

그린수소 생산을 위한 수전해기 소재부품 개발 동향과 뿌리기술 적용 방안



김영수
포항산업과학연구원

초 록

최근 잇따라 발생하고 있는 이상 기후로 탄소 중립에 대한 관심이 높아지고 있다. 우리나라 정부도 신재생에너지 중심의 에너지 전환과 수소 경제 활성화에 대한 정책을 연일 발표하면서 많은 국책 과제들이 추진되고 있다. 잉여 재생에너지를 수소 가스로 변환하여 저장했다가 필요할 때 다시 전기로 사용하거나, 수소 가스 자체를 타 산업에 활용할 수 있게 해주는 핵심 기술이 수전해 기술이다. 다양한 수전해 기술 중에 PEM 수전해 기술은 재생에너지의 빠른 변동에 신속하게 대응할 수 있어 재생에너지 확산과 더불어 최근 높은 관심을 받고 있는 기술이다. 그러나 비싼 촉매와 내부식성이 필요한 핵심 부품들이 국산화 되어 있지 않아 장치의 가격이 높은 상황이다. 그에 따라 아직은 수전해를 통해 생산된 수소 단가가 다른 기술을 통해 생산된 수소들 보다 가격이 높아 상업화가 더디게 진행되고 있다. 그러나 정밀 가공, 열처리, 코팅 등의 뿌리 기술들을 이용하면 PEM 수전해기의 핵심 부품인 bipolar plate나 end plate, 분리판 등을 국산화 하여 수소 생산 단가를 낮출 수 있는 여지는 충분하다. 탄소 중립에 반드시 필요한 그린 수소가 가격 경쟁력을 확보할 수 있도록 산업간 기술 협력이 절실한 시점이다.

서론

최근 전세계적으로 발생하고 있는 이상 고온 및 폭우 등으로 기후 위기의 심각성에 대한 인식이 높아지고 있다.^[1] 이에 따라 세계 각국은 지난 파리기후 협약(COP21) 이래로 강력한 탄소중립에 대한 이행 계획을 세우면서 기후 위기를 극복하고자 다양한 노력을 기울이고 있다.^[2] 우리나라도 2030년 온실가스 감축목표(Nationally Determined Contribution, NDC) 수립^[3]과 「2030년 국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 기본 로드맵」을 마련^[4]하면서 본격적인 온실 가스 감축을 위한 노력을 시작하였으며 최근에는 작년 12월 제출한 2030 NDC 목표인 '18년 대비 26.3% 감축에서 40% 감축으로 그 목표를 대폭 상향하여 추진하기로 하는 등 탄소중립에 박차를 가하고 있다.^[5] 그동안 정부에서 발표한 재생에너지3020이행계획^[6], 수소경제활성화 로드맵^[7]을 통해서 꾸준히 추진됐던 태양광, 풍력 등의 재생에너지 확산과 수소 생산과 활용 생태계가 성공적으로 구축될 때 성공적인 탄소중립이 가능하다는 것은 자명하다.

재생에너지3020이행계획에 따라 우리나라 전체 발전량의 20%를 재생에너지가 담당하게 될 경우 많은 전문가들은 재생에너지원의 간헐성이 계통 안정성에 큰 영향을 미칠 것이라고 우려하고 있다.^[8] 재생에너지 보급률이 높은 유럽에서는 이러한 문제를 극복하기 위해 Power to gas(P2G)의 개념을 도입하여 잉여 전력을 수소나 메탄으로 전환하여 저장하고 있다.^[9] 잉여전력을 계통으로 보내지 않고 물의 전기분해를 통해 유용한 가스로 변환하였다가 연료전지를 통해 다시 전기로 바꾸거나 필요한 곳으로 보내 활용하는 개념이 P2G의 핵심이다. 이렇게 재생에너지로 생산된 전력을 이용하여 만들어진 수소는 수소 경제의 핵심으로 진정한 수소사회를 이루는 밑바탕이 되며 오염물질을 배출하지 않는 진정한 깨끗한 수소라는 뜻으로 '그린수소'라고 불리고 있다.^[7]

본고에서는 그린 수소 생산에 필요한 핵심 기술인 수전해 기술과 관련 소재부품 개발 동향에 대해 짚어보고 부품 국산화를 위해 뿌리 기술과의 연계성에 대해 알아보려 한다.

