

탄소중립 실현을 위한 원자력수소

Nuclear Hydrogen for Realization of Net Zero

장종화*

Jonghwa Chang

현실화되고 있는 지구온난화를 극복하기 위해 2050년까지 탄소중립을 달성해야 한다는 국제적인 합의가 이루어졌으며, 우리나라도 2023년 3월 범제화하여 국제적 합의에 동참하였다.

수소는 전력 저장의 어려움을 극복할 수 있는 에너지담체로 기후변화완화를 위한 온실가스 탄소중립의 핵심이다. 본 논문에서는 수소경제, 수소생산방법, 원자력을 이용한 수소생산을 살펴보고, 우리나라에서 고려할 요소로서 에너지자립, 에너지안보 측면에서의 원자력을 살펴본다. 재생에너지를 이용한 수소생산과 수소생산 포트폴리오 작성도 살펴본다.

주제어 탄소중립, 수소경제, 원자력수소, 수소생산 포트폴리오

Keywords Net Zero Emission, Hydrogen Economy, Nuclear Hydrogen, Hydrogen Production Portfolio

투고일 2023.4.10. 수정일 2023.5.17. 게재확정일 2023.5.23.

* USNC KOREA 최고과학자(Chief Scientist)(Jhchang@usnc.com)

I. 서론

석탄을 에너지원으로 사용하는 산업혁명이 본격화한 1850년대부터 이산화탄소 등 온실가스방출량은 급격히 증가하게 되었다. 온실가스방출은 지구표면의 평균온도를 상승시켜 빙산을 녹이고 더 많은 태양에너지를 흡수하게 된다. 지구온도는 가속적으로 상승하여 2010년 이후의 증가는 10년간 섭씨 1.06도가 증가하였다. 증가된 대기온도는 대기 에너지를 높여 폭서, 폭우, 가뭄, 잦은 태풍발생 등 기상이변으로 이어지게 되었다(IPCC AR6, 2023).

대부분의 국가는 지구평균온도 상승을 산업혁명 당시보다 섭씨 3도 이내로 낮추는 목표로 합의하고 있다. 근년에 목격되는 잦은 기상이변으로 보다 적극적으로 섭씨 1.5도 이하를 목표로 하자는 제안에 많은 선진국이 동의하고 있다(COP21, 2015.12.15; 파리협약, 2023.5.16). 이를 실현하기 위해서는 대기중으로 배출하는 이산화탄소와 해양, 삼림에서 흡수하는 이산화탄소가 평형을 이루는 상태인 탄소중립(Net Zero Emission)을 달성해야 한다. 전세계 110개 국가가 2050년까지 탄소중립을 달성하는 데 동의했으며 (중국은 2060년까지) 우리나라를 포함한 많은 국가가 범제화하였다(UN, 2023; 탄소중립기본법, 2023).

탄소중립을 실현하는 방법은 석탄, 석유, 천연가스 등의 화석연료자원의 사용을 최소화하고, 이산화탄소방출이 없는 태양, 풍력 등 재생에너지와 원자력에너지를 적극 이용하는 것이다. 1차에너지를 가공한 에너지담체(Energy Carrier)로서 전력은 저장이 어려워므로 높은 에너지밀도로 저장성이 높은 수소를 에너지 담체로 사용하는 수소경제 실현이 중요하다. 탄소중립목표를 달성하기 위해서는 이산화탄소 방출을 최소화한 수소생산이 전제되어야 한다.

본 논문에서는 수소경제, 수소생산방식, 원자력에너지, 우리나라의 수소경제 정책 방향에 대해서 조사하였다.

II. 수소경제

1. 수소의 특성

수소는 모든 화학연료 중에서 단위 중량당 에너지밀도가 가장 크고 연료전지를 이용하

[표 1] 에너지원의 특성

분류	종류	무게당 에너지 (kWh/kg)	부피당 에너지 (kWh/L)	CO2 배출 (kg/MBtu)
에너지 자원	석탄	8	20.2	96
	석유	11.6	10.3	73
	천연가스	15	6.2 (LNG)	53
	우라늄-235	22,400,000	427,000,000 (금속)	0
	경수로연료	140,000	1,400,000 (UO2)	0
에너지 담체	전기(батери)	0.2	0.5 (리튬이온)	-
	수소	39	2.8 (액체수소)	-

출처: Wikipedia, US EIA

여 전력으로 전환하기 용이하여 큰 관심을 받고 있다. 사용시 온실가스나 수증기 이외의 공해물질 발생이 전혀 없기 때문에 지구온난화가 가시화되는 현대에는 더욱 중요해진다. 특히 자동차와 같이 연료중량이 주행효율에 큰 영향을 미치는 경우에는 중요한 역할을 할 수 있다.

수소는 자연에서 채굴되는 자원이 아니고, 전기와 마찬가지로 일차에너지를 투입하여 생산해야 하는 에너지 담체이다.

[표 1]은 에너지원별 에너지함량, 이산화탄소 배출계수를 보여준다.

에너지자원은 자연에서 채굴할 수 있는 자원이며, 에너지 담체는 에너지자원을 변환하여 사용하는 것을 말한다. 석탄, 석유, 천연가스 등 화석연료는 사용시 이산화 탄소 배출을 동반하게되고 급격한 기후변화의 원인으로 지목받고 있다. 원자력연료인 우라늄은 화석연료에 비해 백만 배 이상의 에너지 밀도를 갖고 있으며, 원자력 발전소에 사용하는 저농축우라늄도 1~10만 배 이상의 에너지밀도를 갖고 있다. 에너지 밀도가 높으면 대량을 보관할 수 있으므로 에너지공급의 안정성을 담보할 수있다.

