

# 수소자동차 충전소 및 공급망 배치 최적화: 현황 및 연구 제언

류현영<sup>1</sup> · 김병인<sup>1\*</sup> · 송민석<sup>1</sup> · 김현준<sup>1</sup> · 이덕상<sup>1</sup> · 이승엽<sup>1</sup> · 신재민<sup>1</sup> · 유영돈<sup>2</sup> · 김수현<sup>2</sup> · 이해진<sup>3</sup>

<sup>1</sup>포항공과대학교 산업공학과 / <sup>2</sup>고등기술연구원 / <sup>3</sup>수소융합얼라이언스

## Optimization of Hydrogen Refueling Stations Deployment and Supply Chain Networks: Current Status and Research Suggestions

Hyunyoung Ryu<sup>1</sup> · Byung-In Kim<sup>1</sup> · Minseok Song<sup>1</sup> · Hyunjoon Kim<sup>1</sup> · Deoksang Lee<sup>1</sup> · Seungyeop Lee<sup>1</sup>  
Jaemin Shin<sup>1</sup> · Young-Don Yoo<sup>2</sup> · Su Hyun Kim<sup>2</sup> · Hyejin Lee<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial and Management Engineering, POSTECH

<sup>2</sup>Institute for Advanced Engineering

<sup>3</sup>H2KOREA

Hydrogen infrastructure consisting of hydrogen refueling stations and supply chain network is critical in the hydrogen mobility economy. This paper overviews the important key concepts of the hydrogen mobility economy and investigates the status of hydrogen vehicles and refueling stations in Korea and other countries. It also reviews the methodologies for hydrogen station and supply chain network optimization and suggests research agenda for the hydrogen mobility economy.

**Keywords:** Hydrogen, Refueling Station, Supply Chain, Optimization

### 1. 서론

전 세계적으로 화석연료 이용으로 인한 온실가스 배출량 증가와 대기오염이 중요한 환경 문제로 대두되면서 수소 경제(Hydrogen Economy)에 대한 관심이 증가하고 있다(International Energy Agency, 2021). 수소 경제란 수소를 주요 에너지원으로 사용하는 경제산업구조를 말하며 화석연료를 대체하여 에너지 소비와 탄소배출 등을 줄일 수 있는 경제 시스템 구축을 목표로 한다(Ball and Wietschel, 2009). 1970년대부터 주목받아 온 이 개념은 탈탄소화 여부에 따라 중단기적 수소 경제 및 장기적 수소 경제로 나눌 수 있다(R&D Information Center, 2020). 중단기적 수소 경제는 석유, 석탄, 천연가스, 원자력, 신재생에너지 등을 이용하여 수소를 생산하고 연료전지

등을 통해 활용하는 고효율 저탄소 경제사회를 말한다. 장기적 수소 경제는 탄소배출이 없는 태양에너지 등의 재생에너지를 사용해 직접 또는 물을 분해하여 수소를 생산하고 활용하는 고효율 무탄소 경제사회를 말한다.

수소 경제 달성 및 수소 연료로의 전환은 교통 부문과 가장 밀접한 관련이 있다(Kim and Kim, 2016). 내연기관차에서 발생하는 온실가스와 초미세먼지는 전체 배출량의 13.5%와 13.8%를 차지하는 핵심 배출원으로서 무공해차로의 전환을 통해 줄일 수 있다(Ministry of Environment, 2021). 수소는 대기오염물질과 탄소배출이 적고, 다양한 저탄소 에너지원에서 생산 가능하다는 점에서 자동차 연료로서 주목받고 있다(International Energy Agency, 2019). 특히 주행에서의 온실가스 배출은 거의 없고, 연료의 생산부터 이용까지의 전 과정(well-to-wheels)의 배출량은 화석연료

이 논문은 2020년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행되었음 (No. 20203020040050)

\* 연락저자 : 김병인 교수, 경상북도 포항시 남구 청암로 77, Tel : 054-279-2371, Fax : 054-279-2870, E-mail : bkim@postech.ac.kr

2021년 9월 28일 접수; 2021년 12월 31일; 2022년 3월 3일 수정본 접수; 2022년 3월 7일 게재 확정.

와 천연가스의 30-50% 정도이다 (California Fuel Cell Partnership, 2016). 예를 들어, 수송부문의 디젤 및 휘발유 사용을 수소 연료로 대체할 경우 km당 이산화탄소 배출량을 220g에서 19g으로 약 91%를 줄일 수 있다 (De-León Almaraz *et al.*, 2014). 이러한 이점을 바탕으로, 세계 각국에서 수소자동차의 보급 확대를 위한 정책이 증가하고 있으며, 수소충전소 구축과 수소 인프라 계획이 빠르게 추진 중이다.

수소자동차 보급 확대를 위해서는 수소 인프라 구축이 무엇보다도 중요하다 (Tanç *et al.*, 2019). 수소자동차 보급과 수소충전소 구축의 관계를 많은 연구자는 닭과 달걀 문제(chicken-and-egg problem)라고 일컫는다 (Li *et al.*, 2018). 수소자동차의 잠재 고객들은 충분한 수의 수소충전소가 보장되어야 수소자동차를 구매하려는 경향이 있지만, 수소충전소의 설치비용은 1개소당 약 30~60억 원으로 높은 초기 자본 비용으로 인해 수소충전소 설치에 제한적일 수밖에 없다 (Melaina and Penev, 2013). 이런 문제를 해결하기 위해 수소충전소 배치 최적화 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만, 충전소 배치와 공급망을 함께 고려한 연구는 많지 않다. 수소충전소는 전기 충전소와 다르게 수소 생산지와 연계되어야 하므로 신중하게 위치를 선정해야 한다. 충전소를 설치할 경우, 각 지역의 수요를 맞출 수 있는 최적 위치뿐 아니라 장기적인 수소 공급에 대한 계획이 함께 수립되어야 한다.

한국 정부는 2019년 1월 수소 경제 활성화 로드맵을 발표하는 등 수소 경제 활성화에 앞장서고 있다 (Ministry of Trade, Industry, and Energy, 2019b). 정부는 수소자동차를 2030년까지 85만 대, 2040년까지 290만 대를 보급하고 수소충전소를 2022년 310기, 2030년 660기, 2040년에는 1,200기 건설할 목표를 밝혔다 (Ministry of Trade, Industry, and Energy 2019a). 하지만 구체적인 충전소 설치 위치와 공급 방법에 대한 종합적인 방안은 제시되지 않은 상태이다. 불확실한 미래 수요를 토대로 전국 범위의 장기적인 충전소 배치 계획을 수립할 경우, 수소충전소 이용의 효율을 증대시킬 수 있는 최적 위치 선정과 원활한 수소 공급을 위한 공급망 계획 연구가 함께 진행되어야 할 것이다.

본 논문은 국내 연구자, 정책 결정자 및 관련 분야 실무자들이 참고할 수 있도록 수소자동차 인프라에 관련된 기본 개념과 국내외 현황을 소개하고, 수소 공급망 및 충전소 배치 최적화 연구를 요약하여, 향후 국내 연구에 고려해야 할 중점 사안을 제안하기 위한 목적으로 작성하였다. 특히 수소 공급망의 경우, 교통 및 수송 분야에서의 수요와 공급에 초점을 맞추어 수소자동차와 연계된 부분을 중심으로 내용을 정리하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제2절에서는 수소자동차, 수소충전소, 수소 공급망에 대한 기본 개념을 기술하고, 제3절에서 국내외 수소자동차 도입 및 수소충전소 구축 현황을 요약한다. 제4절에서는 문헌조사를 통해 수소충전소 및 인프라 구축 관련 연구를 살펴보고, 제5절에서는 향후 국내 수소충전소 및 공급망 배치 관련 연구 방향에 대해 논의한 후 제6절에

서 결론을 맺는다.

## 2. 관련 개념 및 정의

### 2.1 수소자동차

수소연료전지자동차(Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV; 수소자동차)는 수소를 연료전지로 사용해 전기 모터에 전력을 공급하여 주행하는 자동차를 말한다. 전기차의 내부구조와 비슷하지만, 자동차에 수소 가스탱크가 장착되어 있고, 배터리에 서만 전력을 추출하는 전기차와 달리 연료전지를 통해 수소에서 전기로 전환된다. 수소 충전 시간이 최대 4분으로 1회 충전 시 300마일 이상을 주행할 수 있는 장점이 있으며, 전기차와 비교해 배터리 수명에 따른 기능 저하 문제가 없다 (Alternative Fuels Data Center, 2017). FCEV의 경우 지난 20년간 친환경 교통수단으로의 전환을 목적으로 여러 자동차 회사에서 개발을 목표로 해왔으며, 2014년 처음 상용차가 출시된 이후 시장 도입이 급격히 증가하였다. 2021년 현재 현대 넥쏘와 도요타 미라이가 판매량이 가장 많다 (Asif and Schmidt, 2021). 수소자동차는 탄소 및 오염물질 배출이 전혀 없고 전기 자동차에 비해 충전 시간이 짧고 주행거리가 길다는 장점이 있어 대한민국을 비롯하여 여러 나라에서 정책적으로 보급을 추진 중이다. 2030년까지 전 세계 4천5백만 대의 FCEV가 생산될 것으로 전망되며, 연료 보급을 위한 10,500개의 수소충전소 구축을 목표로 하고 있다 (Hydrogen Council, 2021).

### 2.2 수소충전소

수소충전소(Hydrogen Refueling Station, HRS)는 수소자동차에 수소를 공급하는 인프라로서 이동성 여부에 따라 고정형 충전소와 이동형 충전소로 구분되고, 수소 제조설비 포함 여부에 따라 직접 생산 일체형(On-site)과 외부 수급형(Off-site)으로 구분된다 (Apostolou and Xydis, 2019). 일체형 수소충전소는 탈황 공정, 수소 제조공정, 생성된 수소의 일산화탄소(CO) 농도를 낮춰주는 정제공정, 고순도 흡착 분리 공정, 저장공정, 충전공정 등이 포함된다. 외부 수급형 수소충전소는 외부에서 수소를 공급받기 위해 파이프라인 등 중앙 공급 시설이나 철도, 도로 등 개별 수송을 위한 시설이 구축되어 있다 (Korea Energy Economics Institute, 2019). Robinius *et al.* (2018)에 따르면 중간 크기의 수소충전소가 일 420kg의 수소로 75대의 FCEV를 충전할 수 있으며, 수소자동차의 주행거리가 현재 기준 550km에서 2030년 1,000km까지 늘어날 것으로 전망하였다.

