

창원시 수소 산업 2040 중장기 육성계획 수립 연구

박민주¹ · 김학민² · 구윤정^{3,4} · 정창훈¹ · 강부민^{4,5} · 하승우^{4,6} · 정대운^{1,4†}

¹창원대학교 스마트환경에너지공학과, ²창원대학교 산업기술연구원, ³한국전자기술연구원 기업협력센터, ⁴창원대학교 환경공학과, ⁵창원산업진흥원 수소 산업기획본부, ⁶창원시 스마트혁신산업국 전략산업과

A Study on Fostering Plan for the Hydrogen Industry in Changwon City

MIN-JU PARK¹, HAK-MIN KIM², YUN-JEONG GU^{3,4}, CHANG-HOON JEONG¹, BOO MIN KANG^{4,5}, SEUNG WOO HA^{4,6}, DAE-WOON JEONG^{1,4†}

¹Department of Smart Environmental Energy Engineering, Changwon National University, 20 Changwondaehak-ro, Uichang-gu, Changwon 51140, Korea

²Industrial Technology Research Center, Changwon National University, 20 Changwondaehak-ro, Uichang-gu, Changwon 51140, Korea

³Corporate Cooperation Center, Korea Electronics Technology Institute, 22 Changwon-daero 18beon-gil, Uichang-gu, Changwon 51395, Korea

⁴Department of Environmental Engineering, Changwon National University, 20 Changwondaehak-ro, Uichang-gu, Changwon 51140, Korea

⁵Hydrogen Industry Planning Team, Changwon Industry Promotion Agency, 46 Changwon-daero, Uichang-gu, Changwon 51395, Korea

⁶Hydrogen Industry Team, Strategic Industry Division, Changwon City, 151 Jungang-daero, Uichang-gu, Changwon 51435, Korea

†Corresponding author :

dwjjeong@changwon.ac.kr

Received 14 October, 2020

Revised 11 November, 2020

Accepted 30 December, 2020

Abstract >> This study aims to propose a mid- to long-term fostering plan for the hydrogen industry customized to Changwon City by reviewing the government's policy and the status of the domestic and foreign hydrogen industry. The adopted methodologies were policy analysis, literature review, field investigation, and committee operation that could consider institutions, knowledge (technology), and networking between activity subjects. The short-term projects and long-term projects for the fostering plan are established using these methodologies. The short-term projects were structured so that the ongoing hydrogen industry fostering plan leads to a successful result, and the hydrogen mobility field is expanded to not only land vehicles but also marine and air vehicles. The long-term projects consist of a high proportion of the hydrogen utilization field to take advantage of the industrial strength of Changwon City, and a support system for new and turning companies for localization of parts was added to provide industrial competitiveness.

Key words : Hydrogen industry(수소 산업), Hydrogen industry fostering plan(수소 산업 육성계획), Hydrogen mobility(수소모빌리티), Hydrogen utilization(수소 활용), Localization of parts(부품 국산화)

1. 서론

2015년 12월 파리 기후변화협약 당사국총회(21st Conference of the Parties)에서 채택된 파리협정으로 세계 각국은 2030년까지 온실가스의 감축목표를 수립하였으며 우리나라는 온실가스 배출전망치(business as usual)의 37%에 해당하는 온실가스의 감축을 목표로 설정하였다. IEA가 2018년 발표한 보고서에 의하면 온실가스 감축 목표 달성을 위한 세계 신재생에너지 보급률은 전력부문을 기준으로 2014년 23%를 기록하였으며 2040년에는 37%로 확대될 것으로 나타났다¹⁾.

2018년 신재생에너지 보급률은 2014년 대비 3% 증가하여 26%이며, 이는 신재생에너지의 발전설비용량이 세계 설비용량의 33% (2,378 GW)인데 반해 현저히 낮은 수치이다^{2,3)}. 이러한 이유는 신재생에너지 보급률의 대부분이 수력(16.3%), 풍력(6.7%) 그리고 태양광(2.8%) 등 가변성 재생에너지를 중심으로 보급되기 때문이다²⁾. 재생에너지의 에너지 생산량과 직결되는 요소인 수자원의 위치, 풍량 및 일조량 등은 자연환경에 의존적이기 때문에 재생에너지는 공급과정에서 에너지 손실이 크고 에너지 수급체계가 불안정한 문제점이 대두되고 있다⁴⁾. 또한, 재생에너지의 간헐적 전력 생산은 전력 저장 및 송전 시스템에 과부하를 주어 전력계통의 효율을 저하하는 치명적인 기술적 제한요소를 가지고 있다⁵⁾.

반면, 휘발유보다 3배 높은 에너지밀도(144 MJ/kg)를 가진 수소에너지는 지구의 70%를 구성하고 있는 H 원자로 구성된 분자로서, 지속가능한 에너지원으로 분류되고 있으며 기체, 액체, 화합물 등 다양한 형태로 변환할 수 있으며 운송할 때 에너지 손실이 적고 장기간 저장이 가능하다는 점에서 우수한 에너지원으로 분류된다^{6,7)}. 또한, 폐기물 및 바이오매스 등의 다양한 원료로부터 수소 추출이 가능하다는 점에서 활용가치가 날로 증대되고 있는 실정이다⁸⁾. 특히, 수소는 직접 연소 시 CO₂ 배출 없이 물만을 배출하며 수소연료전지와 연계 시 에너지 변환효율이 높아⁹⁾ 기후변화에 원천적인 대응과 화석연료의 대체가 동

시에 수렴되는 고효율 청정에너지원으로서 국제적으로 주목받고 있으며 몇몇 국가들은 수소경제사회 진입을 위한 준비를 활발히 진행하고 있다.

수소 산업은 수소의 생산, 저장, 이송 그리고 활용의 전주기에 관련된 산업의 동반 성장을 수반하기 때문에 경제적·산업적 파급효과가 큰 미래 성장동력으로 기대되고 있으며^{10,11)}, 그 증거로 2017년 11개국 54개사의 자발적인 참여로 국제적인 규모의 수소위원회(Hydrogen Council)가 출범하였다. 수소위원회가 2017년 발표한 세계 수소시장 전망 보고서에 따르면 수소시장은 연평균 6%의 성장률을 보이며 2050년에는 2조 5천억 달러의 시장규모와 3천만 개의 일자리가 창출될 것으로 보고하였다¹²⁾. 특히, 수소에너지가 2050년까지 전 세계 에너지 소비량의 18%를 차지할 것으로 전망되며, 신재생에너지 보급률의 상당 부분이 수소에너지로 전환·이용될 것으로 예측된다¹³⁾.