에너지 자원을 변환한 에너지 담체는 온실가스방출의 우려 없이 일상에서 편리하게 사용할 수 있다. 전기는 가장 널리 보급된 에너지나, 저장을 위한 батери의 에너지밀도가 낮다. 수소는 아직 널리 보급되지는 못했으나, 전력에 비해 무게기준 80배, 부피기준 5배 이상 높은 에너지밀도를 가지고 있다. 특히 자체 중량이 중요한 수송분야에서 수소의 높은 에너지밀도는 큰 장점이다.

2. 수소경제

수소경제란 수소를 에너지담체로 이용하는 경제시스템으로 미래학자인 제러미 리프킨의 “수소경제”를 통해 대중적으로 널리 알려졌다(Rifkin, 2003).

1973년 발생한 석유위기로 원자력을 이용한 수소생산에 대한 연구가 활발하게 시작되었다. 그러나, 수소는 초기투자비용이 많고, 생산비용이 높아서 도입이 지연되었다. 석유위기가 진정되자 연구개발이 지지부진하게 되었으며 2000년대 발생한 석유고갈론과 가격폭등으로 다시 각광을 받게 되었다. 그러나 웨일오일을 채굴하기 위해 수압균열법¹이 광범위하게 도입되자 석유생산량이 증가하게 되었고 가격이 안정되었다.

2020년대 이후 지구온난화에 의한 피해가 현실화되면서 수소는 온실가스를 방출하지 않는 수단으로 재조명되고 있다. COP21에서 합의하고 COP24에서 강화한 바에 따르면 지구평균온도상승을 산업혁명 이전의 섭씨 1.5도 이하로 줄이기 위해서는 2030년까지 2010년 이산화탄소방출 대비 45% 수준으로 감축하고 2050년까지는 온실가스 순 방출량 0인 탄소중립 목표를 달성해야 한다(Hydrogen Europe, 2019). 우리나라도 2023년 법제화하였다(COP24, 2018; 탄소중립기본법, 2023). 그러나 법이나 시행령에서도 정량적인 목표제시없이 온실가스관리에 주안점을 두고 있으며, 주무부처가 대량의 온실가스 방출원인 산업체를 관장하는 부처가 아니고 환경부라는 것은 탄소중립 목표달성이 현실적으로 어려울 것으로 우려된다.

탄소중립 목표를 달성하기 위한 방법으로 수송, 산업, 건물 분야에서 수소사용이 최선의 선택으로 간주된다. 수소는 태양, 풍력 등 간헐성이 큰 재생에너지로 생산하여 장기간 보존할 수 있기 때문에 수소경제의 실현은 재생에너지 보급에도 적합하다.

3. 수소경제 실현

지금까지 대부분의 수소는 비료생산을 위한 암모니아 합성, 메탄을 합성, 정유공정에 사용하기 위해 생산하고 있다. 그러나 온실가스감축을 위해서는 에너지 사용분야로 확장하여야 한다. 이를 위해서는 전력 등 대체 수단 대비 경쟁력을 확보하여야 하며 우선

1 수압균열법, hydraulic fracturing 또는 fracking.

적으로 수소생산단가를 낮춰야 한다.

2020년 현재의 수소생산단가는 2.5~6\$/kg이나, 2030년대에는 1.8~2.5\$/kg으로 낮아질 것으로 기대하고 있다(Hydrogen Council, 2021). 이러한 비용하락은 대량생산에 의한 가격하락과 시장에 대한 불확실성 제거가 동반되어야 가능할 것이다. 시스템 전체 비용은 수소 분배, 이용의 보급과 연관되어 있다. 현재도 데이터센터용 비상전원과, 지게차, 기차, 대형트럭 등 장거리 수송 분야에서는 수소이용이 경쟁력을 확보하고 있는 것으로 판단하고 있으며 2030년대에는 대부분의 수송분야, 건물용 전력/난방, 소형발전 분야에서 가격 경쟁력을 확보할 것으로 예측하고 있다.

4. 수소소요(생산)량

전세계의 수소소요는 정유공정, 암모니아 생산, 메타놀 생산, 제철 분야(수소환원제철)에서 연간 9천만 톤(2021년 기준)이다. IEA에 따르면, 2030년 Net-zero 달성을 위해서는 수송분야와 제철분야에서의 수소사용을 확장해야 하며, 2030년대에는 1억 8천만 톤으로 증가할 것으로 예측하고 있다(IEA, 2023).

우리나라는 2030년 BAU 대비 37% 감축목표를 정하였다(산업통상자원부, 2019). 주로 연료전지를 사용하는 수송분야와 재생에너지를 이용한 그린수소생산 방향을 설정하고 있다. 2018년 기준 연간 수소생산 13만 톤을 2040년대 526만 톤으로 증가시키는 목표를 정하였다. 정책 방향은 주로 수소차, 연료전지 국산화이며, 생산분야는 추출수소(LNG 증기개질 등), 해외수입과 유류 재생에너지를 사용한 수전해 수소생산을 설정하고 있다.