수전해 기술 개요

수전해 기술은 수소와 산소로 구성되어 있는 물에 전기를 걸어 수소와 산소를 분리, 발생시키는 기술로 현재 상업화 된 기술은 알칼리 수전해법(Alkaline electrolysis, AEL)과 고체분자형 수전해법(Polymer electrolyte membrane electrolysis, PEMEL)이다.^[10]

알칼리 수전해법은 수산화칼륨의 강알칼리 용액을 사용해 수전해하는 것으로 대규모 수소제조용으로 공업 분야에서 적용되고 있다. 고분자 고분자형(PEM형) 수전해법은 1970년대 초기에 GE가 연료전지의 기술을 적용한 것으로 일본에서는 1975년경에 오사카공업기술연구소(현 산업기술종합연구소)에서 막·전극접합기술이 연구되어, 현재는 민간 기업과 연구소에서 연구 개발 및 상용화 되고 있다. 고체고분자형 수전해는 같은 면적에 흐르는 전류(전류밀도)가 알칼리 수전해에 비해 높기 때문에 전해조를 소형화할 수 있으나 촉매 등에 고가 재료들이 포함되어 있어 수소 제조 원가(설비비 포함)는 고체고분자형 수전해가 알칼리 수전해의 2~3배이지만 앞으로 비용이 낮아질 것으로 기대되고 있다. AEL과 PEMEL에 대한 주요 특징을 표 1에 나타내었다.^[11]

상업화된 두 기술 외에 고온 수전해 기술(High Temperature Electrolysis, HTEL)(또는 고체산화물 수전해, (Solid Oxide Electrolyser Cell, SOEC)가 있었으나 본고에서는 상업화 된 두 기술에 대해서만 논의하고자 한다. 독일 NOW (National Organisation Hydrogen and Fuel cell Technology)에서 분석한 주요 수전해 기술 공급 업체의 AEL, PEMEL, HTEL 기술 성숙도는 그림 1과 같다.^[12]

각 수전해 방식에 따라 시동시 요구되는 반응시간도 다른데 재생에너지는 수 초~수십초 사이에 전력 변화가 생기는 특성이 있다. 표 2에 나타난 것과 같이 PEM수전해는 재생에너지 연계 시 최저 부하로 인해 부하변동 대응 능력이 현재 수전해 기술 중에 가장 뛰어나고, 부하변동에 대한 유연성이 우수하며, 상온에서 최소부하로부터 전(full) 부하까지 소요시간이 10초 이내로 매우 빨라 부하 변동에 대한 대응성이 좋다. 또한 수소의 순도 또한 타 수전해 방

식에 비하여 높기 때문에 설계에 따라 고압 운전도 가능하며, 고전류밀도로 인해 시스템 크기를 줄일 수 있어 재생 에너지와 연계한 그린수소 생산에 적합하다. 그리고 낮은 온도에서 순수한 물을 이용해 고순도의 수소를 고압으로

제조할 수 있고, 미량의 수분을 제거하면 별도의 정제과정 없이 최소 순도 99.99% 이상의 수소를 얻을 수 있어 산업용 수소 중에서도 고순도 수소시장에 적합한 기술로 평가 받고 있다.^[13]

표 1. 알칼리 수전해와 고체고분자형 수전해의 비교

	알칼리 수전해	고체고분자형 수전해
피드	KOH 용액, NaOH 용액	순수 물
필요전력	4.5~6.5 kWh/Nm ³	5.0~6.5 kWh/Nm ³
시스템 규모	대형화 가능	50 Nm ³ /h 정도
수소 순도(정제 프로세스 포함)	99.99%	99.99%
이미지		

