



원자력 에너지를 이용한 수소생산의 연계가능성



조원철

한국에너지기술연구원 수소연구단장

- 고려대학교 응용생명환경화학 학사
- POSTECH 환경공학 석사
- KAIST 생명화학공학 박사
- 한국에너지기술연구원 단장

전 세계는 지구 온난화로 인하여 에너지 생산과 이용 단계에서 배출되는 온실가스를 줄이기 위한 탈탄소 에너지 기술 개발에 많은 노력을 하고 있다. 전통적으로 전력 생산은 원자력 발전, 석탄 화력 발전, 그리고 가스 발전이 주로 담당해 왔는데 최근 온실가스 배출 감축과 대기 오염 감축을 위하여 석탄 화력 발전의 비중이 점진적으로 줄이고 있다. 반대로 탈탄소화 에너지 정책에 따라 재생에너지의 비중이 확대되고 있고 전기의 사용량은 꾸준히 증가하고 있다.

성공적인 탈탄소 정책의 이행을 위해서는 각 나라의 에너지 수급 사정을 고려한 현명한 선택이 요구된다. 유럽이나 미국의 경우 넓은 국토와 기후 환경이 재생에너지의 비중을 늘리는데 유리한 환경을 가지고 있다. 전력 수급을 실시간으로 균형 잡을 수 있는 주변국이나 강한 계통망을 확보하고 있어 재생에너지 비중 확대에 따른

문제에 대응할 수 있는 예비력 확보에도 부담이 낮은 편이다. 유럽의 경우 노후 설비 폐기 및 에너지 산업(조선, 철강 등)의 경쟁력 저하로, 미국의 경구 세일가스 개발로 자연스럽게 온실가스를 감축할 수 있었다. 그리고 일찍이 에너지 다소비 산업에 대한 의존도를 낮추어 왔으며 건물 에너지 효율 확대의 효과가 큰 건물 구조를 가지고 있어서 탄소 저감 목표를 달성하기 위한 여건이 준비되어 있다.

하지만, 우리나라는 재생에너지 생산 잠재량은 기후와 국토 면적을 고려하면 유리한 위치에 있지 못하다. 계통망의 관점에서 우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 있으며 북으로 단절되어 있기 있어 주변국들과 쉽게 전력 송배전망이 탄탄하게 엮일 수 없는 형편이어서 독립적으로 전력망을 운영해야 하는 처지에 있다. 재생에너지의 발전, 운용 그리고 탈탄소 목표치의 실현 여부에서도 유리한 조건을 갖춘 유럽과 달리 재

생에너지의 계통 진입으로 인한 변동성 제어에 과도한 예비력 확보가 요구된다. 또한 우리나라는 꾸준한 경제성장으로 에너지 다소비 산업의 경쟁력을 강화하는 방법(설비 고도화 고효율화)으로 성장하였으며 따라서 우리나라의 산업 설비의 전체 에너지 효율은 매우 높은 편이다. 즉, 흔히 이야기하는 잉여 에너지(부생 가스, 폐열, 폐자원)를 활용할 여지가 거의 없다. 따라서 산업 부문에서의 저탄소화는 단기적으로 달성하기가 용이하지 않다.

하지만 탄소 배출을 줄이는 에너지 생산 방식으로의 전환은 거스를 수 없다. 당면한 문제는 어떠한 방법으로 어떠한 속도로 전환할 것인가에 대한 해답을 찾아야 한다. 저탄소 사회로의 전환은 화석 연료의 사용을 줄이는 것인데 발전, 산업, 운송 분야 중 발전 부문에 대하여 주로 논하고자 한다.

재생에너지의 비중 확대로 석탄화력 발전을 대체하기 때문에 단기적으로 가스(천연 가스)의 수요가 강하게 요구되고 있다. 가스발전은 온실가스 배출량이 상대적으로 적고 재생에너지의 변동성에 대하여 전력 안정성을 부하대응 속도가 빠르기 때문에 가스 발전이 저탄소 사회로 전환하는데 징검다리 역할을 할 수 있다. 하지만 천연가스 발전 비중을 계속 늘린다면 온실가스 배출의 감축 효과는 상쇄될 수 있다. 따라서 전력 생산을 위한 탄소 배출량 감축을 위해서는 재생에너지(태양광, 풍력)와 원자력 발전의 에너지 믹스가 요구된다. 물론 기존 석탄 화력 발전

에서 탄소 배출 저감을 위한 순산소 연소 기술이나 CCU기술 개발도 병행되어야 함은 물론이다.