2018년 8월 정부는 온실가스 저감, 신재생에너지 보급 확대 그리고 신산업육성 등을 이유로 수소경제를 혁신 성장 분야로 선정하였다. 이후 정부는 2019년 1월 수소경제 활성화 로드맵을 발표해 국가적인 차원에서 수소 산업의 육성을 알렸으며 2019년 4월 수소경제 표준화 전략 로드맵, 2019년 10월 수소 기술개발 로드맵 등을 통해 구체적인 활성화 계획을 수립하였다. 2020년 2월 우리나라는 세계 최초로 수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률(수소법)을 제정하여 세계 수소 산업의 표준을 선점하였으며, 수소경제사회 조기 진입과 정착을 위한 발판을 마련하고 현실적인 수소 산업 육성을 위한 노력에 박차를 가하고 있다. 최근 우리 정부가 그린뉴딜 정책을 발표하면서 수소 산업에 대한 정부의 전폭적인 지원을 공식화하였으며 2020년 7월 수소경제위원회는 출범과 동시에 구체적인 수소 산업 생태계 경쟁력 강화 방안을 마련하였다. 그간 우리 정부는 로드맵, 표준화, R&D, 인프라, 안전 그리고 거시적 생태계 등 세부 분야로 나누어 수소 산업의 기반 정책을 체계적으로 수립하였다. 정부의 정책이 수소 산업의 육성 및 정착으로 이어지기 위해서는 각 지자체와 산업체

의 환경 및 특성을 고려한 세부 실행방안을 마련하고 체계적인 이행 계획을 수립하는 것이 매우 중요하다.

특히, 정부가 수소 산업 육성을 위해 다양한 정책을 쏟아내고 있는 시점에서 지역혁신정책이 실효성을 가지기 위해서는 중앙의 정책 방향과 조화롭고 각 지역의 산업구조 및 현황이 고려된 맞춤형 수소 육성정책의 수립이 필수적이다.

2018년 창원시는 『수소 산업 선도도시』 비전을 선포하고 수소 산업을 미래전략산업으로 육성하기 위한 다양한 정책들을 발표하였다. 이 정책들이 수소 산업 육성을 위한 동력이 되기 위해서는 정부 정책 방향, 국내·외 수소 산업 현황 및 특성 그리고 지역 산업구조 등을 자세히 비교·분석하여 정부 정책에 부합하면서 지역의 산업적·환경적 강점은 활용할 수 있도록 선택적인 수소육성정책의 수립과 검증이 필요하다.

본 연구에서는 정부의 수소 산업 육성정책과 창원시의 수소 산업 현황을 비교·분석하여 기존에 수립된 수소 산업 육성계획은 재조정하고 신규 육성계획을 추가하였다. 또한, 국내·외 수소 산업 육성현황을

검토하여 기존 창원시의 수소 산업 육성의 큰 틀을 포용함과 동시에 지역의 강점은 극대화할 수 있는 창원시 맞춤형 수소 산업 중장기 육성계획을 제안하고자 한다. 나아가 광역경제권 연계 방안을 마련하여 광역지자체 수준의 협력방안을 모색하였다.

2. 연구방법

2.1 자료 수집 및 조사 방법

수소 산업 육성계획 수립의 방법은 정책분석, 문헌의 질적 고찰, 현장조사 그리고 위원회 운영을 활용하였으며 산업혁신체제의 관점을 고려하여 제도, 지식·기술 그리고 활동 주체 간의 네트워크링이 조화를 이루도록 하였다. 로드맵 수립 과정은 구체적 실행방안 설정, 실행방안의 실현가능성 검토 그리고 맞춤형 계획수립의 순서로 3단계로 나누어 체계적으로 수행하고, 최종적으로 도출된 수소 산업 육성계획은 정부의 수소 기술 개발 로드맵의 기술분류체계에 따라 분류 및 수립하였다(Fig. 1). 구체적 실행방안은

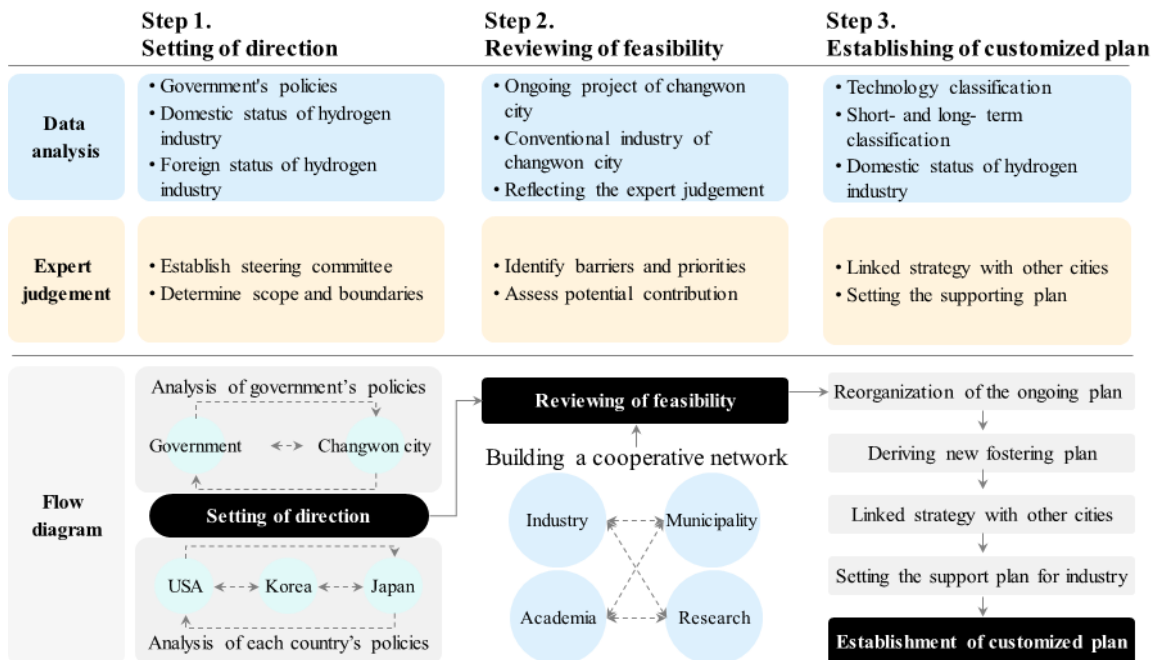


Fig. 1. Establishment process for hydrogen industry fostering plan of Changwon City

정부의 수소경제 활성화와 수소 기술 개발 로드맵을 수립하고 창원시의 산업적 특성 및 수소 산업 육성 현황을 고려하여 정부의 수소 산업 실현을 뒷받침하는 동시에 실행방안이 차별성을 가지도록 창원시와 국내외의 주요 지자체 및 국가의 수소 산업 현황을 비교하였다. 도출된 실행방안의 실현가능성을 진단하기 위해 창원시가 수행 중인 수소 산업 육성현황과 기존 주력산업을 고려하고 창원시가 가진 지역적 강점을 최대한 활용하도록 조정하였으며 전문가위원회를 통해 도출된 실행방안의 제한요소와 우선순위를 점검하고 타당성을 검토하였다.

2.2 전문가 위원회 구성 및 운영

전국, 지자체의 수소 산업 관련 핵심 전문가, TF별 전문가, 지역 중심의 산·학·연·관 전문가로 네트워크를 형성하고 전국/지역/수소전주기 중심의 전문가로 구성된 전문가 위원회는 경상남도 수소 산업 육성위원회, 지역맞춤형 연구회 그리고 산학협력 협의체로 구분하였다. 각 전문가 위원회는 수소 산업 육성계획을 정부의 수소 산업 육성방향과의 부합성, 단기사업과 장기사업 분류 그리고 타당성 평가 및 보완을 수행하였다. 또한, 수소 산업 생태계 조성을 목적으로 타 지자체와의 수소 산업 육성의 연계방안과 신규유망산업을 제안하였다.

