

수소도시를 위한 분산형 수소공급 허브시설 구축 방안 제언

양 충 현¹ · 임 기 원^{2*}¹한국건설기술연구원 연구위원 ^{2*}한국건설기술연구원 박사후연구원

Suggestion to Build a Decentralized Hydrogen Supply Hub Facility for a Hydrogen City

Choongheon Yang¹ · Kiwon Lim^{2*}¹Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-si 10223, Korea^{2*}Post-Doctoral Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-si 10223 Korea

[요 약]

전 세계 여러 도시에서 수소 도시의 개념을 정립하고 있다. 이를 위해 가장 중요한 수소공급시설에 대한 투자하고 민간 기업과 협력을 통해 수소자동차 및 관련 기술을 개발하고 있다. 그러나 여전히 수소 생산 및 운송에서의 높은 비용과 에너지 대체에 필요한 대규모 인프라 투자가 부담으로 작용된다. 그럼에도 불구하고 수소를 지속 가능하고 탄소 없는 미래를 향한 유망한 에너지로 기대하고 있다. 유럽과 북미 그리고 호주에서도 수소 물류비용 저감을 위해 수소의 생산·수요·공급 연결체계, 충전소 공급체계, 도로운송 등의 공급을 효율화하기 위한 노력이 강화되고 있다. 실제로 우리나라 2050 탄소중립 추진전략에서도 도심·거점별 수소충전소를 공공부지나 주유소 등을 활용하여 구축하는 계획을 발표한 바 있다. 본 연구에서는 수소 공급망 및 충전소 배치와 관련한 각 국가들의 정책동향, 기술동향, 그리고 기존 연구들 검토하고, 향후 국내 지역거점 분산형 수소공급 허브시설 구축을 위한 방법론을 제안하였다.

[Abstract]

Several cities around the world are embodying the concept of hydrogen cities as they invest in the most important hydrogen supply facilities and by partnering with private companies to develop hydrogen vehicles and related technologies. However, the high cost of hydrogen production and transportation, as well as the large-scale infrastructure investments required for energy substitution, remain an obstacle to hydrogen's uptake. Nevertheless, hydrogen is a promising energy source for a sustainable and carbon-free future. In Europe, North America, and Australia, efforts are being strengthened to streamline the supply of hydrogen production, demand, and supply connection system, charging station supply system, and road transportation for the reduction of hydrogen logistics costs. In fact, Korea's 2050 Carbon Neutral Promotion Strategy also announced a plan to build hydrogen charging stations in city centers and hubs by utilizing public sites or gas stations. In this study, policy trends, technological trends, and existing studies from each country related to the hydrogen supply chain and charging station arrangement were reviewed, and a methodology for establishing a distributed hydrogen supply hub facility for domestic regional bases was proposed.

색인어 : 수소도시, 수소충전소, 최적화, 운행시간, 교통네트워크**Keyword** : Hydrogen City, Hydrogen Stations, Optimization, Travel Time, Transportation Network<http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2023.24.9.2037>

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 13 July 2023; Revised 03 August 2023

Accepted 07 August 2023

Corresponding Author; Kiwon Lim

Tel: E-mail: chyang@kict.re.kr

1. 서론

수소도시는 일반적으로 온실가스 배출을 줄이고 지속 가능한 개발을 촉진하기 위해 수소를 주요 에너지원으로 사용하도록 설계된 도시나 지역사회를 의미한다. 따라서 수소 도시에서 건물, 운송 및 산업은 수소 연료 전지로 구동되는 것을 가장한 것이다.

현재 전 세계 여러 도시에서 수소 도시에 대한 개념을 정립하고 있다. 이를 위해 주유소 및 생산 시설과 같은 수소 인프라에 투자하고 민간 기업과 협력하여 수소자동차 및 관련 기술을 개발하고 있다. 그러나 현재는 수소 생산 및 운송에서의 높은 비용과 에너지 대체에 필요한 대규모 인프라 투자가 부담으로 작용되지만, 수소를 지속 가능하고 탄소 없는 미래를 향한 유망한 에너지로 기대하고 있다.

유럽과 북미 국가, 일본 등에서는 수소기반 인프라 구축 및 수소 활용 확산을 위한 노력을 진행하고 있다. 이를 위해 수소의 생산과 더불어 수요와 공급 간의 연결체계, 그리고 운송 등에 필요한 다양한 기술과 제도를 만들어가고 있다. 이들은 향후 2030년까지 수소의 생산과 공급, 저장 분야 인프라 구축은 물론 활용분야에 있어서 대용량화 추진, 그린수소, 그레이수소, 블루수소 등 산업 전반에 걸쳐 에너지 시스템 통합을 통해 효율화를 도모하고 있다[1].

