

해설

## 탄소중립과 수소에너지 지하저장

박의섭\* · 정용복 · 오세욱

한국지질자원연구원

## Carbon Neutrality and Underground Hydrogen Storage

Eui-Seob Park\*, Yong-Bok Jung and Sewook Oh

Deep Subsurface Storage & Disposal Research Center, KIGAM, Daejeon, Korea

\*Corresponding Author. Eui-Seob Park, [espark@kigam.re.kr](mailto:espark@kigam.re.kr), Deep Subsurface Storage & Disposal Research Center, KIGAM, Daejeon, Korea

### Received

15 September 2022

### Final version Received

14 October 2022

### Accepted

26 October 2022

### Abstract

This study investigates current technology on large-scale underground hydrogen storage, a clean carbon neutral energy source to prevent the rapid increase of greenhouse gases, and to secure the sustainability of the Earth and mankind. Underground storage technology, which is used for natural gas storage, is widely accepted as the only technology suitable for large-scale hydrogen storage. Many countries have initiated underground hydrogen storage projects by exploiting geological structures such as salt caverns, depleted reservoirs, and aquifers. In Korea, an excavated rock cavern is a unique alternative for hydrogen storage because the other geological structures do not exist. In addition, rock cavern storage can be used for high-pressure gas or cryogenic liquid, and has an advantageous position in the land use, security, and safety aspects. Therefore, it will become an essential infrastructure for the stable and sustainable future hydrogen economy.

**Key words** : Hydrogen storage, Underground storage, Rock cavern, Carbon neutral

### 요약

이 연구는 온실가스의 급격한 배출량 증가를 막고 지구와 인류의 지속가능성을 확보하고자 추진하는 탄소 중립과 매우 밀접한 관계를 가지는 청정에너지원인 수소의 대규모 저장기술을 검토하였다. 기존 천연가스 저장에 널리 사용된 지하저장기술은 대규모 수소저장에 적합한 유일한 기술로 널리 알려져 있다. 많은 국가들이 암염공동이나 대수층 및 고갈유가스전과 같은 지질학적 구조를 활용하여 수소를 저장하는 프로젝트를 수행하고 있다. 이에 반해 우리나라는 암염공동, 대수층 또는 고갈유가스전과 같은 지질구조가 없기에 암반공동을 활용한 지하저장방식이 대규모 수소저장을 위한 유일한 선택지이다. 특히 암반공동을 이용하면 고압의 기체상태 또는 극저온의 액체상태 등과 같이 다양한 조건에 적용할 수 있으며 지상부지 활용 측면과 보안, 안전 측면에서도 유리하다. 따라서 향후 안정적이며 지속가능한 수소경제사회의 필수 인프라가 될 것이다.

**주요어** : 수소저장, 지하저장, 암반공동, 탄소중립

## 서론

현재 널리 사용하는 지구온난화는 1972년 로마클럽 보고회에서 처음 언급되었다. 이후 세계기상기구(WMO)와 국

제연합환경계획(UNEP)에서 이산화탄소의 증가에 의한 온실효과가 온난화의 원인이라고 주장하면서 20세기 후반부터 과학자들 사이에 중요한 화두가 되었다. 특히 1988년 11월에 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)가 구성되면서

온난화에 대한 논의가 본격적으로 다루어졌다(IPCC, 2007).

최근에는 지구온난화로 인하여 전 세계에서 발생하는 가뭄, 홍수, 폭설, 한파 등의 기상이변이 지속적으로 증가하고 대형화되고 있다고 간주한다. 이러한 지구온난화로 인한 기후변화의 직접적인 원인으로 석탄, 석유 등 화석에너지의 다소비로 인한 이산화탄소의 급격한 배출량 증가로 보고 있고, 전 세계가 온실가스 감축을 목표로 한 정책을 추진하고 있는 실정이다. 이를 위해 국제사회는 기후변화로 위협받는 지구와 인류의 지속가능성을 확보하기 위해 1992년 세계 각국이 비준한 ‘기후변화협약’에 따라 국가별로 온실가스 배출량 감축목표(NDC, Nationally Determined Contributions)를 설정하고 이를 이행하기로 하였다. 세계 각국은 2015년 파리기후변화 협정 채택 이전 국가온실가스 감축목표를 유엔에 제출했으며, 보다 많은 국가의 참여를 유도하고자 상향식 목표 설정 방식을 도입하였다. 우리나라는 누적배출량(1951~2018년) 기준 비중 1%로, 세계 13번째에 해당되는 국제사회의 책임있는 일원으로써 우리 경제의 지속성장과 국가경쟁력 제고를 위해 2030년까지 2018년 총 배출량 대비 40% 감축을 목표로 하는 온실가스 감축목표를 2021년 10월 27일 확정하고, 이를 유엔기후변화협약 사무국에 제출하였다(The 2050 Carbon Neutrality and Green Growth Commission, 2022).

기후변화 대응을 위해서는 탄소 중립(Carbon neutrality)을 달성하는 것이 필수적이고, 탄소 중립은 탄소 흡수원에서 탄소를 배출하는 것과 대기로부터 탄소를 흡수하는 것 사이의 균형을 찾아야 함을 의미한다. 배출을 줄이는 또 다른 방법은 배출을 상쇄하는 것으로, 예를 들어 재생 에너지 사용, 에너지 효율성 향상 및 기타 저탄소 기술에 대한 투자 등을 들 수 있다(The 2050 Carbon Neutrality and Green Growth Commission, 2022). 이 중에서 암반공학 및 자원공학 측면에서 고려할 수 있는 탄소 중립의 달성 방안으로는 배출된 이산화탄소를 땅 속으로 직접 저장하는 지중저장 기술개발, 저탄소 전력을 제공하기 위한 지하수소에너지 저장 기술개발, 열과 전력 생산을 위한 지열 에너지 탐사·활용 기술개발 등이 있다.

이와 같이 탄소 중립을 달성하기 위해선 기존의 석탄, 석유 등의 화석에너지로부터 탄소배출이 없는 태양광, 풍력, 수소 등의 신재생에너지로의 전환이 필수적이고, 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 신재생에너지는 2017년 기준으로 전 세계 에너지생산량의 25%를 공급하고 있지만 2040년에는 40%까지 증가할 것으로 예상하고 있다(IEA, 2020). 그러나, 이러한 신재생에너지로의 전환에서 발생하는 문제점은 태양광과 풍력에 의한 전력 생산시간 및 생산 시점이 계절에 따라, 매일의 기상에 따라, 밤과 낮에 따라 달라지는 간헐적 특성이 있어 생산량 예측이 불확실하다는

것이다. 이를 보완하기 위해서는 생산되는 신재생에너지를 언제든지 저장할 수 있는 에너지 저장시스템이 반드시 구축되어야 한다(EIA, 2015).

또한 국가 에너지 안보 측면에서 생각해야 할 문제는 현재 발생하고 있는 전 세계적인 극심한 기후변화(홍수, 태풍, 한파 및 폭서 등)가 글로벌 차원의 에너지 수요와 공급에 영향을 미칠 수 있다는 점이다. 즉, 기후변화의 영향으로 세계적으로 에너지 생산 및 송배전 인프라 유지에 어려움이 생기는데, 특히 신재생에너지원의 경우는 대륙별, 위도별로 발전원별 영향이 매우 다를 수 있다(IPCC, 2022). 특히 IPCC(2022)는 ‘제6차 평가보고서 WG2 보고서’를 통해 폭염과 홍수 등 온난화에 따른 기상이변이 인간과 생태계에 악영향을 미친다는 사실을 발표하였고, 이는 기후변화로 글로벌 공급망 리스크가 더 커질 수 있음을 시사한다. 이를 통해 국가별로 기후변화가 에너지 부문에 미치는 영향을 분석하고, 이에 대한 대응책으로 기간시설의 강화, 에너지원의 다변화 및 효율 개선 등의 다양한 에너지 부문의 적응 전략이 제시되어야 한다.