우리나라의 수소정책방향은 수소생산의 주안점으로 온실가스배출을 피할 수 없는 LNG 증기개질과 온실가스 발생장소를 해외로 전환시키는 방식으로 전 지구적 탄소중립을 목표하는 기후변화 대책과는 거리가 있어 보인다.

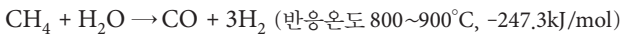
III. 수소생산방식

현재 수소는 정유공정과 비료생산에 사용되며 석탄의 코크스화에서 발생하는 부생수소와 천연가스 증기개질로 대부분 생산하고 있다. 그러나, 이 방식은 동반하는 이산화탄소 등 온실가스방출을 피할 수 없다.

물을 분해해서 수소를 생산하는 방식은 온실가스방출을 배제할 수 있으므로, 기후 변화가 현실화되고 있는 현대에는 물분해 수소생산을 적극 보급해야 한다. 물을 분해하는 방식으로는 전기에너지를 사용하는 전기분해(수전해)와 고온의 열에너지를 사용해서 화학반응을 조합한 열화학 사이클 방식이 있다.

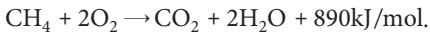
1. 천연가스 증기개질

천연가스 수증기개질의 주성분인 메탄의 증기분해 화학반응식은 다음과 같다.

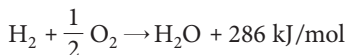


통상적으로 개질반응에 필요한 열은 천연가스 연소로 공급하므로 반응에 의해 발생하는 이산화탄소 외에도 온도유지를 위한 연소로 이산화탄소가 발생한다.

메탄의 연소반응 방정식은 다음과 같다.



수소의 연소 반응방정식은 다음과 같다.



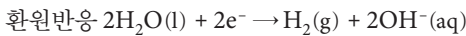
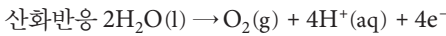
즉, 천연가스 증기개질하여 수소를 생산하더라도 같은 열량생산을 위해 발생하는 이산화탄소는 동일하다. 온실가스 발생측면에서는 증기개질 시 발생하는 이산화탄소를 분리 포집 처리하지 않는다면 net-zero에 기여하는 바는 없다고 할 수 있다.

천연가스 증기개질에 의한 수소생산은 생산단가가 약 1.3\$/kg-H₂으로 가장 경제적인 방법이다(Oni, 2022). 그러나 1kg 수소 생산에는 8~10kg의 이산화탄소가 방출되어 이산화탄소를 포집하여 제거하는 기술도 개발되고 있으며 이 경우에는 생산단가 증가가 예상된다.

2. 수전해

수전해 방식은 잘 개발되어 있으나, 필요한 전기에너지는 열에너지를 변환하는 발전 단계를 거쳐야 얻게 되므로 에너지 효율 측면에서는 열화학 사이클에 비해 불리하다. 그러나, 전력공급인프라는 잘 갖춰져 있으므로, 전체적으로는 장점이 있다.

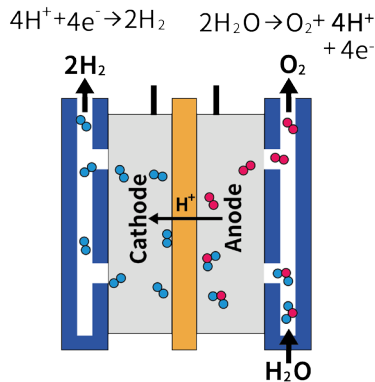
수전해 방식의 원리는 [그림 1]처럼 분리막을 중심으로 양극과 음극을 배치하여 가해진 전압으로 물분자를 이온화시켜 산화-환원반응을 일으킨 후 생성된 이온을 분리막으로 분리하는 방식이다. 이온을 분리막으로 분리하여 수소와 산소를 분리하면 음극에서 수소가스, 양극에서는 산소가스가 발생한다. 분리막을 통과시키는 이온에 따라 수전해 방식을 구분한다.



가. 알카리 수전해

전통적인 물의 전기분해 방식은 알카리수용액을 분해하는 방식이다, 분리막으로는 수산화이온(OH-)을 투과하는 석면이나 이를 대체한 Zirfon을 사용한다. 알카리 전기분해

[그림 1] PEM 전기분해



방식은 50~80도 정도의 가성칼리(KOH) 수용액에 1.8~2.4볼트전압을 가한다. 효율은 52~69% 정도로 낮은 단점이 있다. 이 방식은 전력밀도가(400mA/cm²) 낮으나, 오래 동안 잘 정립된 방식이다.

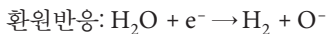
나. PEM 수전해

PEM(Polymer Electrolyte Membrane) 전기분해방식은 양성자(H⁺)을 투과하는 Nafion 등의 플라스틱소재 분리막을 사용한다. 높은 전류 밀도로 4.4W/cm²로 알카리전해방식보다 높아서 1MW 급이 알카리전해 방식으로는 20m³ 정도의 부피가 필요하나, PEM 방식에서는 0.5m³ 정도 부피를 차지한다(Carmo, 2022).