전반적으로 수소도시개발은 아직 초기 단계이며 수소 생산 및 유통에 드는 높은 비용, 대규모 인프라 투자 필요성, 이를 위한 규제 및 표준 개발 등 해결해야하는 이슈들이 많이 남아 있다.

국내에서도 중앙정부차원에서 수소경제의 새로운 유망산업을 육성하고, 도시와 국토의 탄소중립 전환의 필요성을 인지함에 따라 「수소경제 육성과 수소 안전관리에 관한 법률」과 「수소도시 건설 및 운영에 관한 법률」 등 제도적 장치들을 만들어 가고 있다[2] 2020년 에너지 총조사를 통해 산출된 수송 분야의 에너지 소비량은 22%였으며, 월별 에너지 소비 구조에서 석유가 차지하는 비율이 50% 이상으로 가장 높게 나타났다[3]. 통상적으로 도로교통분야에서는 국제석유가격의 변동, 수입의존에 따른 가변성, 지정학적 불안전성 등으로

주요 에너지원으로 수소에 대한 관심이 점차 높아지고 있다. 수소에너지는 탄소배출 저감에 탁월한 효과를 보이고 있어 대체에너지로 각광을 받고 있지만, 수소의 원활한 보급 활성화 여부에 따라 대체재로서의 입지가 결정될 것으로 보인다.

현재 수소 공급 비용 중 물류가 차지하는 비용이 약 40%로 매우 높기 때문에 수소충전소에 원활한 공급을 위한 지역별 거점 수소공급허브시설의 구축이 필요하다. 앞서 언급한 유럽과 북미 그리고 호주에서도 수소 물류비용 저감을 위해 수소의 생산·수요·공급 연결체계, 충전소 공급체계, 도로운송 등의 공급을 효율화하기 위한 노력이 강화되고 있다. 실제로 우리나라 2050 탄소중립 추진전략에서도 도심-거점별 수소충전소를 공공부지나 주유소 등을 활용하여 구축하는 계획을 발표한 바 있다.

본 연구에서는 수소 공급망 및 충전소 배치와 관련한 각 국가들의 정책동향, 기술동향, 그리고 기존 연구들 검토하고, 향후 국내 지역거점 분산형 수소공급 허브시설 구축을 위한 방법론을 제안하였다.

II. 국가별 수소정책 및 연구 동향

2-1 국내·외 동향

미국의 에너지부(Department of Environment)에서는 지리적 특성을 기반으로 수소 수요와 필요한 관련 기반시설을 분석하는 연구를 수행한 바 있다[4]. 수소생산과 배분체계 안에서 수소자동차 충전시설의 최적 위치 결정을 위한 분석을 수행하였다.

유럽에서는 Hydrogen Mobility Europe (H2ME) 시범사업을 추진하였다[5]. 이는 연료 전지 전기 자동차 운전자에게 최초의 범유럽 수소 충전소 네트워크에 대한 액세스를 제공하는 대표적인 프로젝트이다. 독일, 영국, 프랑스 등 여러 국가들이 참여한 사업으로 대상 차종도 승용차, 밴, 트럭 등 다양하게 포함하고 있다. 2025년까지 유럽 전역 1,000개의 수소충전소 보급을 위한 목표를 수립하고 초기 시장 형성을 고



그림 1. 한국의 수소튜브트레일러 출처 : Monthly Hydrogen Economy
Fig. 1. Hydrogen tube trailer in South Korea

려한 최소 네트워크 규모로 검토되었다.

국내에서는 수소충전소 및 수소충전소에 수소 공급을 위한 수소공급허브 시설을 확대하기 위한 노력을 하고 있다. 현재까지의 수소충전소는 Fig. 1과 같이 대부분 튜브트레일러 형태이기 때문에 향후 수소 수요가 증가함에 따라 수소튜브트레일러의 수송량 또한 증가할 것으로 추정된다. 따라서 이를 수용할 수 있는 도로망과 시설에 대한 준비가 필요하다.

수소자동차는 수소를 직접 연소하지 않고 연료전지로 활용하여 생성된 전기에너지로 구동된다. 따라서 수송 분야에서 많은 국가들이 수소자동차의 미래 시장성을 보고, 기술개발에 매진하고 있다[6]. 수소자동차는 2019년 기준으로 전 세계 약 16,000대가 보급되었으며, 국가별 경쟁이 가장 치열한 분야 중 하나이다. 2017년 기준 세계 자동차 시장규모는 약 20,000억 달러인데 이 중 10%만 수소자동차로 전환해도 디스플레이 시장(1,251억 달러)의 약 1.5배, 반도체 시장(4,190억 달러)의 절반 수준의 규모를 달성할 수 있음을 의미한다. 세계적으로 1억 대 이상의 자동차를 포함하는 35개 이상의 도시가 새롭고 더 엄격한 배출 제한을 설정하고 있으며, 25개 이상의 도시가 2025년부터는 무공해 버스만 구입하기로 약속했으며, 20개 이상의 국가가 내연차량 판매 금지를 발

표하였다. 전 세계적으로 2030년까지 450만 대의 수소차를 보유 할 것으로 예상되며 주로 중국, 일본 및 한국이 출시를 주도할 것으로 예상된다. 이와 동시에 차량에 원활한 수소 공급을 위해 2030년까지 10,500개의 수소 충전소 보급을 목표로 하고 있다.