이와 같이 기존 화석연료 의존적 에너지 시스템에서 탄소중립을 위한 에너지 전환에 있어 중요한 에너지원인 수소 중심 사회의 촉진을 도모하고 있는 시점에서 대규모 수소 저장기술의 필요성, 저장기술의 장단점 분석 및 대규모 지하저장 기술의 현황 등을 살펴보고, 국내에 적합한 대규모 수소저장 기술을 제안하고자 한다. 그러나, 우리나라는 해외에서 가스 지하저장에 널리 사용하는 암반공동, 대수층 또는 고갈유가스전과 같은 지층구조가 없기에 암반공동을 활용한 지하저장방식이 대규모 수소저장을 위한 유일한 선택지임을 감안해야 한다(Oh *et al.*, 2021). 또한 국내에서 암반공동을 이용한 지하저장 방식을 채택하면 어떠한 장점이 있는지 등을 살펴보고자 한다. 이를 통해 향후 대규모 수소저장기술이 안정적이며 지속가능한 수소경제사회의 필수 인프라에 필요함을 제시하고자 한다.

## 본 론

### 탄소중립을 위한 에너지 전환

국제사회는 기후변화로 인한 문제의 심각성을 인식하고, 세계 주요국들을 필두로 온실가스 배출량 저감 및 탄소중립 사회의 실현을 위한 다양한 대응방안을 연구해왔다. 그 결과 국제사회에서는 탄소중립 사회 실현을 위해선 재생에너지의 확대, 화석연료의 감축, 친환경 자동차의 보급 등 에너지 시스템의 전환을 제시하였다. 결국 탄소중립 사회로의 전환은 세계적인 흐름으로 우리나라도 국제사회의 흐름과 맥락을 같이하여, 다양한 에너지·기후 관련 국가 전략 정책 수립을 통해 탄소중립 및 에너지 전환 정책을 적극적으로

으로 추진하고 있다.

우리 정부가 발표한 2020년 12월 발표된 ‘2050 탄소중립 추진전략’은 ‘경제구조의 저탄소화’, ‘신유망 저탄소 산업 생태계 조성’, ‘탄소중립 사회로의 공정전환’ 등 3대 정책 방향에 ‘탄소중립 제도적 기반 강화’를 더한 ‘3+1’ 전략으로 구성되어 있다. 이 중에서 수소에너지는 ‘에너지 전환 가속화’, ‘고탄소 산업구조 혁신’, ‘미래 모빌리티로 전환’, ‘도시·국토 저탄소화’, ‘신유망 산업 육성’의 세부 과제와 연관되어 있다. 그 이유로는 수소에너지가 전기와 달리 대용량의 에너지를 장기간 저장할 수 있으며, 열이나 전기와 같은 2차 에너지를 생산하는 과정에서 온실가스를 배출하지 않아 기후변화 위기에 효과적으로 대응할 수 있는 친환경 에너지원으로 주목받기 때문이다. 즉, 수소에너지가 탄소중립의 핵심 기술로 주목받는 가장 큰 이유는 친환경성이다(The 2050 Carbon Neutrality and Green Growth Commission, 2022).

**차세대 에너지로서의 수소**

수소는 구성이 매우 간단한 원소이고, 에너지를 얻는 과정에서 대기 중 흔한 산소만 요구하며, 부산물로는 오직 물만 발생하여 사실상 탄소를 포함한 유해 물질을 배출하지 않는 특성이 있다. 또한 중량 대비 에너지 밀도가 매우 높으며, 전기와 마찬가지로 교통, 발전, 산업, 건물 등 사회구조 전반에 활용 가능한 차세대 에너지원이다.

수소는 생산 방식과 친환경성 정도에 따라 그레이수소, 블루수소, 그린수소로 구분된다. 현재 생산되는 수소의 약 96%는 화석연료로부터 수소를 생산하는 ‘그레이수소’이다. 그레이수소는 천연가스의 주성분인 메탄과 고온의 수증기를 촉매 화학반응을 통해 수소와 이산화탄소를 만들어 내는데, 약 1kg의 수소를 생산하는 데 이산화탄소 10kg을 배출한다. 블루수소는 그레이수소와 생산 방식은 동일하지만, 생산 과정 중 발생하는 이산화탄소를 대기로 방출하

지 않고 포집 및 저장 기술을 이용해 이산화탄소를 따로 저장한다. 따라서 그레이수소보다 친환경성이 높고, 이산화탄소 포집 및 저장 기술 또한 높은 성숙도와 경쟁력이 확보돼 가장 현실적인 대안으로 주목받고 있다. 다만, 이산화탄소를 완전히 제거하진 못해 그에 따른 한계도 존재한다. 그린수소는 물에 신재생에너지(태양광 또는 풍력 등)를 통한 전기분해로 수소와 산소를 생산하므로, 생산과정에서 이산화탄소 배출이 전혀 없는 궁극적인 친환경 수소라고 말할 수 있다. 즉, 이산화탄소를 다량 배출하는 화석연료 기반이 아니라, 반드시 신재생에너지를 통해 얻은 전기로 수소를 만드는 것이 핵심이다. 이로 인해 수소에너지 중에서도 미래의 궁극적인 청정 에너지원으로 주목하는 것은 그린수소이다(Hyundai Motor Group, 2022).

세계 주요국들은 기존 화석연료 의존적 에너지 시스템에서 탈피할 수 있는 대안으로 수소경제사회의 촉진을 도모하고 있다. 현재까지는 수소를 대량으로 생산·공급하는 기술, 제도, 시장 여건이 완전히 갖추어지지 않은 상황이지만, 적극적 정책 추진 및 대규모 투자 등을 통해 향후 수소경제사회의 인프라 기술들은 급속히 성장할 것으로 전망하고 있다. IEA 2019년도 보고서인 ‘The Future of Hydrogen’에 따르면, 2018년 기준 전 세계 수소 생산의 총 규모는 약 1억2천만 톤에 달하며, 이 중 부생수소를 제외하고 온전히 수소 생산을 목표로 생산된 양은 약 7천만 톤 수준으로 평가하고 있다(IEA, 2019). 수소의 생산과 공급은 Fig. 1과 같이, 2030년까지 그레이수소(특히, 천연가스 개질) 위주로 이루어질 것으로 보이며, 2030년을 기점으로 2050년까지 블루수소와 그린수소를 병행한 공급 구조로 변화할 것으로 전망하고 있다(IEA, 2020).