2.3 창원시 맞춤형 수소 산업 육성계획 수립

정책/시장/기술 현황 조사를 통해 발전 방향과 차별화 전략을 제시하고 정부의 수소 산업 육성정책, 국내·외 수소 산업 육성계획 등을 분석하여 정부의 수소 산업 육성방향과 연계되고 지역의 강점이 반영된 창원시 수소 산업 육성계획의 세부실행방안을 수립하였다. 수립한 세부실행방안은 전문가 위원회를 통해 사업의 타당성에 대해 검토 후 보완하였다. 보완한 수소 산업 육성계획의 세부실행방안을 단기 및 장기 육성계획으로 구분하고 신규유망산업을 제안하였다. 이에 더해 광역 경제권 연계, 수소 특화산업단

지 조성, 수소 연료전지 발전 활성화 등 수소 산업 육성의 실현을 위해 인프라 구축 및 기업지원을 포함하는 창원시 수소 산업 중장기 육성계획을 수립하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 국내 수소 산업 로드맵 분석

3.1.1 수소경제 활성화 로드맵 분석

2019년 1월 정부는 수소경제 활성화 로드맵을 통해 수소전기차와 연료전지를 중심으로 “세계 최고 수준의 수소경제 선도국가로 도약”한다는 비전을 제시하고 수소 전주기(활용, 생산, 저장 및 운송, 안전 및 산업생태계)에 걸쳐서 분야별 목표를 설정하였다. 특히, 수소 활용방법은 육상용, 해상용, 항공용 수송 수단과 발전·산업용으로 등 다양한 분야로 확장하고 세계 수소 산업 시장 점유율 1위 달성을 목표로 하였으며, 2040년까지 수소전기차 620만 대, 수소충전소 1,200개소, 연료전지발전 15 GW (가정·건물용 2.1 GW), 수소 공급량 526만 톤/년, 수소 가격 3,000원/kg 달성을 정량적 목표로 수립하였다.

목표를 달성하기 위해서 수소경제 준비기(2018-2022년), 수소경제 확산기(2022-2030년), 수소경제 선도기(2030-2040년)로 나누어서 수소 산업 육성을 추진할 세부 계획을 수립하였다. 수소경제 준비기에는 우리나라가 강세를 보이는 수소 활용 분야는 수소전기차, 수소충전소, 연료전지발전을 중심으로 상용화를 위한 준비를 완료할 예정이다. 수소 활용 분야에서 핵심부품의 국산화, 액화수소 충전소 및 광역 수소버스 기술 개발은 수소경제 확산기까지 기간이 필요하다. 수소 생산 분야는 초기 수소경제 도입에 대비하여 비교적 저렴한 그레이 수소로 수소 수요를 충당하고, 확산기와 선도시로 접어들면서 수전해 기술을 중심으로 그린 수소 생산과 해외수소의 수입을 목표하고 있다. 수소 저장 분야는 고압 수소가스 저장을 기본으로 하고, 점차 액화/액상 수소 저장기술을 개발하여 수소경제 준비기에 급격하게 증가할 것으로 예상되는 수소 수요량을 경제적으로 공급하고

자 한다. 수소 운송 분야에서는 탱크로리, 선박 관련 기술들은 수소경제 준비기에 진행하고, 파이프라인과 IT 관련 기술 개발은 수소경제 확산기에 진행할 계획이다.

궁극적으로 수소경제 준비기에 수소 인프라 보급을 통해 수소 활용 분야를 선점하고 핵심부품을 국산화하여 수소 산업의 경쟁력을 확보하는 한편, 수소경제 확산기에는 수소 인프라에 필요한 수소를 안정적이고 경제적으로 공급할 수 있는 유통체계를 확보하고자 한다. 또한, 탄탄한 수소 산업 생태계 조성 및 개발기술 상용화를 위해 안전기준을 마련하고 안전성 평가 센터를 운영하여 전주기 안전관리 체계를 확립하고자 한다. 수소경제 선도기에는 뚜렷한 세부 실행계획이 없으나 정부는 각 지자체의 수소 산업 육성방향과 추진현황에 따라 향후 수소경제 선도기의 육성계획을 구체화할 것으로 사료된다.

3.1.2 수소 기술 개발 로드맵 분석

수소에너지 분야에서 국내 기술경쟁력을 진단하고 높임으로써 수소경제 이행을 뒷받침하고자 기술 개발 로드맵이 수립되었다. Table 1과 같이 수소 전주기 분류체계를 생산, 저장·운송, 수송수단, 발전·산업, 안전·환경·인프라의 5개 대분류로 수정하고 각각 대분류의 과학적·산업적 특성을 고려하여 18개의 중분류, 49개의 소분류로 기술분류체계를 정립하였다. 5개의 대분류에 대해 기술 개발 최종 목표를 설정하였으며, 이를 달성하기 위한 세부 추진계획을 수립하였다. 5개의 대분류에 대한 기술 개발 최종 목표는 1) 저가수소 및 그린 수소 생산 기술 개발, 2) 대규모 수소 저장·운송 기술 개발, 3) 연료전지시스템 기반의 수송수단 저변 확대, 4) 발전용 연료전지시스템 고효율·저가화 기술 확보, 5) 수소 안전·제도 완비 및 표준 선점과 보급 기반 확보로 구분된다. 또한, 수소 산업 핵심소재·부품 국산화를 통한 산업생태계 구축 및 기술자립도 제고를 재차 강조하였다.

수소경제 활성화 로드맵과 마찬가지로 수소경제 도입 초기에는 수소의 수요에 화석연료 기반의 경제적인 그레이 수소로 대응하고, 점차 재생에너지 기반

의 그린 수소로 전환하는 방향을 제시하였다. 그린 수소 원료로 물뿐만 아니라 폐자원, 바이오매스 등이 추가되었으며 재생에너지(태양광, 풍력 등)와 연계한 다양한 친환경 수소 생산기술(수전해, 열화학적, 생물학적)을 개발할 계획이다.

수소의 저장·운송 방식은 현재 기체상태의 수소 활용에 초점이 맞추어져 있다. 수소를 액체, 액상, 고체 등 다양한 형태로 저장 및 운송하는 방법이 개발 단계에 있으며 국내의 현실에 적합하고 효율적인 기술 개발을 위해서는 전략적인 시나리오 수립을 통한 핵심기술의 개발이 필요한 실정이다. 수소를 활용한 수송수단의 경우 기술 우위 및 경쟁력이 있는 승용/상용차 연료전지시스템을 전략적으로 활용하여 선진국과의 육상용, 해상용, 항공용 수송수단의 기술격차를 최소화하고 수소연료전지 수송수단으로 전환하기 위한 전기동력 추진체 기술 개발을 병행할 계획이다. 발전·산업 분야에서 수소 활용 시장은 핵심소재·부품·장비의 해외수입에 따른 높은 설치 및 유지비로 인해 확산이 지연되고 있다. 핵심소재·부품·장비의 국산화를 통해서 점진적으로 설치비 및 발전단가를 절감하여 보급 확대를 이끌어 나갈 계획이다. 수소 전주기 기술 개발을 뒷받침하기 위해서는 정부의 주도하에 설비 인프라의 안전 및 기술 개발 표준지침을 마련하여 국내 기술을 국제표준으로 부상시키고 향후 실증을 통해 기술 검증까지도 필요하다. 이에 수소 전주기 기술은 수소 시범도시 사업의 일환으로 시범지역을 통해 적용하고 실증할 계획이다.