수소자동차 보급 확대를 위해서는 수소 인프라 구축이 무엇보다도 중요하다. 수소자동차를 이용하고자하는 잠재적 사용자들은 전기자동차 사례와 유사하게 수소충전소의 접근과 활용이 용이해야 구매를 고려할 수 있다[7]. 수소충전소 배치 문제는 중요하며, 이와 관련한 연구는 활발히 진행되고 있다. 그러나 전기자동차와는 달리 수소의 경우 단순히 수소충전소의 위치만 고려할 수 없고, 생산기지와의 연계를 주요 변수로 고려해야한다. 다시 말하면, 수소충전소의 위치는 지역별 수요를 고려하여 이 수요를 충분히 공급할 수 있는 생산기지와의 연결을 위한 수소공급허브시설의 위치를 설정하는 것이 수소 수요 공급에 필수적으로 고려되어야 한다.

앞서 언급하였듯이, 우리나라 정부에서는 수소 경제 활성화를 위한 로드맵을 갖추고는 있으나, 구체적인 수소충전소 설치 위치와 공급 방법에 대한 방안은 미흡한 실정이다.

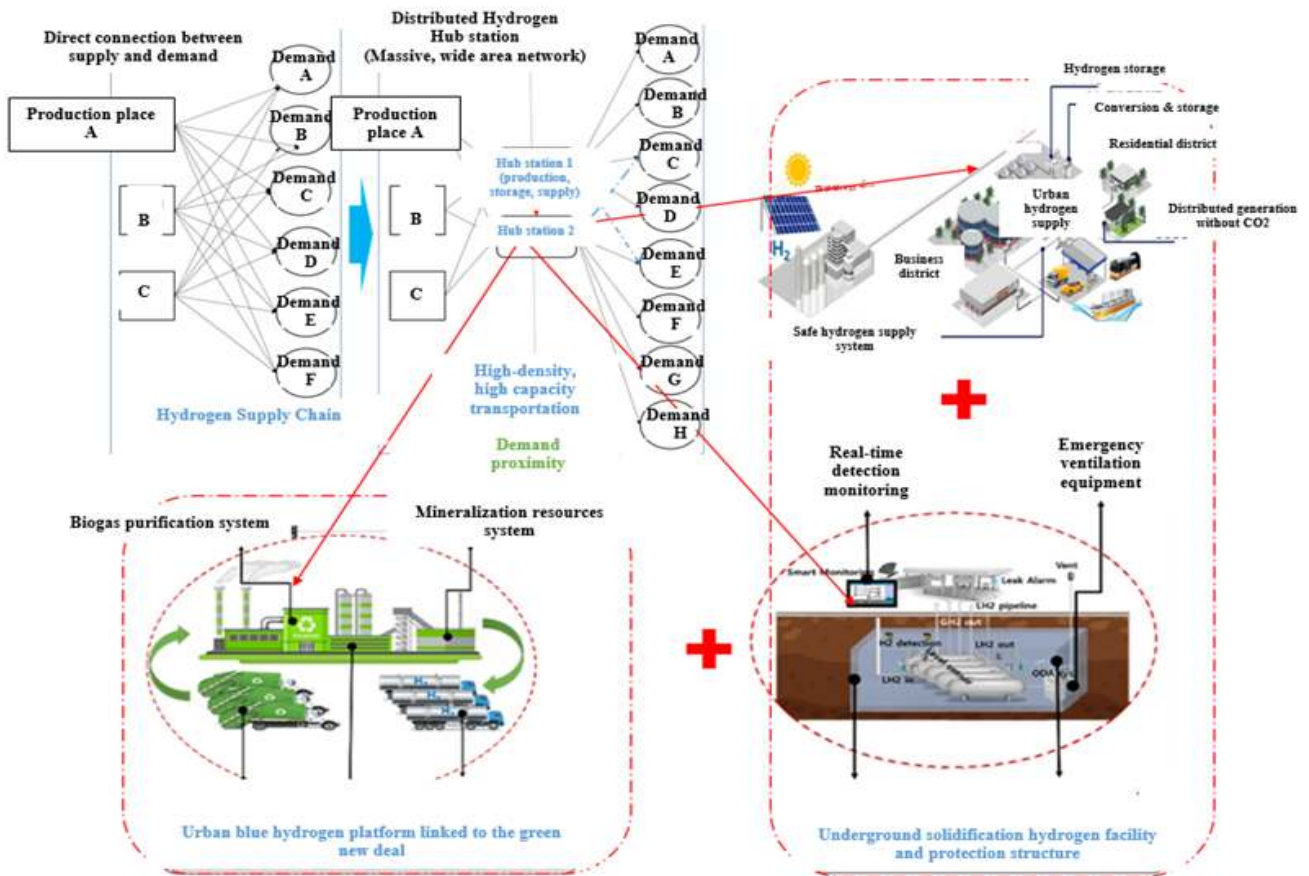


그림 2. 수소도시를 위한 지하연계 입체 통합시스템 인프라의 개념

Fig. 2. Concept of the infrastructure underground linkage three-dimensional integrated system for a hydrogen city

2-2 수소충전소 관련 연구 고찰

수소충전소와 관련 인프라 구축과 관련된 연구는 많이 진행되고 있다. 육상 운송 분야에서 수소 시장 형성을 위한 최신 기술과 잠재성에 대한 결과를 도출하였다[8]. 특히, 수소충전소에 대한 투자는 연료전지차량이 증가하면 수익성이 있는 반면, 적절한 수소 인프라 개발이 없으면 시장 형성에 저해될 것이라고 분석하였다. 2008년에서 2018년까지 미국정부와 산업계 그리고 학계에서 진행된 수소 생산과 수소충전소 기능과 성능까지를 포함한 인프라 연구가 진행되었다[9]. 이 연구에서는 비용, 편익 그리고 안전, 신뢰, 가용성을 포함한 고려사항뿐만 아니라 수소 인프라 확장에 필요한 공학적 요소와 배치 이슈를 검토하였다.

