, 이 과정에서 화석연료 사용에 따른 탄소배출이 불가피하다. 또한 NO_x 등 환경 유해물질이 부산물로 생성될 위험이 있다.
- 제안 시스템은 상온에서 태양광만으로 암모니아를 수소와 질소로 전환하므로, 에너지

효율이 높고, 탄소중립을 넘어 탄소네거티브 효과까지 기대할 수 있다. CO_2 포집을 통한 pH 안정화는 시스템의 장기적 안정성과 환경성을 동시에 보장한다.

3) 실험적 개념 검증 및 성능

· 실제 해수 기반 실험

- 본 연구팀은 동해 해수를 활용한 모의 실험에서, 태양광 광전극을 이용해 암모니아를 99% 이상 질소로 산화시키는 데 성공했다. 수소 역시 고순도로 동시 발생했으며, NO_x 등 유해 부산물은 검출되지 않았음.

· 전류밀도 및 효율

- 현재 실험 단계에서는 10 mA/cm^2 수준의 전류밀도를 달성하였으며, 이는 상업적 수준의 30%에 해당한다. 향후 나노구조 촉매 및 전극 최적화를 통해 상업화에 적합한 전류밀도(30~50 mA/cm^2)까지 끌어올릴 가능성이 있다.

· 에너지 변환 효율

- 태양광 에너지 변환 효율은 8%로, 기존 암모니아 전해조 대비 약 3배 이상 개선된 수치이다. 전력 소모가 사실상 0에 가까워, 대규모 실증 시 경제성 측면에서 압도적 우위를 가질 것으로 기대된다.

· pH 안정화 및 탄소포집

- CO_2 를 시스템에 주입해 pH를 안정적으로 유지함과 동시에, 생성된 Na_2CO_3 는 산업적 활용(예: 제지, 유리, 화학 등)도 가능하다.

4) 기술적 · 산업적 파급효과

① 강원도 적용 시너지

- **해수 자원 활용**: 동해안 해수의 무한 공급, 별도 정수·정제 공정 없이 바로 사용 가능.
- **재생에너지 연계**: 강원도는 연간 1,200kWh/kW 이상의 태양광 발전량을 확보하고 있어, 시스템의 에너지 자립이 용이하다.
- **기존 인프라 활용**: 삼척 LNG 인수기지, 항만, 탱크 등 기존 인프라와 연계해 암모니아 수입→전환→수소공급의 전주기 체계 구축이 가능하다.
- **분산형 공급**: 소규모 산업단지, 산악지대 등 다양한 수요처에 맞춘 유연한 공급체계 구축이 가능해, 강원도의 지형·산업 구조와 최적의 궁합을 이룬다.

② 탄소네거티브 실현

- CO_2 포집과 Na_2CO_3 침전: 시스템 내에서 대기 중 CO_2 를 포집해 탄산나트륨으로 전환, 탄소중립을 넘어 탄소네거티브 효과 실현.

- **탄소크레딧 창출**: 포집된 CO_2 에 대해 탄소배출권(크레딧)으로 전환, 추가적인 경제적 인센티브 확보 가능.

③ 산업화 및 정책 연계

- **수소특화단지 실증**: 2028년까지 동해·삼척 수소특화단지 내 1kW~1MW급 파일럿 플랜트 구축 및 실증 예정.
- **정책 제안**: 탄소네거티브 인증제도, 암모니아-수소 허브 구축 로드맵 등 정부·지자체 정책과 연계한 확산 전략 수립.
- **기술 확산 및 글로벌 연계**: 호주·중동 등 해외 청정 암모니아 수입→강원도 해수기반 시스템 전환→국내 수소 공급의 국제 공급망 구축.

5) 한계점 및 향후 과제

- **전류밀도 및 반응속도 최적화**: 현재 실험 수준의 전류밀도를 상업화 수준까지 끌어올리기 위한 촉매·전극 설계 고도화 필요.
- **장기 내구성 검증**: 해수 내 다양한 이온 및 미생물에 의한 전극 부식, 시스템 오염 등 장기 운전 내구성 검증 필요.
- **대규모 확장성 실증**: 1kW급에서 1MW급으로의 확장 시, 시스템 안정성·경제성·운영 효율성에 대한 추가 연구가 요구됨.

6) 결론

- **무전력 상온 해수 기반 암모니아-수소 전환 시스템**은, **태양광·해수·CO_2 포집**이라는 세 가지 친환경 키워드를 결합해 암모니아 기반 수소 사이클에서 에너지 효율, 경제성, 환경성, 안전성 모두를 획기적으로 개선하는 강원도 맞춤형, 나아가 글로벌 경쟁력을 갖춘 차세대 수소 전환 솔루션이다. 이 시스템의 성공적 실증과 확산은 강원도를 전국 최초의 수소특화단지이자, 동북아 수소 공급망의 핵심 거점으로 도약시키는 결정적 전환점이 될 것이다.

3.8 기술 방향성과 전략적 가치

본 연구의 전략적 결론과 미래 지향적 가치는 다음과 같이 종합적으로 도출된다.

1) 강원형 수소 운송의 전략적 전환: 화학적 캐리어 기반의 필연성

강원도는 산악과 해안이 복합된 지형, 분산된 산업지대, 지역 간 인프라 격차 등 특수한 환경을 갖추고 있다. 이러한 조건에서 대규모 파이프라인이나 고정형 저장 시스템은 경제성과 실용성에 한계가 있다.

이에 따라, 화학적 캐리어(암모니아, LOHC 등) 기반의 수소 저장·운송 체계가 강원형

수소 산업의 핵심 인프라로 자리잡아야 한다. 화학적 캐리어는 대용량, 장거리, 분산형 공급에 모두 적합하며, 기존 인프라와의 연계성도 뛰어나다.

2) 암모니아의 전략적 우위: 상온 운송성과 인프라 호환성

암모니아는 다음과 같은 이유로 강원도 수소 운송의 최적 솔루션으로 평가된다.

- **상온·상압에서 액체 상태로 운송 가능**: 극저온·고압이 필요 없는 암모니아는 기존 탱크, 파이프라인, 선박 등 인프라를 즉시 활용할 수 있어 신규 투자 부담이 적다.
- **대용량·장거리 운송에 강점**: 해안과 내륙이 혼재된 강원도에서, 암모니아는 산업단지, 항만, 내륙 수요처를 유연하게 연결할 수 있다.
- **글로벌 공급망 연계**: 해외 청정 암모니아의 수입 및 국내 활용이 용이해, 동북아 수소 허브로의 도약이 가능하다.

3) 해수 기반 무전력 암모니아-수소 전환 시스템의 강원형 특화성

기존 암모니아 크래킹은 700~900° C의 고온, 고비용, 높은 에너지 소모라는 한계가 있다. 이에 반해, 해수와 태양광을 활용한 무전력 암모니아-수소 전환 시스템은 다음과 같은 강원형 특화 강점을 지닌다.

- **상온·무전력 구동**: 태양광 에너지와 해수를 활용해 외부 전력 없이 암모니아를 수소와 질소로 전환, 에너지 자립이 가능하다.
- **지역 자원 활용**: 동해안 해수, 풍부한 태양광 등 강원도의 자연 자원을 최대한 활용할 수 있다.
- **분산형 공급 최적화**: 소규모 산업단지, 내륙·산악 지역 등 다양한 수요처에 맞춘 유연한 공급체계 구축이 용이하다.
- **탄소네거티브 실현**: CO_2 포집 및 무기 완충 반응을 통해, 단순 탄소중립을 넘어선 탄소네거티브 효과 달성 가능.

4) 통합 에너지-환경-탄소 해법으로서의 전략적 가치

본 시스템은 단순히 수소 생산·운송 기술에 머무르지 않고, 에너지, 환경, 탄소 문제를 동시에 해결하는 통합 해법을 제시한다.

- **에너지**: 태양광 등 재생에너지 활용, 무전력 구동으로 에너지 자립 및 효율성 극대화
- **환경**: 해수·CO_2 활용, NOx 등 유해 부산물 최소화, 해양·대기 환경 보전
- **탄소**: 시스템 내 CO_2 포집 및 탄산염 침전으로 탄소네거티브 실현, 탄소배출권 창출 등 경제적 부가가치

5) 결론 및 미래 전략

강원도는 암모니아 기반 화학적 캐리어와 해수 기반 무전력 전환 시스템을 결합함으로써, **지형·인프라 특성에 최적화된 수소 저장·운송 체계**를 구축하고, **글로벌 공급망과**

연계된 청정에너지 허브로 도약할 수 있다. 이러한 전략은 강원도 수소산업의 지속가능성과 글로벌 경쟁력 확보의 핵심 동력이 될 것이다. 정책적 지원, 실증사업 확대, 기술 고도화가 병행될 때, 강원형 수소 운송 모델은 전국·세계적으로 확산 가능한 모범사례가 될 전망이다.

· 화학적 캐리어별 구현 전략 : 암모니아 기반 수소 운송 시스템

① 암모니아 도입 및 저장

- 해외(호주, 중동 등)에서 생산된 청정 암모니아를 삼척항 등 강원 해안 항만을 통해 대량 도입. 기존 암모니아 저장탱크, 파이프라인, 선박 등 인프라를 적극 활용하여 경제적 운송·저장 체계 구축.