3.2 국내·외 수소 산업 육성현황

3.2.1 국내 주요 지자체 수소 산업 육성현황

수소의 생산과 공급은 강원, 부산, 울산 등 해안가에 있는 도시를 중심으로 활발한 움직임이 이루어진다. 강원, 제주는 재생에너지가 풍부한 점을 이용해 수전해 수소 생산 P2G 단지 조성을 계획하였다. 울산은 석유화학 공단의 정유·화학공정에서 발생하는 부생수소가 풍부하며 수소를 도심으로 공급하기 위 30 km 길이의 수소 배관망을 구축할 계획이다. 충남

Table 1. Technology classification for hydrogen by Korean government

Life cycle	Main category	Sub category
1. Production	1-1. Fossil fuel derived hydrogen	1-1-1. Reforming reaction
		1-1-2. Gasification reaction
		1-1-3. Biological reaction
	1-2. Waste resource/biomass fuel derived hydrogen	1-2-1. Gasification of combustible waste
		1-2-2. Biological fermentation
		1-2-3. Gasification of biomass
	1-3. Water derived hydrogen	1-3-1. Hydrolysis
		1-3-2. Photolysis
		1-3-3. Pyrolysis
		1-3-4. Very high temperature reactor
2. Storage and transportation	2-1. Physical storage	2-1-1. Gas hydrogen storage
		2-1-2. Liquid hydrogen storage
		2-1-3. Physical adsorption hydrogen storage
	2-2. Chemical storage	2-2-1. Liquid hydride storage
		2-2-2. Metal and inorganic hydrides storage
	2-3. Transportation	2-3-1. Land transportation
2-3-2. Marine transportation		
3. Application (vehicle)	3-1. Land vehicle	3-1-1. Passenger car
		3-1-2. Commercial vehicle
		3-1-3. Railway vehicle
		3-1-4. Construction equipment
		3-1-5. Personal mobility
	3-2. Marine vehicle	3-2-1. Coastline
		3-2-2. Ocean ship
3-3. Air vehicle	3-3-1. Drone	
	3-3-2. Manned aircraft	
4. Application (power generation - industry)	4-1. Common technology	4-1-1. Fuel cell material
		4-1-2. Fuel cell engineering
	4-2. Stationary fuel cell	4-2-1. Micro cogeneration
		4-2-2. Distributed power generation
		4-2-3. Large capacity power generation
	4-3. Converged and combined power generation	4-3-1. Convergence (linkage) platform technology
		4-3-2. Fuel cell network
4-4. Hydrogen turbine	4-4-1. Medium and large power generation	
	4-4-2. Small power generation	
5. Safety·environment·infrastructure	5-1. Safety technology	5-1-1. Material, parts and system safety
		5-1-2. Facility and installation safety
		5-1-3. Accident prevention technology
		5-1-4. Quality and measurement technology
	5-2. Standardization and certification technology	5-2-1. Hydrogen mobility standardization
		5-2-2. Hydrogen energy standardization
		5-2-3. Standardization of hydrogen supply and metering
		5-2-4. Standardization of test certification technology
	5-3. Environmental and economic feasibility	5-3-1. Environmental evaluation
		5-3-2. Economic evaluation
	5-4. Hydrogen supply infrastructure	5-4-1. Hydrogen charging technology
		5-4-2. Hydrogen bunkering
	5-5. Build the foundation for hydrogen society	5-5-1. Hydrogen cluster
5-5-2. Hydrogen city substantiation		

은 대산석유화학단지에서 생산되는 부생수소와 당진에 건설될 제5 LNG 기지와 연계하여 개질 수소를 생산할 예정이다. 이렇듯 아직은 개질을 통한 수소 생산이 초기 수소경제 도입에 있어 필수불가결한 상황이다. 한편, 부산은 북한과 러시아로부터 갈탄에서 추출한 수소를 대량으로 수입하고자 석탄가스화 및 수소운송선, 수소저장 기술 개발 및 실증을 준비하고 있다. 창원시는 개질수소를 생산하는 1톤/일 규모의 성주동 분산형 수소 생산기지와 5톤/일 규모의 국가 산업단지 거점형 수소 생산기지를 구축 중이며, 국내 최초로 5톤/일 규모의 액화수소 실증 플랜트를 건설하고 있다.

대부분의 지자체는 수소 활용 분야의 활성화 방안으로 수소전기차, 수소충전소 및 발전용 연료전지의 공급을 확대할 계획이며, 승용차뿐만 아니라 상용차, 건설기계, 연안선박, 유인항공기 등 내연기관 운송수단을 전력기반으로 전환하고자 한다. 2020년 9월을 기준으로 울산은 수소전기차 1,680대와 수소충전소 6기로 보급수가 가장 많다. 동일한 시점에 창원은 수소전기차 658대가 보급되어 기초지자체 중에서 가장 보급수가 높으며, 현재 운영 중인 수소충전소는 4기로 수도권을 제치고 울산 다음으로 보급수가 많다. 하지만 실질적인 산업 경쟁력을 확보하기 위해서 수소 산업 관련 기업유치와 핵심소재·부품·장비의 국산화가 필수적이다. 울산은 수소전기차의 최종생산지로서 경쟁력이 있는 반면 창원은 기계·자동차·조선·항공의 소재·부품·장비를 생산하는 기업이 많으며 수소 산업 관련 기업이 134개소로 수소 산업 생태계 구축에 있어서 유리할 것으로 사료된다.

또한, 수소의 생산, 저장·운송, 활용을 망라하는 해양수소경제 도입의 후보지로 부산, 평택, 울산, 전남이 꼽혔다. 이 중 부산은 2030년부터 시작되는 해외 수소 도입을 준비하기 위해 친환경 수소선박 관련 기술 개발 및 실증을 중점적으로 다룰 예정이다.

안전·환경·인프라는 대전이 최초로 수소 산업 전주기 제품 안전성 지원센터를 유치하면서 선두로 나섰다. 2020년 2월 수소법이 제정되면서 안전과 기술 및 제품의 표준을 정립하기 위해 지자체와 산업체의

활발한 움직임이 예상된다.