다. 고온수증기 분해

상온에서 물분자를 수소이온을 만들기 위해 필요한 이론적 전압은 1.23볼트이나, 그러나 액체인 물을 수소기체와 산소기체로 분리해야 하므로 이론적 최소전압은 2.06볼트이다(Shiva, 2019). 따라서 보다 값싼 에너지인 열로 물을 수증기 상태로 만든 후 비싼에너지인 전기로 분해하는 것이 유리하다.²

고온수증기전기분해(High Temperature Steam Electrololysis) 는 고온의 수증기에 전압을 가해 수소분자와 산소이온을 형성하고 세라믹 전해질을 통과시킨 후 산소분자로 환원한다(Yildiz, 2005). 온도가 높아질수록 Gibbs 자유에너지가 높아져 반응에 필요한 전압은 낮아진다. 산소이온(O₂⁻)을 투과하고 고온 내구성이 좋은 세라믹전해질을 사용한다.



고온수증기분해에 적합한 섭씨 650~750도에서 내구성을 보이는 전해질로는 YSZ (Yttria Stabilized Zirconia) 등이 사용된다.

2 열에너지를 전기에너지로 전환하는 발전 효율은 40~50% 정도이다. 원자력발전의 경우에는 수증기 온도가 낮아서 발전효율이 낮아서 35% 정도이다.

[표 2] 전기분해방식 비교

방식	작동온도(°C)	전압(V)	전류밀도 (A/cm ²)	전력소요 (kW/kg-H/h)	기술단계
알카리 수전해	30~80	1.8~2.4	0.4	54	상용화
PEM 수전해	80~90	1.8~2.4	2~4		상용화
고온 수증기분해	650~850	~0.6	0.6	36	실증완료

라. 전기분해방식 비교

[표 2]는 전기분해방식을 비교하여 보여준다. 전류밀도가 클수록 단위면적에서 많은 수소를 생산할 수 있으므로 경제성이 높아진다. 알카리수전해, PEM 수전해는 액체상태인 물을 분해하므로 전력소요가 크다. 고온수증기분해는 이미 기체상태인 수증기를 분해하므로 에너지효율이 높다.

IV. 원자력에너지

원자력에너지는 에너지 안보와 경제성에서 우월하나, 미량의 방사능이 환경에 누출되고 사고 시 광범위한 지역에 방사능오염을 일으킨다. 또한 핵분열의 특징으로 정지 후에도 상당량의 붕괴잔열을 발생시키므로 장기간 관리하여야 한다.

1. 고온가스로

고온가스로는 삼중피복미세핵연료입자(TRISO)를 사용하는 원자로이다. TRISO 입자는 0.5밀리미터 직경의 우라늄 미세구를 삼중 세라믹피복(PyC-SiC-PyC)하여 1밀리미터 직경의 미세구로 제작한 것이다. TRISO 핵연료입자를 6센티미터 직경의 구형으로 성형하거나, 1센티미터 직경의 원통형 컴팩트로 성형하여 원자로심에 장전한다. 중성자감속재로 흑연을 사용하고 냉각재는 헬륨가스를 사용한다. 헬륨은 부식등 화학반응이 없는 불활성기체이고 흑연은 열용량이 커서 원자로사고시 발생하는 급격한 온도변화, 화재, 핵연료 용융 등의 가능성을 원천적으로 배제할 수 있다. 원자로가 세라믹 소재로 구성되어 섭씨 1,000도 이상의 고온에서도 기계적, 화학적 안전성을 담보할 수 있다. 고온의

열을 이용하기 위한 금속재료 열교환기는 섭씨 900도 이상의 온도에서 내구성이 떨어지므로, 현실적으로는 섭씨 750도 정도의 열을 발생하는 고온가스로(HTGR)과 섭씨 950도를 목표로하는 초고온가스로(VHTR)로 구분된다.

사용하는 열의 온도가 높을수록 전력생산효율이나 수소생산효율은 높다. 750도 열을 생산하는 중국의 HTR-PM의 열효율은 40% 정도이며(Zhang, 2007), 950도 초고온가스로인 GTHTTR-300의 열효율은 47% 정도이다(Sato, 2014).

일본은 섭씨 950도를 생산할 수 있는 시험로 HTTR을 건설하여 운전 중이며 이를 이용한 수소생산을 연구 중이다.

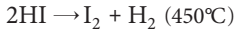
2. 원자력에 의한 수소생산

원자로는 열을 발생하는 장치이며 이 열을 이용하여 전력을 생산한다. 원자력으로 수소를 생산하기 위해서는 고온의 열과 전력을 사용해야 한다. 고온열만으로 물을 직접 분해하려면 섭씨 3,000도 이상의 열이 필요하나, 각종 화학반응을 조합하면 물을 분해할 수 있다. 다양한 열화학 사이클이 제시되어 황산분해와 요오드산 분해를 조합한 요오드-황 공정(IS Process), 구리-염소를 사용하는 Cu-Cl 사이클 등이 검토되고 연구되었다. 물을 분해하여 수소를 생산할 때는 온도가 높을수록 적은 전력이 필요하다. 전력을 생산하기 위해서는 온도가 낮아진 열을 외부에 방출해야 한다. 일반적으로는 고온의 열을 직접 사용하여 전력 소요를 줄이는 것이 전체적 효율에 이득이 된다. [그림 2]처럼 원자로의 출구온도가 높아질수록 수소생산효율도 높아진다. 고온수증기전기분해(HTSE)의 효율은 온도에 따라 완만하게 증가하여 최대 50% 가까운 효율을 보이고, 열화학 사이클인 SI(Sulfur-Iodine)은 700도 부근의 문턱온도가 존재하나, 온도에 따라 급격히 효율이 증가한다. 열화학과 전기분해의 혼합인 HyS(Hybrid Sulfur)는 중간의 효율 증가를 보인다. 열화학 사이클은 생산용량증설이 분리막에 의존하는 전기분해방식보다 유리하다.