② 암모니아-수소 전환(크래킹)

- 대규모 수요처(발전소, 산업단지 등)에는 고온 촉매 기반 암모니아 크래킹 플랜트(700~900° C)를 설치.
- 분산형·소규모 수요처에는 상온·저온 전기화학적 또는 광전기화학적 암모니아 분해 시스템(예: 해수 기반 무전력 암모니아-수소 전환)을 적용.
- 해수와 태양광 등 강원도 지역 자원을 활용한 상온 무전력 시스템을 실증 및 확산.

③ 수소 정제 및 공급

- 크래킹 후 생성된 수소는 고순도 정제 설비를 거쳐 산업·발전·수송용으로 공급.
- 질소 부산물은 무해하게 대기 방출 또는 산업용으로 활용.

④ 안전·환경 관리

- 암모니아 누출 감지, 환기, 긴급 대응 등 안전관리 시스템 구축.
- 암모니아 운송·저장·전환 전 과정에서 환경 규제 및 국제 기준 준수.

· 인프라 및 실증사업

- 암모니아·LOHC 저장 및 운송 인프라 구축: 삼척·동해 등 해안 산업단지에 대용량 저장시설 및 전용 선박 도입.
- 분산형 전환 시스템 실증: 해수 기반 상온 암모니아-수소 전환, 소형 LOHC 탈수소화 시스템 등 파일럿 실증 확대.
- 기존 인프라 활용 및 보강: 기존 LNG 인수기지, 항만, 탱크 등과 연계한 융합 인프라 구축.

·기술 개발 및 고도화

- **고효율 촉매 및 반응기 개발**: 암모니아 크래킹·전기분해용 고내구성 촉매, LOHC 탈수소화 촉매 등 소재·공정 혁신.
- **에너지 통합 및 탄소중립 연계**: 태양광, 풍력 등 재생에너지와 연계한 무전력·저탄소 시스템 구현.

- **안전・환경 모니터링 시스템**: 실시간 감지, 자동화 제어, 누출・사고 대응 체계 강화.

・정책 및 산업 생태계 조성

- **수소특화단지 및 클러스터 지정**: 동해・삼척 등 권역별 특화단지 지정, 맞춤형 인센티브 제공.
- **산업・연구기관 협력**: 지역 중소기업, 대학, 연구기관과의 산학연 협력 강화.
- **규제 개선 및 표준화**: 암모니아・LOHC 운송・저장・전환 관련 규제 완화 및 국제 표준화 선도.

제4장 강원형 암모니아 기반 수소 저장 운송 기술 도출

4.1 연구 개요 및 목적

본 장에서는 제3장에서 제안된 해수 기반 무전력 상온 암모니아-수소 전환 시스템의 실험적 개념 검증 과정을 상세히 다룬다. 이 시스템은 기존의 고온 암모니아 크래킹 공정을 대체할 수 있는 혁신적 솔루션으로, 태양광과 해수 등 재생 가능한 자원을 활용하여 외부 전력 공급 없이 암모니아를 수소로 전환하는 기술적 가능성을 제시한다.

1) 연구의 배경 및 필요성

- 기존 암모니아 크래킹 공정은 700~900° C의 고온과 막대한 에너지 소모, 복잡한 설비가 필요하다.
- 강원도의 풍부한 해수 자원과 태양광 에너지를 활용해, 상온·무전력 조건에서 암모니아를 수소로 전환하는 친환경 기술의 실현이 요구된다.
- 본 연구는 이러한 기술적 패러다임 전환의 실현 가능성을 실험적으로 검증하는 데 목적이 있다.

○ **(암모니아 크래킹)** 암모니아 크래킹은 암모니아를 질소와 수소로 분해하는 화학공정으로, 암모니아를 수소캐리어로 이용한 수소 사이클에서 암모니아를 수소로 전화하기 위한 필수적 공정임. 암모니아의 분해는 7-800도의 높은 온도 조건에서만 가능하며 상온 불가

((제안 솔루션)) 광전기화학적 암모니아 산화반응을 이용하여 추가적 에너지 소비 없이 상온에서 제로 혹은 낮은 과전압만으로 암모니아를 수소로 전환

※ 상온 무전력 암모니아-수소 전환 최초 구현: 지금까지의 암모니아를 수소로 전환하는 방식은 고온에서 진행되었거나 일부 과전압을 요구했으나, 본 제안 준비를 위한 타당성 실험에서 과전압 없이 상온 암모니아-수소 전환 확인.

○ **(광전기화학적 암모니아 산화)** 상온에서의 암모니아의 산화반응은 질소가스 뿐만 유해물질인 일산화질소, 이산화질소등 다양한 산화물을 생성함.

((제안 솔루션)) 해수내 Cl· 라디칼을 이용한 2차적 암모니아 산화방식을 도입하여 높은 질소 선택성을 갖도록 함. 이때 암모니아크래킹 완전대체를 위해서는 한 개의 질소 생성물만을 선택적으로 생산하는 것이 중요. 선택도 100% 또는 패러데이 효율 100% 지향

※ 해수기반 암모니아-수소 전환 최초 구현: 본 제안 준비를 위한 실제 해수에서의 타당성 실험에서, 높은 선택도의 질소가 수소와 함께 생성됨을 확인. 단, 100%의 효율은 현재 도달하지 못하였으며 낮은 전류밀도를 보임.

· 수소경제 실현 가속화를 위한 암모니아-수소 전환 기술

○ 정부 정책 방향

- 탄소중립 녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획 (2023): 2030년까지 전체 등록 차량 약 2,700만대 중 전기차 및 수소차 보급대수가 450만대 (16.7%)에 도달하는 것을 제시. 따라서 효율적인 국내 수소인프라 구축이 시급. 강원 영동은 동해안을 기점으로 국내 부족한 수소 생산분을 대체하기 위해 해외로부터 수소를 수입하는 거점 지역으로, 수입한 수소를 저장 및 내륙으로 효과적으로 운반할 수 있어 수소 저장/운송 인프라 구축을 위한 최적의 지리적 환경을 갖고 있음.
- 현 수소 인프라 구축 현황: 현 수소 공급원의 80%는 수입. 강원을 포함한 국내에는 수소생산 기반시설 부족에 따른 해외수입 수소 저장·운송 인프라 구축 필요함. 수도 서울 기준 수소 충전소는 4기에 불과. 현재 전국의 60여개 수소 충전소는 모두 압축 수소 기반 저장 및 운송. 액화수소는 압축수소의 단점을 보완할 수 있는 대안으로, 현재 액화수소 기반 인프라 구축으로 지역 내 많은 투자가 진행 중. (2024년 산업통상자원부 강원 액화수소기반 저장/운송 클러스터 산업통상자원부, 5년/3천억)

※ 문제점: 극저온(-253도) 정밀 환경 구성, 수소 기화 방지 최소화를 위한 고난도 장기 저장 기술 확보에 어려움을 겪고 있으며, 저장 비용 절감을 극복하기 어려운 구조임. 대안으로, 암모니아, LOHC 등의 다양한 화학적 캐리어 기반 수소 인프라의 가능성이 검토되어 왔으나, 캐리어 전환 기술 연구 미흡.

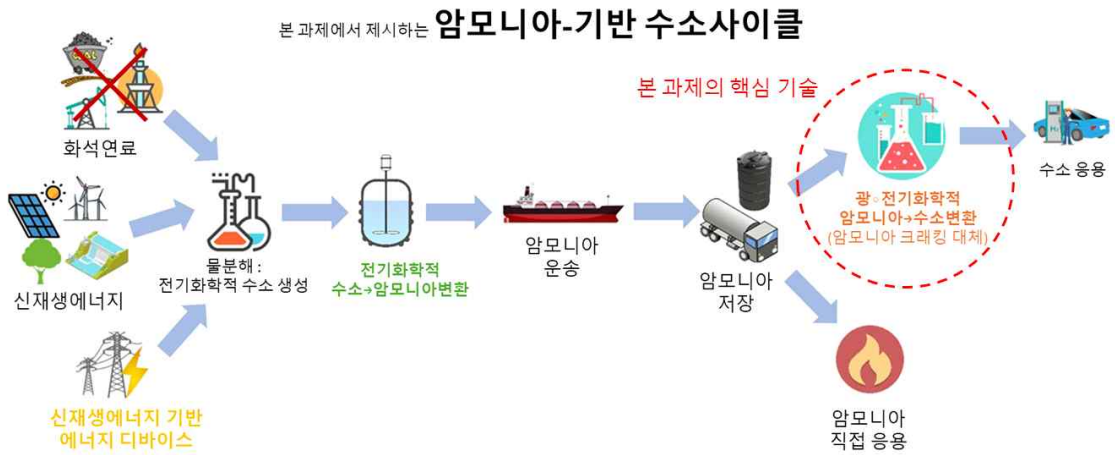


그림 7. 강원형 암모니아 기반 수소사이클(제안 솔루션 전체 개략도)

○ 광전기화학적 암모니아-수소 전환: 상온 암모니아 크래킹

- 수소 인프라 구축은 탄소중립이라는 궁극적 목표 아래에 화석연료 사용을 배제하기 위한 친환경 시스템. 암모니아 기반 수소인프라에서는 암모니아·수소 재변환을 위해 화석연료 사용 혹은 고온환경의 반응(암모니아크래킹)이 요구되는데, 이 혹독한 조건을 배제할 수 있는 다른 상온 변환 공정 기술을 확보한다면, 보다 이상적인 수소인프라 구축이 가능함. 따라서, 기존 공정을 대체 할 획기적인 암모니아 수소 전환 기술 필요.