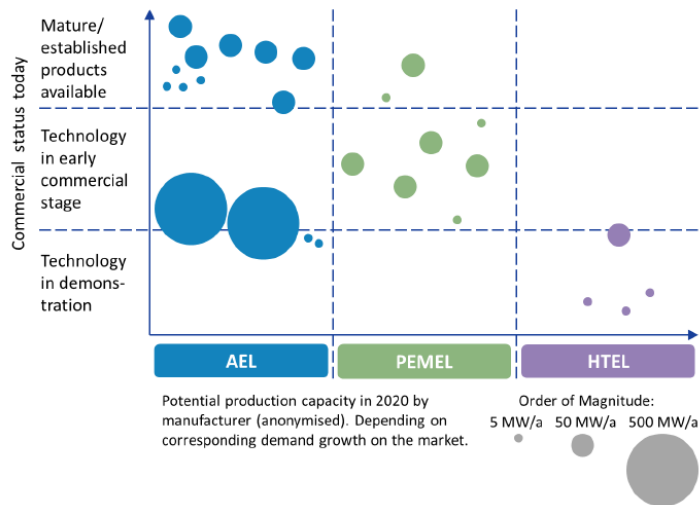


그림 1. 수전해 기술 공급 업체의 AEL, PEMEL, HTEL 기술 성숙도 그래프

표 2. 수전해 방식별 특성

구분	PEMEL	AEL	HTEL
시스템 가격 구성	Stack ↑ / BOP ↓	Stack ↓ / BOP ↑	연구 단계
개발 단계	실증 단계	상업화 단계	기초 연구 단계
유지/보수	상당히 용이	전해액 손실/ 부식	고온의 열원 필요
반응시간(시동소요시간)	<10s	1~5min	15min
국산화 수준	매우 낮음	낮음	기술 개발 단계

독일 NOW의 시장 조사를 통한 PEMEL, AEL, HTEL의 에너지 소비량 전망과 셀의 밀도 전망은 현재 AEL이 PEMEL보다 전력 소비량이 낮으나 2050년경에는 PEMEL이 AEL을 따라잡을 수준의 경제적 효율을 발휘할 것으로 전망하고 있으며, 곧 PEMEL의 생산량이 늘어날 것으로 전망하고 있다.^[12]

PEM 수전해기 구성

PEM 수전해기의 단위셀(그림 2)은 막전극 집합체(membrane electrode assembler, MEA), 급전체(Gas Diffusion Layer, GDL), bipolar plate(또는 분리판, flow-plate)등으

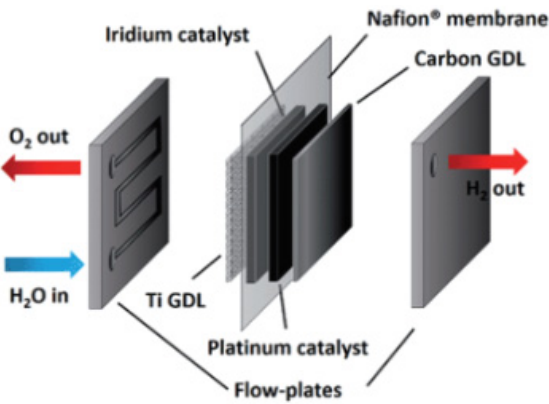


그림 2. PEM 수전해기 단위전지의 개념도

로 구성된다. 전극 접합체의 음극 촉매로는 Pt/C가 주로 사용되며 양극에는 이리듐이나 이리듐계 합금 촉매를 사용한다. 이러한 MEA와 티타늄 bipolar plate를 직렬로 연결하여 스택을 만들어 보통 사용하게 된다. 전극제조 기술의 경우 수소를 발생하는 음극용 탄소나노튜브나 탄소섬유를 이용한 전극개발 등이 진행되고 있으며, MEA 제조 기술 관련 연구도 활발히 진행 중이다. 백금계열 귀금속 촉매의 함량절감, Pt-Ir 등의 혼합 전극을 이용한 MEA 제조, Pt 물질의 다변화에 의한 MEA 제조, MEA 성능을 향상시키기 위한 기술 등이 있다. 셀/스택 제조 기술은 고분자 전해질 수전해용 단위 셀을 제작하는데 필요한 end plate 재질, 집전체에서의 유로형상, 단위 셀의 형태(원형, 평판형 등), 탄력적인 집전체의 개발, 용액 및 생성 가스의 누수 방지를 위한 실링 방법, 고압 및 고온에서 동작 가능한 단위 셀 제조 방법, 단위 셀들의 적층에 의한 스택제조 방법이 연구 중에 있다. PEM 수전해의 구성요소를 표 3에 정리하였다. 전체 시스템 value chain을 그림 3에 나타내었다.

PEM 수전해기의 총 시스템 비용에서 각 요소의 구성 비중을 조사한 결과 현재 스택이 가장 큰 비중을 차지하였으며, 그 다음으로 BoP, Power Supply, Gas Purification 순이었다. 가장 큰 비중을 차지하는 stack의 각 부품 요소 별로 가격을 세분화하여 그림 4에 나타내었다. Bipolar