### 2.3 수소공급망

수소 공급망(Hydrogen supply chain network)은 수소의 원료, 생산, 저장, 운송, 분배, 이용 등의 전 과정을 말하며, 각 단계는

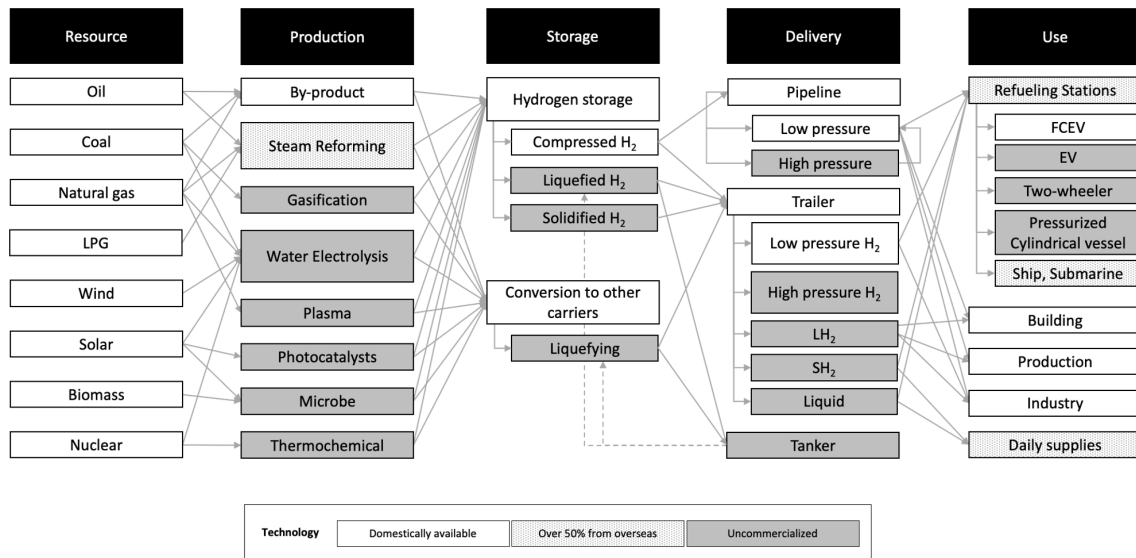


Figure 1. Structure of Hydrogen Value Chain in Korea(Korea Gas Safety Corporation, 2018)

다양한 방법과 기술로 구성되어 있다(Li *et al.*, 2019). 수소 공급망의 단계는 크게 수소 생산과 운송으로 나눌 수 있다. 생산 단계에서는 다양한 에너지원을 사용하여 여러 가지 기술적 생산 방법을 활용할 수 있는 특징이 있으며, 생산된 수소는 기체, 액체, 고체 등의 형태로 변환할 수 있다. 운송 단계에서는 연료 형태를 고려하여 운송 수단, 저장소, 충전 시설 등을 결정한다. 이처럼 수소공급망은 수소충전소의 높은 초기자본 비용, 기체, 액체 등의 다양한 형태, on-site 충전소 등 다양한 생산방법 및 운송 방법의 조합이 가능하다는 점에서 휘발유, 경유, LPG 등의 다른 자동차 연료의 공급망과 차이가 있다. 국내의 수소의 원료, 생산, 저장, 운송, 활용을 포함한 가치 사슬(value chain)의 단계별 방법 및 기술적 구분은 <Figure 1>과 같다(Korea Gas Safety Corporation, 2018). 각 단계의 기술 현황은 현재 국내기술로 상용화, 50% 이상 해외 기술로 상용화, 미상용화 기술로 구분할 수 있다. 단계별 설명은 다음과 같다.

수소 생산의 에너지원(resource)은 석유, 석탄, 천연가스, LPG 등의 자원과 풍력, 태양, 바이오, 원자력 등이 활용된다. 태양력, 풍력, 조력, 파력 등의 신재생에너지를 사용하여 수소를 생산하면 친환경적이고 다양한 에너지원을 활용할 수 있지만, 현재로서는 높은 생산 단가와 지역적인 제한으로 인해 대량생산이 어렵다.

수소 생산(production) 기술은 대표적으로 부생, 개질, 가스화, 수전해 등이 있고, 플라즈마, 광분해, 미생물, 열분해 등의 방법도 가능하다. 부생(by-product) 수소는 화학 및 제철 공정 부산물인 폐가스를 활용한다. 이는 정제가 필요하며 생산량을 확대할 수 없다는 한계가 있다. 수증기 개질(steam reforming) 방법은 천연가스와 석탄 등 화석연료를 사용하여 메탄을 고온 고압 상태에서 수증기로 분해하여 수소를 생산하는 비교적 안정된 기술이다. 개질 방법은 대량생산이 가능하고 생산 단가가 저렴하지만, 이산화탄소 발생이 많고 에너지 안보에 취약

한 단점이 있다. 가스화(gasification)는 석탄과 물로 열분해하는 방법이고, 수전해(water electrolysis)는 전기로 물을 분해한다. 그 외 수소 생산 방법으로는 물, 탄소, 메탄을 열분해하는 플라즈마, 광촉매로 물을 분해하는 광분해, 효소, 광합성 등의 미생물을 활용하는 방법, 초고온 가스 냉각원자로에서 열분해하는 다양한 기술이 있지만, 현재 국내에서는 부생 수소를 활용하는 방안과 개질만 기술적으로 가능하다. 수소 생산은 시간이 흐름에 따라 신재생에너지를 활용한 수소 생산 중심으로 비중이 증가할 것으로 예상되며, 국가 간 생산 수소의 거래도 활발히 진행될 것으로 전망한다.

수소 저장(storage) 방법은 크게 두 가지로 수소를 압축, 액화, 고체화하여 그대로 저장하거나, 촉매제를 활용하여 다른 물질로 변환하는 방법이 있다. 압축은 현재 가장 상용화된 기술로 이용이 편리하며 부피가 작은 소량 이용에 적합하다. 다만 압축과정에서의 에너지 소모가 많고, 저장 용기에 대한 엄격한 특성을 요구한다. 액화의 경우 대량 저장이 가능하고 체적 대비 효율이 압축방식보다 우수하지만 -235도 이하를 유지해야 하고 액화 과정의 에너지 소모가 크며, 밸브나 이음매의 가스 유출 가능성이 큰 문제가 있다. 고체는 마그네슘 수소화물 등 고체에 흡착시켜 저장한다. 그 외 다른 물질로의 변환 방법은 수소 수화물, 톨루엔, 암모니아, 메탄올, 메틸실클로hex산(MCH), 수소화붕소나트륨( $\text{NaBH}_4$ ) 등의 촉매제를 활용한 액상 저장 방법이 있다. 수소 분리용 촉매와 저장용 촉매가 필요하며 성능과 경제성이 미흡하고 사용장소에서 수소를 추출하는 소형 탈수소 장치의 상용화가 필요하다. 그 외 메탄화(P2G) 및 합금화합물 등의 화학적 처리 방법도 있지만, 연구 단계에 있다.

수소 운송(delivery)은 파이프라인, 튜브 트레일러, 탱크 등이 사용되며, 국외 수입의 경우에는 유조선으로 운송된다. 이

때 압력과 형태에 따라 저압, 고압 이송으로 나뉘고 수소는 기체, 액체, 고체, 액상 형태로 구분된다. 수소는 상온에서 기체 상태로 에너지 밀도가 낮아 생산, 저장, 운송 단계에서 약 10~20% 정도 누출되며, 높은 안전성 확보가 중요하다 (POSCO Research Institute, 2019).

수소충전소나 충전기는 승용차, 버스, 특장차 등의 수소연료전지차뿐 아니라 연료전지에서 전기를 충전하는 융복합 전기차, 카트와 오토바이 등의 이륜차, 고압 용기를 사용한 드론, 캠핑용 이동식 전원에서도 활용할 수 있다. 배와 잠수함의 연료로도 활용된다. 이외에도, 연료로서 수소 이용(use)은 수소충전소 이외 건물용, 발전용, 산업용, 생활용품 등 다양한 형태로 소비자에게 이용된다.

장기적으로 수소 경제 활성화를 위해서는 생산, 저장, 운송, 충전, 이용 등 전체 가치 사슬을 유기적으로 연결하고, 친환경적으로 수소를 생산하고, 안정성 높은 저장 및 운송 방법을 채택하여, 충전과 이용의 불편함이 없도록, 연료로서 수소의 안전성, 편리성, 경제성을 확보하는 것이 중요하다.

### 3. 국내외 현황

본 절에서는 국내외 수소자동차 도입 및 충전소 구축 현황을 살펴봄으로써 최신 동향 정보를 제공하고자 한다. 관련 자료는 정부 및 연구기관 보고서와 기존 연구를 참고하였다. 국제에너지기구(International Energy Agency, IEA)의 보고서를 바탕으로 각 나라의 공기관 및 정부 로드맵 등의 자료를 참고하였고, 통계자료는 제공 출처 상의 최신 수치로 재인용 하였다.

### 3.1 수소자동차 및 수소충전소 현황

국내의 수소자동차 도입 및 수소충전소 구축 현황은 <Figure 2>와 같다. 2019년까지의 수소자동차 판매 대수는 미국이 8,039 대로 가장 많았고, 2019년을 기점으로 아시아의 수소자동차 대수가 급격히 증가하였다. 최근 IEA의 조사에 따르면 2020년 한국의 수소자동차 대수가 10,000대 이상으로 증가하면서 전 세계 29%의 수소자동차를 보유하고 있고, 미국(27%), 중국(24%), 일본(12%), 독일(3%)이 그 뒤를 따르고 있다 (International Energy Agency, 2020).

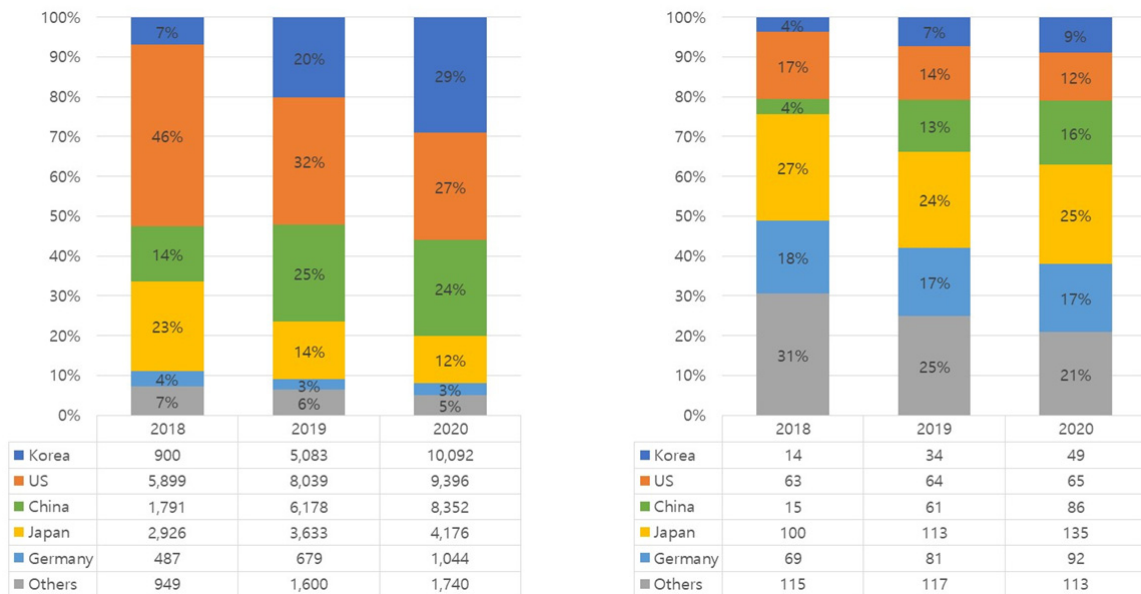
수소충전소 구축 현황은 2020년 말 기준 일본이 약 25%를 차지하고 있으며, 독일(17%), 중국(16%), 미국(12%) 순으로 많다. 한국의 세계 수소충전소 비율은 9%로 인프라 구축은 수소자동차 대수 증가에 비해 느린 편이다(International Energy Agency, 2021).

### 3.2 국가별 중장기 계획

수소자동차 도입과 충전소 건설이 가장 활발히 진행되는 미국, 독일, 일본, 중국과 한국의 수소자동차 도입 및 충전소 구축 계획은 <Table 1>과 같다.