**수소경제사회의 필요성**

현재 국제사회는 지속적으로 늘어만 가는 에너지 수요, 환경오염, 자원고갈 등의 문제를 해결할 수 있는 지속적이

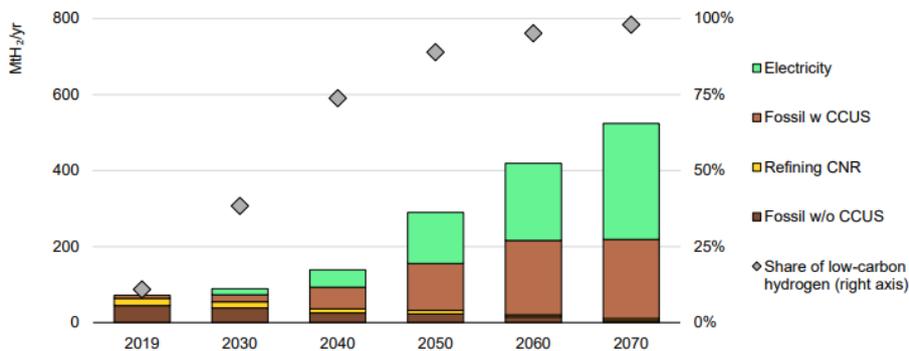


Fig. 1. Global hydrogen production by technology in the Sustainable Development Scenario, 2019 – 70 (IEA, 2020).

고 친환경적인 에너지원으로서의 잠재력을 수소가 가지고 있다고 여긴다. 따라서 수소를 단순히 에너지원의 하나로 사용하는 것이 아니라 탄소기반사회에서 수소경제사회로 전환시키기 위해 더욱 필요하다고 보는 것이다.

수소경제사회는 수소를 주요 에너지원으로 사용하는 경제산업구조로 수소가 국가경제, 사회전반, 국민생활 등에 대한 근본적 변화를 초래하여 경제성장과 친환경 에너지 원천이 되는 경제사회를 의미한다. 즉, 화석연료를 기반으로 하는 현재 에너지 시스템에서 탈피하여 수소를 주요 에너지원으로 사용하는 모빌리티(자동차, 선박, 열차 등), 기계, 발전 시스템을 구축하고, 이를 위해 수소를 안정적으로 생산/저장/운송하는데 필요한 전 분야의 산업 및 시장을 새롭게 양성하는 경제체제라 할 수 있다. 이를 통해 환경, 에너지, 사회·경제 분야 등에서 발생하고 있는 여러 가지 문제들을 해결할 수 있을 것으로 예상된다.

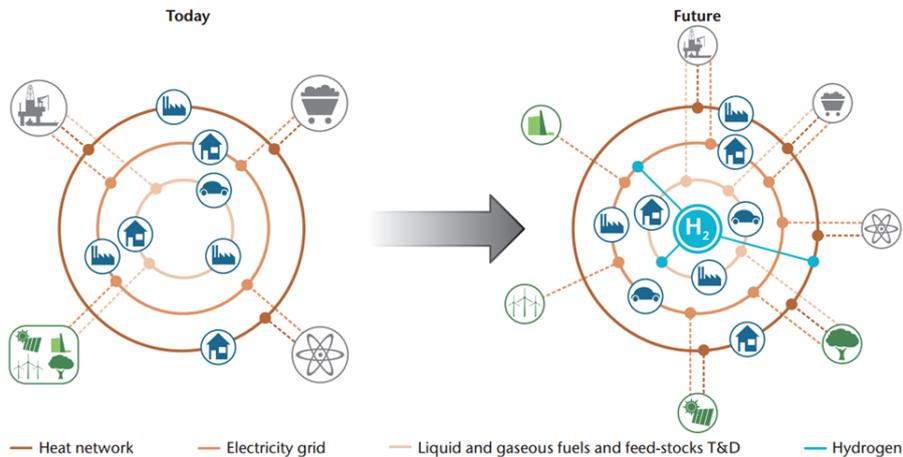
우리나라는 수소경제사회로 진입하기 위해 2005년 발표한 <친환경 수소 경제 구현 마스터플랜>에서부터 시작되었다. 하지만 이후 시장 환경 등의 사유로 수소자동차 중심으로 제한적으로 추진하다 2018년에 수소 에너지를 <혁신 성장을 위한 3대 전략투자 분야>로 선정하면서 수소의 생산부터 저장, 이송, 활용에 이르는 전 밸류체인에 걸쳐 육성하는 방향을 발표하였고, 2019년에는 2040년까지의 수소 산업의 밸류체인별 목표를 정한 <수소 경제 활성화 로드맵>을 발표하여 추진하고 있다(Hydrogen Convergence Alliance, 2020).

### 수소경제의 가치사슬

수소경제사회를 포함한 통합 에너지 시스템(integrated energy system)의 미래상(Fig. 2)은 저탄소 연료, 수소, 열, 전기 등 다양한 에너지 네트워크들이 에너지 섹터 간의 연결(에너지 섹터 커플링, energy sector coupling)을 이루는 시스템이라 할 수 있으며, 여기서 수소는 에너지 섹터 커플링의 매체이자 주요 에너지 캐리어로서의 역할 수행을 기대하고 있다(IEA, 2015).

수소경제의 가치사슬(value chain) 혹은 공급사슬(supply chain)은 수소의 생산(production), 저장(storage), 운송 및 분배(transportation & distribution), 활용(application)의 4 가지 핵심 인프라로 구성된다(Fig. 3). 각 가치사슬별 인프라 기술은 수소경제사회의 안정적인 구현 및 지속성을 위해 필수적인 요소이며, 최근 이들에 관한 기술 수요가 급증하는 추세이다. 즉, 수소경제사회의 성공적인 실현을 위해서는 수소의 보급 확산을 위한 가치사슬별 기술적, 정치적 불확실성 해소와 시장성이 확보되어야 한다(Markus *et al.*, 2019).

특히 가치사슬 중 수소 저장은 사회 전반에 대한 공급 안정성 확보를 위해 매우 중요한 부분으로, 해외 선진국들은 국가 로드맵이나 정책 전략에 대규모 수소 저장을 언급하고 있다(Fig. 4). 미국, 영국, 네덜란드, 프랑스, 핀란드, 스웨덴 등 선진국들에서는 지하 수소저장, 대규모 수소저장, 계절주기 수소저장 등을 수소 저장기술의 핵심 기술 중 하나로 분류하여 국가전략 및 에너지안보 차원에서 기술개발을 추진하고 있다(U.S.DOE, 2020). 한편, 우리나라와 비슷하



**KEY POINT:** Hydrogen can link different energy sectors and energy T&D networks and thus increase the operational flexibility of future low-carbon energy systems.

Fig. 2. The current energy system and that of the future (IEA, 2015).

계 압연, 저류층 등의 지하저장을 위한 지질학적 여건이 부족한 핀란드와 스웨덴 등의 국가에서는 지하공동식 대규모 수소저장기술을 언급하고 있다.

이에 반해 우리나라는 수소 생산 및 활용 중심으로 기술 개발이 진행되며, 수소 저장기술은 운송을 위한 부수적 수단으로 인식하는 경향이 있다. 이는 향후 수소경제사회 도약에 따른 기술적 부재가 우려되는 사안으로 보인다.