3.2.2 국외 주요 국가 수소 산업 육성현황

세계 수소 생산량의 96%는 화석연료로부터 생산되고 있으며 전기분해를 통한 수소 생산이 4% 수준이다¹⁴⁾. 2016년 세계 수소 생산량 추이는 미국 193,485 m³/day, 한국 72,231 m³/day, 일본 69,940 m³/day, 쿠웨이트 36,388 m³/day, 독일 33,493 m³/day 순이며, 상위 10개 국가에서 전체 수소 생산량의 70%를 생산하고 있다¹⁵⁾. 그러나 전 세계는 화석연료 기반의 수소 생산을 점차 재생에너지를 이용한 수소 생산으로 전환하고자 하며, 국제재생에너지기구(International Renewable Energy Agency, IRENA)는 Hydrogen from Renewable Power 2018 보고서에서 재생에너지를 이용한 수소 생산 기술을 연구, 스케일-업, 실증, 상용화 단계로 나누어 보고하였다¹⁶⁾. 태양에너지의 경우 태양열과 광촉매 반응을 통한 수전해가 있으나 아직은 두 기술 모두 연구단계에 있다. 폐기물 및 바이오매스를 이용하는 기술로, 초임계수 가스화기술은 연구단계지만 혐기성소화 및 암발효는 실증단계, 혐기성 소화로부터 생산된 바이오가스의 수증기 개질은 상용화 단계에 이르렀다. 재생에너지 기반의 수전해 관련 기술은 고체 산화물 전해 전지(solid oxide electrolysis cell)는 스케일-업 수준이며, 양성자 교환막(proton exchange membrane)이 실증, 알칼리 전해 전지(alkaline electrolysis cell),는 상용화 단계이다. 유럽, 미국, 호주는 지리적·환경적 조건을 활용하여 태양광, 풍력 등 재생에너지 기반의 친환경 전기를 이용하여 그린 수소 생산을 목표하고 있다¹⁷⁾. 미국은 풍력 발전으로 수소를 생산하는 Wind2H2 프로젝트를 수행 중이다¹⁸⁾. 수소 저장·운송의 경우, 일본은 고압기체 수소와 액화수소 저장기술을 상용화하였고 고체 수소 저장기술을 수소충전소에 적용·실증하고 일본 내 수소 공급을 위한 파이프라인망을 구축하는 등 수소 공급 인프라에 집중하고 있다¹⁹⁾. 이는 일본이 호주와 같이 수소의 대량생산이 가능한 국가와 협력해 수소를 저렴하게 공급받을 수 있는 판로를 확보하기 위함이다²⁰⁾. 일본과 마찬가지로 미국 또한

고압기체 수소와 액화수소 기술은 상용화단계이며 2008년부터 수소를 고체형태로 저장·운송하기 위해 금속수화물, 탄소소재 등 다양한 연구를 수행 중이다^{21,22)}. 고체 수소 저장은 상온, 상압 하에서 수소의 저장이 가능하다는 장점이 있어 독일, 프랑스, 영국에서도 활발히 연구 중이다²²⁾. 수소경제를 준비하는 주요 국가들은 공통적으로 수소전기차와 수소충전소를 보급하여 수소 활용 인프라를 빠르게 구축하고 있으며 국가별로 건설기계, 선박, 항공 등으로 확장하기 위해 연구개발을 추진하는 추세이다. 2019년 기준 미국 전체 수소전기차 보급 대수는 약 7,937대로 세계 최대 규모다. 미국 수소경제의 중심지인 캘리포니아 주는 2019년을 기준으로 수소충전소 45개가 운영 중이며 오는 2030년까지 5,600개의 수소충전소를 구축할 계획이다²³⁾. 또한, 미국은 수소트럭을 개발 중이며 2023년부터 양산할 계획이다. 마찬가지로 유럽은 2030년까지 수소전기차 180만 대를 보급하고 수소충전소 또한 1,000개소로 확대할 계획이다²⁴⁾. 유럽은 지난 2018년 수소에너지 활용 실증사업으로 세계 최초로 수소전기열차를 선보인 바 있다. 일본은 2030년까지 수소전기차 80만 대와 수소전기버스 1,200대를 보급하고 수소충전소 900개소를 설치할 예정이다. 또한, 모빌리티 뿐만 아니라 가정용 연료전지 530만 대 보급을 목표로 세웠다. 우리나라의 경우 2040년까지 수소전기차 620만 대(수출 330만 대, 내수 290만 대)와 수소충전소 1,200개소를 보급할 계획이다. 수소 및 연료전지의 국제표준은 2019년 기준, 37종이 제정되었으며 2030년까지 60건의 국제표준이 개발될 예정이다. 우리나라가 국제전기기술위원회에 제안한 ‘마이크로 연료전지 파워시스템’ 표준안이 첫 번째로 2019년에 국제표준(IEC 62282-6-400)에 등록되었다.

3.3 창원시 수소 산업 중장기 육성계획

3.3.1 창원시 수소 산업 현황

창원시는 2018년에 친환경 수소 산업 특별시 건설이라는 비전 아래 도입기(2018-2020년), 성장기

(2021-2023년), 성숙기(2024-2025년)의 세 가지 단계로 나누어 선제적으로 수소 산업 육성계획을 수립하였다. 현재 도입기는 수소 산업 관련 정책을 강화하고 인프라를 구축하는 동시에 수소 활용 기술력을 높여 수소 선도도시로 나아가고 있다. 이후에는 수소 특화산업단지를 지정하고 수소 생산 기업을 유치하여 수소 산업 육성을 위한 기초를 다져 성장기를 준비하고자 하였다. 성숙기는 수소 글로벌 기업을 육성하여 산업생태계의 활성화를 목표로 하고 있다.

창원시는 2020년 9월을 기준으로 전국에서 수소전기차 658대(전국 대비 6.9%) 및 수소충전소 4기(전국 대비 10.8%)를 보급하여 다른 기초지자체 또는 광역지자체보다 높아 수소 활용 분야의 인프라가 잘 구축되고 있다. 또한, 창원시는 지역에 있는 기업 및 연구기관과 협력하여 분산형 및 거점형 수소 생산기지, 액화수소 실증 플랜트를 구축하고 있고 상복 일반산업단지, 창원국가산업단지 확장구역 등 수소 특화산업단지의 부지를 확보하여 성장기의 목표를 앞당겨 수행하고 있다. 창원시는 국내 최초로 수소의 생산부터 소비까지의 5단계로 구성된 수소에너지 순환시스템(hydrogen energy cycle system, HECS) 실증단지를 조성 중이며, 현재는 HECS의 4단계인 수소액화 및 저장장치를 구축하고 있다. 또한, 2019년 6월부터 수소버스 시범도시로 선정되어 수소버스를 운행 중이며 최근 수소버스 충전기술 표준 및 부품 국산화와 운영기술 확보를 위해 수소버스용 충전소 실증사업을 수행 중이다. 나아가 2021년까지 수소트럭, 수소트램 그리고 수소건설기계장비 등 대형 수소 모빌리티 실증사업을 수행할 예정이다. 또한, 20 MW급 분산형 연료전지발전소를 구축하여 공격적으로 수소 산업을 육성하고자 한다. 창원시의 수소 산업 육성계획은 초기에 수립되었으며 빠른 수소 산업 육성 속도 및 정부의 구체적인 수소 산업 육성계획 발표에 의해 정부의 정책방향과 창원시의 현황을 검토한 수소 산업 육성계획 수립이 필요하다.