#### 3.2.1 미국

미국의 수소 위원회(Hydrogen council)는 2020년 10월 미국의 수소 경제를 위한 로드맵을 발간하여 수소 관련 시장의 발전과 확장을 위한 정책적 제안을 하였다 (Fuel Cell and Hydrogen Energy Association, 2020). 이 로드맵에 따르면 2030



(a) FCEV

(b) Hydrogen Refueling Station (HRS)

Figure 2. Number of FCEVs and HRSs by Region, 2018-2020

(Data from Antoni et al., 2019; Samsun et al., 2020; and International Energy Agency, 2021)

**Table 1.** Number of Planned FCEVs and Hydrogen Refueling Stations from 5 Countries

Country		2020	2025	2030	2040 and long-term	References
U.S. (California)	Car	-	-	1,000,000	-	California Fuel Cell Partnership (2018)
	Station	-	-	1,000	-	
Germany	Car	-	-	1,000,000	10,000,000	Hebling <i>et al.</i> (2019)
	Truck	-	-	5,000	200,000	
	Station	100	400	1,000	5,000	
Japan	Car	40,000	200,000	800,000	-	Hydrogen and Fuel Cell Strategy Council (2019)
	Bus	100	-	1,200	-	
	Forklifts	500	-	10,000	-	
	Station	160	320	900	-	
China	Car	5,000	50,000	1,000,000	-	The Chinese Society of Automotive Engineers (2016), Greene <i>et al.</i> (2020)
	Station	100	350	600	-	
Korea	Car	-	65,000 (2022)	850,000	2,750,000	Ministry of Trade, Industry, and Energy (2019a)
	Bus	-	2,000 (2022)	-	40,000	
	Taxi	-	-	-	80,000	
	Truck	-	-	-	30,000	
	Station	100	310*	660	1,200	

년 수소 수요는 1천7백만 톤, 2050년 6천3백만 톤에 달하고, 전체 에너지 수요의 14%를 차지할 것으로 예상하였다. 또한, 수소 경제로의 전환은 2030년까지 연간 1,400억 달러의 수익을 창출하고, 70만 개의 일자리를 창출할 수 있으며, 2050년까지는 7,500억 달러, 누적 3,400만 개의 일자리를 창출할 수 있을 것으로 전망했다.

미국의 수소자동차 이용과 충전소 구축은 캘리포니아 지역을 중심으로 시행되고 있다. 캘리포니아주에서 2022년까지 구축되는 충전소의 개수는 71개로 2015년 6개에서 크게 증가하였다 (California Air Resources Board, 2020). 미국 캘리포니아 연료전지 파트너십(California Fuel Cell Partnership, CaFCP)은 캘리포니아 연료전지 혁신(California Fuel Cell Revolution)을 공표하였는데, 이는 2030년까지 자가용, 버스, 트럭을 포함한 1백만 대의 수소자동차 도입과 1,000개의 수소충전소를 구축을 목표로 하였다. 특히, 버스는 2029년까지 100% 탄소 무배출로 전환할 계획을 밝혔다 (California Fuel Cell Partnership, 2018). 캘리포니아 주 정부는 탄소배출이 없는 자동차에 차량 구매 보조금 및 세금 혜택을 제공하고, 동시에 수소 공급 측면에서 수소 생산자가 전체 생산량의 33% 이상을 저탄소 수소 및 재생에너지를 활용하여 생산할 경우 건설 자금 및 운용 보조금을 지원해주고 있다.

3.2.2 독일

현재 독일은 유럽지역에서 가장 많은 수소충전소가 구축되어 있고, 정부에서 2009년 H2Mobility를 설립하여 다양한 에너지 관련 기관과 자동차 회사들이 공동으로 참여하는 수소 충전 네트워크를 구축하고 있다(H2 Mobility Deutschland GmbH & Co KG, 2014). 하지만 수소충전소에 비해 수소자동차 수는 적으며, 2021

년 7월을 기준으로 1,195대의 FCEV와 버스 79대, 트럭 2대가 운영되고 있다(International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy, 2021).

독일 정부는 2020년 6월에 산업 및 교통 부문의 탈 탄소화와 친환경 수소생산 및 공급을 위한 국가 수소 전략을 발표하고(Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, 2020), 수소 기술 개발에 초점을 맞추어 국가 수소 연료전지 기술 혁신 프로그램(National Innovation Programme Hydrogen and Fuel Cell Technology, NIP)을 두 차례 실행하였다 (Fuhrmann, 2020). 독일 정부 출연 국립연구소 Fraunhofer-Gesellschaft의 로드맵에 따르면 초기 단계에서 100개의 충전소를 7대 권역에 설치하고 주요 도로와 아우토반으로 연결하는 방안을 계획하였고, 2025까지 400개, 2030년까지 1,000개의 충전소를 설치하는 것을 목표로 한다. 수소자동차는 2030년 승용차 100만 대, 트럭 5,000대, 이후 장기적으로 승용차 1,000만 대, 트럭 20만 대를 보급하고, 이를 수용하는 5,000개의 충전소 구축을 장기적으로 목표로 하고 있다(Hebling *et al.*, 2019).

3.2.3 일본

일본은 수소 기반 사회 조성을 위한 기본 수소 전략과 제5차 전략적 에너지 계획을 2019년 3월 12일에 공표하였고, 수소와 연료전지 전략 위원회에서 앞으로의 개발에 대한 로드맵을 발표하였다 (Hydrogen and Fuel Cell Strategy Council, 2019). 수소 생산 가격 저하를 최우선순위로 하여 화석연료와 탄소 포획 저장(CCS) 기술을 활용한 생산을 계획하고 있으며, 2022년까지 수소 저장 및 해외 운송을 기술적으로 가능하게 하고, 2030년 모든 수소 생산 방법을 도입하여, 2050년 무탄소 수소 경제 달성을 목표로 한다. 수소자동차와 수소충전소는 2020년까지 4만 대의 연

료전지 자동차, 버스 100대, 화물차 500의 도입과 160개의 충전소 건설을 계획하였고, 2025년 20만 대 320개의 충전소, 2030년 대까지 80만 대 그리고 1,200대의 수소 버스, 1만 대의 화물차, 충전소 900개의 전국적 도입을 목표로한다. 수소 충전소는 2020년 135개를 구축하며 기존 160개의 목표에 근접해가고 있지만, 수소자동차는 4,679대, 버스 104대로 2020년 기존 목표 4만 대보다 현저히 도입이 느린 편이다(Hydrogen and Fuel Cell Strategy Council, 2021).

### 3.2.4 중국

중국의 경우 2019년 기준 버스 약 4,300대, 경량 화물차 1,800대로 전 세계 가장 큰 비중의 수소 버스(97%)와 수소 트럭(98%)을 보유하고 있다(International Energy Agency, 2020). 전기 승용차와의 간섭을 피해 수소 화물차와 수소 버스 등의 상용차 시장에 집중하고 있으며, 2025년까지 수소자동차 구매 보조금이 지역 단위로 운영될 것으로 전망한다(Deloitte China, 2020). 수소충전소 구축 지원은 몇몇 시 단위로 중점적으로 이루어지고 있고, 광둥, 상하이, 베이징 등 대도시 지역에서 적극적으로 추진하고 있다(Greene *et al.*, 2020). 수소자동차 및 수소충전소에 대한 계획은 중국 자동차공정학회(China Society of Automotive Engineers, China SAE)의 에너지 절약 및 신차를 위한 기술 로드맵(Technology Roadmap for Energy Saving and New Vehicles)에 따라 2020년 5,000대, 2025년 수소자동차 5만 대, 2030년 1백만 대의 수소자동차 도입을 목표로 하고, 충전소는 각 연도별 100개, 350개, 600개로 계획하였다(The Chinese Society of Automotive Engineers, 2016). 중국은 2019년 수소자동차 6,178대로(Samsun *et al.*, 2020) 2020년 목표치를 미리 달성하였고, 2020년 10월 제2차 로드맵을 공표하며 2025년의 목표 수소자동차 대수를 10만 대로 상향하였다(China Society of Automotive Engineers, 2020). 또한, 수소자동차 보급을 위한 장려책으로 수소자동차 핵심 기술 부품 개발 및 산업망 구축을 위해 지방정부와 기업에 간접적인 장려금을 지원하는 시범 정책을 도입하였다.

### 3.3 국내 현황 및 로드맵

국내 수소 경제에 대해 정부는 지역 사회, 기업 생태계 등 여러 관점에서 수소 경제를 분석하고 세부 대책을 지속적으로 마련해오고 있다. 정부는 2019년 4월 수소 경제 표준화 전략 로드맵을 발표하고, 같은 해 10월 미래 자동차 산업 발전전략과 수소 인프라-충전소 구축방안을 발표하였다. 수소 기술 개발 로드맵 및 수소 시범도시 추진 전략도 함께 공표하고, 12월 수소 안전관리 종합대책을 마련하였다(Ministry of Trade, Industry, and Energy 2020).

수소 수요 예측과 공급 계획에 관하여 정부에서는 수소자동차 보급 확대와 수소충전소 보급을 계획하고 있으며, 권역별 수소자동차 보급 및 수요 예측값을 제시하고 수소 수요를 전

망하였다. 국내 수소충전소에 대한 2040년까지의 세부 목표는 다음과 같다. 2022년까지 누적 310기를 주요 도시에 250기, 고속도로 환승 센터 등 교통 거점에 60기를 구축하되 광역지자체별 2기 이상 구축 및 주요 도시에서 충전소까지 30분 내 도달하도록 배치한다. 2030년까지 누적 660기를 고속도로 75km 이내 및 주요 도시 20분 내 도달하도록 배치하고, 2040년까지 누적 1,200기로 고속도로 50km 이내 및 주요 도시 15분 이내 도달하도록 배치한다.

또한, 정부는 수소충전소의 건설 시 핵심 고려 사항으로 생산 방식, 공급 및 구축 비용, 충전 시간 등을 고려하고 있다. 생산 방식은 단계적으로 부생 수소를 이용하고 장기적으로 수전해를 통한 그린 수소 비중을 확대할 예정이며, 공급 비용은 울산 및 대산 등 생산지에서 수도권으로 운반 시 1kg 당 약 1.1-1.2만 원으로, 구축 비용은 압축 장치 약 12억 원, 저장장치 약 4.5억 원, 냉각장치 약 2억 원으로 책정하고 있다. 충전 시간은 1기의 수소충전소에서 시간당 수소자동차 4-6대 충전할 수 있도록 목표하였다. 그 외 충전 인프라 안전기준과 주민 수용성도 고려해야 함을 강조하였다 (Ministry of Trade, Industry, and Energy, 2019a).

## 4. 관련 연구

앞 절에서는 수소자동차와 수소충전소에 관한 기본 개념과 국내외 현황 및 계획을 살펴보았다. 본 절에서는 수소충전소 및 인프라 구축과 관련된 연구 동향을 살펴봄으로써 추후 연구의 방향에 대해 제언하고자 한다. 우선 연구자들의 이해를 돕기 위해 최근 리뷰 논문을 바탕으로 수소 인프라 구축과 관련된 연구의 범위를 확인하였다. 또한, 산업공학 관점에서 다룰 수 있는 수소충전소 및 공급망 배치 최적화에 관련한 기존 연구를 정리하였다.

### 4.1 수소충전소 및 인프라 관련 리뷰 논문

수소충전소 및 인프라 구축과 관련된 리뷰 논문은 <Table 2>와 같다. Apostolou and Xydis(2019)는 수소충전소에 관한 연구를 기술적으로 분류하고, 수소자동차 현황 및 전망을 조사하였는데, 특히 비용 문제에 초점을 맞추었다. Kurtz *et al.* (2019)은 지난 10년간의 미국을 대상으로 한 수소인프라 연구를 중점으로 정리하였고, 충전소 신뢰성(reliability)에 대해 강조하였다. Li *et al.*(2019)은 수소 저장소에 관한 연구를 운영(operation)관점에서 기술하였으며, 급속충전(Fast-refueling)에 관련한 기술적 내용을 정리하였다. Li *et al.*(2019)은 교통 분야의 수소 공급망 설계 방법론(Hydrogen Supply Chain Design Model, HSCDM)을 중점으로 기술하였다. HSCDM은 원료로부터 수소 생산, 운송, 거점, 분배를 통해 연료 충전소까지 어떤 형태와 종류의 수소 인프라를 구축할 것인지에 대해 결정

하는 과정을 말한다. Moradi and Groth(2019)는 수소 저장과 운송 기술에 초점을 맞추어, 안전성과 신뢰성의 두 가지 문제를 주로 기술하였다. Greene *et al.*(2020)은 수소 충전 인프라 전반에 대해 정리하였고, 각국의 구축 현황도 포함하였다. Lin *et al.*(2020)은 수소충전소 입지 모델을 상세히 정리하였다. 전체적으로 기존 연구들은 수소충전소의 수요, 공급, 배치, 비용, 안전 등에 관한 사항을 논의하고 있으며, 이는 수소충전소 및 인프라 구축에서 필수적으로 고려되어야 할 사항들로 볼 수 있다.