**국내 수소경제의 계획 및 전망**

국내 수소 수요 현황 및 향후 전망을 살펴보면, 2020년 기준 대한민국의 수소 수요는 약 44만톤으로 글로벌 시장 5위에 해당되고, 수소경제 활성화 및 공급 확대 정책에 따라 2050년에는 약 1690만톤 수준의 수소 수요가 발생할 것으로 전망한다(Hydrogen Council, 2018). 2019년에 우리 정부가 발표한 ‘수소 경제활성화 로드맵’ 및 ‘수소 공급부문 확대 로드맵’에 따르면, 2022년 47만톤, 2030년 194만톤,

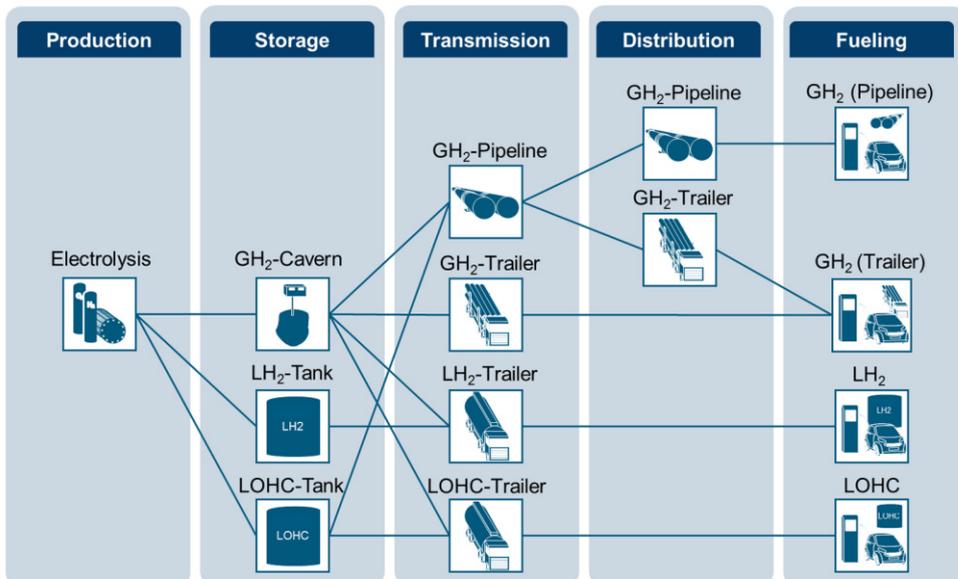


Fig. 3. The core value chain of a hydrogen economy society (Markus et al., 2019).

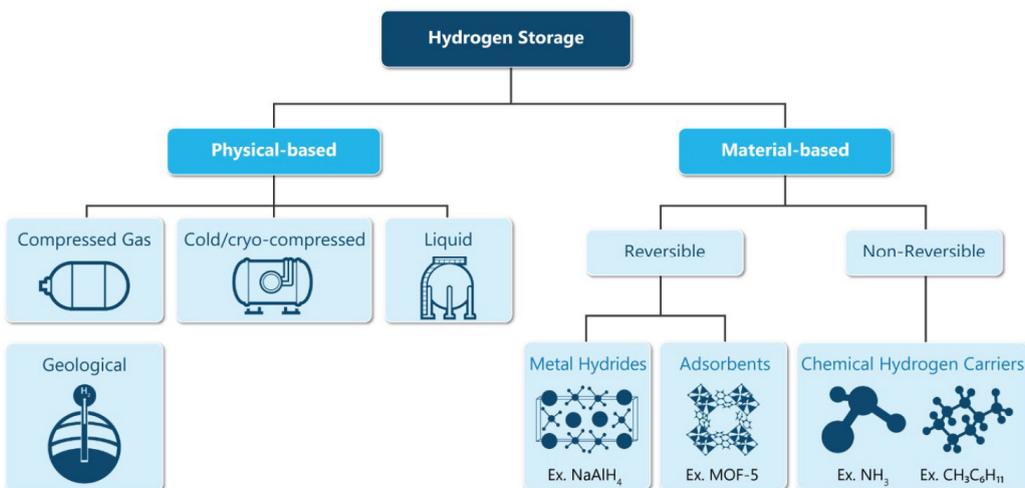


Fig. 4. Classification of hydrogen storage technology (U.S.DOE, 2020).

2040년 526만톤의 연간 수소 공급 목표치가 제시되어 있다. 이처럼 정부가 제시한 목표를 달성하기 위해선 생산 활용을 필두로 한 수소 가치사슬별 인프라 기술의 급속한 발전이 예상된다(Hydrogen Convergence Alliance, 2020).

이에 반해, 발표된 로드맵에서 현재 예상할 수 있는 문제는 수소의 안정적 공급을 위한 대규모 저장기술의 수요는 증가하고 있으나, 이를 충족할 핵심 기술은 부재한 상태라는 것이다. 그 이유는 수소의 생산과 활용(공급과 수요)은 절대적으로 일치하는 개념이 아니고, 생산량과 수요량 모두 변동성이 존재하므로 안정적 공급체계의 조성을 위해서는 이를 충족할 수 있는 에너지의 저장 및 확보가 필수적이기 때문이다. 하지만, 국내의 수소 로드맵이나 국가전략상에서는 안정적 인프라 구축을 위한 대규모 수소 저장기술이 제시되어 있지 않은 상황이다(Table 1). 또한 수소경제 사회의 핵심 가치사슬인 저장과 운송의 구분이 모호하며, 저장은 운송을 위한 수단으로 간주, 단순 효율 증대 위주 기술개발이 추진 중이다(MOTIE, 2019). 따라서 수소에너지 대규모 지하저장기술은 사회 인프라를 충족할 중·대용량의 수소를 장기간 안정적으로 저장할 수 있는 핵심 기술로서, 국내 연구 및 기술개발 추진이 시급한 실정이다.

**기존 수소 저장기술들의 대규모 저장 한계성**

국내에서 현재 상용화된 수소 저장용기는 차량용이나 충전소용, 운송을 위한 튜브 트레일러, 항공우주 등 연구를 위한 탱크로리 기반이 일반적이다. 또한 대부분이 압축 수소 기체를 저장하는데, 저장압력은 약 180~700bar, 저장용량은 500kg 이내의 수준으로 소형 저장에 머물러 있다. 해외 기술선도국들도 독일 Linde사의 저장압력 500bar, 1.1톤 튜브 트레일러나 200~300kg의 저장성능을 갖는 용기가 현행 기술의 한계점이며, 이러한 용기들을 지상에 세로로 배치하여 소규모 저장 플랜트를 구성하는 것이 일반적이다(Decker, 2019). 이러한 수소 용기 및 탱크 기반의 저장기술들은 소규모, 단주기 저장에 적합한 것으로 인프라 기반의 대규모 저장에는 한계가 존재한다.

천연가스나 원유 등을 저장하는 데 주로 사용하는 구형

용기(Spherical vessel) 형태의 저장시설 용량은 약 25톤 내외이고, 대규모 파이프라인을 통한 저장은 약 45톤의 저장 성능을 보인다. 이에 반해 극저온 구형 용기(Cryogenic spherical vessel) 등을 활용한 액체수소 저장은 체적당 저장효율이 높아 고압 기체수소 용기저장에 비하여 우수한 저장성능을 보이나, 이 또한 4톤 규모(탱크로리)에서 200톤 규모(극저온 구형 용기) 수준에 있다(Decker, 2019). 또한 액체수소는 -253°C의 극저온 상태로 일정하게 유지해야 하므로, 외부환경과 온도차가 많이 발생하는 지상에서



**Key Data**

- Inner volume: 71 m<sup>3</sup> (references up to 270m<sup>3</sup>)
- Design pressure: 12 bar(g)
- Storage capacity: 4,600 kg LH<sub>2</sub> (1bar, 5% ullage)
- Vacuum-perlite insulation
- Integrated cryogenic valves
- Designed for industrial applications with high demand (electronics, chemical, etc.)
- Horizontal & vertical design