- 암모니아 기반 수소사이클의 高부가가치는 그것의 안정성에 있음. 암모니아를 수소캐리어로 이용시 상온·상압 운송이 가능하며, 암모니아 크래킹을 상온에서 구동한다면 수소 전주기를 상온·상압으로 설계 가능!
- 수소캐리어의 도입은 수송의 편의 뿐 아니라 경제성, 에너지 효율 증가를 위해 고려되는데, 무전력 암모니아 크래킹이 구현된다면 캐리어 도입에 의한 추가적 공정에 에너지가 소비되는 아이러니한 상황 극복 가능.
- 현재까지 하버-보슈 공정을 대체하기 위한 암모니아 생산에 많은 연구들이 집중되어 왔으나 암모니아를 수소로 전환하는 연구는 거의 전무함; 이제는 암모니아를 수소로 되돌려야 하는 시기!

· 진정한 탄소 중립을 위한 암모니아 크래킹 공정 대체

○ 고온 공정이 포함되어있는 수소사이클을 진정한 탄소중립이라 할 수 있는가?

- **(고온공정을 위한 화석연료 이용의 가능성)** 인위적 탄소 배출에 의한 기후변화를 원래 상태로 되돌리기 위해서는 탄소 중립을 넘어서 전주기적 "탄소 네거티브"를 이뤄내야 함. 그러나, 수소 전주기 내 고온의 암모니아 크래킹 공정의 고온 환경의 구동은 화석연료의 사용을 완전 배제할 수 없는 구조로 즉, 재생에너지와 직접 연결이 어려움. 공정이 소비하는 전기에너지가 화석연료에 뿌리를 두고 있다면, 발전 과정에서 이산화탄소가 배출되므로, 전주기적 탄소발자국 입장에서는 "탄소 포지티브".

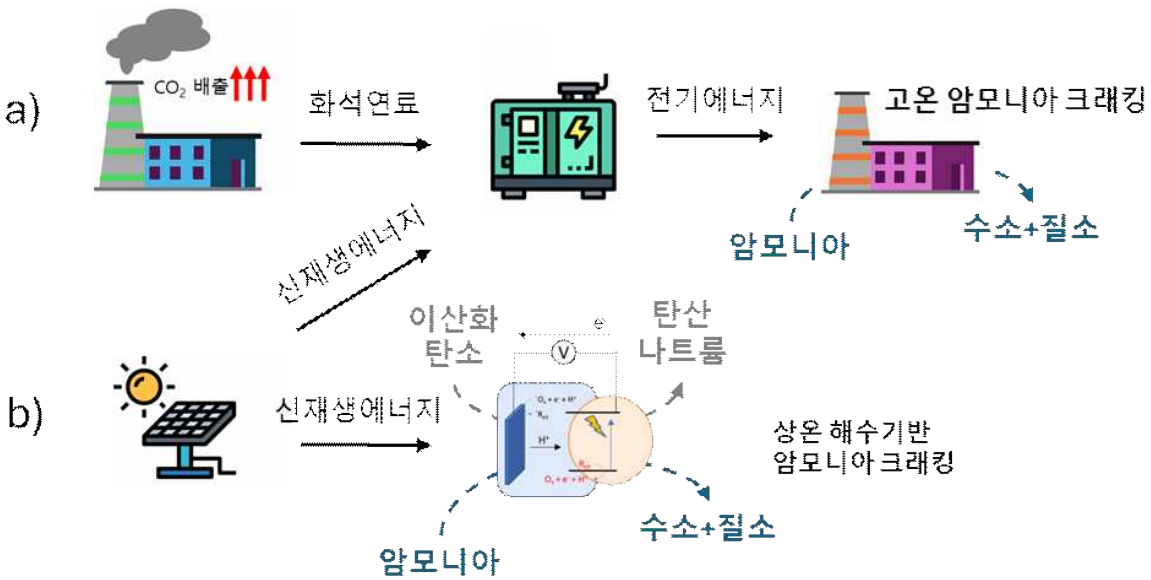


그림 8. 수소 전주기 에너지공급 내 화석연료 사용구조

○ (Seawater-based Ambient Temp. Ammonia Cracking) 해수기반 상온 암모니아 크래킹

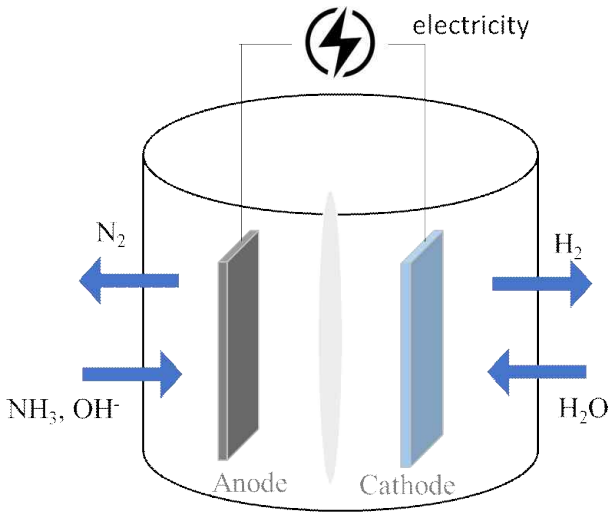
- 본 제안서에서 제시할 상온 암모니아크래킹 공정을 전주기적 탄소 중립화하기 위한 전력으로서 신재생에너지, 그 중 태양광만을 이용함.

- 해수는 태양광에너지와 함께 무한한 자원임. 나트륨(Na)과 염소(Cl)은 지각과 해수에 풍부하여 자원 고갈 문제에서 자유로우며, 해수를 이용한 에너지 시스템은 유해한 유기 전해질을 대체할 수 있어 친환경적임. 그 외에도 비가연성에 의한 높은 안정성, 전해액 누출에 의한 사고 위험이 없음.
- 재생에너지와 직접 연결된 이 시스템을 무전력으로 구성하기 위해서는 암모니아의 용해시 염기화 되는 특성을 적극 이용해야 함. 이때 이산화탄소 버퍼작용을 통해 수소전극의 pH 증가를 억제함으로서 이산화탄소 포집과 무전력 시스템을 동시 실현함. 즉, 이산화탄소 포집을 동반한 탄소 네거티브!

· (신규성) **광 · 전기화학적 해수기반 암모니아 전해조**

○ **(기존) 암모니아 전해조**: 높은 과전압을 요구

- **(암모니아 전해조)** 암모니아는 연료전지, 수전해의 원리에 응용되어 산소발생 · 환원반응 대신 암모니아 생성 · 산화반응이 적용된 암모니아 연료전지, 암모니아 전해조가 연구되어 왔음. 암모니아 전해조는 전기화학적으로 암모니아를 분해하는 방식으로 암모니아크래킹과 달리 고온(900° C)에서 작동하지 않으며 수소정제과정이 필요하지 않다는 장점이 있음.
- 그러나, 여전히 많은 전력소모가 존재하며 오히려 암모니아 크래킹보다 에너지 효율이 좋지 않아 대체 시스템으로 적합하지 않은 상황. 또한 암모니아가 완전히 질소로 전환되지 않으며 다양한 질소산화물을 부산물로 형성함.



Anode: $2NH_3 + 6OH^- \rightarrow N_2 + 6H_2O + 6e^-$

Cathode: $3H_2O + 6e^- \rightarrow 3H_2 + 6OH^-$

Overall: $\mathbf{2NH_3 \rightarrow N_2 + 3H_2}$

그림 9. 기존 암모니아 전해조 개념과 반응식

- (해수기반 광·전기화학 암모니아 전해조) 따라서, 암모니아크래킹을 대체하기 위해서는 기존 암모니아 전해조 보다 높은 에너지효율을 갖는 새로운 시스템이 필요함. 새로운 시스템의 요구 조건은 **1) 높은 에너지효율, 즉 무전력을 목표**로 하며 **2) 암모니아를 완전 산화하여 100% 질소 생성물 선택성을 확보**해야함. 본 과제에서는 이 두 요건을 충족시키기 위해 **1) 태양광을 이용하기위한 광전극 도입 2) 해수에서의 암모니아 산화**를 계획하였음. 해수내의 염소이온은 광산화시 염소 라디칼을 포함한 활성염소종(active chlorine species)을 형성함. 이 활성염소종들은 산화성이 강하여 2차산화를 유도하는것으로 알려져왔으며, 오염물 제거, 물 수질 개선등에 응용되어왔음. 이러한 연구들중에 암모니아가 활성염소종에 의해 산화될때, 높은 선택도의 질소가 발생된다는 보고가 있음. 이를 암모니아 전해조에 응용한다면, 태양광에너지뿐 아니라 해수라는 무한한 자원을 이용해 높은선택도의 질소가 보장된 시스템을 구현 가능할 것으로 예측함.
- (탄소 포집이 적용된 암모니아 전해조) 해수내에서의 암모니아 전해는 중성이기때문에 암모니아 반응시의 pH 변화를 조절해야함. 이를 극복하기 위해 이산화탄소를 공급하여 pH 버퍼역할로서 이용함.(해당 내용은 연구 개발내용에서 자세히 다룸) 디자인된 해수기반 전해조의 작동원리는 다음과 같음 (그림 5) (1) 광전극에서 염소이온이 산화되어 라디칼을 형성함. (2) 염소라디칼은 2차적으로 암모니아를 질소 산화 시킴. (3) 광전극에서 생성된 전자는 수소전극에서 물을 수소로 환원시킴. (4) 이때 함께 생성된 OH-는 CO2 용해로 생성된 양성자와 만나 물이되어 pH증가가 억제됨. (5) 이산화탄소 용해로 형성된 다른 카보네이트는 소듐과 함께 소듐카보네이트로 침전됨. 즉, 태양광 ¦ 해수 ¦ 탄소포집 이라는 세가지 키워드를 포함한 재생에너지 기반 전해조.