#### 4.2 수소 공급망 배치 최적화

최적화 문제는 네트워크의 구성, 자원의 양, 단계별 상품의 흐름 등을 결정한다. 따라서, 수소 공급망 최적화는 생산, 저장, 운송 등 각 단계의 다양한 기술적 선택 사항에 따라 유통되는 수소의 양과 인프라 규모, 건설 및 운영 비용, 탄소 배출량, 안전 및 위험성 등을 산정하는 것을 목표로 한다.

수소 공급망 최적화 연구의 항목별 비교는 <Table 3>과 같다. 관련 연구들은 수학적 모델, 단계(echelon), 공간적 분석 범위에 따라 분류할 수 있다. 분석 모델은 대부분 선형 계획법(Linear programming, LP)과 혼합정수계획법(Mixed-integer linear programming, MILP)을 활용하며, 동적 계획법(dynamic programming)으로 분석한 경우도 있다(Seo *et al.*, 2020). 단계별로는 공급망의 특정 단계에서 여러 가지 기술적 선택을 바탕으로 최적화하거나 공급망의 여러 단계를 함께 포함해 전체적으로 분석하기도 한다. 공간적 범위는 국제, 국가, 지역 단위의 분석이 이루어지고, 국가 단위 이하의 분석에서는 운송 네

트워크 및 생산 시설의 위치를 결정하는 연구가 대부분이다.

Almansoori and Shah(2009)는 영국을 대상으로 수소 생산의 에너지원과 운송, 생산 및 저장 설비의 규모, 장기간의 수요와 인프라 증가를 고려하여 생산 시설을 최적화하는 연구를 수행하였다. 결과적으로 초기에는 on-site 충전소 기반의 작은 규모의 화학적 처리 생산 플랜트를 도입하고 규모가 증가할수록 단계적으로 다양한 규모의 생산 및 저장 설비를 증축해 나가는 것이 필요함을 제시하였다.

Nunes *et al.*(2015)은 수요의 불확실성을 고려하여 장기적인 수소 공급망 구축 및 배치 문제를 해결하는 방법을 제안하였다. 영국 전역을 대상으로 공급망의 원료 수급, 생산 시설, 저장소, 충전소, 운송 형태 등을 고려하였고, 최적화에 있어 생산 시설의 개수, 저장소의 개수와 위치, 용량, 그리고 운송 방법 등을 설정하였다. 초기 투자 결정과 공급망 운영의 두 단계를 구분한 확률적 혼합정수계획법(stochastic mixed-integer programming)으로 최적화하였고, 이때, 자원의 단가와 가능 여부, 생산 비용, 수요 등을 함께 고려하여 공급망의 크기를 결정하였다.

Bique and Zondervan(2018)은 독일의 2030년부터 2050년까지 장기적인 수소 공급망 구축 및 배치 문제를 최적화하였다. 수소 공급망 분석을 통해 연료로서의 수소 이용 가능성을 조사하고, 가장 최선의 인프라 경로를 설정하여 구축비용을 최소화하는 것을 목표로 하였다. 또한, 모든 기술적인 도입이 있을 경우와 탄소배출을 저감하기 위해 친환경 기술만을 활용한 두 가지 시나리오를 비교하였다. 결과적으로 수소 생산은 현재 석탄 가스화(coal gasification) 기술이 대부분 활용되고 있고, 추후 풍력과 태양광 에너지를 활용한 수전해 기술로 수

Table 2. Reviews on Hydrogen Refueling Stations and Infrastructure

Author	Topic	Contents	Demand	Supply	Location	Cost	Safety
Apostolou and Xydis (2019)	Refueling stations and infrastructure	Categories on H2 retail stations, current status and future prospects of the stations including financial issues on capital cost and H2 fuel cost	O	O	-	O	-
Kurtz <i>et al.</i> (2019)	Infrastructure performance and reliability	Hydrogen infrastructure studies for past 10 years in US from engineering perspective especially highlighting 'reliability' as operation challenges	-	O	O	O	O
Li <i>et al.</i> (2019)	Hydrogen storage system for FCEVs	Technological descriptions on fast-refueling as storage system for FCEVs and operational strategies	-	O	-	-	O
Li <i>et al.</i> (2019)	Supply network	Classification of modelling approaches and solution methods on Hydrogen Supply Chain Network Design (HSCND)	O	O	-	-	-
Moradi and Groth (2019)	Storage and delivery	Technologies of storage and delivery system; safety and reliability challenges of hydrogen infrastructure	-	O	-	-	O
Greene <i>et al.</i> (2020)	Refueling infrastructure for FCEV	Overall introduction of hydrogen infrastructure such as pathways, refueling station technology and cost challenges and prospects, including global status	O	O	O	O	-
Lin <i>et al.</i> (2020)	Station location model	Classification and comparison of hydrogen station location models	-	-	O	-	-

소를 생산할 경우 탄소배출 없이 지역별 충전 수요와 가구 에너지 수요를 충족할 수 있을 것으로 판단하였다. 운송 및 저장은 액화 형태의 수소를 기차로 운송하여 초강력 구형 탱크에 저장하는 경로를 제안하였다.

Ogumerem *et al.*(2018)은 미국 텍사스 주를 대상으로 시기별, 지역별 공급망을 최적화하여 비교하였다. 공급망 모델은 에너지원, 생산, 운송의 세 단계로 구분하고, 생산 시설의 위치와 용량, 수소량, 운송 방법 및 경로 등을 포함하였다. 또한, 수전해 기술로 수소 생산 시 발생하는 부생 산소를 그대로 배출시키는 경우와 판매하는 경우의 두 가지 시나리오로 비교하여, 친환경 수소 생산을 위한 수전해 기술의 경제적 도입 가능성을 제안하였다.

Talebian *et al.*(2019)은 캐나다의 브리티시컬럼비아주를 대상으로 2020년부터 2050년까지의 장기적 관점에서 공급망 구축 및 배치 문제를 해결하였다. 이때, 수소 수요지를 제외한 생산기지, 저장소, 압축 및 액화 수소, 수송 방법, on-site 및 off-site 충전소, 건설 비용을 고려하여 MILP를 활용하여 해결

하였다. 또한, 수소 공급망의 유통과 더불어 충전소의 종류와 용량을 고려하였다.

국내에서도 수소 공급망 최적화 모델을 구축하는 연구들이 진행되어 왔다. 주로 수소 수요의 불확실성, 효율적인 저장, 공급망의 위험 요소 등을 추가적으로 고려하였다. Cho and Boo (2007)는 수소 연료 전지 시장의 최적 공급시스템을 제안하기 위해 수소 및 연료전지 수요량을 산정하고, 에너지 시장에서의 수소 비중과 신재생에너지 비중을 산출하였다. 이 연구에서는 직접적인 공급시설을 배치하지 않았지만, 초기 수소 공급망 연구로서 연료 전지 도입시기, FCEV 보급대수, 수소수요량, 에너지 비중, 이산화탄소 저감량 등을 산출하였다.

Kim *et al.*(2008)은 수요의 불확실성을 고려하여 공급망을 설계하는 연구를 수행하였다. 수소 생산 방법, 수소 형태와 저장 시설, 운송 방법 등의 다양한 구성을 공급망에 반영하였고, 수요의 변화에 따른 생산 및 운송 시설의 구축비와 운영비를 비교하였다. 결과적으로 개질 생산이 수전해 방식에 비해 대량 공급이 가능하고, 압축 기체 형태보다는 액화 저장 시설이

**Table 3.** Research on Hydrogen Supply Chain Network

Author	Place	Level	Model	Echelon						Objectives other than cost	Time frame
				Pro-duction	Sto-rage	State of H2		Transportation	Refueling stations		
						Compressed gas	Liquid				
Almansoori and Shah (2009)	UK	34 grids	MILP	O	O	O	O	O	-	-	Long-term (2005-2034, 5 periods)
Nunes <i>et al.</i> (2015)	UK	34 grids	Stochastic MILP	O	O	-	O	O	O	-	Long-term (18 years)
Bique and Zondervan (2018)	Germany	16 regions, major cities	MILP	O	O	O	O	O	-	-	Long-term (2030, 2050)
Ogumerem <i>et al.</i> (2018)	Texas, US	11 counties	MILP, constraint method	O	-	O	O	O	-	Minimize GHG	Long-term (2015-2050, 5 periods)
Talebian <i>et al.</i> (2019)	British Columbia, Canada	Major cities, district	MILP	O	O	O	O	O	O	-	Long-term (2020-2050)
Cho & Boo (2007)	Republic of Korea	-	-	O	-	-	-	-	-	Energy mix	Long-term (2015-2040)
Kim <i>et al.</i> (2008)	Republic of Korea	15 regions	Stochastic MILP	O	O	O	O	O	-	Safety	Long-term (2044/1year)
Boo <i>et al.</i> (2009)	Republic of Korea	162 regions	Network, MMST	O	O	-	-	O	-	-	Long-term (2020-2040)
Han <i>et al.</i> (2012)	Republic of Korea	16 regions	MILP	O	O	O	O	O	-	CO2 Reduction	-
Kim and Kim (2016)	Republic of Korea	15 regions	MILP	O	O	-	O	-	-	-	Long-term (2044/1year)
Seo <i>et al.</i> (2020)	Republic of Korea	20 major cities	MILP	O	O	O	O	O	O	-	Market share 0-50 (%)
Choi <i>et al.</i> (2021)	Republic of Korea	33 cities	MILP	O	O	-	-	O	-	-	Short-term (2030)



유리하며, 한국의 지리적 특성상 튜브 트레일러나 파이프라인 보다는 탱커 트럭이 더 경제적인 것으로 나타났다.

Boo *et al.*(2009)은 수소 공급망을 수소제조방식에 따라 집중형과 분산형으로 나누고, 각 형태별 에너지 믹스를 계산하여 수소 인프라 구축을 제안하였다. 전국의 시군 단위별로 수소 수요량을 추정하여 시나리오를 분석하고, 네트워크 최적화 모형을 활용하였다. 즉, 도시 지역을 노드(node), 다양한 수소 운송 및 분배 수단을 엣지(edge)로 하여 최소 비용으로 연결하는 문제를 수정 최소결집나무 해법(modified minimum spanning tree, MMST)으로 계산하였다. 이 연구에서는 비용효과적인 수소 인프라 구축을 위해 2030년을 기점으로 분산형에서 집중형으로 공급망 비중을 증가시키고, 권역별로는 수도권 등 북부지역에서 남부지역으로 단계적으로 도입하는 방안을 제시하였다.

Han *et al.*(2012)은 수소 공급을 생산, 저장, 수요의 3단계로 구분하여 2030년의 전국 시도 단위의 공급망을 배치하였다. 이와 유사하게 Kim and Kim(2016)은 수소 생산기지, 저장소, 액화 수소, 수송 방법, 건설비용을 고려하여 수소 공급망 구축 및 배치 문제를 해결하는 방법을 제시하였다. 15개 시도를 대상으로 혼합정수계획법을 활용하였다.

Seo *et al.*(2020)은 20개의 도시를 대상으로 중앙 집중식 저장 방법이 분산형 방법보다 경제적인 것을 보였다. 이 연구에서는 수소의 생산부터 이용까지의 전 과정을 광범위하게 고려하여 공급망을 설계하였다. 수소의 생산 방식은 생산 시설에서의 개질, 가스화, 수전해 방식 뿐 아니라 on-site 충전소의 개질, 수전해 등도 고려하였다. 수소의 압축 기체 상태와 액화를 고려하였고, 튜브 트레일러, 탱커 트럭, 철도, 파이프라인 수송 등을 고려하였다. 하지만 20개의 주요 도시만을 대상으로 하였고, 장기적인 수요 변화를 고려하지 않았다.