표 3. PEM형 수전해 구성 요소

스택의 구성 요소		
막전극 집합체 (MEA)	전극 촉매	양극 $2H_2O - 4H^+ + O_2 + 4e$ 음극 $4H^+ + 4e \rightarrow 2H_2$
	전해질막	H ⁺ 를 선택적으로 통과시킴
Gas Diffusion Layer		전극 촉매 전극을 통전시키고 반응물과 생성물의 확산을 촉진
Bipolar Plate (분리판)		<ul style="list-style-type: none"> 산소와 수소의 혼합을 방지 면에 유로를 형성하여 반응물의 전극으로 확산을 유도 성성된 가스를 원활히 배출 분리판은 양극형(양면에 유로), 단극형(단면에 유로)이 있음
Stack End Plate		<ul style="list-style-type: none"> Stack Clamping 순수 유입과 산소, 수소 가스의 배출 유로가 있음 Stack 반응면의 접촉저항을 최소화 할 수 있는 Inner Pressure Bolt 위치
Gasket		<ul style="list-style-type: none"> 구성 요소간 gas와 유체의 Leak를 방지 산소, 수소, 순수의 이동 유로가 위치 구성 요소간의 절연
조립		물의 공급 배분, 생성 가스의 집합을 위한 전기 분해셀의 출입구, 수 심에서 수백 전기 분해셀의 적층기술

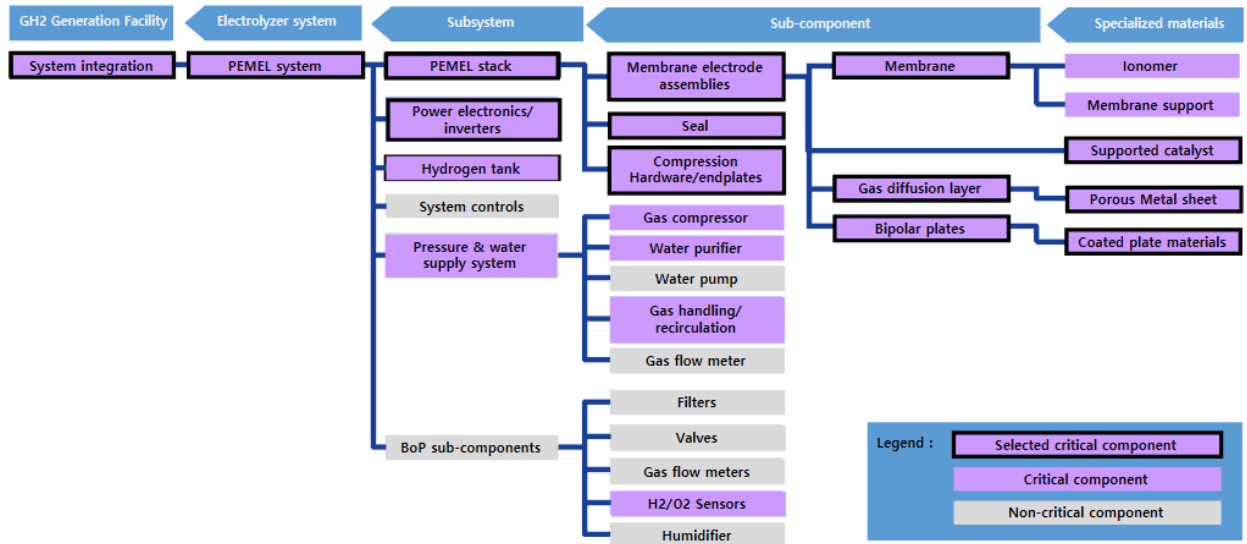


그림 3. 수전해기 전체 시스템 value chain

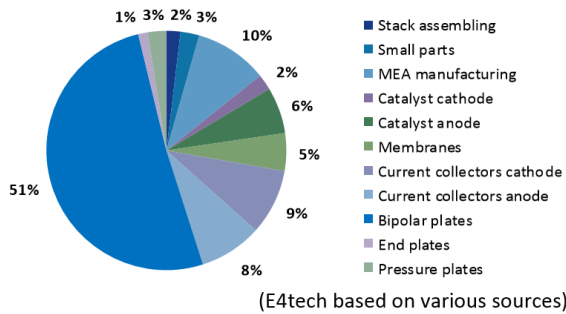


그림 4. PEMEL cost breakdown (E4tech based on various sources)

plate가 51%를 차지하고 있으며 MEA와 current collector 등의 부품이 나머지 40%를 차지하고 있다.^[14] 그런데 bipolar plate 및 current collector들은 현재 가공기술 부족으로 전량 수입 되고 있으며 국내 뿌리기술을 통해 충분히 개발 될 수 있는 부분이다.