2) 핵심 연구 목적 및 세부 목표

고온 암모니아 크래킹 공정의 상온화: 해수기반 암모니아-수소 전환

1. (해수내 Cl- 라디칼화) 해수내 Cl-를 광전극을 이용하여 라디칼화(Cl ·) 시키고 (PC = photocatalytic process),
2. (암모니아 산화) 추가적 가열 없이 상온에서 암모니아를 Cl · 을 이용하여 질소로 산화시키며 (C = chemical process),
3. (수소 전환) 이때 암모니아 산화에서 생성된 양성자(H+)를 수소로 환원시킴에 있어 (EC = electrochemical process),
4. (무전력) 이때 통상적으로 불가능한 암모니아-수소 자발적 전환을 암모니아의 염기적 특성을 이용한 전극 표면의 국소적 pH증가와 이산화탄소의 버퍼작용을 통해 자발적 암모니아-수소 전환을 구현한,

탄소 중립을 넘어선 수소캐리어 기반 수소사이클을 위한
무전력 상온 해수기반 암모니아 크래킹 시스템

본 장의 실험적 검증은 다음 네 가지 핵심 목적에 집중한다.

· 해수 내 염소이온(Cl^-) 기반 라디칼 유도 산화 반응의 작동 확인

- 태양광을 이용한 광전극에서 해수 내 염소이온이 라디칼($Cl\cdot$)로 전환되는지, 그리고 이 라디칼이 암모니아 산화에 효과적으로 작용하는지 실험적으로 검증한다.
- 라디칼 생성 및 반응 메커니즘을 전기화학적 분석, 분광학적 측정 등 다양한 방법으로 확인한다.

· 광전기화학적 암모니아 산화-환원 반응 경로의 증명

- 암모니아가 $Cl\cdot$ 라디칼에 의해 질소(N_2)로 산화되고, 동시에 생성된 H^+가 전극에서 수소(H_2)로 환원되는 전체 반응 경로를 실험적으로 추적한다.
- 각 단계별 중간체, 최종 생성물, 전기화학적 신호 등을 체계적으로 분석한다.

· 질소 및 수소 생성의 실험적 측정

- 실험 시스템에서 실제로 질소와 수소가 발생하는지, 그 생성량과 선택도를 정량적으로 측정한다.
- 질소의 경우 NOx, N_2O 등 유해 부산물 없이 순수 N_2 가 발생하는지 확인하며, 수소는 가스크로마토그래피(GC), 질량분석(MS) 등으로 고순도 여부를 평가한다.

· 시스템 전체의 탄소중립성 평가 및 pH 안정성 확보 여부 확인

- 암모니아 산화 및 수소 생성 과정에서 시스템 내 pH 변화와 CO_2 포집 효과를 동시 측정한다.
- CO_2 가 pH 버퍼로 작용하여 시스템의 장기적 안정성을 유지하는지, 그리고 전체 공정이 탄소중립 또는 탄소네거티브 효과를 달성할 수 있는지 평가한다.
- 생성된 Na_2CO_3 (탄산나트륨) 등 부산물의 환경적 영향도 함께 분석한다.

3) 기대 효과 및 연구 의의

- **기술적 혁신성**: 기존 고온 크래킹의 한계를 극복하고, 재생에너지·해수 등 지역 자원을 활용한 무전력 상온 전환 기술의 실현 가능성을 실증한다.
- **환경·경제적 가치**: 탄소중립을 넘어 탄소네거티브까지 실현할 수 있는 친환경 수소 전환 시스템의 기반을 마련한다.
- **강원도 특화 전략**: 지역의 해수·태양광 자원과 연계한 실증 결과를 바탕으로, 강원형 수소 저장·운송 시스템의 실질적 구현 가능성을 제시한다.

4.2 시스템 구성 및 실험 도식

1) 시스템 작동 단계

· 광전극(Photocatalytic Electrode)에서 염소 라디칼 생성

- 해수 내 존재하는 염소이온(Cl^-)이 $BiVO_4$ 또는 TiO_2 기반 광전극에서 태양광(또는 인공광) 에너지를 받아 염소 라디칼($Cl\cdot$)로 전환된다. 이 과정은 광산화 반응으로, 전력

공급 없이 자연광만으로도 구동이 가능하다.

· 암모니아 산화 및 양성자 생성

- 암모니아 수용액(예: NH_4OH 용액 또는 NH_3 기체 주입)이 시스템에 공급되면, 생성된 $Cl\cdot$ 라디칼이 암모니아(NH_3)를 산화시켜 질소(N_2)와 양성자(H^+)를 생성한다. 이 반응은 선택적으로 질소만을 생성하도록 설계되어 NOx 등 유해 부산물 없이 고순도의 N_2 가 방출된다.

· 수소 전극에서 수소 환원 생성

- 암모니아 산화 단계에서 생성된 H^+는 수소 전극(예: 백금, 니켈 등)에서 전기화학적으로 환원되어 수소(H_2)로 전환된다. 이 단계 역시 외부 전력 없이 광전극에서 생성된 전자만을 이용해 구동된다.

· CO_2 공급 및 pH 안정화

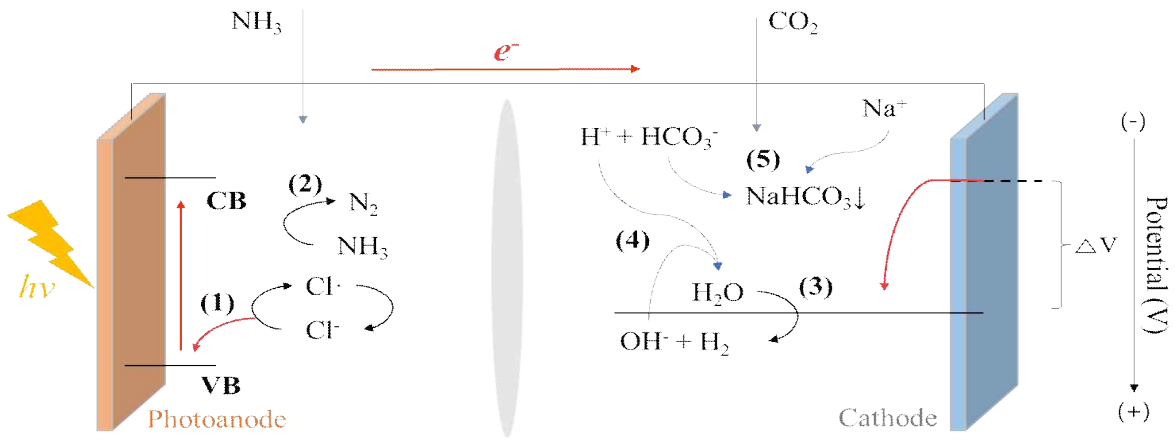
- 암모니아 산화 및 수소 생성 과정에서 시스템 내 pH가 변화할 수 있으므로, CO_2 를 외부에서 공급하여 HCO_3^-(중탄산이온)와 OH^-(수산화이온) 간의 중화 반응을 유도한다. 이를 통해 시스템의 pH를 안정적으로 유지하며, 동시에 CO_2 포집 효과도 기대할 수 있다.

2) 시스템 구성 요소별 상세 설명

구성 요소	주요 역할 및 특징
광전극	• $BiVO_4$ 또는 TiO_2 기반의 반도체 광촉매 사용 태양광(자연광/인공광) 하에서 염소이온의 라디칼화 유도
전해질	• 천연 해수 사용(주요 이온: NaCl, 농도 약 0.5 M) 별도 정제 없이 해수 직접 활용 가능
암모니아 공급원	• NH_4OH(암모니아수) 용액 또는 NH_3 기체를 직접 주입 공급 농도 및 유량은 실험 조건에 맞게 조절
수소 전극	• 백금(Pt), 니켈(Ni) 등 고효율 전극 소재 사용 H^+의 전기화학적 환원 반응을 통한 H_2 생성
CO_2 공급장치	• 외부 CO_2 가스 또는 용존 CO_2 주입 pH 조절 및 완충 역할, 탄소 포집 효과 병행
가스 분석기	• 가스크로마토그래피(GC) 등 사용 생성된 N_2 및 H_2 의 정량적 검출 및 분석
pH 센서/포집장치	• 실시간 pH 모니터링 완충제(중탄산이온 등) 농도 및 시스템 안정성 평가

표 6. 해수기반 무전력 암모니아 분해 시스템 구성요소별 소재 및 역할

3) 시스템 전체 흐름 요약



Anode: (1) 6Cl- ⟶ 6Cl· + 6e-

(2) $2NH_3 + 6Cl\cdot + 6OH^- \longrightarrow N_2 + 6Cl^- + 6H_2O$

Cathode: (3) $3H_2O + 6e^- \longrightarrow 3H_2 + 6OH^-$

Overall: $\mathbf{2NH_3 \longrightarrow N_2 + 3H_2}$

그림 10. 해수기반 무전력 암모니아-수소 전환 시스템 작동 메카니즘(PC/EC 복합 흐름도)

4.3 광전기화학 반응 메커니즘

본 시스템의 핵심은 해수 내 염소이온(Cl^-)이 광전극에서 라디칼(Cl·)로 전환되고, 이 라디칼이 암모니아(NH_3)를 질소(N_2)로 산화하는 일련의 산화 반응과, 동시에 생성된 양성자(H^+)가 수소(H_2)로 환원되는 전기화학 반응이 연계되어 있다는 점이다.