Choi *et al.*(2021)은 2030년 전국을 대상으로 수소 생산 및 저장 시설의 위치와 공급량을 결정하고 수요지까지의 운송 수단 및 운송량을 계산하여 생산과 운송의 비용을 최소화하는 공급망을 설계하였다. 전국의 33개 대표 수요클러스터를 선정하고, 수소의 저장과 운송 효율성을 높이기 위해 유통허브를 도입하였다. 하지만 수소 생산방식은 부생수소와 추출수소만을 고려하였으며, 추후 다양한 수소 공급방식과 액화 수소활용을 추가시킬 것을 제안하였다.

기존 연구 중 충전소를 함께 고려한 수소 공급망 연구는 많지 않다. Nunes *et al.*(2015)은 충전소 개수를, Talebian *et al.*(2019)은 충전소의 종류 및 용량을 함께 고려하였다. 하지만 충전소의 위치는 고려하지 않았다. 또한, 국내의 수소공급망 배치 연구는 광역시, 도 단위의 제한된 지역만을 대상으로 분석한 한계점이 있다.

### 4.3 수소충전소 배치 최적화

수소충전소 입지 모델(hydrogen station location model)은 일반적으로 분석 범위 내 지역별 수요를 추정하고, 수요지와 충

전소 후보지를 설정하고, 이 둘 사이의 이동 거리나 시간을 최소화하여 각 수요량을 충족할 수 있는 충전소의 개수와 위치를 결정하게 된다. 분석 목적에 따라 단일 목적과 다목적으로 구분된다(Lin *et al.*, 2020). 단일 목적의 모델은 covering model, p-median 등의 전통적인 입지 모델과 최근 대체 연료 충전소에 적용하는 통행량 기반의 연료 충전 입지 모델(Fuel-refueling location model, FRLM) 등을 포함하며, 다목적 모델은 비용, 안전성 및 위험성 등을 함께 분석한다. 수소충전소 배치 최적화 관련 연구의 항목별 비교는 <Table 4>와 같다.

Nicholas and Ogden(2006)은 미국 캘리포니아주를 대상으로 p-median 모델과 지리 정보 시스템(GIS)을 함께 활용하여 충전소의 입지를 설정하였다. 총인구 분할구역의 중심점을 수요지로 가정하여 해당 구역 인구수와 비례하게 수요를 추정하고, 주행거리의 제한은 거의 없지만 소비자가 특정 시간 내로 충전소에 도달하기를 원한다는 가정하에 최적화를 수행하였다.

Kuby *et al.*(2009)은 미국 플로리다 올랜드 지역을 대상으로 FRLM을 활용하였다. 교차지점을 통과하는 교통량을 중심으로 최대 차량 수를 구하였고, 이용자들의 이동 경로와 다수 경로 선택 가능성을 고려하여 충전소의 입지를 결정하였다.

Stephens-Romero *et al.*(2010)은 미국 캘리포니아 어바인 지역에 set covering model을 활용하여 충전소를 배치하였다. 이때, 주거지역과 시설치된 주유소를 수요지와 후보지로 설정하고 최소 평균 이동 시간과 최대 차량수를 고려하여 배치하였다. 그 결과 지역 내 8개의 충전소를 배치하였고, 수소충전소의 개수와 위치뿐 아니라 수소 활용의 환경적 측면과 에너지 안전성을 포함하였다. 즉, 수소 생산 방법 및 운송 수단과 재생 에너지 사용 여부 등을 포함한 공급 측면의 변수를 세 가지 시나리오로 제시하여 비교 분석하였다.

Brey *et al.*(2014)은 2030년까지 스페인 안달루시아 지방의 단계적인 충전소 배치(roll-out) 시나리오를 제시하였다. 지역별 충전소 개수와 충전소의 규모, 기술적 가용성, 비용을 함께 제시하였다. 하지만 충전소의 정확한 위치가 아닌 행정구역 단위로 분석하였다.

Itaoka *et al.*(2019)은 일본 전 지역을 대상으로 초기 단계의 충전소를 배치하였다. 지역의 잠재적인 수요는 전국의 1km<sup>2</sup> 그리드 분할을 기준으로 고가 및 중저가 자동차 판매 데이터를 활용하여 파악하였다. 2020년 200개, 2025년 400개의 충전소의 개수를 설정하고 전국 분포와 대도시 중심의 분포를 비교하였다. 설문조사를 통해 운전자들이 주유하기 위해 15분 이내의 거리를 선호하는 것을 확인하여 최소 평균 이동 시간을 활용한 p-median 방법으로 잠재적 소비자들의 충전소까지의 거리의 합을 최소화하는 방향으로 최적화하였다.

Zhao *et al.*(2019)은 미국 내 일반 국도와 고속도로를 함께 고려하여 충전소 배치 문제를 해결하였다. 운전자가 경로상의 출발지와 목적지 사이에서 충전할 것을 가정하고, 이때, 시내의 도로, 도시 내 간선도로, 도시 간의 간선 도로 등을 함께 고려하였다.

Table 4. Research on Hydrogen Refueling Station Location Optimization

Author (year)	Place	Analysis	Objective	Demand point	Station candidate	Demand estimation	Supply aspect
Nicholas and Odgen (2006)	California, US	P-median	Min. average moving time	Census area	Existing gas stations	-	-
Kuby <i>et al.</i> (2009)	Orlando, Florida, US	FRLM	Max. number of cars	Street intersections	Intersections in major routes	-	-
Stephens-Romero (2010)	Irvine, California, US	Set covering model	Min. average moving time & max. number of cars	Residential area	Existing gas stations	Short-term (2010-2014)	O
Brey <i>et al.</i> (2014)	Andalusia, Spain	Spatial approach	Min. cost	Census area	Highways and streets	Long-term (2014-2030)	O
Itaoka <i>et al.</i> (2018)	Japan	P-median	Min. average moving time	1km <sup>2</sup> grids	1km <sup>2</sup> grids	Short-term (2020-2030)	-
Zhao <i>et al.</i> (2019)	Hartford, Connecticut, US	FRLM	Min. average moving time	Traffic analysis zones	Intersections in street network	-	-
Lin <i>et al.</i> (2020)	Beijing, China	P-median	Min. moving distance	Census area	Census area	-	-
Thiel (2020)	Paris, France	Pricing-based location model	Max. net profit	Taxi stands	Designated 21 zones in the city	Short-term (2020-2023)	-
Fuse <i>et al.</i> (2021)	Yokohama, Japan	Demand-supply matching model	Max. demand and supply	Census area	Existing gas stations	Short-term (2020-2030)	-
Gim <i>et al.</i> (2014)	Republic of Korea	FRLM	Max. number of cars	Express highways	Service stations on highway	Short-term (2020-2030)	-
Kim <i>et al.</i> (2019)	Republic of Korea	FRLM, P-median	Min. distance	Passing traffic	Unused toll gate sites on express highways	-	O
Bae <i>et al.</i> (2020)	Seoul, Republic of Korea	P-median	Min. distance	Community center of each administrative district	LPG stations in operation, parks, district offices, public parking lots, CNG bus garages	Short-term (2021-2030)	O
Kim <i>et al.</i> (2020)	Republic of Korea	P-median	Max. number of cars & min. total sum of moving time	Administrative office buildings by census area, gas stations on expressway, bus garages	Administrative office buildings by census area and operating or planned station sites, gas stations on expressway, bus garages	Long-term (2022-2040)	-

Lin *et al.*(2020)은 GIS를 활용하여 중국 베이징의 충전소 후보지를 선정하였다. 기존 주유소 네트워크를 후보지로 활용하고, 각 행정구역의 인구 및 지역 경제 변수를 활용하여 5개의 주요 지역을 수요지로 선정하였다. 분석을 통해 충전소의 개수와 그에 따른 충전소까지의 거리 등을 계산하여 회귀식으로 도출하였다.

Fuse *et al.*(2021)은 일본 요코하마시를 대상으로 단기적인 이동형 충전소 배치 계획을 제안하였는데, 수소자동차 증가를 세 가지 시나리오로 구분한 뒤 GIS를 통해 지역별 수요와 공급을 함께 분석하였다. 행정구역을 수요지로 하여 공간적인 수요 분포를 수요 모델로 추정하고, 500m 거리 내의 기존 주유소

를 후보지로 설정하였다. 수요가 높은 순으로 충전소를 선택하고, 시나리오별 최대 개수를 만족시키는 최적 충전소의 개수를 계산하였다.

국내의 경우도 수소 충전소의 최적 배치 연구가 진행되어왔다. Gim *et al.*(2014)은 GIS를 이용하여 고속국도에서의 수소충전소 구축방안을 연구하였다. 하지만, 교통량을 고려하지 않은 거리 위주의 자료를 활용하였다. Kim *et al.*(2019)은 수소 충전 인프라 구축 초기 단계에서 소형 개질기를 통해 수소를 생산하고 인근 충전소로 공급하는 하이브리드형 수소 공급 방식 설정하고, 설치 및 운송의 비용을 최소화하는 최적 입지 선정 모형을 개발하였다. 통행량을 기반으로 수요를 산정하고, 전국 고속

도로 요금소 유희부지를 충전소 후보지로 활용하였다.

Bae *et al.*(2020)은 서울 일부 지역 46개동을 대상으로 하여 2030년까지의 수소 충전소 및 공급기지 위치를 결정하였다. 이때, p-median 모델을 활용하여 시설 간의 거리를 최소화하는 최적화 모델을 활용하였다. Kim *et al.*(2020)은 2022년부터 2040년까지 장기적 관점에서 일반도로, 고속국도, 수소 버스 충전소를 포함하는 전국적인 수소 충전소 배치 연구를 진행하였다. 우선 연도별/도로별 충전소 개수를 결정한 후, 도로별로 제한된 수의 수소 충전소 배치 문제를 해결하는 혼합정수계획법 수리 모델 기반의 배치 최적화 방법론을 개발하였다.

기존 연구를 살펴본 결과 다양한 충전소 배치 모델에 관한 연구가 진행되었으나 수소 공급망을 함께 고려하면서 충전소를 배치한 연구는 많지 않음을 알 수 있다. 또한, 수소충전소 입지 결정을 위한 단계적인 수요 예측은 장기간보다 10년 이내의 단기 예측을 하는 경우가 많다.

## 5. 향후 수소자동차 충전소 및 공급망 연구에 대한 제언

앞 절에서 살펴본 것처럼, 수소자동차의 본격적인 양산과 더불어 수소충전소 및 공급망 배치 최적화 관련 연구는 활발히 진행되고 있다. 하지만 한국 실정에 맞는 장기적인 수소충전소 및 공급망 계획을 위해 보다 구체화하고 정교화해야 하는 부분이 존재한다. 따라서, 본 절에서는 수요, 공급, 배치의 측면에서 향후 연구에 고려해야 할 종합적인 연구 방향을 제언하고자 한다. 본 논문이 출발점이 되어 보다 많은 연구자들이 국내의 현황을 반영한 수소충전소 및 공급망 연구를 시도하고 수소자동차 도입 활성화 방안을 제시할 수 있기를 기대한다.

### 5.1 수소수요 예측 정교화

장기적인 수소충전소 및 공급망 배치 연구에서 가장 우선으로 해결해야 하는 부분은 미래의 수요를 예측하는 일이다. 기존 연구들은 과거 통계자료를 활용하여 연료 수요를 추정하거나, 수소자동차의 시장 점유율 목표치를 설정하여 로지스틱 모형(logistic model)이나 S-곡선(s-curve)을 적용하였다. 예를 들어, Almansoori and Shah(2009)는 2030까지 5년 단위의 수소 수요량이 s-curve를 따른다고 가정하였다. Emonts *et al.*(2019)은 2050년까지 전체 FCEV 대수가 시장 점유율 1%, 10%, 30%, 75%로 증가하고 s-curve를 따른다고 가정하였다.