**Performance**

- Boil-off ratio: <44 kg/day (<0.95%/d)

**Applications**

- Typical industrial applications with high Hydrogen demand

(a) Liquid hydrogen storage tank of Linde, Germany (Decker, 2019)



(b) Cryogenic spherical vessel of NASA, USA (NASA website)

**Fig. 5.** Liquid hydrogen storage using (a) cryogenic storage tank and (b) spherical vessel.

**Table 1.** Development direction of hydrogen storage and transportation technology (MOTIE, 2019)

Type	Government policy
Gas hydrogen storage and transportation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Increased efficiency of high-pressure containers, tube trailers.</li> <li>• Pipeline development and deployment review.</li> </ul>
Liquid hydrogen storage and transportation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Development of local technology for liquid hydrogen storage containers.</li> <li>• Hydrogen liquefaction technology and plant development.</li> </ul>
Chemical hydrogen storage and transportation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conversion of substances such as methane, liquid ammonia, and MCH.</li> <li>• Development of hydrogen compound storage technology.</li> </ul>

는 약 0.3~0.95%/day 수준의 기화율(Boil-off ratio)이 발생하여(Decker, 2019), 저장효율의 저하 및 장주기 저장에 한계를 가지고 있다(Fig. 5).

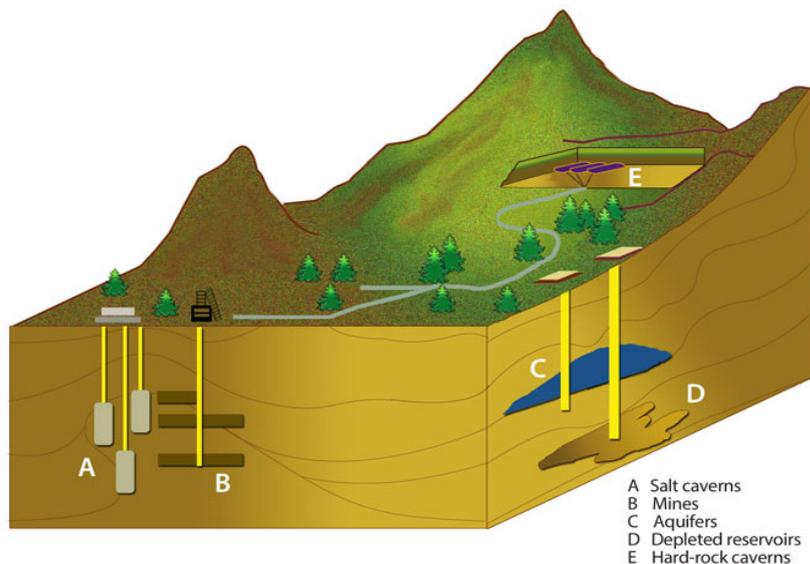
향후 수백만 톤 규모의 수소 공급이 이루어지는 수소경제사회에서 안정적 수급을 위한 수소 저장량을 수요 및 공급의 약 10~20%로 가정하면, 수십만 톤 규모의 저장용량이 확보되어야 하는데, 이러한 용기나 탱크 기반의 저장 설비로는 명확한 한계가 존재한다. 따라서 기존 수소저장 기술들의 대규모 저장 한계를 극복할 대안 기술의 제시가 필요하며, 대규모 및 장주기 수소저장에 있어 지하저장기술은 이를 효과적으로 대체할 수 있는 기술로 여겨진다.

### 대규모 가스 및 수소 지하저장기술

지금까지 지하저장기술은 기존 원유 및 천연가스 시장에서 계절 및 최대 수요를 충족시키기 위해 주로 사용하고 있는데, 미국은 약 380개의 운영 중인 지하저장시설을 통해 3조 8천억 입방피트의 가용한 가스용량을 가지고 있다(Michanowicz *et al.*, 2017). 이 중에서 운영 저장시설의 88%는 폐가스전(Depleted reservoirs), 9%는 대수층(Aquifers), 암염공동(Salt caverns)은 3%를 차지하고 있다. 이 외에도 소수의 광산(Mines) 또는 암반공동(Hard-rock caverns)이 천연가스 지하저장시설로 활용되고 있다(EIA, 2015). 다만 이러한 천연가스 지하저장시설은 모두 고압의 기체 상태로 저장하고 있다는 점을 염두에 두어야 한다.

현재까지 전 세계적으로 널리 이용 중인 천연가스 지하

저장시설의 유형은 Fig. 6에 나타나 있다. 먼저 암염공동은 비교적 천부에 위치하고 있어 개발이 신속하게 진행되며, 주로 일별 수요를 충족시키기 위하여 사용된다. 지하 암염층에 시추공을 뚫고 해수 등을 주입하여 암염을 용해시키는 과정을 통해 저장공동을 확보한 후, 시추공을 통해 주입한 염수를 생산하고 가압 천연가스를 충전하는 방식으로 개발된다(Katz and Lee, 1990). 대수층은 다공성 투수층의 퇴적암으로 구성되며 그 공극은 물로 채워져 있다. 대수층 가스저장의 특성 중 하나는 대수층 지층의 공극에 대상을 주입함으로써 인공적인 가스전을 형성하는 것이라 할 수 있다. 대수층은 보통 덮개암 하부에 존재하므로 가스 주입시 대수층 외부로의 가스 이동이 어려워 저장시설로 가능하다. 고갈가스전이나 암염공동보다 광범위하게 분포되어 있어 상기의 두 저장방식이 불가능한 지역에서 비교적 쉽게 이용할 수 있다는 장점이 있다. 가스의 주입과 회수는 고갈가스전과 비슷하게 운영되지만 이에 대한 보다 많은 시험과 연구가 요구되고, 특히, 점차 엄격해지는 환경적 규제에 직면하고 있다는 단점이 있다. 고갈가스전을 이용한 저장방식은 가장 일반적이며 비교적 비용이 적게 소요되는 방법으로, 상당히 많은 양의 가스를 저장할 수 있으며 특히 전략적인 저장과 계절적인 수요변동을 충족시키기에 적합하다. 그리고 경제적으로는 대상 가스전의 지질 및 저류층 특성이 이미 파악되어 있어 추가 탐사 작업에 비용이 적게 소요된다는 장점이 있다(Azin *et al.*, 2008). 또한 가스전 자체가 저류층 생성 때부터 가스를 안전하게 저장해 온 시설



Source: PB-KBB, inc., enhanced by EIA.

Fig. 6. Types of underground natural gas storage facilities (EIA, 2015).

이기에 저장 가스의 누출 가능성이 상당히 적다는 점은 안전성 측면에서 유리하다.

위에서 살펴본 지하저장시설 중에서 암염공동, 대수층 및 고갈가스전은 지질학적 특성에 매우 좌우되는 입지의 제한성을 가지고 있는 반면, 암반공동은 적절한 역학적 강도를 가지는 기반암에 인공적으로 굴착하여 저장공간을 만드는 방식이라 지질 조건 및 입지 제한성이 거의 없다는 장점이 있다. 특히 우리나라, 스웨덴 등과 같이 암염공동, 대수층 및 고갈가스전을 찾기 어려운 국가에선 암반공동 형태의 저장방식이 대안이 될 수 있다.