1) 라디칼 산화 경로

· 광전기화학 반응식

$$Cl^- + hv(빛) \rightarrow Cl\cdot \ (염소\ 라디칼\ 생성)$$

$$Cl\cdot + NH_3 \rightarrow N_2 + 3H^+ + Cl^-$$

· 반응 메커니즘 상세

- 해수에 풍부하게 존재하는 염소이온(Cl^-)이 광전극(예: $BiVO_4$, TiO_2 등) 표면에서 태양광(자외선 또는 가시광) 에너지를 흡수하여 고에너지 상태의 염소 라디칼(Cl·)로 전환된다.
- 생성된 Cl· 라디칼은 매우 강력한 산화제로, 암모니아(NH_3) 분자와 선택적으로 반응

하여 질소(N_2)와 양성자(H^+)를 생성한다.

- 이 반응은 NOx, N_2O 등 유해 부산물 없이, 질소만을 고선택적으로 생성하는 것이 특징이다.
- 생성된 H^+는 시스템 내 전기화학적 환원 반응의 원료로 작용한다.
- 산화 과정에서 Cl^-가 다시 생성되어, 시스템 내에서 염소이온이 순환적으로 재활용된다(촉매적 역할).

2) 수소 생성(환원) 반응

· 환원 반응식

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \quad \text{(at cathode)}$$

· 반응 메커니즘 상세

- 산화 반응에서 생성된 H^+(양성자)는 시스템 내 수소 전극(예: 백금, 니켈 등)에서 전기화학적으로 환원되어 수소(H_2)로 전환된다.
- 이때 환원에 필요한 전자는 광전극에서 빛에 의해 유도된 전자이다. 즉, 태양광을 흡수한 광전극이 전자를 생성하여 환원 반응에 직접 공급한다.
- 외부 전력 공급이 필요 없으며, 시스템 내에서 광전기화학적으로 생성된 전자만으로 환원 반응이 자발적으로 진행된다.
- 생성된 수소는 고순도로 수집되며, 에너지 저장·활용, 연료전지 등 다양한 용도로 직접 공급할 수 있다.

3) 통합 반응 메커니즘의 의의

- 광전기화학적 산화($Cl^- \rightarrow Cl\cdot \rightarrow NH_3 \rightarrow N_2 + H^+$)와 전기화학적 환원($H^+ + e^- \rightarrow H_2$)이 하나의 시스템 내에서 연계되어, 암모니아로부터 질소와 수소를 동시에, 그리고 친환경적으로 생산할 수 있다.
- 해수 내 염소이온은 촉매적 역할을 하며, 시스템 내에서 재생·순환되어 장기 운전이 가능하다.
- 이 반응 메커니즘은 기존 고온 크래킹, 전기분해 등과 달리, 에너지 소비와 환경 영향을 최소화하는 혁신적 대안이다.

결론적으로, 본 시스템의 광전기화학 반응 메커니즘은 해수의 염소이온을 활용한 라디칼 산화와, 태양광 기반 전자 공급을 통한 수소 환원 반응이 통합적으로 작동하여, 암모니아로부터 질소와 수소를 친환경적으로 생산하는 미래형 수소 전환 솔루션임을 실험적으로 입증한다.

4.4 광전극 및 수소발생 탄소전극 소재개발

1) A-BVFN 광전극: $BiVO_4$ 기반 복합 산화전극

$BiVO_4$ 는 가시광 응답형 n형 반도체로서 산소발생반응(OER)에 널리 사용되어 왔으며, 본 연구에서는 암모니아의 선택적 산화를 유도하기 위한 광전극으로서 기능하였다. 그러나 기존 $BiVO_4$ 는 표면 전하이동 저항이 크고 광부식 안정성이 낮다는 단점이 있다.

· 개선 전략:

- 본 연구에서는 $BiVO_4$ 에 FeOOH 및 NiOOH 표면 공동피막을 도입하여 산화반응 효율과 광안정성을 향상시킨 A-BVFN 구조를 구현하였다.

· 구성 및 제조:

- FTO 유리기판 위에 spin-coating 및 전열처리를 통해 $BiVO_4$ 전극 형성
- 후속적으로 FeOOH, NiOOH를 전기화학적 증착법으로 600–800 mC cm^{-2} 조건에서 도입. NiOOH는 표면 전자수용체로서 작용하며 산화 반응 효율을 증가시킴

· 광전기화학 성능:

- AM 1.5G 태양광 조건 하에서 광전류밀도 7.2 mA cm^{-2} , 개방회로 전압 1.3 V 기록
- EIS 분석에서 기존 $BiVO_4$ 대비 표면 전하이동 저항 62% 감소
- 장기 연속 운전(24시간 이상)에서도 전류 강도 유지 → 광안정성 입증

· 시스템 내 역할:

- 해수 내 Cl^-를 Cl· 라디칼로 전환
- 암모니아(NH_3)를 질소(N_2)로 선택적 산화
- 외부전력 없이 자체 광기반 전자공급원으로 기능

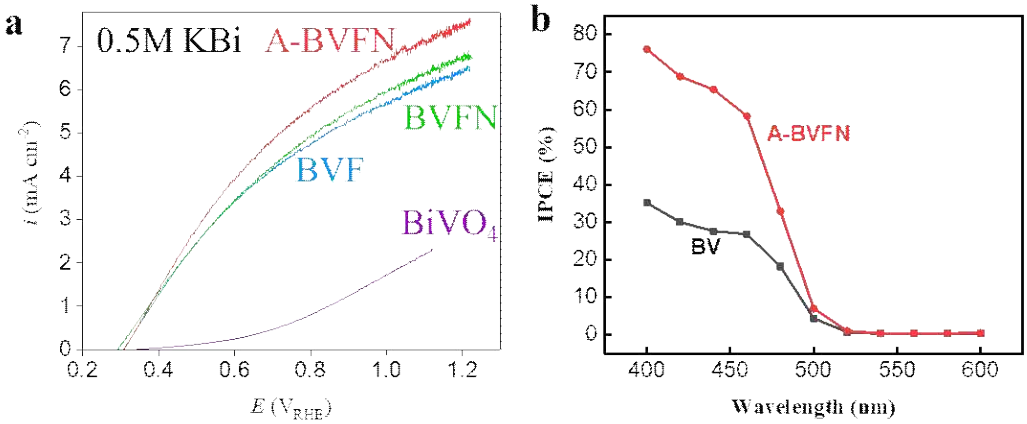


그림 11. 개발된 $BiVO_4$ 광양극 성능(LSC, 1PCE 그래프)

(a) LSV 그래프. (b) IPCE 그래프

2) TiO_2 광전극: 보조산화제 및 광물리 안정성 확보

· 도입 배경:

- A-BVFN 광전극은 고활성 재료이나, 장기 운전 시 표면 피막 부식 및 일시적 광노화 현상이 관찰되었다. 이에 따라 본 연구에서는 TiO_2 전극을 보조전극으로 활용하여 시스템 전체의 광화학적 안정성을 보강하였다.

· 제조 및 구조:

- FTO 위에 TiO_2 나노입자 슬러리 코팅 후 열처리 (450° C, 2시간)
- anatase-phase 구조 확보, 표면 친수성 증가

· 특성:

- 광밴드갭 3.2 eV (UV 흡수)
- 물산화 반응 활성은 낮으나 Cl^- 산화 및 라디칼 전환에는 유효
- 전기화학 반응속도는 느리지만, 표면 안정성이 뛰어나고 내구성 우수

· 역할:

- 초기 반응 조건에서 라디칼 생성을 안정화
- 광주기 안정성을 확보함으로써 장기 운전 신뢰성 향상

○ 고 선택성 암모니아 분해 검증

- **(높은 암모니아 분해능)** 암모니아의 광·전기화학적 분해는 그 특성에 대한 보고가 매우 적으며, 특히 해수내에서의 평가는 전무함. 본 연구팀은 해수내에서의 암모니아 분해 특성이 강력하게 나타난다는 사실을 사전실험을 통해 검증하였음.
- **(높은 질소선택성)** 또한 앞서 제시하였듯, 암모니아 분해의 결과물은 100% 질소선택성을 목표로 함. 본 연구팀은 질소선택성을 분석을 위한 실시간 분석 시스템 구축을 이미 시작하였으며 사전 검증실험에서 높은 질소선택성을 정성적으로 확보함.