다수의 연구는 수요의 불확실성(demand uncertainty)을 고려하여 시나리오를 설정하기도 한다. 이때, 기존 자동차 시장의 전망과 FCEV의 시장 점유율을 기반으로 연도별로 서로 다른 증가치의 시나리오를 구분하고 수소자동차 대수를 계산한다. Almansoori and Shah(2012)는 15년을 5년씩 3단계로 나누고 단계별로 high, medium, low의 세 가지 시나리오로 구분하여 최

종 9가지의 시나리오의 수소 수요량을 비교하였다. Xu *et al.*(2017)은 시나리오를 cautious, moderate, optimistic의 세 가지로 구분하고, 2025년도의 FCEV의 자동차 시장 점유율을 최소 4%에서 최대 15%로 설정하였다.

친환경 자동차의 증가를 예측하기 위해 확산 모형(Bass diffusion model)을 활용한 경우도 있다. 이는 기존의 상품군과의 확산 유사성을 바탕으로 신제품의 수요를 예측하는 방법으로, 수소자동차에도 확산 모델을 적용한 사례가 있다(Li *et al.*, 2020; Park *et al.*, 2011). Kim and Kim(2021)은 하이브리드차 판매 데이터를 바탕으로 Bass 확산 모델을 적용해 2040년까지 국내 수소전기차의 보급 대수를 추정하였다.

장기적 수요예측과는 별개로 지역별 수요 분배는 인구 및 사회경제적 변수 등을 바탕으로 지역별 비율을 산정하여 계산한다. Melendez and Milbrandt(2008)는 지역의 소득 수준, 가구당 자동차 대수, 공기 질, 환경 정책, 출퇴근 거리, 교육 수준, 하이브리드 자동차 등록 대수, 정책적 요인 등을 바탕으로 미국 전역 주 이하 단위의 수요를 추정하여 수소충전소를 배치하였다. 보다 최근의 연구들은 지역별 도입 시기를 세분화하거나, 인구 감소 등의 요인을 반영하기도 한다. Itaoka *et al.*(2019)은 수소자동차가 우선적으로 증가할 수 있는 지역을 고려하여 초기 단계와 확산 단계의 수요를 지역별로 구분하여 예측하였다. 이때, 기존의 고급자동차 판매 대수와 중산층 자동차 판매 대수를 바탕으로 지역을 구분하였다. Fuse *et al.*(2021)은 일본의 미래 인구와 자동차 보유 대수가 감소할 것을 예상하여 수요를 예측하였다.

따라서, 실현 가능한 수소충전소 및 공급망 배치 최적화를 위해서는 국내 수소자동차 시장을 잘 반영한 시기별(단기, 중장기), 지역별(전국, 시군구 단위) 수소 수요량 예측이 필요하며, 이를 위해 향후 수소 수요 예측을 정교화하기 위한 연구가 진행되어야 한다.

### 5.2 장기적 관점의 공급망 결정: 생산 방식 다양화, 공급 비용 예측 정교화

장기적으로 공급망을 계획하기 위해서는 시기별, 지역별 변화를 포괄할 수 있는 종합적인 분석이 필요하다. 이를 위해 여러 시점에서의 공급망 배치 솔루션 제공, 생산 방식의 다양화 반영, 공급 비용 예측의 정교화 등이 필요하다.

첫째, 여러 시기별, 지역별 시점에서 공급망을 최적화할 필요가 있다. 예를 들어, 수소 공급의 연도별 변화를 고려하여 단순히 한 시점이 아니라 여러 관점에서의 최적 배치솔루션을 제공하여야 한다. 또한, 공간적 단위(scale)를 고려하여 지자체별 생산 설비 구축 및 운송 방법, 비용 등을 더 상세히 제시할 수 있어야 한다. 이는 정부나 지자체에서 계획하고 있는 수소 공급 및 충전소 보급 사업에 대한 분석을 통해 가능하며, 수소 경제 활성화 로드맵에서 제시한 수소 공급가격 달성 여부도 평가할 수 있을 것이다.

둘째, 생산 방식의 다양화 등을 반영하여 공급망을 설계해야 한다. 수소 생산은 시간이 흐름에 따라 신재생에너지를 활용한 수소의 비중이 증가할 것으로 예상되며, 국가 간 생산 수소의 거래도 활발히 진행될 것으로 전망된다. 향후 재생에너지의 도입에 따라 발전 비용이 하락하면 이에 따른 수전해 수소 생산 원가 저하도 기대할 수 있고, 수소 유통 및 충전 인프라가 규모의 경제를 갖추게 되면 수소 공급 원가 저하도 예상할 수 있다. Liu *et al.*(2012)은 장기적으로 생산 시설의 구축 비용이 수소가격에 미치는 영향은 시간에 따라 점차 줄어들고, 수소 생산량이 증가할수록 그 영향이 미미할 것으로 분석하였다.

마지막으로, 수소 가스 및 수입 부품의 국내기술 개발 등 수소 공급 비용의 저감 요인을 고려한 공급 비용 평가가 수행되어야 한다. 예를 들어, 국내 수소 생산량을 예측하여 수요량보다 부족할 경우 해외 수소 수입량을 고려하는 등의 수소 자원과 관련된 전반적인 공급망 솔루션을 제공할 수 있다. 또한, 해외 수소 도입 타당성 연구를 바탕으로 국내에서 공급 가능한 시나리오를 설정하고, 추후 해외 수입 수소 경로에 관한 연구를 진행하여 원활한 수소 공급이 이루어지도록 계획할 수 있다.

### 5.3 수소충전소 배치

효과적인 수소충전소 배치 연구를 위해 국내 현실에 맞도록 구체적인 수요지와 후보지를 선택하고, 수요와 공급 측면을 배치 모델에 연계할 수 있다. 자세한 내용은 다음과 같다.

첫째, 보다 현실적인 충전소 후보지를 설정하고 구체적인 충전소 종류를 반영하여 배치에 적용할 수 있다. 즉, 국가 전체를 함께 고려하는 전국 단위의 최적화가 필요하며 이를 위해 전국의 수소 수요를 고려하고 공간 단위를 세분화하며, 다양한 교통수단을 포함한 종합적인 수소충전소 배치 계획 개발이 필요하다. 기존 연구에서는 승용차를 기준으로 행정구역과 도로를 중심으로 한 수요지와 충전소 후보지를 선정하였다. 또한, 국내 대부분의 연구는 수소자동차와 충전소가 집중될 것으로 보이는 대도시를 중심으로 공급망의 수요를 설정하였다. 하지만 전국 단위의 수송과 공급 가능성을 높이기 위해서는 기존의 LPG, LNG 공급망을 활용할 수 있다 (Lee *et al.*, 2021). 이를 위해 기존에 설치된 충전소 부지 내 수소 융복합충전소 구축 가능성을 검토하는 연구들이 시행되고 있다 (Park *et al.*, 2017). 또한, 다양한 교통수단별 수소 연료 도입을 반영하여 전국 단위의 계획의 포괄성을 높일 수 있다. 예를 들어, Viesi *et al.* (2017)은 이탈리아의 수소 교통 수요를 승용차와 버스로 구분하였고, Thiel (2020)은 프랑스 파리의 택시를 대상으로 수소충전소를 배치하였다. 국내의 경우 수소 수요지와 충전소 후보를 일반도로, 고속국도, 버스 차고지 등으로 확장하여 종합적인 지역별 수소충전소를 배치하였다 (Kim *et al.*, 2020). 하지만, 기화충전소 및 액화충전소의 종류를 구분하고 On-site 및 Off-site 수소충전소의 개념을 모두 고려한 연구는 여전히 부족하다. On-site 충전소는 수소 생산, 저장, 충전이 같은 공간에서

이루어지며, Off-site 충전소는 다른 지역에서 생산한 후 배관과 튜브 트레일러 등을 통해 운송하여 충전하므로 이 둘을 구분하여 배치 결과에 반영할 필요가 있다.

둘째, 수소충전소 및 공급망 배치 연구에 있어 수소 에너지 공급자와 수요자 입장을 모두 고려하는 배치 최적화 솔루션이 필요하다. 수소 모빌리티의 확대 적용을 위해서는 수소를 공급하는 정부나 공급 기업의 입장뿐만 아니라 수소자동차를 소유한 수소 수요자들의 입장이 고려된 공급망 배치가 필요하다. 단순히 공급 비용을 최소화할 뿐 아니라 사용자의 편리성, 안정성 등을 고려하여 공급망 배치가 이루어져야 하며, 이를 위한 심도 있는 연구가 필요하다.

셋째, 수소 공급망 및 수소충전소를 동시에 고려하는 배치 모델을 활용할 수 있다. Brey *et al.*(2014)은 천연가스 시설의 여부를 포함해 충전소 최적 입지를 행정구역 단위에서 선정하였고, Samsatli *et al.*(2016)은 공급망 배치 시설에 충전소를 함께 고려하여 분석하였다. 하지만, 하나의 모델에 고정값으로 사용함으로써 변화를 파악할 수 없다는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 두 단계의 배치 모델을 활용한 경우도 있다. Stephens-Romero *et al.*(2010)은 수소충전소의 배치와 더불어 수소충전소의 공급 측면을 세 가지 시나리오로 제시하여 비교 분석하였다. 수소충전소의 최적 개수를 구하기 위해 이동 시간 분석(travel-time analysis)을 수행하였고, 수소 인프라 구축의 환경적 영향을 평가하기 위해 상용화된 기술을 중심으로 수소의 생산 원료, 운송 수단, 재생에너지 사용 여부 등을 포함한 공급 전략을 검토하였다. 이때, 지역 내 공급 시설의 정확한 위치와 충전소 간의 이동 시간을 활용하여 탄소배출 정도를 계산하였다. 이처럼 수소충전소와 공급망을 함께 고려하는 모델을 적용함으로써 시기별로 달라지는 충전소 개수와 공급망의 변화를 동시에 반영할 수 있을 것이다. 이를 통해 보다 정확한 전국 단위의 장기적인 충전소 배치안을 제공할 수 있다.

### 5.4 웹 기반 의사결정 시스템(DSS) 구축

수소충전소 및 공급망 배치를 위해 웹 기반의 의사결정 지원 시스템(Decision support system, DSS)을 활용하면 정책 결정에 도움을 줄 수 있다. DSS란 의사결정 과정에서 서로 다른 형태의 시나리오나 디자인을 분석하고 시각화할 수 있는 효율적 도구이다. 사용자가 그래픽 인터페이스를 통해 데이터를 직접 불러오고, 최적화를 수행하여 분석 내용을 편집하거나 결과를 시각화할 수 있다. Kuby *et al.*(2007)은 FRLM 모델을 활용하여 자동차의 주행 범위와 충전 시설의 개수를 정하였으며, 모델 내의 네트워크 데이터를 GIS로 통합하여 지도와 그래프의 형태로 결과를 제시하였다. Kim(2010)은 같은 FRLM 모델 내에서 차량흐름에 따른 각 지점의 변화량을 산정하는 목적으로 사용자가 출발지의 사회경제적 특성을 바탕으로 OD 통행량을 계산할 수 있는 DSS를 개발하였다. 하지만, 현재까지 수소충전소 및 공급망 배치 최적화와 관련된 사용자 중

심의 DSS 개발은 제한적이다. 따라서, 연도별, 지역별 문제를 설정하여 최적해를 제공해 줄 수 있는 시스템이 필요하다. 특히, 실제 도로망을 고려한 수소 생산기지 및 충전소 배치 결과와 발생 가능한 다양한 시나리오별 결과를 제공하는 유연한 시스템의 개발이 요구된다. 이는 정책 결정자의 정책 결정에 도움을 줄 수 있을 것이다. 본 논문의 저자들은 국내 환경에 맞는 웹 기반 DSS를 구축 중이다.