기저부하 발전을 담당하는 원자력 발전은 풍력 및 태양열 발전과 에너지 믹스 체계를 구성하는 경우에 재생전력의 빠른 속도의 변동성에 대응하여 빠른 속도로 출력을 증가 및 감소해야 한다. 하지만 원자로는 열용량이 크고, 핵반응의 특성상 신속하게 전력요구에 대응하기에 부적합하다. 따라서 원자력 발전이 수소 생산으로 전력 생산 모드로 빠르게 전환할 수 있는 “대체 작동 모드”가 가능하면 재생에너지 비중이 높은 에너지 믹스에서도 원자력 발전은 안정적으로 운전이 가능하게 된다. 전력에 의한 수소 생산 방식인 수전해 기술은 최근 MW~GW급 용량으로 빠른 응답성을 보유하면서 에너지를 경제적으로 저장할 수 있는 방법으로 최근 많은 연구와 실증이 진행되고 있다. 그러므로 원자력과 연계된 수소 생산 기술(대체 작동 모드)은 운전 응답 속도가 빨라야 할 것이다. 그리고 원자력 발전 설비 용량이 대략 1 GW급이며 생산된 수소의 경제성을 고려하면 수십 MW급 이상의 수소 생산 기술이 요구된다.

원자력의 열원 또는 전력을 이용하여 수소를 생산할 수 있는 기술로는 저온 수전해 기술(LTE, Low Temperature Electrolysis), 고온 수전해 기술(HTE, High Temperature Electrolysis), 하이브리드 황산 분해 공정(HSA, Hybrid Sulfuric Acid)와 개질 수소(StMR, Steam-



〈표 1〉 Technical Figures of merit relative to Nuclear/Hydrogen Hybrid Systems

	LTE	HTE	HSA	StMR
Electrical Duty(%)	100	85	50	5
Heat Duty(%)	0	15	50	95
Peak Temperature(°C)	Ambient	800-850	650-850	800-900
TRL	6-8	5	3-4	9
Nuclear SMR Compatibility	LWR, LMR, MSR, HTR	LWR, LMR, MSR, HTR	MSR, HTR	MSR, HTR
Application Flexibility	High	High (may run reversibly)	Low	High
Rampability	Fast	Fast	Slow * (H ₂ SO ₄ Dissociation)	High
Process Control Response Rate	Fast (<10min)	Moderate (>10 min)	Electrolyzer - Moderate (>10 min) H ₂ SO ₄ - Slow (> 24hr)	slow (> 1hr)
Electrical Demand Response Rate	Fast (< 1 sec)	Fast (<1 sec)	Fast (< 1sec) Electrolyzer	Not Applicable
Thermal Response Rate	Not Applicable	Unknown	Unknown	Not Applicable
Complexity	Medium	High	Medium	Low
Scalability	High modular cell stacks	High modular cell stacks	Medium typically large	Low typically large
Hydrogen Purity	High	High	Medium acid gases	High

Methane Reforming)가 있으므로 각 기술의 특징을 〈표 1〉¹⁾에 정리하였다.

응답성(Rampability, Response rate)과 대용량화(Scalability) 측면에서 저온수전해가 현재 가장 현실적인 대안이 될 수 있다. 하지만 100% 전력을 이용한다는 점에서 효율이 낮은

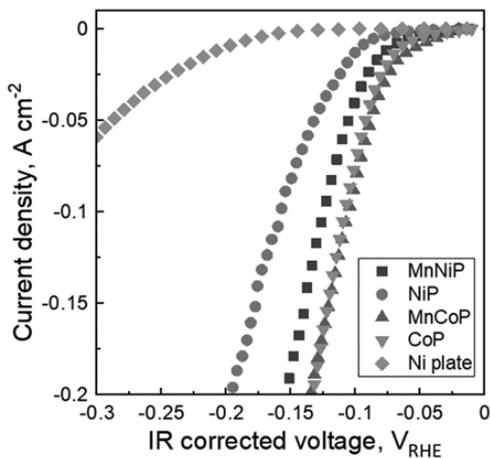
단점이 있다. 고온 열을 직접 이용함으로써 효율을 늘리는 측면에서는 고온수전해가 유리하지만 Scalability 측면에서 아직 해결해야 할 부분이 필요하다.