수소 저장과 수송에 대한 연구에서는 수소 인프라의 안전성과 신뢰성에 대해 언급하였다[10]. 안전성과 신뢰성은 이러한 기술에 대한 대중적 수용에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. Greene 등의 연구에서는 현재까지의 수소충전 인프라 진행 상황과 미래 전망의 설계, 계획 및 배치에 필요한 이슈들에 대한 포괄적인 검토를 수행하였다[11]. 결과적으로 수소충전소의 배치는 수소자동차의 수요에 대한 관계 설정은 향후 중요한 주제임을 확인하였다. Lin 등의 연구에서는 수소충전소 위치 선정 모형의 구성요소로 시설면적, 계획된 구조, 수에 따라 구분하였다[12]. 이를 통해 수소 충전소 위치에 대한 연구를 포괄적으로 이해할 수 있도록 하였다.

수소충전소 입지 모형에서는 우선 분석 범위 내 지역별 수요를 추정한다. 두 번째로 수요지와 충전소 후보지를 설정한다. 이때 수요지와 충전소 후보지 간 이동 거리나 시간을 최소화하여 각 수요량을 충족할 수 있는 충전소의 개수와 위치를 결정하게 된다[13]. 일반적으로 사용되는 모형은 covering model과 p-median 모형이다. 전자는 최소한의 비용으로 정의된 지역 내의 모든 수요 지점에 서비스를 공급할 수 있는 입지를 찾을 때 적합하다고 알려져 있다. 다만, 대부분 예산 등의 제약으로 대상 지역 전체에 대한 서비스를 제공하는 것을 어렵다. 후자는 특정 시설의 특성에 따라 복수 개의 입지와 각 입지에 대한 최적화된 수요를 배분하는데 활용된다. P-median 문제는 모든 수요에서부터 p개 시설까지의 평균 이동거리를 최소화하는 입지를 찾는 것이다[14],[15].

최근에는 통행량 기반의 연료충전입지모형(Fuel-refueling location model, FRLM)을 통해 비용, 안전성, 그리고 위험성 등을 동시에 분석한다[16]. FRLM 방법을 기반으로 우리나라와 미국에서 최대 차량대수, 최소 평균통행시간, 또는 최단거리를 목적함수로하여 입지 후보지를 선정한 연구가 진행되었다[17]-[20].

또한, P-median 방법을 기반으로 최대 차량대수, 최소 평균통행시간, 또는 최단거리를 목적함수로 하는 연구가 진행되었다[21]-[23].

요약하면, 수소충전소 입지와 관련한 여러 가지 형태의 배치 모형 구축과 관련된 연구가 진행되었다. 그러나 거시적 관

점에서 수소 공급망을 동시에 고려하여 적정 수소충전소 위치를 결정하는 연구와 이들에게 지속 가능하게 수소를 공급할 수 있는 수소공급허브시설에 관한 연구는 미흡하다.