가. IS 열화학 사이클

IS 열화학 사이클은 다음과 같은 3가지 화학반응의 조합으로, 물이 들어가서 산소와 수소가 발생되고 황(Sulfur)와 요오드(Iodine)은 재순환된다.

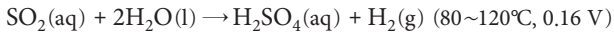




이 사이클의 장점은 수소생산효율이 50% 정도로 높다. IS 사이클이 가장 많이 연구되어 부분공정은 성공적이었으나, 화학반응의 불안정성으로 안정적인 전체 공정은 아직 실증되지 못했다. 그러나, 850도 이상의 고온이 필요하고, 황산, 요오드산의 부식성이 크다는 단점이 있다.

나. HyS 열화학 사이클

HyS(혼합 황산) 열화학 사이클은 IS 열화학 사이클에서 아황산가스를 황산으로 전환하는 과정을 전기분해를 통해 달성함으로써 순 열화학 사이클인 IS 사이클을 단순화한 것이다.

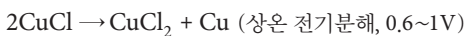
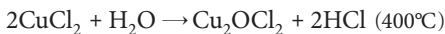


이 사이클은 웨스팅하우스에서 상당한 연구를 진행하여 WSP(Westinghouse Sulfur Process)라고도 한다.

전기분해는 PEM 수전해와 동일한 방법으로 할 수 있다(Gorensek, 2009). 혼합황산 사이클의 순 효율은 25~30%로 알려져 있다.

다. Cu-Cl 열화학 사이클

Cu-Cl 열화학 사이클은 다음과 같은 4가지 화학반응의 조합이다.



이 방식은 작동온도가 섭씨 450~500도로 상대적으로 낮다는 장점이 있으나, 반응 요소인 구리가 고체이므로 연속 공정 달성에 어려움이 발생한다. Cu-Cl 사이클은 초임

계경수로를 추진하던 캐나다에서 적극적으로 연구하고 있다.

Cu-Cl 열화학 사이클의 효율은 33~37%로 추정된다(Tin, 2020).

라. 고온수증기전기분해

고온의 수증기를 전기분해하는 방식으로 통상적으로 섭씨 900도 이상의 고온의 열을 발생시킬 수 있는 초고온가스로를 사용하는 방식이 검토되어 왔다.

고온 수증기분해는 800도 세라믹 산화막을 SOEC(Solid Oxide Electrolysis Cell)를 사용하여 낮은 전압으로 물을 전기분해하는 방식이다(Frick, 2019).

경수로의 경우, 터빈을 돌리고 나온 수증기의 일부를 응축기(Condensor)를 거치지 않고 재가열한 후 전기분해하는 방식은 기존 경수로 시설의 일부분을 개량하여 수소를 생산할 수 있으므로, 원자력발전의 시설 용량이 많아서, 부하추중 운전이 필요한 상황에서 유용하다(Bragg-Sittion, 2020).

마. 천연가스 증기개질

고온가스로의 열에너지로 천연가스를 증기개질하는 방식으로 천연가스를 연소하여 열 에너지를 얻는 기존 천연가스증기 개질에 비해 동일 양의 수소를 생산하기 위한 천연가스 소요량과 이산화탄소 발생면에서 유리하다. 천연가스 증기개질로 1kg의 수소를 생산하려면 증기개질 과정에서 9.3kg의 이산화탄소가 발생하게 되는데 수소 1kg의 에너지와 같은 1갤런의 휘발유를 연소시키면 9.1kg의 이산화탄소가 발생하므로 증기개질에 의한 수소생산은 지구의 기후변화 방지에 큰 기여를 하지 못한다는 주장이 있다(Rapier, 2020). 증기개질에 필요한 열을 원자로에서 공급한다면, 천연가스연소에 수반되는 이산화탄소 배출을 줄일 수 있다(Zhang, 2021).

일본 HTTR로 실증을 완료하였으나, 일반 천연가스 증기개질과 마찬가지로 동반하는 온실가스 배출을 완전히 줄이지 못하고 초고온가스로를 신규로 건설해야 하므로 아직 실용화되지는 못하고 있다.

바. 경수로이용 저온전기분해

경수로로는 타 발전원에 비해 온실가스 배출이 없으며, 기술이 완성되어 있고 발전단가가 낮다. 저온전기분해 기술도 이미 상용화되어 있으므로 경수로에서 생산된 전력을 이용하여 저온전기분해를 한다면, 보다 효율이 높은 기술이 개발될 때까지 대량의 수소 공

급을 할 수 있다(OCED, 2022).

원자력발전업자 측면에서는 전력시장에 공급하기 전에 수소생산을 할 수 있고 자본비가 높은 비중을 차지하는 원자력발전소를 전출력으로 가동하여 생산단가를 낮출 수 있다. 간헐성이 큰 태양, 풍력 전기의 비중이 커질수록 이러한 필요성은 증대된다.

미국 DOE는 기존발전소에 PEM 전기분해로 560kg의 수소를 생산하는 1MW급 시범시설을 실증하였다(WNN, 2023). 생산된 수소는 발전소에서 필요한 자체 수소수요를 충당하고 있다.