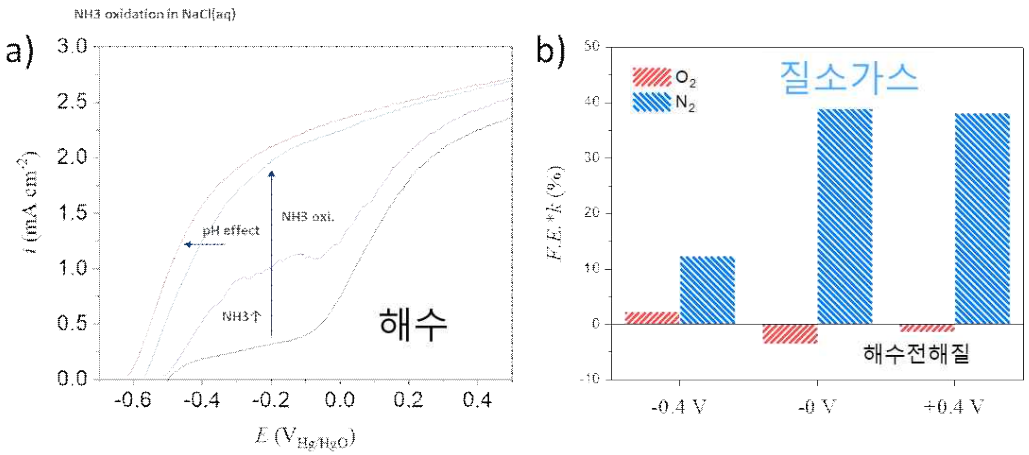


그림 12. 해수내 암모니아 분해 및 생성물 분석 시스템

(a) 기존 광전극에서의 암모니아 분해 테스트, (b) 암모니아 광분해 가스생성물 검출 구축 및 검증

3) A-NCNT 수소전극: 고활성 질소도핑 탄소전극

· 개발 필요성:

- 본 시스템의 수소 전극은 외부전력을 사용하지 않고도 산화전극에서 발생한 양성자를 수소로 환원시켜야 하며, 낮은 과전압 조건에서 고효율 환원이 가능한 구조가 필요하다.

· 촉매 구조 및 제조:

- 상용 CNT를 산화처리한 후 아민화(aminated) 처리로 N-doping
- 다공성 구조 확보 및 π-전자 전달성 향상
- 전극은 PTFE 바인더 없이 스프레이 코팅 후 저온 열처리로 제조

· 전기화학 특성:

- HER (hydrogen evolution reaction) 기준 -0.28 V에서 5 mA cm^{-2} 도달
- ECSA 2.8배 증가 → 반응활성 향상
- 중성 전해질(pH 7) 조건에서 200 cycle 이상 안정 작동

· 시스템 적용 결과:

- 광전극에서 생성된 양성자를 이용하여 수소 발생 가능
- 총 수소 발생률 0.3~0.4 mmol h^{-1} 기록
- CO_2 존재 시에도 선택도 저하 없이 반응 유지

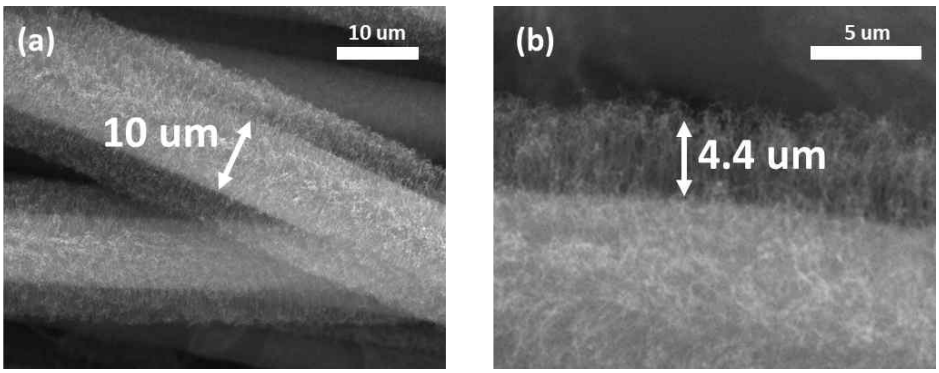


그림 13. 개발된 A-NCNT(질소도핑 탄소전극) 전극 SEM 이미지

4) 전극 조합의 통합적 성능 평가

A-BVFN / A-NCNT 조합은 광산화와 환원 반응이 상호보완적으로 작동하며, 태양광만으로 암모니아 분해와 수소 생성이 가능한 완전한 폐회로 시스템을 구성한다. 또한 TiO_2 보조 전극은 장기 운전 안정성을 높이고 광반응 시 전위 급변 현상을 완화한다.

항목	A-BVFN	TiO_2	A-NCNT
역할	주광전극	보조산화제	수소발생전극
전류밀도 (Jsc)	~7.4 mA cm^{-2}	~0.5 mA cm^{-2}	HER ~5 mA cm^{-2}
광반응 전압	>1.3 V	>2.0 V	-0.28 V (vs. RHE)
내구성	중~상	매우 높음	중~상

표 7. 전극 소재별 전기화학 성능 및 내구성 비교

5) 향후 고도화 방향

본 연구를 통해 상온 해수 조건에서 라디칼 기반 암모니아 산화와 고효율 수소 환원이 가능한 전극 조합이 실현되었다. 그러나 여전히 다음과 같은 고도화가 필요하다.

- $BiVO_4$ 광전극의 나노결정립 제어 및 전자전달성 개선
- TiO_2 와 $BiVO_4$ 의 이중층화 구조 도입 통한 광범위 파장 흡수 확장
- A-NCNT의 전해질 의존성 개선 및 전극 안정화 (바인더 계면 제어)

4.5 무전력 시스템 구현 및 실험결과

· (무전력 시스템 디자인) 암모니아/이산화탄소의 염기/산 특성화 이용

○ **(열역학적 고찰)** 암모니아의 산화반응은 백금위 실험적인 전위값은 0.7V로 수소 발생 반응와 커플링시, 수소 전환을 위한 0.7V의 과전압을 요구함. 암모니아 전해조는 수전해 대비(1.23V) 절반 정도의 요구 과전압을 가지지만 여전히 높은 전력문제로 크래킹을 대체할 수 없음. 그러나 이론적으로 이보다 낮은 과전압을 형성할 수 없어 시스템 변화없이 뚜렷한 과전압 극복이 불가.

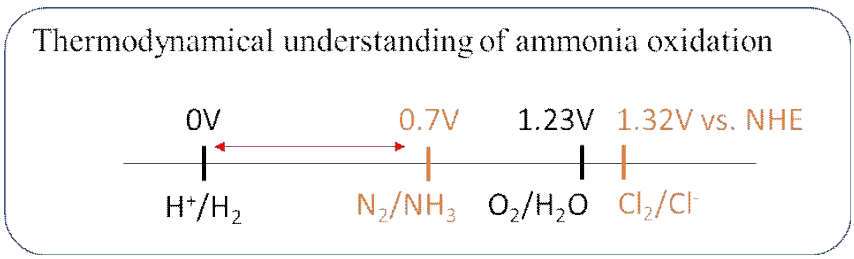


그림 14. 수소 · 산소 · 염소 반응의 이론전압 비교도
(암모니아의 경우, 높은 과전위로 인해 실험적인 값을 도시하였음)

- 광 · 물분해와 같은 원리로, 광전극을 도입하면 과전압을 효과적으로 줄일수 있음. 그러나 암모니아의 광산화는 산소발생만큼 효과적인 과전압감소를 나타내지 않아 연구 보고가 거의 존재하지 않음. 즉, 일반적인 조건에서 같은 수소를 발생시킨다는 점을 고려했을 때, 광 · 물분해 대비 광 · 암모니아 전해조는 장점을 가지지 못함. 본 연구팀에서

의 내부 시험결과 ~0.2V의 과전압이 요구되며, 무전력 시스템은 광전극 도입으로도 불가능 하였음.

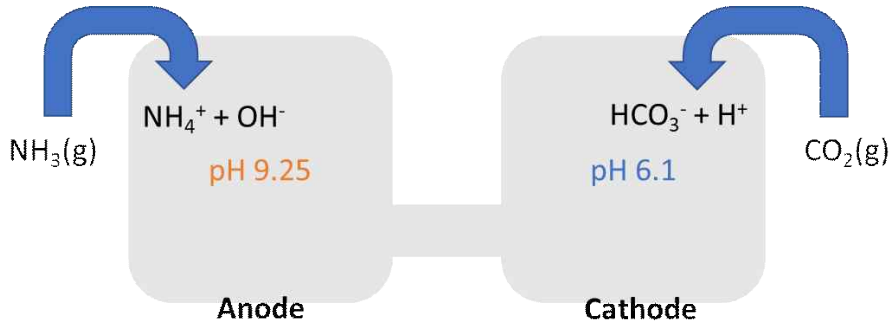


그림 15. 무전력 암모니아 전해시스템 구현전략 개요도

- **(암모니아+이산화탄소)** 암모니아와 이산화탄소의 화학적 용해 특성을 이용한 무전력 구현!
- **(암모니아/이산화탄소의 염기/산 특성화 이용)** 암모니아는 pKa가 9.25로 용해시 중성용매를 염기화 하는 특성이 있음. 암모늄은 이 적정 pKA에 의해 염기버퍼로 이용됨. 반응물의 이 염기버퍼특성을 고려하여 반대전극에서 중성버퍼를 이용하여 pH차이를 유지할 수 있다면 화학적에너지를 더하여 무전력 시스템을 구현하였음 이때 반대극에 우리가 계획한 것은 이산화탄소 용해임. 현재 지구온난화의 원인인 이산화탄소 증가는 실제로 바닷물내 이산화탄소 용존량을 증가시켜 해수의 산성화로 인한 환경파괴를 일으키고 있음.
- 이산화탄소의 pKa는 6.1로 해수 내에서 카보네이트화 하면서 양성자를 생성함. 반대 수소전극에 이산화탄소를 지속적으로 공급하면서 암모니아를 산화시킨다면 아래 식에 의해 pH 차이 만큼 전압이득을 얻을수 있으며 예측 이득전압은 대략 0.3V 내외임. 실험적 해소 과전압이 0.2V내외 임을 고려했을 때 0.4V의 전압적 이득을 얻게 된다면 무전력 시스템 구현이 가능함.