최근 해외 주요 선진국들은 에너지 시스템의 전환 및 수소경제의 실현이 이슈화됨에 따라, 기존 원유 및 천연가스 등에 활용되던 지하저장기술을 청정에너지원인 수소를 저

장하는 연구개발에 다양하게 적용하고 있다. 즉, 미국, 유럽 등 선진국들은 수소경제 추진을 위한 국가 전략 내 수소의 저장 항목에 지질학적 저장(geological storage) 및 지하수소저장(underground hydrogen storage) 등을 명시하여 기술개발을 독려하고 있다.

현재까지 지하저장기술은 대규모로 수소를 저장하는 가장 경제적인 방법으로 알려져있다(Tarkowski, 2019). 이러한 이유로 해외 선도국들은 천연가스 지하저장시설의 개발 및 운영 노하우를 활용하여 기체 수소를 고압으로 압축해 지하에 저장하는 기술을 활발히 연구 개발하고 있는데, 현재까지는 암염공동을 이용하여 기체 수소를 고압으로 저장하는 사례가 대부분이다. 물론 대수층이나 폐가스전을 활용하여 기체 수소를 저장하는 사례도 점차 증가하고 있다.

**Table 2.** Major projects related to hydrogen underground storage technology

Project/Region	Country	Materials	Depth (m)	Pressure (bar)	Volume (m <sup>3</sup> )	Geological method	Status
Tesside	UK	GH <sub>2</sub>	365	45	210,000	Salt cavern	Operating
Clemens	USA	GH <sub>2</sub>	1,000	70~137	580,000	Salt cavern	Operating
Moss Bluff	USA	GH <sub>2</sub>	1,200	55~152	566,000	Salt cavern	Operating
Spindletop	USA	GH <sub>2</sub>	1,340	68~202	906,000	Salt cavern	Operating
Kiel	Germany	GH <sub>2</sub> , NG	-	80~100	32,000	Salt cavern	Operating
Ketzin	Germany	GH <sub>2</sub> , NG	200~250	-	-	Aquifer	Operating
Beynes	France	GH <sub>2</sub> , NG	430	-	330,000,000	Aquifer	Operating
Lobodice	Czech Republic	GH <sub>2</sub> , NG	430	90	-	Aquifer	Operating
Sun storage	Austria	GH <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>	1,000	78	-	Depleted field	Operating
HYBRIT	Sweden	GH <sub>2</sub>	100~200	200	50,000~150,000	Salt cavern	Operating
Haje	Czech Republic	GH <sub>2</sub> , NG	950	-	-	Rock cavern	Operating
HyStock	Netherlands	GH <sub>2</sub> , NG	-	-	-	Salt cavern	Operating
Advanced Clean Energy Storage	USA	GH <sub>2</sub>	-	-	-	Salt cavern	Operating
San Pedro belt	Spain	GH <sub>2</sub>	-	-	-	Aquifer	Preparing/Potential
Rough gas storage	UK	GH <sub>2</sub>	2,743	50~100	48,000,000	Depleted field	Preparing/Potential
Northern Nordrhein Westfalen	Romania	GH <sub>2</sub>	-	-	-	Salt cavern	Preparing/Potential
Salina B	Canada	GH <sub>2</sub>	400	-	64,000,000	Salt cavern	Preparing/Potential
Salina A2	Canada	GH <sub>2</sub>	525	-	95,000,000	Salt cavern	Preparing/Potential
Gora	Poland	GH <sub>2</sub>	-	-	-	Salt cavern	Preparing/Potential

이 중에는 기존 가스 지하저장시설의 일부를 수소 저장시설로 전환하여 운영 중인 사례도 존재한다. 이러한 고압 기체 수소의 지하저장기술은 저장물의 종류에 따른 영향 및 특성을 제외하면 기존 천연가스나 압축공기의 지하저장 요소기술과 많은 측면에서 동일성을 가지므로, 기술 도입 장벽이 상대적으로 낮은 편이란 것을 알 수 있다.

일부 해외 연구사례에서는 기존 천연가스 저장시설에 기체 수소를 혼소 상태로 저장하여 기술 진입장벽을 낮추거나, 이산화탄소와 수소를 혼합 주입해 화학적 반응에 의한 메탄가스 생성기술 개발(CCUS 관점에서의 접근)을 추진하고 있다. 현재 전 세계적으로 10개 이상의 부지에서 대규모 지하 수소저장기술을 개발하는 연구가 수행되고 있으며, 15개 이상의 부지에서 추가적인 프로젝트들이 추진되고 있다(Table 2).

최근에는 수소 지상저장 및 ESS 저장기술 위주로 개발하던 해외 선도기업들도 대규모 저장을 고려한 지하저장기술을 적극적으로 개발하고 있다. 예를 들면, 수소 저장기술의 선도기업인 독일의 Linde사는 암염공동(salt cavern)을 이용한 수소 지하저장기술의 개발을 추진하고 있으며, ESS 기반의 에너지 저장기술의 선도기업인 일본의 Mitsubishi power사 또한 수소 지하저장기술 프로젝트를 가동하고 있다.

상기의 수소 지하저장 프로젝트는 모두 기체수소를 고압 상태로 저장하는 것으로 저장효율 측면에서 더 유리한 액체수소를 대상으로 지하저장을 연구하는 것은 전 세계적으로 거의 없는 상태이다. 그 이유는 액체수소 지하저장기술은 기존 액화천연가스 저장기술과 일부 공유하는 부분이 있으나, 액화천연가스의 저장온도가  $-162^{\circ}\text{C}$ 인 것에 반해 액체수소는  $-253^{\circ}\text{C}$ 의 저장온도를 요구하므로 극저온 액화 및 온도 유지 등의 기술 고도화를 위한 추가적 연구개발이 필요하다. 그런데도 액체수소는 기체수소 대비 체적당 에너지 밀도가 8배 이상으로 높은 저장효율의 이점을 가지고 있어 연구개발 필요성은 꾸준히 제기되고 있으며, 현재까지는 액체수소와 관련된 기반 인프라 기술들이 상용화 초기 단계이지만 향후 활성화 단계로 진입하면 기술 수요가 증대될 것으로 예상된다.

### 중대용량 수소저장을 위한 암반공동 저장방식

앞서 살펴본 바와 같이 수천에서 수만 톤 규모의 수소 저장이 가능한 저장방식은 지하저장 밖에 없다는 것을 알 수 있다. 물론 지하저장시설도 지질학적 특성을 이용한 암염공동, 대수층 및 고갈가스전을 활용하는 방식이 전 세계적으로 널리 개발되고 있으며, 스웨덴과 우리나라와 같이 이러한 지질 조건을 확보하기 어려운 국가에선 불가피하게 암반공동을 시공하여 저장하는 방식을 개발할 필요가 있다.

암반공동 저장방식은 원하는 저장장소 및 저장용량을 확보하는 것이 다른 저장방식에 비하여 매우 쉽다는 장점이 있다. 그 이유는 중대규모의 수소저장이 필요한 지역을 대상으로 지표로부터 100m 내외에서 견고한 암반층을 확보하면 되기 때문이다. 우리나라는 수십미터만 내려가도 역학적으로 강한 기반암이 존재하고, 주변에 활용가능한 산지가 많다. 또한 다소 암반조건이 불량하더라도 적절한 보강공법을 적용하면 충분히 원하는 규모의 저장공동을 확보할 수 있다.