III. 수소공급허브시설 구축방안

3-1 주요고려사항

향후 국내에서 수요사용 증가에 대비하여 도로·교통망을 이용한 수소운송체계의 획기적인 개선이 필요하다. 수소 특성상 안전이슈가 중요하기 때문에, 그림 2와 같이 수소공급 허브 또는 수소충전소의 기반시설까지도 지하화하는 것이 필요하다. 이는 유사시 수소시설로 인한 위험도 및 공급·수요의 지속성을 확보하기 위함이다. 특히, 도시에서 발생하는 유기·가연성 폐기물을 유용한 형태로 자원화하기 위한 수요가 증가하고 있어, 이를 고려한 공급허브시설을 고려중에 있다. 주요 구성요소로는 수소공급사슬, 그린뉴딜연계 도시 블루 수소 플랫폼, 그리고 지하 입체화 수소설비 및 방호 구조이다. 일반적으로 수소충전시설의 최적 위치를 결정을 위해 필요한 중요한 사항들은 다음과 같다.

- ① 인구 밀도: 수소에 대한 충분한 수요를 보장하기 위해 인구 밀도가 높은 지역에 있어야 함
- ② 수소 생산 시설과의 근접성: 운송비용을 줄이고 안정적인 수소 공급을 보장하기 위해 수소 생산 시설과 가깝게 위치해야 함
- ③ 기존 기반 시설과의 근접성: 주유소의 위치는 운전자가 편리하게 주유할 수 있도록 고속도로 또는 주요 도로와 같은 기존 기반 시설에 쉽게 접근할 수 있어야 함
- ④ 공간의 가용성: 충전소에는 저장 탱크 및 기타 장비를 위한 상당한 공간이 필요하므로 위치에 사용 가능한 충분한 공간이 있어야 함
- ⑤ 미래 성장 가능성: 위치는 수소에 대한 수요가 증가함에 따라 미래 성장 및 확장 가능성이 있어야 함
- ⑥ 환경적 영향: 대기 및 소음 공해, 토양 및 지하수 오염 가능성과 같은 잠재적인 환경적 영향에 대해 위치를 평가해야 함
- ⑦ 정부 정책 및 인센티브: 최적의 위치를 결정할 때 세금 감면 또는 보조금과 같은 수소 인프라 개발을 위한 정부 정책 및 인센티브도 고려해야 함

궁극적으로 수소공급인프라 시설은 프로젝트의 특정 상황과 우선순위에 따라 달라질 수 있다.

3-2 국내 수소공급 및 수요현황

수소공급 허브시설의 위치 결정을 위해서는 육상 수송을 위한 도로네트워크와 관련된 국가교통데이터의 파악이 필요하다. 현재 공공에 오픈되어 있는 데이터베이스는 총 3가지 카테고리(교통 분석용 네트워크, 고속도로 데이터, 대중교통)로 구분할 수 있다. 교통 분석용 네트워크는 노드와 링크를 포함한 여객 및 화물 수요를 포함하고 있다. 고속도로 데이터는 DSRC (Dedicated Short Range Communication) 기반의 경로 정보와 각 영업소 진출입 교통량 정보를 가지고 있다. 대중교통데이터에는 각 버스노선과 차고지를 포함하고 있다. 이러한 데이터베이스를 통해 통행망 배정, 수소 여객 수요, 수소화물 수요, 화물 경로 및 수요, 고속도로 여객 수요와 사업용 차량의 노선 특성 등을 파악하는데 활용할 수 있다.

국가교통데이터와 더불어 주거, 토지 이용목적과 같은 지리적 데이터를 기반으로 생활 수소 수요를 예측하기 위해서는 지도 데이터가 필요하다. 지도데이터는 건물, 용도지역, 철도안전용도구역, 도로 등으로 구분된다. 이러한 데이터들은 행정안전부를 통해 수집이 가능하다.

표 1. 수소 생산 구성 및 공급 목표

Table 1. Hydrogen production configuration and supply target

Division	Current	Year 2022	Year 2030	Year 2040
Combination	① ②	① ② ③	① ② ③ ④	① ② ③ ④
	130,000 ton/year	470,000 ton/year	1,940,000 ton/year	5,260,000 ton/year
	① Byproduct hydrogen ② Extraction hydrogen ③ Water electrolysis hydrogen ④ Oversea production			

Source: KIS Special Report (2021)

현재 국내에서 사용되는 수소는 대부분 석유화학 공정에서 발생하는 부생수소 또는 천연가스를 이용한 개질수소이다. 정부는 수전해와 해외생산을 통한 수소 공급을 점차 확대하여 2019년 기준 연간 13만 톤인 수소 생산을 2040년에는 526만 톤으로 증가시키는 것을 목표로 표 1과 같이 제시하였다.