### 5.5 수소자동차 및 충전소 보급을 위한 효과적인 정책에 관한 연구

수소자동차 및 충전소 보급을 위한 효과적인 정책에 관한 연구가 필요하다. 특히, 수소자동차 도입을 가속화 하기 위해서 수소 모빌리티 성장 단계별로 수소자동차 구매자나 충전소 및 공급망 관련 주체들에게 어떤 인센티브를 제공하는 것이 효과적인지에 관한 연구가 필요하다. Dolci *et al.*(2019)은 IEA의 수소 기술 협력 프로그램에 참여하는 10개국의 수소 연료 전환을 위한 각국의 인센티브를 비교하였다. 연구에 따르면, 수소 경제 활성화를 위한 인센티브는 교통 부문의 수소 활용에서 가장 많고, 저탄소 수소 생산과 산업적 사용, 천연가스와의 혼합 등에 대한 인센티브도 존재한다. 수소자동차 구매를 위한 인센티브는 탄소배출 저감을 목표로 전기자동차와 함께 등록 세금 감면 및 보조금 지원의 혜택으로 주로 제공되고 있다. 하지만 앞으로 승용차 이외 트럭, 택시, 기차 등의 다양한 수단 도입에 대한 정책이 필요하며, 수소충전소 인프라 도입을 위한 인센티브 또한 확대해 나가야 할 것을 제안하였다. Asif and Schmidt(2021)는 미국의 경우 주 정부의 각기 다른 인센티브와 규제가 존재하며, 연방정부나 중앙 정부에서 제공하는 비중은 적기 때문에 단계적인 통합이 필요한 점을 강조하였다. 미국의 수소 로드맵에 따르면 초기 단계(~2022년)에서는 주 정부와 연방정부가 직접적인 공공 인센티브를 제공하지만, 확산 단계(2023~2025년)에 이르러 측정 가능한 시장 기반의 메커니즘으로 전환하여 특정 주에 한하지 않고 인센티브를 확장하는 것을 목표로 한다. 이후 다양화 단계(2026~2030년)에서는 인센티브를 교통 부문 이외 산업과 에너지 부문으로 확장하고, 전국적인 수소자동차 활성화 단계(2031년~)에서는 연방 단위의 수소 규제 적용을 목표로 한다. 이처럼, 국내에서도 발전 단계에 따른 효과적인 인센티브 제공 방법에 관한 연구가 수행되어야 할 것이다.

## 6. 결론

한국은 수소자동차 양산에 성공한 나라로서, 수소 활용 분야에서 세계적인 기술을 확보하고 있다. 앞으로의 친환경 수소자동차 도입 확산을 위해, 국가적 차원에서 효과적인 수소자동차 충전소 및 공급망 배치 최적화는 필수적이다. 이를 위해

서는 보다 정확하게 수소자동차의 지역별 수요를 예측하고, 미래 공급망 설계를 고려하여, 충전소 배치를 최적화해야 한다. 효과적인 충전소 및 공급망 배치를 통해 기존 및 신규 수소자동차 소유자들의 충전 수요를 충당하고, 새로운 수소자동차의 보급 확산에 기여할 수 있을 것이다. 장기적으로는 수소 경제 활성화를 위해 수소의 생산, 저장, 운송, 충전, 이용 등 전체 가치 사슬을 유기적으로 연결하고, 친환경적으로 수소를 생산하고, 안정성 높은 저장 및 운송 방법을 채택하며, 충전과 이용의 불편함이 없도록 하여, 연료로서 수소의 안전성, 편리성, 경제성을 확보해 나가는 것이 중요하다. 이를 통해 국가의 수소 경제와 수소자동차 산업을 증진할 수 있을 것이다

본 논문에서는 국내의 수소자동차 도입 및 수소충전소 구축 현황 및 계획을 파악하고, 수소자동차 충전소 및 공급망 배치 최적화에 관한 연구를 정리하였다. 국내 현황에 맞게 현실적으로 고려해야 할 사항들을 파악하여 향후 수소충전소 및 공급망 배치 최적화 연구에 보완할 내용을 제안하였다.

수소자동차의 생산 및 보급 등의 계획이 여전히 불확실성을 가지고 진행되는 시점에서, 본 연구의 제한점이 있음을 부정할 수 없다. 하지만 본 연구에서 정리한 여러 가지 연구 및 정보가 기반이 되어 수소 모빌리티에 대한 관심을 불러일으키고 향후 수소충전소 및 공급망 배치 계획 수립에 도움이 될 수 있기를 기대한다.

## 참고문헌

- Almansoori, A. and Shah, N. (2009), Design and operation of a future hydrogen supply chain: Multi-period model, *International Journal of Hydrogen Energy*, **34**(19), 7883-7897.
- Almansoori, A. and Shah, N. (2012), Design and operation of a stochastic hydrogen supply chain network under demand uncertainty, *International Journal of Hydrogen Energy*, **37**(5), 3965-3977.
- Alternative Fuels Data Center (2017), How Do Fuel Cell Electric Vehicles Work Using Hydrogen?. <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work>.
- Antoni, L., Garland, N., Han, J., Rex, M., and Samsun, R. C. (2019), *Survey on the Number of Fuel Cell Vehicles, Hydrogen Refueling Stations and Targets*, IEA Advanced Fuel Cells Technology Collaboration Programme.
- Apostolou, D. and Xydis, G. (2019), A literature review on hydrogen refuelling stations and infrastructure, *Current Status and Future Prospects, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **113**, 109292.
- Asif, U. and Schmidt, K. (2021), Fuel Cell Electric Vehicles (FCEV): Policy advances to enhance commercial success, *Sustainability*, **13**(5149), 1-12.
- Bae, S., Lee, E., and Han, J. (2020), Multi-period planning of hydrogen supply network for refuelling hydrogen fuel cell vehicles in Urban areas, *Sustainability*, **12**(10), 4114.
- Ball, M. and Wietschel, M. (2009), *The Hydrogen Economy: Opportunities and Challenges*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Bique, A. O. and Zondervan, E. (2018), An outlook towards hydrogen supply chain networks in 2050 - Design of novel fuel infrastructures

- in Germany, *Chemical Engineering Research and Design*, **134**, 90-103.
- Boo, K., Cho, S., and Gim, B. J. (2009), Research on building a foundation for future hydrogen economy: Hydrogen supply infrastructure in the transportation sector, *Korea Energy Economics Institute*.
- Brey, J. J., Carazo, A. F., and Brey, R. (2014), Analysis of a hydrogen station roll-out strategy to introduce hydrogen vehicles in Andalusia, *International Journal of Hydrogen Energy*, **39**(8), 4123-4130.
- California Air Resources Board (2020), *2020 Annual Evaluation of Fuel Cell Electric Vehicle Deployment & Hydrogen Fuel Station Network Development*, Annual Hydrogen Evaluation.
- California Fuel Cell Partnership (2016), Air Climate Energy Water Security.
- California Fuel Cell Partnership (2018), *The California Fuel Cell Revolution: A Vision for Advancing Economic, Social, and Environmental Priorities*.
- China Society of Automotive Engineers (2020), *Technology Road 2.0 for Energy Conservation and New Energy Vehicles*, China SAE, Beijing, China.
- Cho, S. and Boo, K. (2007), A study on optimal hydrogen supply system for materialization of hydrogen economy, *Proceedings of the Korean Society for New and Renewable Energy*, Spring 2007, 759-762.
- Choi, S., Park, H., Han, J., Korean, T., and Society, M. S. (2021), Optimization of hydrogen supply network design for fuelling hydrogen fuel cell vehicles, *Korea Management Science Review*, **38**(2), 75-88.
- De-León Almaraz, S., Azzaro-Pantel, C., Montastruc, L., and Domenech, S. (2014), Hydrogen supply chain optimization for deployment scenarios in the Midi-Pyrénées region, France, *International Journal of Hydrogen Energy*, **39**(23), 11831-11845.
- Deloitte China (2020), *Fueling the Future of Mobility: Hydrogen and fuel cell solutions for transportation*, Deloitte-Ballard.
- Dolci, F., Thomas, D., Hilliard, S., Guerra, C. F., Hancke, R., Ito, H., Jegoux, M., Kreeft, G., Leaver, J., Newborough, M., Proost, J., Robinius, M., Weidner, E., Mansilla, C., and Lucchese, P. (2019), Incentives and legal barriers for power-to-hydrogen pathways: An international snapshot, *International Journal of Hydrogen Energy*, **44**(23), 11394-11401.
- Emonts, B., Reuß, M., Stenzel, P., Welder, L., Knicker, F., Grube, T., Görner, K., Robinius, M., and Stolten, D. (2019), Flexible sector coupling with hydrogen: A climate-friendly fuel supply for road transport, *International Journal of Hydrogen Energy*, **44**(26), 12918-12930.
- Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (2020), The National Hydrogen Strategy.
- Fuel Cell and Hydrogen Energy Association (2020), Road map to a US Hydrogen Economy.
- Fuhrmann, M. (2020), Germany's National Hydrogen Strategy, Mitsui & Co. Global Strategic Studies Institute.
- Fuse, M., Noguchi, H., and Seya, H. (2021), Near-term location planning of hydrogen refueling stations in Yokohama City, *International Journal of Hydrogen Energy*, **46**(23), 12272-12279.
- Gim, B., Kook, J. H., and Cho, S. M. (2014), A construction plan of hydrogen fueling stations on express highways using geographic information system, *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, **25**(3), 255-263.
- Greene, D. L., Ogden, J. M., and Lin, Z. (2020), Challenges in the designing, planning and deployment of hydrogen refueling infrastructure for fuel cell electric vehicles, *E Transportation*, **6**, 100086.
- H2 Mobility Deutschland GmbH & Co KG (2014), Hydrogen Cars: All models at glance. <https://h2.live/en/wasserstoffautos>.
- Han, J. H., Ryu, J. H., and Lee, I. B. (2012), Modeling the operation of hydrogen supply networks considering facility location, *International Journal of Hydrogen Energy*, **37**(6), 5328-5346.
- Hebling, C., Ragwitz, M., Fleiter, T., Groos, U., Härle, D., Held, A., Jahn, M., Müller, N., Pfeifer, T., Plötz, P., Ranzmeyer, O., Schaadt, A., Sensfuß, F., Smolinka, T., and Wietschel, M. (2019), *A Hydrogen Roadmap for Germany: Executive summary*, Fraunhofer.
- Hydrogen and Fuel Cell Strategy Council (2019), *The Strategic Road Map for Hydrogen and Fuel Cells*, Japanese Ministry of Economy, Trade and Industry.
- Hydrogen and Fuel Cell Strategy Council (2021), About the current status of Hydrogen Station Project, Ministry of Economy, Trade, and Industry. [https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/suiso\\_nenryo/pdf/024\\_01\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryo/pdf/024_01_00.pdf).
- Hydrogen Council (2021), Hydrogen Insights: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness.
- International Energy Agency (2019), The Future of Hydrogen.
- International Energy Agency (2020), Hydrogen IEA.
- International Energy Agency (2021), Global Energy Review 2021.
- International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy (2021), Current status & Target Partners: Germany. <https://www.iphe.net/germany>.
- Itaoka, K., Kimura, S., and Hirose, K. (2019), Methodology development to locate hydrogen stations for the initial deployment stage, *E3S Web of Conferences*, **83**, 1-18.
- Kim, G., Park, J., and Go, S. (2019), Location problem of hydrogen refueling station considering hybrid hydrogen supply system, *Journal of Transport Research*, **26**(2), 53-70.
- Kim, H., Eom, M., and Kim, B. I. (2020), Development of strategic hydrogen refueling station deployment plan for Korea, *International Journal of Hydrogen Energy*, **45**(38), 19900-19911.
- Kim, J. G. (2010), *Location of refueling stations for alternative fuel vehicles considering driver deviation behavior and uneven consumer demand: Model, Heuristics, and GIS*, Arizona State University.
- Kim, J. and Kim, E. (2021), Forecasting of inspection demand for pressure vessels in hydrogen fuel cell electric vehicle using bass diffusion model, *Journal of the Korean Institute of Gas*, **25**(3), 16-26.
- Kim, J., Lee, Y., and Moon, I. (2008), Optimization of a hydrogen supply chain under demand uncertainty, *International Journal of Hydrogen Energy*, **33**(18), 4715-4729.
- Kim, M. and Kim, J. (2016), Optimization model for the design and analysis of an integrated renewable hydrogen supply (IRHS) system: Application to Korea's hydrogen economy, *International Journal of Hydrogen Energy*, **41**(38), 16613-16626.
- Korea Energy Economics Institute (2019), Future Energy, Is Hydrogen Economy Coming?, Energy Focus.
- Korea Gas Safety Corporation (2018), (Quote bid-standard) Manual Writing for High-Pressure Hydrogen Refuelling Station (Attachment). <http://www.g2b.go.kr:8081/ep/co/fileDownload.do?fileTask=NOTIFY&fileSeq=20181035008::00::2::3>
- Kuby, M., Lines, L., Schultz, R., Xie, Z., Lim, S., Kim, J. G., and Clancy, J. (2007), Location strategies for the initial hydrogen refueling infrastructure in florida, *Proc. the National Hydrogen Association Annual Hydrogen Conference*, San Antonio, Texas, US.
- Kuby, M., Lines, L., Schultz, R., Xie, Z., Kim, J. G., and Lim, S. (2009), Optimization of hydrogen stations in florida using the flow-refueling