현재 한국에너지기술연구원 수소연구단 수전해 그룹은 빠른 응답성과 대용량화가 가능한 저

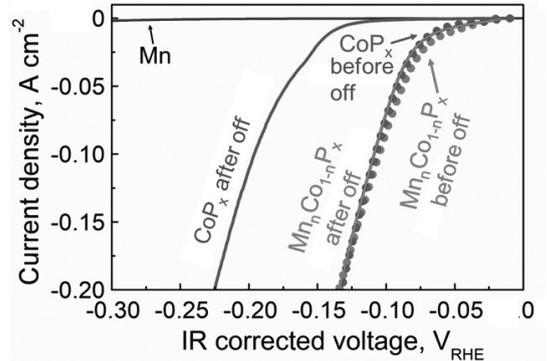
온수전해 기술(알칼라인 수전해, PEM 수전해, AEM 수전해)을 중점적으로 연구/개발 중이며 특히 알칼라인 수전해 기술 부문에서 세계 최고 수준의 원천 기술과 Scale-up 기술을 보유하고 있다.

알칼라인 수전해용 음극(Cathode)전극의 경우 대부분 니켈, 코발트, 철 등의 상대적으로 저렴한 전이 금속을 이용하고 있으며, 인(P), 황(S) 등의 비금속 원소로 화합물을 첨가하면 일반 순수 전이금속 전극보다 수소발생 활성도가 크게 향상되는 것이 보고되고 있다. 한국에너지기술 연구원은 전기도금법을 이용하여 수소발생용 전극으로 니켈인화물(NiP), 코발트인화물(CoP)을 합성하고 높은 활성도를 확인하였다²⁾.

그리고 잦은 간헐성에 대비하여 차단 상황에서의 성능 하락을 보완하기 위하여 Mn을 함께 도금하여 내구성을 향상시킬 수 있었다. NiP의 경우 Mn의 첨가로 수소 발생 활성도가 향상되는 효과도 보였다³⁾.



[그림 1] 제작한 Ni, Co, Mn 계열 인화물의 수소발생 활성도



[그림 2] Mn 첨가로 코발트-인 전극의 성능 열화 개선

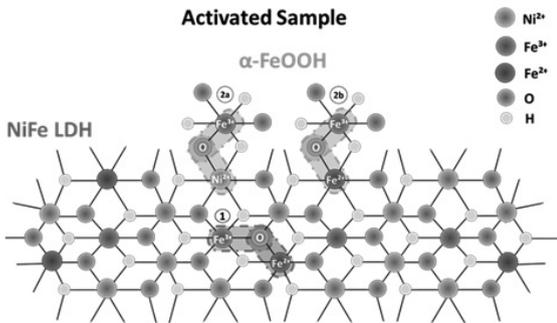
수소전극의 활성도는 전류밀도 10 mA cm^{-2} 에서 발생한 과전압으로 비교되며, 세계적으로 보고되는 전이금속계열 알칼라인 수전해 음극은 과전압이 60 ~ 200 mV 대로 보고된다. Mn을 첨가한 CoP와 NiP의 과전압은 각각 65, 73 mV로 세계적으로도 상당히 우수한 수소발생 활성도를 보인다고 할 수 있다. 또한 기존에 널리 보고된 금속인화물 전극은 수열합성, 열처리, 인화처리 등 복잡하고 시간이 오래 걸리는 제작 과정이 필요하며 재현성이 낮지만 한국에너지 기술연구원이 개발한 전극은 전기도금법을 이용하여 빠르고 간단한 고효율 수소발생 전극 제조가 가능하며 부하변동 상황에 대응할 수 있다는 장점이 있다.

알칼라인 수전해용 양극(anode) 전극의 경우 수전해용 양극은 이리듐, 루테튬 계열 산화물이 높은 산소발생성능으로 많이 이용되어 왔으나 효율성이 높으면서도 가격이 저렴하며 내구성이 뛰어난 전극재료를 개발하는 것은 매우 중요하다. 저렴한 전이금속 계열 산화물 및 합금전극

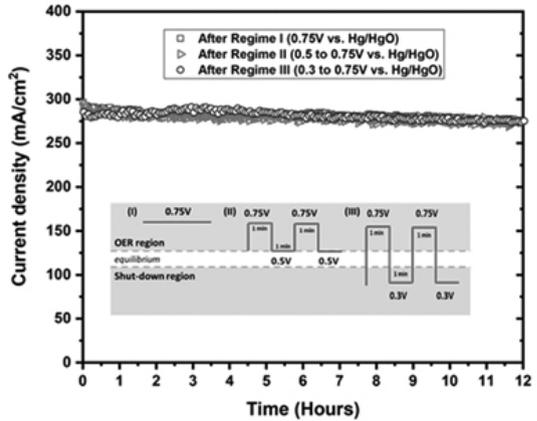


들이 연구되었고, 그중 이중층 수산화물(LDH, Layered Double Hydroxide)은 활성점이 많고 이온 교환이 빠르며, 알칼라인 환경에 적합한 특성에 의해 알칼라인 수전해의 양극으로 많은 관심을 받게 되었다. 그러나, LDH 전극은 전도도가 낮고 수전해 장치 작동시 전원 공급이 불안정한 경우 전극의 내구도가 심하게 떨어지는 문제점이 있다.