3.3.2 창원시 수소 산업 2040 중장기 육성계획 수립

정부의 ‘수소 기술 개발 로드맵’을 중점적으로 검

토하고 지역특성을 고려하여 창원시에 부합하는 수소 산업 중장기 육성계획을 단기사업과 장기사업으로 구분하여 도출하였으며 세부목록은 각각 Table 2와 Table 3에 나타내었다. 단기사업은 정부 그린뉴딜 정책의 가시적 성과를 선도적으로 창출하기 위해 안정적·경제적인 수소 공급 인프라 구축, 수소 활용(수송수단) 실증, 수소 산업 전문기관 유치 등 창원시가 수행 중인 수소 산업 육성계획을 중심으로 구성하여 체계적·적극적으로 수행할 수 있도록 하고 육상용 수송수단은 기술 개발 및 실증의 범위를 수소트램, 수소건설기계, 수소견인차로 확대하였다. 창원시가 강점을 가지는 수소 모빌리티를 더욱 다양화하기 위해 해상용 및 항공용 수송수단 기술 개발 및 기업지원을 단기사업으로 추가하였다. 창원시는 창원국가산업단지를 중심으로 기계·자동차·조선·항공의 소재·부품·장비 산업이 집적되어 있고 134개의 수소 산업 관련 기업이 있어 수소 활용 분야의 기업 유치 및 산업생태계 활성화를 통해 수소 활용 분야의 핵심소재·부품·장비 개발이 가능할 것으로 기대된다. 장기사업은 수소 생산 2개, 수소 저장·운송 1개, 수소 활용(수송수단) 4개, 수소 활용(발전·산업) 4개, 안전·환경·인프라 6개로 구성하였고 각 사업은 정책적 요소와 기술 개발 요소를 포함하고 있다. 정책적 요소는 기

술 개발이 원활하도록 보조하고 시민들의 수소 산업 수용성을 높이는 데 목적이 있으며 창원시의 역할이 중요하다. 기술 개발 요소는 산·학·연·관이 협력하여 신규기술을 개발하고 기술 애로를 해결하여 상용화함으로써 궁극적인 수소 산업의 육성이 가능하게 한다. 창원시가 육성 중인 주요 수소 산업이 대형 수소 모빌리티와 핵심 소재·부품·장비 국산화임을 고려하여 장기사업에서 수소 활용 분야의 비중을 높게 구성하였다. 또한, 기존 주력산업인 소재·부품·장비산업 인프라를 활용하여 수소 산업으로 신규진입 혹은 전환하고자 하는 기업의 지원을 안전·환경·인프라 분야에 편성하였다. 한편, 수소 활용 분야 외에도 창원시의 인프라와 자원을 최대한 활용하고 전주기의 산업경쟁력을 갖추기 위하여 수소 생산 및 수소 저장·운송 분야의 사업을 추가로 편성하였다. 수소 생산 분야는 수소 추출 원료 중 화석연료가 차지하는 비중의 일부를 폐자원/바이오매스와 물로 전환하여 탄소중립의 수소를 생산하는 것을 목표로 하고 있다. 창원시의 기반 시설 중 덕동하수처리장과 연계하여 미 활용 바이오가스를 수소로 전환하거나 노후한 소각장을 대체하여 가스화 시설을 건설하고 폐기물로부터 수소를 생산할 수 있다. 수소 저장·운송 분야는 특정 지역에 수소배관망을 구축하여 기체수소의 효율

Table 2. Derived project to fostering the hydrogen industry in Changwon City (short-term)

Life cycle	Main category	Fostering plan
Production	Fossil fuel derived hydrogen	Construction of production and supply infrastructure for low-cost hydrogen
Storage and transportation	Physical storage	High-pressure hydrogen (gas) storage and liquefaction/storage technology development
Application (vehicle)	Land vehicle	Expansion of the scope and substantiation for land vehicles (trams, construction equipment, towing vehicles, etc.)
	Marine vehicle	Development and corporate support for marine vehicle technology
	Air vehicle	Development and corporate support for air vehicle technology
Safety·Environment·Infrastructure	Build the foundation for hydrogen society	Hydrogen cluster construction project (industry, academia, government, and research)
		Graduate school of hydrogen energy specialization
		Hydrogen industry promotion committee
		Creating an industrial complex for the hydrogen industry
		Inducement of professional agency for hydrogen industry

Table 3. Derived project to fostering the hydrogen industry in Changwon City (long-term)

Life cycle	Main category	Fostering plan
Production	Waste resource/biomass fuel derived hydrogen	Establishment of hydrogen production infrastructure based on sustainable waste resources and biomass
	Water derived hydrogen	Water electrolysis system construction (few dozens of MW)
Storage and transportation	Transportation	Hydrogen piping pilot project
Application (vehicle)	Land vehicle	Supply and operation of V2G-linked hydrogen-electric vehicles Substantiation of truck operation for hydrogen supply
	Marine vehicle	Hydrogen ship development and substantiation
	Air vehicle	Substantiation of hydrogen-based aerospace industry (drone, flying car, satellites)
Application (power generation industry)	Common technology	Support for local manufacturing and advancement of key materials, parts, and devices for hydrogen fuel cell
	Stationary fuel cell	Substantiation of hydrogen fuel cell power generation
	Converged and combined power generation	Support for technology development and advancement of converged and combined hydrogen fuel cell power generation
	Hydrogen turbine	Hydrogen turbine technology development
Safety-environment-infrastructure	Safety technology	Support for product safety certification of hydrogen industry company
	Standardization and certification technology	Fostering Platform of the core material and parts industry
	Environmental and economic feasibility	Substantiation of hydrogen energy cycle system
	Hydrogen supply infrastructure	Substantiation of the liquefied hydrogen plant
	Build the foundation for hydrogen society	Substantiation of hydrogen city Build a hydrogen theme park

적 이송이 가능하도록 한다. 수소 활용(수송수단) 분야는 육상용 수송수단에 이어 해상용 및 항공용 수송수단을 상용화하고 vehicle to grid 연계 수소전기 차량 보급 및 운영을 통해 효율적인 비상전력 공급을 달성하고자 한다. 수소 활용(발전·산업) 분야는 연료전지 발전사업 실증을 통해 연료전지의 핵심소재·부품·장비의 국산화를 목표로 하는 동시에 융·복합 발전과 수소터빈을 통해 발전효율을 극대화할 계획이다. 안전·환경·인프라 분야는 수소 활용 분야의 핵심소재·부품·장비 개발과 안전성 인증을 위한 수소 산업 기업 지원, HECS와 액화수소 플랜트 실증, 수소테마파크 조성 등을 통해 궁극적으로 수소도시 실증을 목표로 하고 있다.

창원 수소 산업 중장기 육성계획은 크게 4개의 항

목으로 분류할 수 있다. 첫 번째는 수소 생산의 자립화이며, 이는 수소 산업의 활성화를 위해 필수적인 요소이다. 현재 성주지구에서 HECS 실증단지를 조성하는 사업을 추진하고 있으며, 1단계는 수소충전소 구축, 2단계는 수소 생산설비 구축, 3단계는 이산화탄소 재처리 장치 구축, 4단계는 수소액화 및 저장 장치 그리고 5단계로 태양광 연료전지 발전소를 연계하여 하루 10 MW의 전기를 생산할 수 있는 실증 단지를 완성할 계획이다.

두 번째는 대형 수소 모빌리티 산업의 선도이다. 창원시의 지역 주력산업인 기계·자동차·조선·항공 산업의 관련 기업은 수소 산업으로 진입이 상대적으로 쉬우며 모빌리티의 범위를 확대함으로써 전·후방 산업으로 확장가능성이 높다. 이와 관련하여 전문가

는 창원시에 위치한 대표적인 대형 모빌리티 기업과 연계하여 대형 수소 모빌리티의 개발 및 실증을 통해 지역 기업의 경쟁력 강화가 필요하다는 검토 의견을 주었다. 그리고 창원시는 수소 모빌리티의 운영에 필수적인 수소충전소의 구축실적이 전국 1위이므로 수소 활용 분야 시장의 점유율을 높일 수 있을 것으로 예상한다. 또한, 전문가는 표준 운영절차를 개발하여 수소충전소의 구축뿐만 아니라 고장 시 소음, 압력, 온도 등의 현상을 관찰하여 고장 원인을 분석하고 사고의 예방이 필요함을 강조하였다.