PEM 기반 수전해 산업을 위한 뿌리기술 지원방향

○ MEA

표 4와 같이 PEM 수전해기에 사용되는 기술과 뿌리 기술과 밀접한 관계가 있다. MEA와 관련된 고성능 전극 촉매, 막에 전극 촉매를 코팅하는 코팅 공정 등의 요소기술 개발이 필요하며 전기분해셀 내부 구성 요소간에 접촉저

항 최소화, 스택 조립 시 전기 분해셀 간의 접촉저항 최소화 연구, 전기 분해 셀 내에서의 효과적인 물 분배와 생성된 가스 제거를 위한 구조 연구, 전기분해 반응에서 발생하는 열 제거 등을 통해 스택 효율을 개선필요하다.

○ 분리판

분리판은 수소연료전지의 핵심 부품 가운데 하나로, MEA와 함께 가장 많은 수량이 사용되는 부품이다. 기존의 분리판은 금속이나 흑연으로 만들었으며 수소가스가 이동하는 통로가 새겨진 유로를 선반으로 가공하므로 두께 조절과 가공작업에 한계가 있다. 분리판은 반응가스의 공급/분리뿐만 아니라 전기 전도, 반응에서 생성된 물의 배출, 내부 열관리 등의 주요 역할을 수행하는데, 분리판은 계면 접촉저항을 줄이기 위해 전기적 전도성을 구비해야한다. 금속분리판 개발을 위해서는 다양한 공정별 요소기술이 필요하며 일반적인 제작 공정은 그림 5와 같이 금속 분리판 소재를 프레스 성형, 가스켓 사출, 표면 코팅 등의 공정들로 진행하게 된다. 내식성을 포함한 고성형의 박판 재료 개발, 특수 프레스 선정 및 조건 최적화, 금형가공 기술, 성형 해석 등 설비뿐만 아니라 정밀성형 및 해석 기술 개발, 코팅 기술 개발이 요구된다.

표 4. PEM 수전해기 기술과 뿌리기술

구분	수전해기 제조 기술	관련 뿌리 기술	
스택	스택의 적층수 감소를 위한 스택 및 부품설계 기술개발	금형 및 정밀 가공기술	
	분리판 일체형 다공성 전극 구조 개발	금형 및 정밀 가공기술	
	전해질 막의 구조제어 및 생산성 향상 기술개발	소성가공	
	연료전지차용 미세구조제어 기반의 전극 원가절감 기술개발	열처리, 소성가공	
	기체확산층 원가절감을 위한 박막화 및 양산기술 개발	금형, 소성가공	
	대량 생산형 연료전지 분리판 및 BOS 부품 소형화 개발	금형 및 사출 기술	
	수소차용 대량생산 일체형 가스켓 소재기술 개발	금속 정밀가공기술	
	백금촉매 사용량 절감(20g/대) 기술 개발	열처리 기술	
주변 장치	수소 공급 장치	영하 결빙조건에서 작동 가능한 밸브 및 센서 개발	금형 및 정밀 가공기술
	공기 공급 장치	공기압축기 진동소음 저감을 위한 고회전 BLDC 모터 개발	기계 설계 및 가공기술
		유입공기의 능동습도제어를 위한 가습장치 개발	기계설계 및 가공 기술
	열관리 장치	열효율 향상을 위한 냉각수 온도제어 아유로 가변밸브 개발	금형 및 가공기술
		스택 열회수 및 냉각수 누설방지를 위한 전동워터펌프 개발	기계설계 및 가공기술

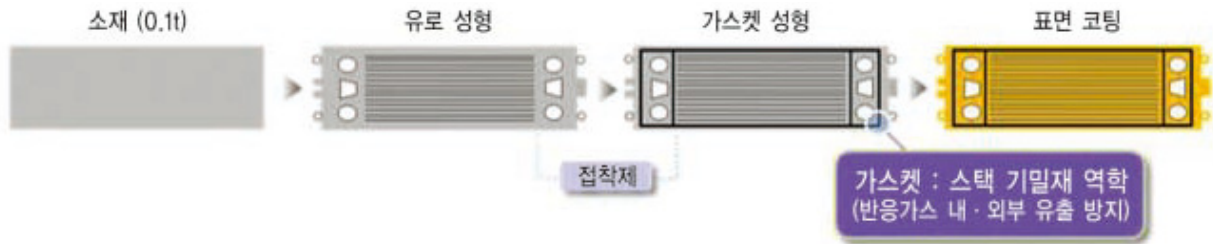


그림 5. 금속분리판의 가스켓 성형 공정

- 프레스 성형기술

금속분리판 소재는 두께 0.1~0.2mm로 스테인리스 또는 Ti, Al 등 다양한 극박 소재를 프레스 공법을 이용해 유로를 형성하고 있으며, 최근에는 소재 두께 0.075mm 이하의 박판을 사용한 초극박 성형 제품을 활발히 개발 중