한국에너지기술연구원은 철 기판을 니켈 이온이 존재하는 용액에 담근 뒤 pH조절을 통하여 연속적인 산화반응을 일으켜 표면에 LDH를 형성하는 방법을 적용하였다. 해당 방법으로 제작한 Ni-Fe LDH는 철 이온이 기존의 LDH에서는 볼 수 없었던 α -FeOOH 상의 출현으로 인해 $Fe^{3+}-O-M^{2+}$ (O:산소원자, M:금속원자) 결합과 $Fe^{3+}-O-Fe^{2+}$ 산소 브릿지를 형성하여 Ni과 Fe의 활성상태를 유도할 수 있었다⁴⁾. 또한 전압을 급격히 변화·반복 시켰음에도 높은 활성도를 계속해서 유지하는 것을 확인하였다⁵⁾.



[그림 3] 표면에 α -FeOOH 상이 형성된 NiFe LDH

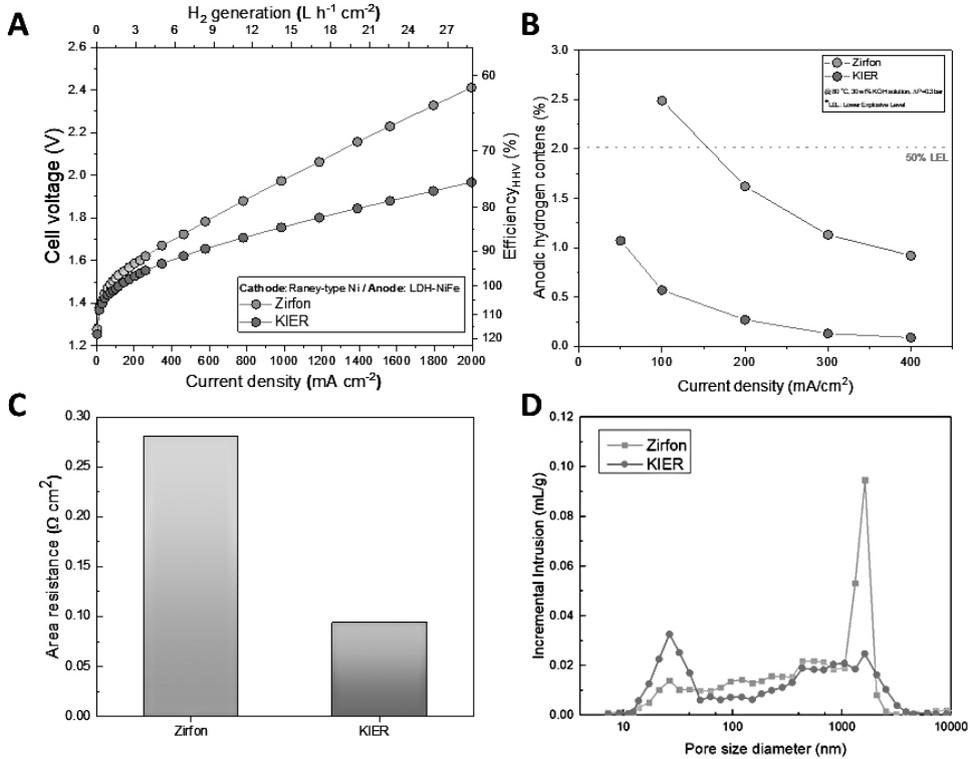


[그림 4] 작동전압 변동을 이용한 산소발생 내구성측정

산소발생전극의 활성도는 많은 경우 전류밀도 10 mA cm^{-2} 에서 발생한 과전압으로 비교되며, 세계적으로 전이금속계열 알칼라인 수전해 양극은 과전압이 150 ~ 350 mV 대로 보고되고 있다. 위의 방법으로 형성된 α -FeOOH/NiFe LDH는 214 mV 의 낮은 과전압을 보였으며, 동시에 불안정한 운전 전압에서도 높은 산소발생 성능을 보이는 부하변동형 내구성까지 확보하여 이는 세계적인 수준에서도 우수한 산소발생전극이라고 할 수 있다.

알칼라인 수전해의 분리막은 고농도 전해질 (25~30 wt.% KOH)의 이온 전도도와 음극, 양극에서 발생한 가스의 혼합을 억제하는 분리 역할에 우수한 성능을 보여야한다. 대표적인 알칼라인 수전해용 분리막은 85 wt.% 지르코니아 구조체와 15 wt.% 폴리설폰 바인더로 구성된 벨기에 Agfa사의 Zirfon이다.