세 번째는 소재·부품·장비산업과 수소 융합프레임 구축이다. 창원시는 모터나 터빈, 엔진 등 고효율 파워 유닛의 성능평가 및 인증시험 등의 비용·행정적 지원기반을 조성하기 위해 핵심 소재·부품·장비산업 육성플랫폼 사업을 추진 중이며 한국자동차연구원, 한국전자기술연구원 등 수소 산업과 관련된 전문기관을 적극적으로 유치하고 있다. 창원시는 한국자동차연구원과 협력하여 수소 모빌리티 연구시설과 수소충전연구동, 기업공동연구동 등을 구축하여 수소 전기차 부품 기술 개발과 수소 모빌리티 핵심연구기지를 육성할 계획이며, 한국전자기술연구원과는 기업수요기반 연구개발사업과 수소인프라 안전관제시스템 구축 사업 등을 추진할 계획이다. 특히, 모빌리티 관련 전문가는 건설기계, 선박 등의 대형 모빌리티의 핵심소재·부품은 진동, 충격, 부식 등 수소전기차와는 다른 운전 환경에 노출되므로 운전 환경을 고려한 기술 개발 및 양산이 대형 수소 모빌리티 개발의 핵심임을 제시하였다.

네 번째는 수소 산업 생태계 구축 및 활성화이다. 수소 산업 관련기업의 사업화는 기술 개발 및 안전성 인증이 필수적이다. 이에 따라 창원시는 상복일반산업단지과 창원국가산업단지에 수소 특화산업단지를 조성하여 연구기관과 기업을 유치하고 상호보완을 통해 연구개발에 집중할 수 있도록 지원하여 경제적·기술적 시너지 효과를 유도할 계획이다. 또한, 수소 산업 육성계획의 실효성을 높이기 위해 산·학·연·관 클러스터와 전문위원회를 구성·운영하여 수소 산업의 육성현황을 점검하고 방향성을 제시하도록

한다. 나아가 창원시 수소 산업 육성을 장기적으로 뒷받침하기 위해 수소에너지 특성화대학원과 같은 전문인력양성을 추진해야 한다.

창원시는 중장기 육성계획에 따라서 창원시의 수소 산업이 성장하게 된다면 4만 2천 명의 일자리와 7.2조의 경제효과, 온실가스 감축 363여만 톤, 전력에너지 발전량 1.2 GW (창원 전체 사용량의 1/3 해당)의 부가가치가 창출될 것으로 예상된다.

3.3.3 창원시 수소 산업 육성계획과 타 지자체 간의 연계 방안

도출된 창원시 수소 산업 중장기 육성계획과 타 지자체가 보유한 인프라 간의 연계 방안을 모색한 결과, 다양한 방안들이 검토되었다. 통영의 LNG 인수기지에 중대형(300-1,000 m³/h)급 수소 추출기를 설치하고 창원-통영을 연결하는 수소배관 설치 사업을 통해 안정적인 수소 공급망을 확보할 수 있다. 고성군에서 2021년부터 운영 예정인 20 MW 급 수소 연료전지사업과 연계하여 연료전지 폐열 및 LNG 냉열을 이용한 수소 생산 기술 개발은 창원시 연료전지 및 액화수소 실증 플랜트에 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 사천이 강점을 보이는 항공기 부품생산 및 기계조립 산업과 협력하여 수소드론과 수소비행기 등 항공용 수소 모빌리티의 개발과 상용화를 고려해볼 수 있다. 부산, 울산 그리고 경남(창원)은 동남권 협력체계를 마련하여 다양한 수소 산업을 추진할 수 있다. 일례로 각 지역을 연결하는 수소시외버스와 경전선 수소열차를 운행하여 동남권을 아우르는 충전인프라 구축이 가능하다. 또한, 수소항만을 건설하여 수소선박과 항만장비 개발 그리고 수소 항만 운영을 통해 해양항만산업을 혁신하는 등 다양한 동남권 수소 산업 육성방안을 구상할 수 있다.

4. 결론

수소는 지속가능하고 친환경적인 에너지원으로, 화석연료를 대체하여 기후변화에 대응할 수 있다. 또한, 수소는 생산, 저장·운송, 활용, 안전·환경·인프라

로 광범위한 전주기를 가지며 연료전지와 연계 시 수송, 발전, 산업 등 사회 전반에 적용할 수 있어 전·후방 산업의 육성이 가능하다. 수소의 환경적, 산업적, 경제적 파급효과를 고려할 때 수소경제의 도래는 선택이 아닌 시기의 문제이며 세계 각국은 수소경제를 앞당기기 위해 다양한 정책과 정량적·정성적 목표를 발표하고 있다.

우리나라도 이에 발맞추어 2018년 수소경제를 혁신성장 분야로 선정하였으며 2019년 1월 ‘수소경제 활성화 로드맵’과 10월 ‘수소 산업 기술 개발 로드맵’, 2020년 2월 ‘수소법’, 7월 ‘그린뉴딜’과 ‘수소 산업 생태계 경쟁력 강화 방안’ 등을 발표하여 수소경제 육성을 위한 정책적·제도적 기반을 마련하였다. 창원시는 지역 및 국가의 수소경제를 이행하고자 정부의 정책과 지원 방향을 검토하고 지역의 현황과 강점을 고려한 수소 산업 육성계획을 선택적·체계적으로 수립하였다.

창원시 수소 산업 2040 중장기 육성계획의 세부 실행방안으로 단기사업 10개와 장기사업 17개를 도출하였다. 단기사업은 창원시가 수행 중인 수소 산업 육성 활동이 성공적인 성과로 연결되고 창원시가 강점을 가지는 수소 모빌리티 분야를 육상용, 해상용, 항공용으로 확장하도록 구성하였다. 장기사업은 창원시의 지역적 강점을 활용하고자 수소 활용 분야의 비중을 높게 구성하고 수소 산업 관련 기업의 지원을 추가하였으며 그린 수소 생산, 수소배관망, 연료전지 발전사업 실증, HECS 실증 등 수소 산업 전주기의 산업경쟁력을 마련하도록 하였다. 창원시의 지역적 강점은 소재·부품·장비산업과 대형 모빌리티산업이 기존 기술력을 활용하여 수소 산업으로의 전향이 유리하다는 점이다. 다시 말해 지역이 가진 인적·물적 인프라를 최대한 활용하여 신산업도출을 위한 투자비용은 최소화하고 신산업도출에 따른 경제적 파급효과를 극대화할 수 있다. 창원시에 위치한 소재·부품·장비산업과 대형 모빌리티 기업이 수소 산업으로 진입하기 위해서는 기업의 기술 애로와 제도적·행정적 수요를 검토하여 적극적인 지원이 필수적이다. 일부 장기사업은 LNG 인수기지, 연료전지 실

증 플랜트, 수소선박 기술센터와 같이 타 지자체가 보유한 수소 산업 인프라와 연계하여 기술 개발의 효율성 제고를 유도하였다. 창원시가 수소 산업 특별시로 거듭나기 위해서는 경제적인 수소 보급(생산, 저장·운송), 대형 수소 모빌리티 개발(수송수단, 발전·산업)의 기술적인 요소는 물론이고 수소 산업 특화 산업단지 조성, 수소 산업 전문기관 유치, 수소도시 실증사업 등의 정책적인 요소도 수반하도록 구성하였다.