현재 정부가 계획하고 있는 수소의 생산방식은 부생수소, 추출수소(개질 수소), 수전해, 해외생산이다. 부생수소는 산업공정에서 발생하는 수소를 의미하여 대부분 석유화학공정에서 발생하고 있다. 2017년 기준 국내 주요 석유화학 단지의 수소 생산능력은 연간 191만 톤으로 판단되며, 이 중 울산 지역이 약 50%를 점유하고 있다. 석유화학 단지 별 세부적인

생산능력은 다음 표 2와 같다.

현재 우리나라에서 수소에너지는 에너지밸런스에 포함되지 않아 연료전지에 소비되는 정확한 수소 통계는 활용이 불가능하다. 따라서 원료용(비에너지), 연료용, 발전용, 수송용과 관련된 수소 통계가 필요하다.

표 2. 석유화학단지별 수소생산능력

Table 2. Hydrogen production capacity by petrochemical complex

Region	Production Capacity (ton/year)
Ulsan	949,677
Yeosu	645,626
Daesan	210,222
Others	106,764
Total	1,912,289

Source: KIS Special Report (2021)

IV. 수소공급허브 시설 위치 선정을 위한 방법론

4-1 현황 및 문제점

수소충전소 확충과 관련해서 가장 큰 문제점은 충전시설의 입지 후보지 인근 주민의 반대와 해당 지자체의 인허가 이슈이다. 실제로 수소충전소 입지 주변 주민들의 반대로 상당수 수소충전소 계획이 무산되거나 연기 또는 변경되는 현상이 전국적으로 많이 발생하고 있다. 효율적인 충전수요 대응 차원에서 지역 간 통행량을 기반으로 통행량이 많은 기·종점 지역 및 간선도로상에 우선적으로 구축되어야 하는 이슈가 있다. 대도시 주변에서 수소 충전 문제와 갈등으로 인해 주변 수소 충전 대기시간이 증가하는 문제는 계속되고 있다.

다음 표 3과 표 4는 주요국간, 대도시간 수소차 및 수소충전소 현황을 각각 나타낸다. 주요국간 수소충전소 1개소당 수소차 담당대수를 살펴보면, 한국 232대, 중국 215대, 미국 130대, 일본 30대, 독일 9.47대로 한국이 수소차 보급에 비해 충전소는 부족한 것으로 분석된다.

특히, 대도시권 수소충전소 구축 현황은 매우 미흡한 것으로 나타났다.

결과적으로 이러한 점들을 고려했을 때 수소 수용자의 통행패턴과 접근성, 현재의 수소충전소 위치 등을 고려한 설계가 필요하다.

4-2 최적화 방법론

본 연구에서 제안하는 수소허브공급시설의 입지선정과 관련한 최적화 절차는 다음 표 5와 같이 제시한다. 우선, 수소충

표 3. 국가간 수소차량과 충전소 현황

Table 3. Status of hydrogen vehicles and stations between countries.

Country	Korea	China	U.S.A	Japan	Germany
Hydrogen vehicles	10,906	7,115	8,890	4,212	875
Stations	47	33	68	137	93
Total (veh./stations)	232	215	130	30	9.4

표 4. 대도시간 수소 차량과 수소충전소 현황

Table 4. Status of hydrogen vehicles and stations between large cities.

Country	Seoul	Gyeonggi	Busan	Incheon	Kangwon	California
Hydrogen vehicles	1,671	1,578	916	488	856	8,469
Stations	4	6	2	2	1	47
Total (veh./stations)	417	263	458	244	856	180

표 5. 최적화 절차

Table 5. Optimization procedure

Research Process	Contents
Data collection	<ul style="list-style-type: none"> · Network for traffic analysis · Taxi/Navigation/Map data · DTG data · Highway/Public transit data
Data Processing	<ul style="list-style-type: none"> · Rest area coordinate information matching · Rest area (gas station) and road network matching · Establish of a highway network considering travel time via rest areas
Flow analysis	<ul style="list-style-type: none"> · Use traffic analysis model · Estimate traffic volume by individual path based on User Equilibrium · Actual data available · Verify with TransCAD
Flow maximize with OD routes	<ul style="list-style-type: none"> · Maximize traffic volume of individual rest areas · Simultaneously, building a model that minimizes path detours for hydrogen refueling
Sensitivity	<ul style="list-style-type: none"> · Maximum capacity by individual gas stations · Ratio of traffic volume and detours · Full supply · Percentage of hydrogen vehicles in traffic volume · Conduct sensitivity analysis by adjusting the above parameters

전소의 입지를 최적화하는 것을 고려한다. 기존 연구에서는 실제 데이터와 용량과 공급 수준을 모형 구축 요소로 고려하지 않았으나, 본 방법론에서는 수요, 경로통행량, 실제데이터, 그리고 용량과 공급 수준을 모두 동시에 고려하도록 구성한다.