V. 우리나라의 수소경제 정책

1. 에너지 자립

우리나라의 연간 1차에너지 공급량은 307.6MTOE이며 국내생산량은 신재생에너지와 수력 등이 24.4MTOE로 1차에너지의 92%를 수입에 의존한다³(에너지경제연구원, 2021). 이는 열량기준으로 석탄 86.7, 석유 81.6, LNG 55.2, 우라늄 28.4MTOE에 해당한다.

에너지 수입액은 총 146M\$로 국가총수입액 535M\$의 27%를 차지하고 있다. 이중 석유 105.5M\$, 석탄 16.7M\$, 천연가스 23.2M\$, 우라늄 0.576M\$으로 구성된다. 생산한 열량당 수입에 지급한 비용은 석유 1.3, LNG 0.42, 석탄 0.2, 우라늄 0.02\$/TOE로 석유가 가장 비싼 에너지원이고, 우라늄은 가장 저렴한 에너지원이다.

수입된 석유의 47%는 수송부문에 사용되므로, 자동차 연료를 수소로 전환한다면, 에너지 수입을 위해 외국에 지불하는 비용이 크게 줄어든 것이다.

단위 수입비용이 압도적으로 적은 원자력에너지 이용은 에너지 자립도를 크게 향상시킬 것이다.

3 에너지 소비가 가장 큰 2018년을 기준으로 하였음.

2. 에너지 안보

IEA(International Energy Agency)에 의하면 에너지안보란 에너지를 적절한 가격으로 충분히 공급할 수 있는 능력이다. 에너지 안보는 경제개발에 따른 장기적 투자 측면과 일시적 수급불균형에서 발생하는 단기적 측면으로 구분된다.

우리나라는 대부분의 에너지를 수입해야하므로 단기적인 측면에서 국내 비축분이 많을 수록 에너지 안보에 유리하다. 석유, 천연가스 등은 “에너지법”에 따라 비축기지를 건설하여 비축하고 있으나 3개월 사용량 정도로 제한되고 있다. 또한 전쟁 시에는 용이한 폭격 목표가 될 수 있을 뿐만 아니라 화재 또는 불순분자에 의한 파괴 목표가 될 수 있다(통진당 사전, 2013).

원자력발전소의 연료는 에너지밀도가 높은 LNG보다 1만 배 정도 높은 에너지밀도로 보관이 용이하므로 가격변동성이 적다. 원자로에 장전후 5년 정도 사용하게 된다. 신규 연료도 3년간 국내 원자력발전소에 공급할 수 있는 물량을 국내에 확보하고 있다(정세영, 2023).

또한 연료비가 발전비용의 대부분을 차지하는 천연가스, 석탄과 달리 원자력 발전에서는 연료비가 5~10% 이내이다.

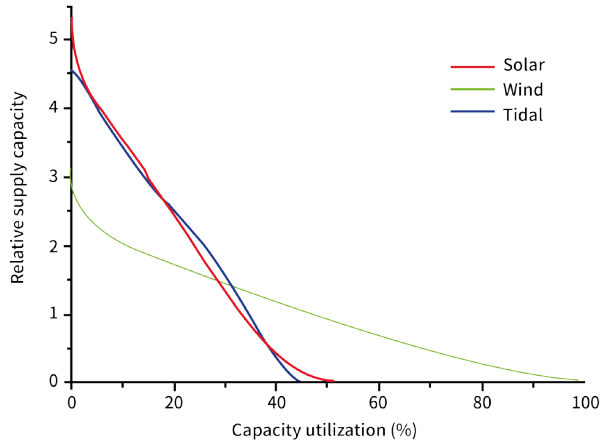
원자력에너지의 적극적 이용은 원자력연료인 우라늄을 대량 장기보관함으로써 에너지 공급가격안정과 중등과 미중관계에서 발생하는 국제 물류공급망의 불안정성에 대처할 수 있다.

3. 재생에너지

태양, 풍력, 조력 등 자연에너지는 이산화탄소 배출없이 전력을 생산할 수 있는 에너지원이다. 그러나, 기상조건에 따라 발전량 변동이 심한 간헐성의 문제가 존재한다. [그림 2]는 우리나라의 재생에너지 이용율을 보여준다. 풍력은 시설용량 이용율이 32%로 높은 편이고, 조력과 태양은 20% 정도이다. 재생에너지 발전량 중 태양광은 [그림 3]처럼 2012년 이후 증가하였고 2018년 이후에는 더 급격히 증가하였다(에너지 통계연보, 2021).

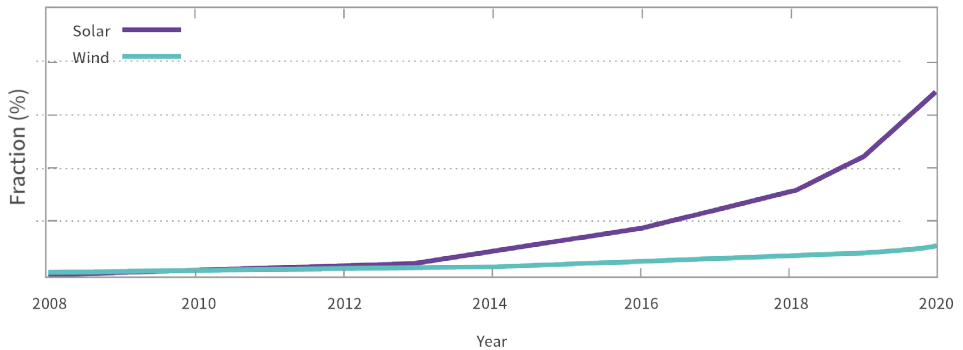
과도한 재생에너지 전력공급은 기저부하, 변동부하로 구분되는 전력망 체계를 타격하여 안정적 전력공급과 주파수유지를 방해한다. 이를 완화하기 위해서는 잉여전력을 이용한 수전해 수소생산을 활성화해야 한다(산업통상자원부, 2023).