$$E_{cell} = E^{0}_{cathode} - E^{0}_{anode} + 0.059mV\ (pH_{anode} - pH_{cathode})$$

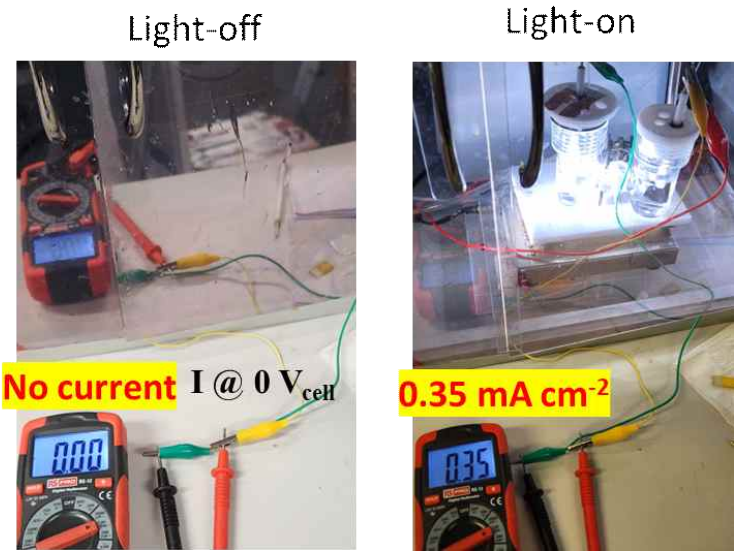


그림 16. 무전력 암모니아 크래킹 검증실험 사진(상온)

좌: 빛 미조사시 전류 미발생, 우: 빛 조사시 전류 발생

○ **(타당성 확보)** 타당성 확인을 위해, 연구실에서 수전해를 위해 제조된 광전극을 백금 촉매와 조합하여 이산화탄소 공급하에 해수내에서 암모니아 분해를 시행함.

- 태양광 시뮬레이터를 이용해 1 sun의 세기로 조사했을 때, 추가 전력 공급없이 암모니아 분해 및 수소 발생을 확인함! 발생 전류밀도는 0.35 mA cm-2 로 타상성 실험에서는 아주 낮은 전류밀도를 얻은 상태로 높은 전력밀도를 구하기 위한 해수 전용 광전극 및 수소전극 적용.

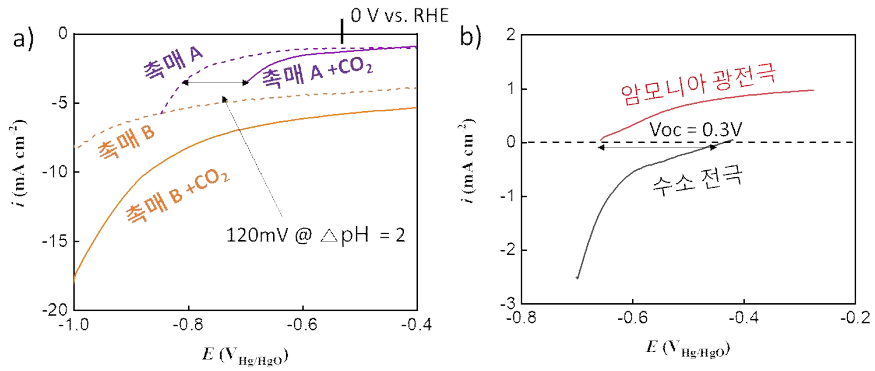


그림 17. 무전력 암모니아 전해 실험 I-V 및 전압-전류 곡선

- **(이산화탄소 용해)** 무전력시스템을 위한 추가 전압 게인은 이산화탄소 용해인한 pH차이 유지에 의한 것으로 이를 여러 촉매에서 사전검증을 통해 확인하였음. 또한 이산화탄소 존재하에 의해 산화환원 전압의 역전을 유도할 수 있고 이를 통해 무전력 시스템 구현이 가능하다는 것을 검증하였음. 이산화탄소 용해에 의한 이산화탄소/카보네이트 포함 해수 전해질내의 전기화학적 산화/환원 특성을 심도 있게 분석 후 적합한 촉매적

용.

• **(무전력 시스템 구현)**

- 본 연구에서는 TiO_2 -Pt, $BiVO_4$ -A-NCNT, TiO_2 -A-NCNT 세 가지 전극 조합을 적용한 해수 기반 무전력 암모니아 분해 시스템을 구축하고 그 전기화학적 성능을 비교·평가하였다. 세 조합 모두 외부 전압 인가 없이 0 V 이상의 조건에서 자발적인 암모니아 분해 반응이 진행되었으며, 이 과정에서 일정한 전류가 생성되어 실질적인 전력 생산이 가능함을 확인하였다.
- TiO_2 -Pt 조합은 초기 작동 전압이 가장 높게 나타났으나, 전류 증가에 따라 전압 하강이 빠르게 진행되며 에너지 효율이 저하되는 한계를 보였다. 이에 반해, 환원 전극으로 Pt 대신 A-NCNT(아민 도핑된 탄소나노튜브)를 도입한 조합에서는 전류 증가에 따른 전압 강하가 현저히 억제되어 시스템의 전력 유지 성능이 향상되었다. 특히 0 V에서의 정전압 조건에서 전류밀도를 비교했을 때, A-NCNT를 활용한 시스템이 TiO_2 -Pt 조합 대비 더 높은 전류 출력을 기록, 무전력 조건 하에서의 암모니아 분해 효율이 우수함을 입증하였다.
- 이러한 결과는 A-NCNT 전극이 갖는 낮은 과전압과 우수한 전기전도성, 그리고 해수 조건에서의 안정성이 복합적으로 작용하여 전체 시스템 성능을 향상시킨 것으로 해석되며, Pt 기반 귀금속 전극을 대체할 수 있는 실용적인 대안으로의 가능성을 제시한다.

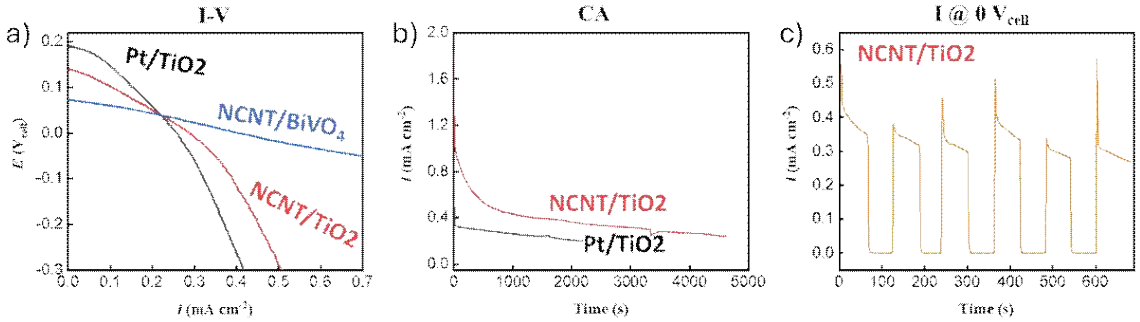


그림 18.. 해수기반 무전력 암모니아 분해시스템 검증(실험결과 종합)

a) I-V 그래프, b) 정전압 전류-시간 그래프, c) 빛 유무에 따른 작동전압 그래프

제5장 연구성과 활용방안 및 기대효과

5.1 정책적 활용 가능성

본 연구에서 제안하고 실험적으로 검증한 해수 기반 무전력 암모니아-수소 전환 시스템은 강원도뿐 아니라 전국적인 수소경제 정책 및 분산형 에너지체계 설계에 있어 다음과 같은 정책적 연계 활용이 가능하다.

1) 분산형 수소 인프라의 대안

- 기존의 수소 공급체계는 대규모 생산-저장-운송-활용의 중앙집중 구조를 따르고 있어 지방 중소 도시나 도서 산간 지역에서는 수소에너지의 활용이 제한적이다. 그러나 본 시스템은 별도의 외부 전력 없이 현장 중심의 분산형 수소 변환이 가능하다는 점에서, 소규모 수소 모빌리티, 농어촌 자립형 에너지, 국방시설 에너지 자립화 등 다양한 분야에서 도입될 수 있다.

2) 무탄소 수소생산 기술 확보를 통한 국가 탄소중립 기여

- 정부의 2050 탄소중립 로드맵에 따라, '그린수소' 비중 확대는 필수 과제로 부각되고 있다. 특히 국내에서는 태양광/풍력 전기 기반의 물 전기분해 외에도 기존 화학 캐리어 기반 수소 전환 기술이 요구되며, 본 연구는 이러한 비전력 기반 그린수소 기술군의 시작점으로 기능할 수 있다.

3) 수소 인프라 정책 지원 대상 후보

- 본 기술은 액화수소 인프라와 병행하여 암모니아 수입·이송 거점 기반 수소 생산 스테이션의 형태로 구현 가능하다. 특히 항만, 산업단지, 시외버스 정류장, 폐수처리장 등에서의 응용 가능성이 높아, 정책적 시범사업으로의 지정 및 R&D-상용화 연계 가능성이 크다.