[그림 5]는 상용 분리막(Zirfon)과 KIER 분리막의 수전해 시스템에서의 성능을 비교한 그림



[그림 5] 상용 분리막(Zirfon)과 제조 분리막(KIER)의 비교. (A) 80°C, KOH 30wt% 용액에서 I-V 곡선. (B) 0.3 bar 차압 분위기에서의 에노드극 수소 농도. (C) 면 저항 비교. (D) Hg 기공도 측정.

이다. 수전해 시스템에서 분리막의 이온 전도 능력을 확인할 수 있는 전류밀도에 따른 전압에 관한 그래프를 [그림 5A]에 나타내었다. KIER 분리막은 2 A/cm²에서 약 76% 높은 효율을 나타내고 있으며, 1.4 A/cm²에서는 80 wt% 효율을 기록하였다. 이에 반해 상용 분리막은 그 절반 값인 700 mA/cm²에서 80 wt% 효율을 나타내었다. 다음으로 분리막의 가스 혼합 억제 성능을 확인할 수 있는 실험 결과를 [그림 5B]에 나타내었다. 낮은 전류밀도에서는 생성되는 가스의 양이 적기 때문에 에노드극으로 투과되는 적

은 양의 수소만으로도 폭발 하한점(LEL)의 50% 지점에 도달하여 안전문제를 야기할 수 있다. 제조 분리막은 전 범위의 전류밀도에서 폭발 하한점에 도달하지 않지만, 상용 분리막의 경우 150 mA/cm² 이하에서 50%의 폭발 하한점에 도달하게 된다⁶⁾.

[그림 5C]는 분리막의 면저항을 측정한 결과이다. 제조된 분리막은 상용 분리막에 비해 약 1/3 값인 0.11 Ω·cm²의 낮은 면저항을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이런 수전해 시스템에서의 성능 차이는 [그림 5D]에 나타낸 분리막의



기공 구조에 지배적인 영향을 받는다. 제조 분리막은 상용 분리막에 비해 meso기공의 양이 많고 macro기공의 양이 적은 것을 확인할 수 있다. 2~50 nm의 meso크기 기공은 분리막의 OH⁻ 이온의 전달 능력에 영향을 미치며, 700 nm ~ 2000 nm사이의 macro크기 기공은 분리막의 수소 투과도에 영향을 미친다. 따라서 제조 분리막의 이온 전도 능력과 가스 분리 능력이 우수하게 나타난다.

정리하면, KIER 수소연구단 수전해 그룹은 수전해 기술을 전 세계적으로 선도하고 있으며 스케일업 기술을 보유하여 기술 이전을 통하여 MW급 수전해 시스템 개발이 준비되어 있다. 운전 유연성이 뛰어나고 시스템 Scalability가 검증된 수전해 시스템을 원자력과 연계하여 운전하는 선택은 우리나라의 성공적인 탈탄소 정책 이행을 위해 필요한 방안이 될 수 있다. **KIIF**

참고문헌

- 1) INL/EXT-17-41484, Figures of Merit for Nuclear/Hydrogen Hybrid Systems, Richard D. Boardman, March 2017.
- 2) Kim, Ik-Sun, et al. "Sacrificial Species Approach to Designing Robust Transition Metal Phosphide Cathodes for Alkaline Water Electrolysis in Discontinuous Operation." *Journal of Materials Chemistry A* (2021).
- 3) Wang, Xiaodeng, et al. "Mn-doped NiP₂ nanosheets as an efficient electrocatalyst for enhanced hydrogen evolution reaction at all pH values." *Journal of Power Sources* 387 (2018): 1-8.
- 4) Chen, J., Zheng, F., Zhang, S. J., Fisher, A., Zhou, Y., Wang, Z., ... & Sun, S. G. (2018). Interfacial interaction between FeOOH and Ni-Fe LDH to modulate the local electronic structure for enhanced OER electrocatalysis. *ACS Catalysis*, 8(12), 11342-11351.
- 5) Lee, S., Cho, H. S., Cho, W. C., Kim, S. K., Cho, Y., & Kim, C. H. (2019). Operational durability of three-dimensional Ni-Fe layered double hydroxide electrocatalyst for water oxidation. *Electrochimica Acta*, 315, 94-101.
- 6) Lee, Hae In, et al. "Advanced Zirfon-type porous separator for a high-rate alkaline electrolyser operating in a dynamic mode." *Journal of Membrane Science* 616 (2020): 118541.