[그림 2] 재생에너지 이용율



출처: 전력거래소, 2013년 자료 처리

[그림 3] 전력생산중 재생에너지 비율

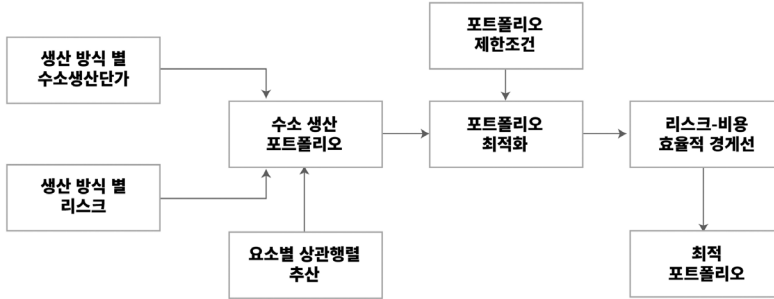


출처: 에너지 통계연보, 2021 자료 처리

4. 포트폴리오

각 에너지원별로 장단점이 있으므로 1차 에너지 선정 시 에너지안보, 경제성, 환경오염,

[그림 4] 수소생산 최적포트폴리오 결정 방법



온실가스배출량, 위험도 등의 가중치를 설정하고, 가격변동성 등의 분산을 고려한 포트폴리오를 구성해야 한다. Markowitz는 MVP(Maximum Variance Principle)방법론을 주식투자의 포트폴리오에 적용하였다(Markowitz, 1952). MVP는 각각의 요소가 불확실한 가격변동성을 가지나 서로 상관관계에 있는 경우에 적용할 수 있다. Awerbuch는 석탄, 가스, 원자력, 수력, 태양 등의 전력원을 이용한 유럽의 전력생산을 분석하였다. 이 분석에서는 불확실한 탄소세를 고려하여 비용과 리스크를 최소화할 수 있는 포트폴리오를 구하였다(Awerbuch, 2007). 유사한 분석을 원자력과 석탄, 천연가스, 전력 등의 방법으로 수소생산 포트폴리오에 적용한 실례도 있다(장중화, 2009).

최적 포트폴리오 결정을 위해서는 [그림 4]와 같은 절차가 필요하다. 다양한 수소생산에 대한 예상 수소생산단가와 수반되는 불확실도(리스크)를 결정해야 한다. 생산단가에는 건설비, 건설기간, 투자기간, 연료비, 운전비, 유지보수 비용, 탄소세가 포함되며 각 요소는 물가변동에 따른 불확실성이 존재한다.

각국마다 에너지가격, 에너지안보, 이산화탄소 감축 등의 지표가 다르므로 근년의 물가 변동을 고려한 포트폴리오 분석이 필요하다. 또한 대체 가능한 생산요소 간에는 상관관계가 존재한다. 이러한 상관관계는 과거의 물가변동을 분석하여 얻을 수 있다. 여기에 각 요소의 제한조건을 고려한 MVP 분석을 통해 리스크-비용의 효율적 경계선을 결정할 수 있으며, 최적 포트폴리오를 도출할 수 있다. 미래 기술인 경우에는 개발 비용, 예상 배치물량, 도입 가능시기, 성공가능성 등을 예측하여 비용, 리스크에 추가할 수 있다.

VI. 결론

수소는 전력과 같은 에너지 담체로 단위 연료 무게당 높은 에너지밀도를 요구하는 수송 분야에서 중요성을 가진다. 수소는 현재의 배터리 기술보다 200배 정도 높은 에너지밀도를 가지고 있다. 에너지 담체는 담체 생산장소와 소비장소를 분리시켜 인구밀집지역의 공해 요소의 줄일 수 있으나, 현재 널리 사용되는 천연가스 증기개질 방식은 전지구적으로 보면 변환효율을 고려할 때 온실가스방출량은 오히려 늘어날 수도 있다. 따라서 기후변화 완화를 위한 Net-Zero 목표를 달성하기 위해서는 이산화탄소 배출이 없는 1차에너지를 사용해야 한다. 기상조건에 따라 생산량이 급변하는 태양광, 풍력을 이용한 수소생산은 적합한 방향이다. 과도한 태양광전기 생산이 간헐성으로 전력망에 부담을 주는 점을 고려하여 전력생산에 지급되는 보조금을 수소생산 부분으로 전환할 필요가 있다. 인구밀도가 높은 우리나라에서 재생에너지 생산은 한계가 있으므로 부족한 부분은 이산화탄소 배출이 없는 원자력에너지를 이용하여 수소를 생산하는 것이 현실적인 방향이다. 원자력활용은 현재 에너지자립도와 에너지안보확립에 절대적인 기여를 하고 있다.