- location model, *International Journal of Hydrogen Energy*, **34**(15), 6045-6064.
- Kurtz, J., Sprick, S., and Bradley, T. H. (2019), Review of transportation hydrogen infrastructure performance and reliability, *International Journal of Hydrogen Energy*, **44**(23), 12010-12023.
- Lee, W. S., Kim, Y., Shinn, Y., Wang, J., Moon, B., Park, H., Chang, S., and Kwon, O. (2021), Role of blue hydrogen for developing national hydrogen supply infrastructure, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, **58**(5), 503-520.
- Li, L., Manier, H., and Manier, M. A. (2019), Hydrogen supply chain network design: An optimization-oriented review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **103**, 342-360.
- Li, M., Bai, Y., Zhang, C., Song, Y., Jiang, S., Grouset, D., and Zhang, M. (2019), Review on the research of hydrogen storage system fast refueling in fuel cell vehicle, *International Journal of Hydrogen Energy*, **44**(21), 10677-10693.
- Li, Y., Cui, F., and Li, L. (2018), An integrated optimization model for the location of hydrogen refueling stations, *International Journal of Hydrogen Energy*, **43**(42), 19636-19649.
- Li, Y., Kool, C., and Engelen, P. J. (2020), Analyzing the business case for hydrogen-fuel infrastructure investments with endogenous demand in the Netherlands: A real options approach, *Sustainability*, **12**(13), 5424.
- Lin, R., Ye, Z., and Wu, B. (2020), A review of hydrogen station location models, *International Journal of Hydrogen Energy*, **45**(39), 20176-20183.
- Lin, R., Ye, Z., Guo, Z., and Wu, B. (2020), Hydrogen station location optimization based on multiple data sources, *International Journal of Hydrogen Energy*, **45**(17), 10270-10279.
- Liu, H., Almansoori, A., Fowler, M., and Elkamel, A. (2012), Analysis of Ontario's hydrogen economy demands from hydrogen fuel cell vehicles, *International Journal of Hydrogen Energy*, **37**(11), 8905-8916.
- Melendez, M. and Milbrandt, A. (2008), *Regional Consumer Hydrogen Demand and Optimal Hydrogen Refueling Station Siting*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, US.
- Melaina, M. and Penev, M. (2013), *Hydrogen Station Cost Estimates: Comparing Hydrogen Station Cost Calculator Results with Other Recent Estimates*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, US.
- Ministry of Environment (2021), Implementation plan on environment-friendly vehicles diffusion 2021.
- Ministry of Trade, Industry, and Energy (2019a), Implementation of Hydrogen Infrastructure and Charging Stations.
- Ministry of Trade, Industry, and Energy (2019b), Roadmap for Hydrogen Economy.
- Ministry of Trade, Industry, and Energy (2020), Hydrogen Industry Ecosystem Competitiveness Plan.
- Moradi, R. and Groth, K. M. (2019), Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, **44**(23), 12254-12269.
- Nicholas, M. A. and Ogdin, J. (2006), Detailed analysis of urban station siting for California hydrogen highway network, *Transportation Research Record*, **1983**(1), 121-128.
- Nunes, P., Oliveira, F., Hamacher, S., and Almansoori, A. (2015), Design of a hydrogen supply chain with uncertainty, *International Journal of Hydrogen Energy*, **40**(46), 16408-16418.
- Ogumerem, G. S., Kim, C., Kesiosoglou, I., Diangelakis, N. A., and Pistikopoulos, E. N. (2018), A multi-objective optimization for the design and operation of a hydrogen network for transportation fuel, *Chemical Engineering Research and Design*, **131**, 279-292.
- Park, J., Huh, Y., and Kang, S. (2017), A study on site to build hydrogen multi energy filling station in domestic LPG station, *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, **28**(6), 642-648.
- Park, S. Y., Kim, J. W., and Lee, D. H. (2011), Development of a market penetration forecasting model for hydrogen fuel cell vehicles considering infrastructure and cost reduction effects, *Energy Policy*, **39**(6), 3307-3315.
- POSCO Research Institute (2019), Economic and Technological Issues on Hydrogen Economy: Focusing on 5 stages of Hydrogen Value Chain.
- R&D Information Center (2020), *Hydrogen Economy Future Technology Development Trends and R&D Strategies for Fuel Cell Industry and Use*, Knowledge Industry Information Institute, Seoul, Republic of Korea.
- Robinius, M., Linßen, J., Grube, T., Reuß, M., Stenzel, P., Syranidis, K., Kuckertz, P., and Stolten, D. (2018), *Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles*, Forschungszentrum Jülich.
- Samsatli, S., Staffell, I., and Samsatli, N. J. (2016), Optimal design and operation of integrated wind-hydrogen-electricity networks for decarbonising the domestic transport sector in Great Britain, *International Journal of Hydrogen Energy*, **41**(1), 447-475.
- Samsun, R. C., Antoni, L., and Rex, M. (2020), *Report on Mobile Fuel Cell Application: Tracking Market Trends*, IEA Advanced Fuel Cells Technology Collaboration Programme.
- Seo, S. K., Yun, D. Y., and Lee, C. J. (2020), Design and optimization of a hydrogen supply chain using a centralized storage model, *Applied Energy*, **262**, 114452.
- Stephens-Romero, S. D., Brown, T. M., Kang, J. E., Recker, W. W., and Samuelsen, G. S. (2010), Systematic planning to optimize investments in hydrogen infrastructure deployment, *International Journal of Hydrogen Energy*, **35**(10), 4652-4667.
- Talebian, H., Herrera, O. E., and Mérida, W. (2019), Spatial and temporal optimization of hydrogen fuel supply chain for light duty passenger vehicles in British Columbia, *International Journal of Hydrogen Energy*, **44**(47), 25939-25956.
- Tanç, B., Arat, H. T., Baltacıoğlu, E., and Aydın, K. (2019), Overview of the next quarter century vision of hydrogen fuel cell electric vehicles, *International Journal of Hydrogen Energy*, **44**(20), 10120-10128.
- The Chinese Society of Automotive Engineers (2016), Hydrogen Fuel Cell Vehicle Technology Roadmap.
- Thiel, D. (2020), A pricing-based location model for deploying a hydrogen fueling station network, *International Journal of Hydrogen Energy*, **45**(46), 24174-24189.
- Viesi, D., Crema, L., and Testi, M. (2017), The Italian hydrogen mobility scenario implementing the European directive on alternative fuels infrastructure (DAFI 2014/94/EU), *International Journal of Hydrogen Energy*, **42**(44), 27354-27373.
- Xu, X., Xu, B., Dong, J., and Liu, X. (2017), Near-term analysis of a roll-out strategy to introduce fuel cell vehicles and hydrogen stations in Shenzhen China, *Applied Energy*, **196**, 229-237.
- Zhao, Q., Kelley, S. B., Xiao, F., and Kuby, M. J. (2019), A multi-scale framework for fuel station location: From highways to street intersections, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **74**, 48-64.

## 저자소개

**류현영** : 류현영은 서울대학교 조경시스템공학부에서 2009년 학사, 서울대학교 환경대학원에서 2011년 도시계획 석사학위를 취득하고, 일본 도쿄대학교 sustainability science 전공으로 박사학위를 취득하였다. 연구분야는 도시 및 지역 계획, 도시 빅데이터이다.

**김병인** : 포항공과대학교 산업공학과에서 1991년 학사, 1994년 석사학위를 취득하고 미국 Rensselaer Polytechnic Institute 대학교 Decision Sciences and Engineering Systems 학과에서 2002년 박사학위를 취득하였다. LG생산기술원 주임연구원, 미국 맨피츠대학교 조교수, 미국 Institute of Information Technology 사 R&D Director를 역임하고 2005년부터 포항공과대학교 산업경영공학과 교수로 재직하고 있다. 연구분야는 최적화, 공급망 설계, 시뮬레이션이다.

**송민석** : 포항공과대학교 산업공학과에서 2006년 산업경영공학 박사학위를 취득하였다. 네덜란드 Eindhoven University of Technology에서 박사후연구원, 울산과학기술원 조교수와 부교수를 역임하고, 2016년부터 포항공과대학교 산업공학과 부교수로 재직하고 있다. 연구 분야는 process mining, industrial AI, business analytics, healthcare information systems이다.

**김현준** : 포항공과대학교 수학과에서 2016년 학사 학위를 취득하고, 2022년 2월에 포항공과대학교 산업경영공학과 박사학위를 취득하였다. 연구분야는 차량 경로 결정, 스케줄링, 공정 시스템 등의 조합 최적화와 공급망 설계이다.

**이덕상** : 포항공과대학교 산업경영공학과, 컴퓨터공학과(부전공)에서 2018년 학사, 2020년 석사학위를 취득하고 포항공과대학교에서 산업경영공학과 박사과정에 재학 중이다. 연구분야는 블록체인, 데이터마이닝, 프로세스마이닝이다.

**이승엽** : 포항공과대학교 수학과에서 2020년 학사 학위를 취득하고, 2020년부터 포항공과대학교 산업경영공학과 석박사 통합과정에 재학 중이다. 연구분야는 최적화, 인공지능이다.

**신재민** : 포항공과대학교 산업경영공학과에서 2020년 학사학위를 취득하고 포항공과대학교에서 산업경영공학과 석사과정에 재학 중이다. 연구분야는 데이터마이닝, 프로세스마이닝이다.

**유영돈** : KAIST 기계공학과에서 1994년 박사학위를 취득하였다. 박사학위 취득 후 고등기술연구원 플랜트엔지니어링 센터장으로 재직 중이다. 연구분야는 에너지 및 환경 관련 분야 플랜트 최적 설계, 플랜트 경제성 및 환경성 분석이다.

**김수현** : 아주대 환경공학과에서 학사, 에너지공학과에서 2001년 석사, 2011년 박사학위를 취득하였다. 2001년부터 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터에서 에너지 및 환경 플랜트 공정 해석 및 기본설계, 경제성, 환경성 분석과 관련된 연구를 수행하고 있다.

**이혜진** : 이화여자대학교 통계학과에서 2004년 학사, 독일 Kiel대학교 Environmental Management 전공으로 2011년 석사, 서울대학교 농업·자원경제학과에서 박사학위를 취득하였다. 온실가스종합정보센터, 한국이산화탄소포집및처리연구개발센터를 거쳐 현재 수소융합얼라이언스 기술기획 팀장으로 재직하고 있다. 연구분야는 기술경제성, LCA분석, 경제적 파급효과 분석이다.