이와 같이 지하 암반공동을 이용한 중대용량 수소 저장기술은 천연방벽이라 일컬어지는 주변 암반에 의해 저장공동이 완전히 밀폐되는 구조를 가진다. 또한 저장공동은 지하 수십에서 수백 미터의 심도에 설계되는 만큼 외부로부터의 간섭을 차단하여 장기 저장의 안전성을 확보할 수 있다. 특히 극저온 액체수소를 저장하는 경우, 기후 조건이나 계절별 온도변화에 영향을 받는 지상저장시설과는 달리, 지하 암반에 의해 일정한 온도 수준이 유지되므로 기화율을 최소화하여 저장효율을 크게 증대시킬 수 있다. 기존 LNG 저장 연구사례에서 지상저장 시 기화율이 0.075~0.15%/day 수준인 반면, 지하저장에서는 0.01%/day 수준으로 평가된 바 있다(Park and Chung, 2014). 이러한 기화율의 급감은 수소에너지의 장기 저장에 매우 유리하고, 이는 국가적인 수소에너지의 안보에 긍정적인 영향을 준다.

이외에도 지하저장시설은 암반에 의해 지하에 격리되는 공간으로, 지진이나 태풍 등 자연재해로부터 영향을 받지 않는 안전한 공간이다. 또한 지상에 노출되는 부분이 극히 적고 저장공간 자체가 지하에 위치하므로 인위적인 테러나 사고 등으로부터 안전하며, 예기치 못한 상황에 의한 폭발 사고 발생 시에도 암반의 완충효과로 지상 인프라에 대한 피해를 최소화 할 수 있다는 장점을 가진다(Park and Chung, 2014).

일반적으로 지하저장시설은 지상저장시설과는 달리 저장규모가 커질수록 경제성이 유리해지는 특성이 있다. 물론 적절한 저장규모 이하에선 암반공동을 활용하는 저장방식이 초기 인프라 구축이나 암반 굴착 등에 따른 공사비용이 상대적으로 크다는 단점이 있다. 반면, 규모의 확장에 따른 비용은 상대적으로 낮으며, 저장규모가 증가해도 시설에 대한 운영비 자체는 크게 차이가 없어 대규모 저장에 유리한 기술로 알려져 있다(Fig. 7). 국내의 원유 및 LPG 저장 사례를 토대로 지하와 지상 저장의 경제성을 비교 하면, 원유는 약  $890,000\text{m}^3$  이상부터 지하저장이 경제적이며,  $3,200,000\text{m}^3$ 의 저장규모에선 지상에 비해 15% 이상 경제성이 우수한 것으로 분석되었다(Kim, 2021).

지하저장시설은 지상부지에 대한 노출 및 훼손 최소화를 통한 공간 활용성과 저장 효율성을 확보하기 쉽다. 즉, 지상

저장시설과 달리 수소를 저장하는 저장공동이 지하에 위치하므로, 지상에는 최소한의 운영 시설만이 존재한다(Fig. 8).

이로 인해 저장시설의 지상 자연환경을 원상태로 유지할 수 있고, 이는 주민들의 반발 심리를 완화시켜 주민 수용성을 크게 높일 수 있다. 또한 지하저장시설의 유지보수 및 관리할 지상 면적이 최소화되므로, 장기적으로 운영비 절감에 기여할 수 있다.

우리나라도 기후변화 대응 및 탄소중립 실현을 위해 2040년까지 재생에너지 발전비중이 30~35%로 확대할 전망이다. 이러한 재생에너지의 확대는 기후변화 대응 및 탄소중립을 위한 필수불가결적 선택이나, 간헐적 전원으로서는 전력계통의 변동성을 증가시키는 결과를 초래한다. 이처럼 재생에너지의 변동성에 대응하고 전력계통의 안정화를 도모할 완충 기술의 개발이 필요 시 되는 상황에서 재생에너지의 변동성 대응을 위한 핵심기술로 평가받는 것 중 하나는 P2X(Power to X)기술로, 간헐성 및 변동성을 갖는 재생에너지 전력을 다른 형태의 에너지로 변환 및 저장하여 다양한 산업 분야에 연결하는 개념이다. P2X의 개념 중

가장 대표적인 것이 전력을 통해 만들어진 수소를 에너지 운반체로 활용하는 P2G(Power to Gas) 기술로, 재생에너지 변동성 대응 및 전력계통의 안정화뿐만 아니라, 계절주기에 따른 잉여전력 손실을 막고 설비의 출력제한을 완화시켜 운영효율 및 가동 수명을 증대시키는 효과를 가져온다. 특히 재생에너지는 기상이나 환경조건에 의존성을 보이며, 특히 계절 조건이 뚜렷한 우리나라는 단주기적 소규모 저장기술보다 장주기적으로 대용량의 수소를 저장할 수 있는 지하암반공동을 활용한 수소저장기술이 반드시 필요하다.

**결론**

현재 전 세계를 괴롭히는 지구온난화로 인해 제기된 탄소중립은 청정에너지원인 수소를 기반으로 하는 경제사회를 가속하는 계기가 되었다. 이러한 시점에서 우리나라는 자원빈국으로 에너지 안보는 오랜 기간 중요한 화두였으며, 수소경제사회의 도래는 에너지 자립도를 증대시키고 자원부국으로 탈바꿈하는 중요한 계기가 될 것이다. 그러

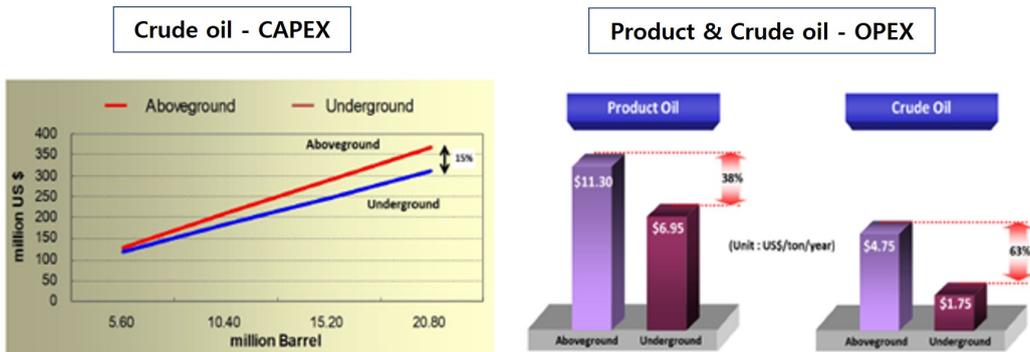


Fig. 7. Comparison of economic feasibility according to above-ground and underground domestic crude oil storage bases (Kim, 2021).

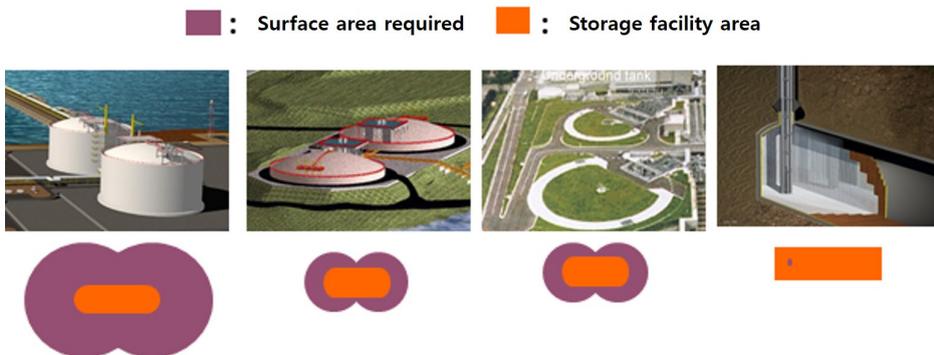


Fig. 8. Comparison of required area between above-ground and underground storage facilities (Park and Chung, 2014).