원자력이용 수소생산방식으로 유희전력을 이용한 수전해, 경수로 배출 수증기를 재가열하는 고온수증기분해는 단기적으로 실용화할 수 있는 방향이며, 장기적으로는 보다 높은 효율을 보장하는 고온가스로를 이용한 열화학 사이클 또는 고온수증기분해를 실용화하기 위한 연구개발투자가 필요하다. 합리적인 투자배분은 MVP 방법론을 적용하여 도출할 수 있다.

참고문헌

- 산업통상자원부, “봄철 안정적 전력수급관리를 위한 선제적 조치 추진”, 산업통상자원부, 보도자료, 2023. 3.24.
- 산업통상자원부, “수소경제 활성화 로드맵”, 산업통상자원부, 보도자료, 2019.1.18.
- 에너지경제연구원, 『에너지통계연보 2021』, 에너지경제연구원. 2021.
- 장중화, “Portfolio Analysis for Nuclear Hydrogen”, 4th OECD/NEA Information Exchange Meeting on Nuclear Production of Hydrogen, Chicago USA, 2009.
- 정세영, “韓 우라늄 수급엔 문제없나…美 HALEU 공급망에 참여하거나 자급 기반 마련해야”, 전기신문, 2023.1.2.
- 탄소중립기본법, “기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법”, 법률 제19308호, 2023.3.28.
- 통진당사건, “이석기 내란 선동 사건”, 나무위키, 2023(검색일: 2023.5.1).
- 파리협약, “The Katowice Climate Package: Making The Paris Agreement Work for All,” <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/katowice-climate-package> (검색일: 2023.5.16).
- Awerbuch, S. and S. Yang. “Efficient Electricity Generating Portfolios For Europe: Maximising Energy Security and Climate Change Mitigation,” EIB Pap.12 (2), 2007, pp. 8-37.
- Bragg-Sittion, S.S. and R. Borardman, “Integrated Energy Systems for Hydrogen & Chemical Production,” Hydrogen and Fuel Cell Energy, Annual Merit Review, May 2020.
- Carmo, “Introdictiom to Liquid Alkaline Electrolysis,” DOE Hydrogen Energy Earthshot Expert Meeting, 2022.1.26.
- COP21, “UN Climate Change Conference,” Paris, 2015.12.15.
- COP24, “UN Climate Change Conference,” Katowice, Poland, 2018.12.12.
- Frick, K. et al., “Evaluation of Hydrogen Feasibility for a Light Water Reactor in the Midwest,” INL/EXT-19-55395 Rev.1, Sept. 2019.
- Gorensek, M.B. et al., “A Thermodynamic Analysis of the SO₂/H₂SO₄ System in SO₂ Depolized Electrolysis,” SRNL-STI-2009-00377, 2009.
- Hydrogen Europe, “Hydrogen Roadmap Europe: A Sustainable Pathway for the European Energy Transition,” Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking, Jan. 2019.
- Hydrogen Council, “Path to Hydrogen Competitiveness: A Cose Perspective,” Hydrogen Council, 2020.1.
- IEA, “Hydrogen, International Energy Agency,” Paris <https://www.iea.org/reports/hydrogen> (검색일: 2023.5.1).
- IPCC AR6, “Synthesis Report of the IPCCV Sixth Assessment Report,” IPCC, 2023.

- Markowitz, H.M. "Portfolio Selection," *J. Finance* 7, 1952, pp. 77-91.
- OECD, "The Role of Nuclear Power in the Hydrogen Economy, Cost and Competitiveness," NEA No. 7630, OECD, 2022.
- Oni, A.O. et al., "Comparative Assessment of Blue Hydrogen from Steam Methane Reforming, Auto-thermal Reforming, and Natural Gas Decomposition Technologies for Natural Gas-producing Regions," *Ener. Conv. and Mgmt.*, 254, 115245, 2022.
- Rapier, "Estimating the Carbon Footprint of Hydrogen Production," *Forbes*, June 6, 2020.
- Rifkin, Jeremy, "The Hydrogen Economy: The Creation of the Worldwide Energy Web and the Redistribution of Power on Earth," *TarcherPerigee*, 2003.8.25.
- Sato, H. et al., "GTHTR300 - A Nuclear Power Plant Design with 50% Generating Efficiency," *Nucl. Eng. Design* 275, 2014, pp. 190-196.
- Tin, K.K., S. Swarup, and A. Kumar, "A Review of Nuclear Energy-based Hydrogen Production Methods," selected proc. of RAME 2020, pp. 131-142.
- UN, <https://www.un.org/en/climatechange/>, United Nations - climate action (검색일: 2023.4.30).
- WNN, "Nine Mile Points Start Supplying Hydrogen," *WNN*, 2023.3.8.
- Yildiz, B., K.J. Hohnholt, and M.S. Kazimi, "Hydrogen Production Using a Gas Reactor Operating with Supercritical CO₂ Cycles," *Nuc. Tech.* 155, 2005, pp. 1-21.
- Zhang, Y., "Thermodynamic Analysis and Optimization for Steam Methane Reforming Hydrogen Production System Using High Temperature Gas-cooled Reactor Pebble-bed Module," *J. Nuc. Sci. Tech.*, 58(8), 2021, pp. 1-14.
- Zhang, Zuoyi, "Chinese HTR Program: HTR-10 Results and Work Progress on HTR-PM," *ICAPP-2007*, Nice, 2007.