- 가스켓 사출 기술

가스켓(Gasket)은 MEA와 분리판 사이를 밀봉하는 역할을 수행하며, 제작이 용이하고 밀봉 특성이 우수한 고무가 사용되며 주요 가스켓 재료로는 Acrylonitrile-butadiene Rubber (NBR), Ethylene-propylene-diene Rubber (EPDM), Vinyl-methyl Silicon Rubber (VMQ), Fluoro Silicon Rubber (FVMQ), Fluorocarbon Rubber (FKM) 등이 많이 적용되고 있음.^[15]

- 고내식 코팅 기술

혁신계 분리판 이상의 전도성 및 내식성을 확보하기 위해 금속계 소재 표면에 습식(Wet) 또는 건식(Dry) 타입의 코팅을 하는 방법과 소재 자체적으로 내식성을 가진 금속 또는 특수한 원소를 첨가한 후 다양한 열처리 및 표면개질을 통해 제작 하는 무코팅 방법 등이 있음. 코팅 금속분리판: 코팅 방법을 크게 분류하면 전기도금이나 스프레이 코팅 방법과 같은 습식(Wet) 타입과, PVD, CVD와 같은 건식(Dry) 타입으로 구분. 코팅 재료는 Graphite, Carbon Black 등과 같이 카본을 기반으로 하는 것과 Au, Cr, Ti 등 금속을 기반으로 재료로 나눔

- 금속분리판 유로 설계

분리판 유로는 내부에서 발생한 수소와 산소가 혼합되지 않게 각 전극 외부로 배출하는 동시에 외부에서 들어오

는 물을 MEA 내부로 원활하게 들어오게 하는 역할 및 외부에서 공급되는 전기를 전달하는 매개체와 막전극접합체 지지체 기능을 하므로 정밀한 유로 설계가 필요함

결론

태양광 발전의 간헐성은 태양광 발전이 기저 발전이 될 수 없도록 만드는 주요 원인이다. 잉여된 태양광 에너지를 수소로 전환해 저장해 두었다가 태양광 발전이 불가능한 야간이나 흐린 날에 연료전지로 발전을 할 수 있다면 태양광 발전은 우리가 바라는 탄소중립을 위해 화력 발전보다 훨씬 경쟁력 있는 발전원으로 사용될 수 있을 것이다. 그렇게 하기 위해 PEM 수전해기로 대표되는 수전해 장치와 기술이 효율 향상을 위한 요소 기술 개발은 물론이고 부품 국산화를 통해 가격 경쟁력을 확보해야 한다. 그러기 위해서는 부품 가공 정밀도 및 코팅 기술, 열처리를 통한 물성 향상 등 뿌리 기술들이 적극 활용되어야 할 필요가 있다. 탄소 중립에 반드시 필요한 그린 수소가 가격 경쟁력을 확보할 수 있도록 산업간 기술 협력이 절실한 시점이다.

참고문헌

- [1] 2020년 이상기후 보고서, 기상청 및 관계부처 (2020)
- [2] Net Zero Tracker, <http://eciu.net/netzerotracker>
- [3] 2030sus 온실가스 감축목표 수립, 환경부 (2015)
- [4] 2030년 국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 기본 로드맵, 환경부 (2016)
- [5] 2030 NDC 상향안, 관계부처합동 (2021)
- [6] 재생에너지3020 이행계획, 산업통상자원부(2017)
- [7] 수소경제 활성화 로드맵, 산업통상자원부 (2019)
- [8] “재생에너지원 보급에 따른 전력 계통 안정도 분석”, Journal of the KIECS, 16 (2021)
- [9] 독일의 P2G 추진 현황 및 시사점, 주독일대사관(2012)
- [10] 고분자전해질 수전해 시스템 기술동향, KIC News, 21 (2018)
- [11] NEDO水素エネルギー白書 (2015)
- [12] Hydrogen as Fuel : Production and Costs, Energy Security, 14 (2020)
- [13] 재생에너지 변동성 대응을 위한 P2G 활용 방안 연구, 에너지경제연구원 (2020)
- [14] Development of water electrolysis in the European Union (Final Report), Fuel Cells and Hydrogen Joint-undertaking (2014)
- [15] 고분자 전해질 연료전지용 금속분리판, Auto Journal, (2014)