나 수소경제사회로의 급속한 전환에 따라 재생에너지에 의한 그린수소 등 청정에너지원의 확보 기술은 활용 및 수요에 아직 못 미치는 상황이라, 우리나라는 그레이수소와 블루수소를 통한 생산을 계획하고 있으며, 탄소중립 실현을 위해 수소 공급 목표치의 약 50~70%를 해외로부터 수입하는 전략을 추진하고 있다. 하지만, 그레이수소나 블루수소 모두 기존 화석연료 기반의 생산방식을 취해 수입 에너지에 대한 의존에서 벗어날 수 없고, 수소의 수입 또한 에너지 자립도를 떨어뜨리므로, 기존 원유 등의 화석연료와 같이 국가 에너지 안보 측면에서의 일정 수준 수소에너지의 비축이 필요하다. 특히 에너지 안보 측면에서의 비축은 국가의 수요를 고려해 상대적으로 대규모의 에너지를 장기간에 걸쳐 저장하는 개념이므로 대용량의 수소를 장주기에 걸쳐 저장할 기술이 필요할 것으로 전망된다.

이러한 대용량 수소 저장기술로 전 세계적으로 널리 개발하는 지하저장기술은 기존의 천연가스 지하저장기술을 적용하고 있는데, 아직까지는 지질학적 특성을 이용한 압연공동, 대수층 및 고갈가스전을 활용한 지하저장기술이 대부분이다. 하지만 우리나라는 지질학적 여건상 이러한 지하저장시설을 확보하기가 어려운 상황이라 인위적으로 지하 압반층을 굴착하여 저장공동을 만드는 지하저장방식을 개발할 것을 제안한다.

특히 지하 압반공동 저장방식은 고압의 기체상태 또는 극저온의 액체상태 등과 같이 저장물의 상태, 저장온도 및 압력 등을 결정할 수 있어 수소경제사회의 중요한 저장인프라로서의 역할에 적합하다. 물론 고압의 기체수소를 저장할지 아니면 극저온의 액체수소를 저장할지에 따라 복공재의 특성 및 핵심기술 또한 달라지므로, 이러한 저장특성을 감안한 지하 압반공동 저장기술을 개발해야 한다.

현재 고압의 기체수소를 복공식 압반공동에 저장하는 방식은 스웨덴에서 개발하여 실증하고 있으나, 극저온의 액체수소를 복공식 압반공동에 저장하는 방식은 전 세계적으로 없는 실정이다. 하지만 우리나라는 극저온의 액화천연가스를 복공식 압반공동에 저장하는 기술을 파일럿 규모로 실증한 사례가 있으므로,  $-253^{\circ}\text{C}$ 의 저장온도를 요구하는 액체수소 저장을 위해 극저온 액화 및 온도 유지 등의 기술 고도화를 위한 추가적 연구개발이 필요하다. 이를 통해 현재까지는 상용화 초기 단계인 액체수소와 관련된 기반 인프라 기술들을 한 단계 진일보시킬 기회를 가질 수 있다.

## 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 '심지층 개발과 활용을 위한 지하심부 특성평가 기술 개발'의 일환으로 수행되었습니다.

## References

- Azin, R., Nasiri, A., Entezari, A.J., and Montazeri, G.H., 2008. *Investigation of Underground Gas Storage in a Partially Depleted Gas Reservoir*, paper SPE 113588 presented at the CIPC/SPE Gas Technology Symposium 2008 Joint Conference, Calgary, Alberta, Canada, June p.16-19.
- Decker, L., 2019. *Liquid hydrogen distribution technology*, HYPER closing seminar, Brussels, December 11, 2019.
- EIA, 2015. *The basics of underground natural gas storage*, <https://www.eia.gov/naturalgas/storage/basics/>
- Hydrogen Convergence Alliance, 2020. *Hydrogen Energy: Hydrogen Economy 30 Questions 30 Answers*.
- Hydrogen Council, 2018. *Hydrogen meets digital*, 2018, Hydrogen Council.
- Hyundai Motor Group, 2022.10.12., [www.hyundai.co.kr](http://www.hyundai.co.kr)
- IEA, 2015. *Technology Roadmap: Hydrogen and Fuel Cells*; IEA: Paris, France.
- IEA, 2019. *The Future of Hydrogen - Seizing today's opportunities*. Report prepared by the IEA for the G20, Japan.
- IEA, 2020. *Energy Technology Perspectives 2020*. Flagship report, IEA.
- IPCC, 2007. *Fourth Assessment Report, Climate Change 2007 - Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II*, Cambridge University Press.
- IPCC, 2022. *Sixth Assessment Report, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II*, Cambridge University Press.
- Katz, D.L. and Lee, R.L., 1990. *Natural Gas Engineering, Production and Storage*, McGraw-Hill Publishing Co., New York, p.628-653.
- Kim, H.Y., 2021. *Underground Gas Storage and the Prosperity of Underground Hydrogen Storage*, KIGAM Seminar, Daejeon.
- Markus, R., Thomas, G., Martin R., and Detlef, S., 2019. *A hydrogen supply chain with spatial resolution: Comparative analysis of infrastructure technologies in Germany*, Applied Energy, 247(1), p.438-453.
- Michanowicz, D.R., Buonocore, J.J., Rowland, S.T., Konschnik, K.E. Goho, S.A. and Bernstein, A.S., 2017. *A national assessment of underground natural gas storage: identifying wells with designs likely vulnerable to a single-point-of-failure*, Environ Res Lett, 12, p.1-12.
- MOTIE, 2019. *Hydrogen Economy Revitalization Roadmap*.
- Oh, S.W., Kim, M.J., Park, E.S. and Jung, Y.B., 2021. *Introduction of Underground Hydrogen Storage*, KSCE Magazine, 69(8), p.52-55.

Park, E.S. and Chung, S-K., 2014. *Experience and Challenge of Underground Oil/Gas Storage Caverns in Korea*, Geosystem Engineering, 17(5), p.294-302.

Tarkowski, R., 2019. *Underground hydrogen storage: characteristics and prospects*, Renew Sustain Energy Rev,

105(2019), p.86-94.

The 2050 Carbon Neutrality and Green Growth Commission, 2022.10.12., www.2050cnc.go.kr

U.S. DOE., 2020. Department of Energy Hydrogen Program Plan, 2020, U.S.DOE.



**박 의 섭**

2000년 서울대학교 대학원 지구시스템공학부 공학박사

현재 한국지질자원연구원 국토지질연구본부 심층처분환경연구센터장 & 책임연구원  
(E-mail; [espark@kigam.re.kr](mailto:espark@kigam.re.kr))



**정 용 복**

2000년 서울대학교 대학원 지구시스템공학부 공학박사

현재 한국지질자원연구원 국토지질연구본부 책임연구원  
(E-mail; [ybjung@kigam.re.kr](mailto:ybjung@kigam.re.kr))



**오 세 욱**

2020년 전북대학교 공과대학 토목/환경/자원·에너지공학부, 공학박사

현재 한국지질자원연구원 국토지질연구본부 선임연구원  
(E-mail; [dynoh@kigam.re.kr](mailto:dynoh@kigam.re.kr))