다만, 방법론상에서 반드시 고려해야할 것은 제도에 관한 것이다. 특히, 수소충전시설에 대한 규제이다. 수소충전소는 고압가스 안전법 시행규칙, 고압가스 일반제조 시설·기술·검사·감리·안전성 평가 기준 등과 같은 고압가스 관련법과 건축법, 철도안전법, 도로법과 같은 건축 안전법, 지방자치단체 규제, 국토계획 규제 등 다양한 규제에 의해 제한된다.

특수수소충전소는 국토계획법 상의 건축제한 규제에 따라 “위험물 저장 및 처리시설”로 구분되어 주거지역과 상업지역에 설치가 불가능한 실정이며 고압 가스법에 따라 이격거리

제한 등의 규제를 가지고 있어 인프라 확충에 어려움을 겪고 있다. 정부에서는 지난 19년에 수소자동차 충전 안전규제를 합리화하여 충전 인프라의 구축확대를 선도하기 위해 고압가스 안전관리법 시행령·시행규칙을 개정한 바 있다. 주요내용은 수소충전소의 조건을 LPG 및 CNG 충전소와 동일한 자격으로 완화한 것이다. 따라서 이러한 규제를 고려한 입지 가능한 구역을 후보지로 선정해야한다. 도심지 인근 수소충전소 입지 가능지역은 도시공원 내 점용허가 대상에 추가되었고, 부지 임차인에도 설치가 허용된다. 또한, 기존 LPG충전소 등 수소충전소와의 복합 설치 시 건폐율 30%로 한시적으로 상향하는 내용이 검토 중에 있다.

이와 같은 사항들을 고려하여, 고속도로 주변을 중심으로 한 수소충전소의 최적 위치가 선정된다면, 최종적으로 각 개

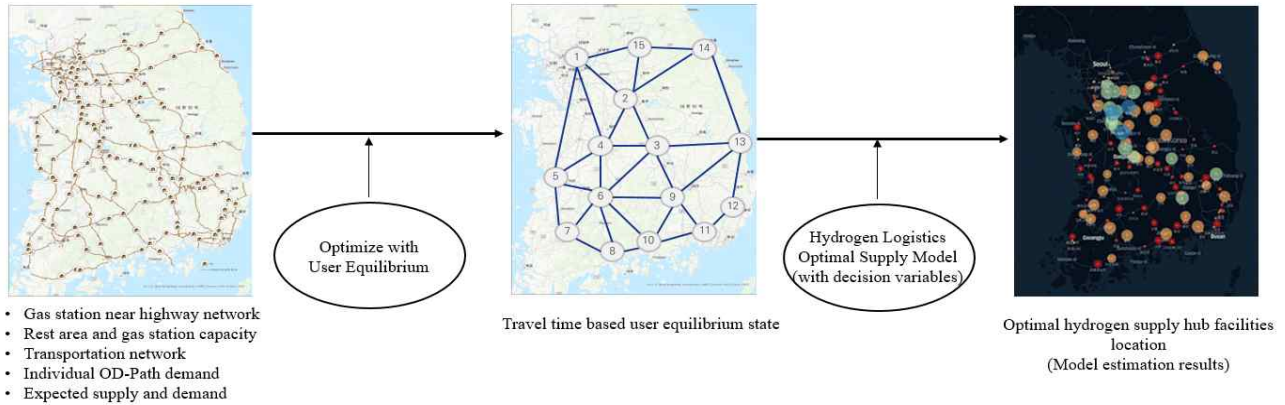


그림 3. 제안된 방법론 적용에 대한 개념
 Fig. 3. The concept of applying the proposed methodology

별 수소충전소에 수소수요에 부합한 공급을 위한 수소공급허브 시설에 대한 위치 최적화가 가능하다.

본 연구에서 최종적으로 제안하는 방법론은 그림 3과 같이 나타낸다. 본 방법론의 핵심은 효율적인 수소충전 수요 대응 차원에서 새로운 입지보다 기존에 운영 중인 고속도로 휴게소 시설 및 주요소에 충전시설을 구축하는 것이다. 이는 고속도로 휴게소를 중심으로 수소충전소 설치 및 운영 예정인 정부 정책의 방향성을 고려한 것이다. 수소차의 장거리 주행 가능성을 고려함과 동시에 화물차로의 이동 등 물류 측면도 고려한 것이다. 고속도로를 비롯한 교통거점 충전소 구축을 통해, 수소자동차 장거리 운행 지원 및 다른 교통수단과의 연계성 등도 주요 고려대상으로 하였다. 또한 통행시간을 근거로 이용자평형(user equilibrium)을 산정한다. 현재 개발 중인 수소물류 최적 공급 모형을 통해 개별적인 수소충전소에 원활한 수소공급이 가능하도록 하는 수소공급허브 시설의 위치를 최종 산정한다.