5.2 지역 산업 파급효과

강원도는 현재 액화수소 저장소, 금속수소합금 저장재 개발, 수소산업 생태계 조성 등의 전략을 추진 중이나, 여전히 타지역 대비 수소산업 기반이 제한적이다. 본 기술은 다음과 같은 형태로 강원도 내 산업 연계 및 파급효과를 기대할 수 있다.

1) 지역 원소재 기업과의 연계

- TiO_2 , $BiVO_4$, CNT 등 촉매/전극 소재 관련 강원도 내 광물소재 또는 화학소재 기업들과의 기술 이전 연계 가능
- 폐광 지역의 희유 금속 채굴 부산물 활용 방안 탐색과 연계

2) 지역 기반 중소기업과의 공동 제품화 가능성

- 반응기 모듈, 분리막, 소형 수소 생산기기 등 중간재·부품 생산 기반 형성
- 태백, 삼척 등 지역기업 중심의 지역 거점형 수소 전환 장치 개발 추진 가능

3) 해양·관광 인프라와의 융합

- 동해안 항만지역(묵호, 주문진 등)에 설치 가능한 분산형 해수 수소 생산 시스템 도입
- 친환경 관광 인프라(수소버스, 수소트램 등)와의 에너지 자립적 연계

5.3 탄소네거티브 에너지 시스템 확장 가능성

본 시스템의 가장 큰 기술적 차별성은 탄소중립을 넘어 탄소네거티브로 확장 가능하다는 데 있다. 이는 단순한 수소 생산을 넘어, 환경정화와 탄소흡수까지 포함한 통합 에너지-환경 시스템을 구축할 수 있다는 의미이다.

1) CO_2 활용 및 pH 안정화 기술

- 시스템 내에 CO_2 기체를 투입하여 반응 중 생성되는 OH^-와 반응시킴으로써 탄산수소염(HCO_3^-) 형태로 고정화하며, 이는 pH 안정화뿐만 아니라 잠재적 탄소포집(CCS) 역할까지 가능함을 보여준다.

2) 해수정화 및 수질개선 부가효과

- 암모니아 및 유기질소류가 포함된 오염 해수를 본 시스템에 공급할 경우, 암모니아 산화를 통해 N_2 로 전환되며 수질 개선 효과를 동시에 기대할 수 있다. 이는 향후 해양 환경개선형 수소생산 시스템으로의 적용 가능성을 열어준다.

3) 태양광-CO_2 -해수 융합형 지속가능 시스템 구축

- 재생에너지(태양광) 기반 반응
- 대기 중 CO_2 포집 및 해수 완충 적용
- 탄소배출 없는 수소 생산

제6장 결론 및 제언

6.1 연구 요약

본 과제는 강원도 수소 저장·운송 전략의 새로운 가능성으로서, 암모니아 기반 수소 전환 기술의 실증 사례를 개발하고자 하였다. 특히 고비용 인프라와 외부 전력 없이 작동 가능한 해수 기반 무전력 암모니아-수소 전환 시스템을 구현하여, 강원도의 지형·에너지 특성에 적합한 현장형 수소 생산 솔루션을 제시하였다.

이 시스템은 광전극($BiVO_4$ -A-BVFN, TiO_2), 탄소기반 수소전극(A-NCNT) 등으로 구성되어, 해수 내 염소이온 라디칼을 이용해 암모니아를 자발적으로 분해하며 수소를 생성한다. 0 V 조건에서도 작동 가능한 이 시스템은 기존 고온·고압 기반 크래킹 기술의 한계를 극복하는 실효적 대안이 될 수 있음을 실험적으로 입증하였다.

6.2 시사점

본 연구는 단일 기술 구현을 넘어, 강원도 수소 저장·운송 전략의 근본 방향에 대한 재검토를 요구하는 시사점을 제시한다.

- **기존 전략의 한계**: 강원도는 현재 수소저장합금 기반 저장 기술을 정책적으로 중심에 두고 있으나, 이는 높은 원재료 가격, 회수·재생의 비효율성, 고온 운전 조건 등으로 인해 실질적 확장성·경제성·에너지 효율 측면에서 지속 가능성이 낮다.

- **암모니아 기반 전략의 필요성**: 이에 반해 암모니아는 이미 인프라가 형성되어 있으며, 액상 저장·운송이 용이하고 수소 밀도가 높아 대규모 수소 캐리어로서의 가능성이 높다. 또한 글로벌 수소 생태계에서도 암모니아는 수소 공급망의 핵심 연결고리로 자리매김하고 있다.

- **본 과제 시스템의 위치**: 본 과제에서 구현한 시스템은 암모니아 기반 수소 전환 기술의 실증적 예시로, 소규모 지역에서도 적용 가능한 자립형·분산형 수소변환 기술의 기술적 실현 가능성을 보여주는 대표 사례이다.

6.3 향후 제안

이러한 맥락에서, 강원도 수소 저장·운송 전략은 다음과 같은 방향으로 전환되어야 한다:

1) 암모니아 기반 수소 저장 · 운송 체계로의 전략 전환

- 수소저장합금 중심에서 벗어나, 액상 암모니아의 물류 효율성과 기술 응용성을 바탕으로 한 저장체계로 정책 방향 전환
- 암모니아 수입 · 저장 거점을 기반으로 한 수소공급 허브 및 소규모 전환 장치 도입 추진

2) 암모니아 전환 기술의 실증 및 고도화

- 본 과제에서 개발한 시스템을 실증단지에서 검증하고, 모듈화 및 상용화 가능성을 타진
- 고효율 촉매 및 저가형 전극 개발을 통한 장치의 경제성 확보
- 이동형 장치, 해양 응용형 장치 등 다양한 확장 모델 연구 필요

3) 탄소중립 및 탄소네거티브 전략과의 연계

- 암모니아 기반 시스템은 기존 수소저장합금 기반 방식과 달리, 이산화탄소 발생 없이 작동하며, 탄소 고정 가능성도 내포
- 이는 강원도의 탄소중립 도시 선언 및 수소-환경 융합정책과도 정합성을 가진다

6.4 결론

강원도의 수소 전략은 더 이상 수소저장합금과 같은 고비용 고정형 기술에만 머물러서는 안 된다. 지금 필요한 것은, 국제적 흐름과 현장 실효성 모두를 고려한 ‘암모니아 기반 저장 · 운송 기술’ 중심의 전략 전환이다. 본 과제에서 개발된 무전력 암모니아-수소 전환 시스템은 그 한 가지 기술적 예시이자, 새로운 방향성을 증명한 실험적 근거이다.

암모니아는 강원도의 지역적 조건, 해안 접근성, 분산형 수소 수요에 적합한 저장매체이자, 수소경제의 실제적 실현 수단이 될 수 있다. 강원도 수소 저장 · 운송 전략은 암모니아 중심으로 재정의되어야 하며, 이는 향후 강원도가 전국 수소 산업의 차세대 선도 지역으로 도약하는 데 결정적인 기술적 · 정책적 기점이 될 것이다.

참고문헌

1. 산업통상자원부. (2019). 『수소경제 활성화 로드맵』.
2. International Energy Agency (IEA). (2023). Global Hydrogen Review.
3. 산업통상자원부. (2023). 『제2차 수소경제 이행 기본계획(2024-2030)』.
4. 강원특별자치도. (2024). 『2024년 강원도 수소산업 육성 종합계획』.
5. Chiyoda Corporation. (2021). Demonstration Project for Large-Scale Hydrogen Supply Chain. Final Report.
6. European Commission. (2020). A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe.
7. HySTOC Project Consortium. (2022). Hydrogen Supply and Logistic Chain Analysis.
8. Ministry of Economy, Trade and Industry (METI, Japan). (2022). Energy White Paper.
9. 박현미, 외. (2024). 액화수소 저장 및 운송기술 현황과 전망. 한국수소및신에너지학회 논문집, 35권.
10. Energy & Environmental Science. (2021). Ammonia as a hydrogen carrier and energy vector, 14(9), 5126-5160.
11. Kim, S. et al. (2023). Advances in Electrochemical Hydrogen Production from Ammonia. ChemSusChem, 16.
12. Cell Reports Physical Science. (2024). Energy-efficient and cost-effective ammonia electrolysis for converting ammonia to green hydrogen, 5(2).
13. Aramco/Topsoe. (2023). Catalytic Ammonia Cracking for Hydrogen Supply Chains. Technical Note.
14. Air Liquide. (2024). Hydrogen Solutions: Ammonia Cracking. Brochure.
15. Kang, E. et al. (2024). Ambient temperature electrochemical decomposition of ammonia for green hydrogen production. Journal of Cleaner Production, 412.
16. 정동섭, 외. (2024). 강원권 에너지 인프라와 청정수소 전환 정책. 강원정책포럼.
17. 한국가스공사. (2023). 수소 인프라 및 저장기술 백서.
18. 김성환, 외. (2023). LOHC 기술의 국내외 응용 현황. 신재생에너지, 20(2).

【주　　의】

1. 이 보고서는 삼척시탄소중립지원센터에서 시행한 ‘2025 삼척시 탄소중립 연구과제 공모사업’으로 수행된 최종보고서입니다.
2. 이 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 삼척시탄소중립지원센터에서 시행한 ‘2025 삼척시 탄소중립 연구과제 공모사업’의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

삼척시탄소중립지원센터의 연구사업은 ㈜삼표시멘트의 후원과
시멘트산업사회공헌재단의 지원을 받아 시행하고 있습니다.