수소 산업은 막 태동하는 단계의 산업으로 급격한 성장과 변화를 겪고 있으며 수소 산업의 전주기는 산업적 파급효과가 큰 만큼 광범위하다. 따라서 지역별 차별화된 육성계획을 수립하고 이행하면서 가능성을 진단하고 즉각적으로 대응하는 것이 수소 산업 육성의 성패를 좌우할 것으로 판단된다. 이러한 관점에서 창원시가 수소 산업을 지역에 의한, 지역을 위한 산업으로 육성하기 위해서는 육성계획을 수행하는 과정에서 계획대비 창원시 수소 산업 육성현황을 주기적·체계적으로 진단할 수 있도록 전문가위원회를 운영하여 수소 산업 육성의 추진체 역할을 담당해야 한다. 또한, 산·학·연·관 클러스터를 구축해 지역 주체 간의 의견이 조화를 이루고 수소에너지 전문인력을 함께 양성하고 지역에 보급하면 지속가능한 수소 산업의 발전에 이바지할 것이다.

후 기

이 논문은 2019-2020년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과입니다.

References

1. International Energy Agency (IEA), “World energy outlook 2016, executive summary”, IEA, 2016, pp. 1-8. Retrieved from <https://iiccc.sabanciuniv.edu/sites/iiccc.sabanciuniv.edu/files/WEO%202016%20Executive%20Summary.pdf>.
2. International Energy Agency (IEA), “Renewables information 2019”, OECD Publishing, 2019, doi: <https://doi.org/10.1787/fa89fd56-en>.
3. REN21, “Renewables 2019 global status report”, REN21

- Secretariat, 2019. Retrieved from <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/28496/REN2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
4. S. Guo, Q. Liu, J. Sun, and H. Jin, "A review on the utilization of hybrid renewable energy", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 91, 2018, pp. 1121-1147, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.105>.
 5. M. A. Mirzaei, A. S. Yazdankhah, B. Mohammadi-Ivatloo, M. Marzband, M. Shafie-khah, and J. P. Catalão, "Stochastic network-constrained co-optimization of energy and reserve products in renewable energy integrated power and gas networks with energy storage system", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 223, 2019, pp. 747-758, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.021>.
 6. N. Sazali, "Emerging technologies by hydrogen: a review", *Int. J. Hydrog. Energy*, Vol. 45, No. 38, 2020, pp. 18753-18771, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.021>.
 7. S. Samsatli and N. J. Samsatli, "The role of renewable hydrogen and inter-seasonal storage in decarbonising heat - comprehensive optimisation of future renewable energy value chains", *Applied Energy*, Vol. 233-234, 2019, pp. 854-893, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.159>.
 8. S. Cho and J. Kim, "Multi-site and multi-period optimization model for strategic planning of a renewable hydrogen energy network from biomass waste and energy crops", *Energy*, Vol. 185, 2019, pp. 527-540, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.053>.
 9. L. Sun, Q. Hua, J. Shen, Y. Xue, D. Li, and K. Y. Lee, "A combined voltage control strategy for fuel cell", *Sustainability*, Vol. 9, No. 9, 2017, pp. 1517, doi: <https://doi.org/10.3390/su9091517>.
 10. A. Demirbas, "Future hydrogen economy and policy", *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, Vol. 12, No. 2, 2017, pp. 172-181, doi: <https://doi.org/10.1080/15567249.2014.950394>.
 11. H. Kasai, A. A. B. Padama, B. Chantaramolee, and R. L. Arevalo, "Review of the current status of the hydrogen economy", *Hydrogen and Hydrogen-Containing Molecules on Metal Surfaces Springer Series in Surface Sciences*, 2020, pp. 119-147, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-15-6994-4_4.
 12. Council, Hydrogen, "Hydrogen scaling up, a sustainable pathway for the global energy transition", Hydrogen Council, Belgium, 2017. Retrieved from <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>.
 13. R. Phillips and C. W. Dunnill, "Zero gap alkaline electrolysis cell design for renewable energy storage as hydrogen gas", *RSC Advances*, Vol. 6, No. 102, 2016, pp. 100643-100651, doi: <https://doi.org/10.1039/C6RA22242K>.
 14. B. Dou, H. Zhang, Y. Song, L. Zhao, B. Jiang, M. He, C. Ruan, H. Chen, and Y. Xu, "Hydrogen production from the thermochemical conversion of biomass: issues and challenges", *Sustainable Energy & Fuels*, Vol. 3, No. 2, 2019, pp. 314-342, doi: <https://doi.org/10.1039/C8SE00535D>.
 15. Hydrogen Tools, "Refinery hydrogen production capacities by country", Hydrogen Tools, 2017. Retrieved from <https://h2tools.org/node/820>.
 16. International Renewable Energy Agency (IRENA), "Hydrogen from renewable power: technology outlook for the energy transition", IRENA, 2018. Retrieved from https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/IRENA_Hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf.
 17. A. V. Abad and P. E. Dodds, "Green hydrogen characterisation initiatives: definitions, standards, guarantees of origin, and challenges", *Energy Policy*, Vol. 138, 2020, pp. 111300, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111300>.
 18. B. Widera, "Renewable hydrogen implementations for combined energy storage, transportation and stationary applications", *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 16, 2020, pp. 100460, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100460>.
 19. A. T. Wijayanta, T. Oda, C. W. Purnomo, T. Kashiwagi, and M. Aziz, "Liquid hydrogen, methylcyclohexane, and ammonia as potential hydrogen storage: comparison review", *Int. J. Hydrog. Energy*, Vol. 44, No. 29, 2019, pp. 15026-15044, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.112>.
 20. M. Aziz, T. Oda, and T. Kashiwagi, "Comparison of liquid hydrogen, methylcyclohexane and ammonia on energy efficiency and economy", *Energy Procedia*, Vol. 158, 2019, pp. 4086-4091, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.827>.
 21. E. Rivard, M. Trudeau, and K. Zaghbi, "Hydrogen storage for mobility: a review", *Materials*, Vol. 12, No. 12, 2019, pp. 1973, doi: <https://doi.org/10.3390/ma12121973>.
 22. L. F. Chanchetti, D. R. Leiva, L. I. L. de Faria, and T. T. Ishikawa, "A scientometric review of research in hydrogen storage materials", *Int. J. Hydrog. Energy*, Vol. 45, No. 8, 2020, pp. 5356-5366, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.093>.
 23. Fuel Cell, "Road map to a US hydrogen economy", Fuel Cell, 2019. Retrieved from <https://cafcp.org/sites/default/files/Road%2BMap%2Bto%2Ba%2BUS%2BHydrogen%2BEconomy%2BFull%2BReport.pdf>.
 24. J. U. FCH, "Hydrogen roadmap Europe: a sustainable pathway for the European energy transition", J. U. FCH, 2019. Retrieved from <https://www.fch.europa.eu/news/hydrogen-roadmap-europe-sustainable-pathway-european-energy-transition>.