V. 결 론

본 연구에서 제시한 방법론을 통한 수소충전소 위치 산정은 OD통행량 데이터를 기반으로 실제 통행량 데이터를 활용함으로써, 실제 수요에 반응할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 개별 충전소별 용량을 제시할 수 있어, 각 충전소의 유형을 선택할 수 있다는 장점을 가질 수 있다.

고속도로 네트워크는 충전을 위해 경로를 우회하는 것이 합리적이지 않을 수 있으며, 따라서 가장 많은 고객에게 서비스 할 수 있는 경로 내에 충전소를 배치하는 것이 중요한 것으로 판단된다. 수요와 충전소의 최대 용량을 고려하여 공급량을 다르게 배치하는 것은 제한된 전체 공급 하에서 합리적인 것으로 보인다. 또한, 사용자 평형 (user equilibrium)은 어떤 운전자도 다른 경로로 전환할 동기가 없는 교통흐름 상태를 설명하는 개념으로 각 경로의 이동 시간은 운전자가 경

로 전환에서 이점을 느끼지 못하는 정도에서 평형됨을 나타낸다. 따라서 운전자가 일방적으로 경로를 변경하여 이동 시간을 절감할 수 없다. 결과적으로 운전자의 총 통행시간이 최소화된다.

이러한 방식에 따라 고속도로네트워크는 안정적인 평형 상태에 있다고 볼 수 있다. 시스템이 사용자 평형 상태에 도달하면 운송 네트워크 또는 운전자 행동에 영향을 미치는 기타 요인에 상당한 변화가 없는 한 그대로 유지되는 경향이 있기 때문이다. 그러나 한 가지 주의해야 할 점은 총 통행시간은 사용자 균형에서 최소화되지만 이는 시스템이 사회적 관점에서 반드시 최적이라는 것을 의미하지는 않는다는 것이다.

앞서 그림 2에서 제시한 것과 같이 수소공급허브 시설은 안전성과 접근성을 높이기 위해서 지하화하는 것을 계획하고 있다. 수소공급허브 시설은 주변의 개별수소충전소의 용량도 함께 고려하여 위치가 선정되기 때문에, 수소의 수요와 공급, 안전 측면에서 매우 효율성이 높을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(주요사업)사업으로 수행되었습니다(과제번호 20230104-001, 수소도시 기반시설의 안전 및 수용성 확보기술 개발).

참고문헌

[1] European Commission. A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe [Internet]. Available: <https://www.h2greentech.eu/a-hydrogen-strategy-for-a-climate-neutral-europe/>

[2] Ministry of Environment. South Korea to Move towards the Goal of Carbon Neutrality by 2050 [Internet]. Available:

- <https://eng.me.go.kr/eng/web/main.do>
- [3] D. Y. Choi, Y. J. Jeon, M. S. Choi, Y. J. Seo, S. K. Park, M. H. Park, ... and H. N. Jeong, 2020 Energy Consumption Survey, Ministry of Trade, Industry and Energy, Sejong, pp. 92-93, March 2022.
- [4] S. McQueen, J. Stanford, S. Satyapal, E. Miller, N. Stetson, D. Papageorgopoulos, ... and R. Costa, Department of Energy Hydrogen Program Plan, U.S. Department of Energy, Washington: DC, DOE/EE-2128, November 2020.
- [5] European Commission. Hydrogen Mobility Europe 2 [Internet]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/700350/results>.
- [6] Korea Innovation Foundation (INNOPOLIS). Issue Report Hydrogen Car [Internet]. Available: <https://www.innopolis.or.kr/board/view?pageNum=11&rowCnt=10&no1=849&linkId=46202&menuId=MENU00999&schType=0&schText=&boardStyle=&categoryId=&continent=&country>.
- [7] B. Tanç, H. T. Arat, E. Baltacıoğlu, and K. Aydın, “Overview of the Next Quarter Century Vision of Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 20, pp. 10120-10128, April 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.112>
- [8] D. Apostolou and G. Xydis, “A Literature Review on Hydrogen Refuelling Stations and Infrastructure. Current Status and Future Prospects,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 113, 109292, October 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109292>
- [9] J. Kurtz, S. Sprick, and T. H. Bradley, “Review of Transportation Hydrogen Infrastructure Performance and Reliability,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 23, pp. 12010-12023, May 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.027>
- [10] R. Moradi and K. M. Groth, “Hydrogen Storage and Delivery: Review of the State of the Art Technologies and Risk and Reliability Analysis,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 23, pp. 12254-12269, May 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.041>
- [11] D. L. Greene, J. M. Ogden, and Z. Lin, “Challenges in the Designing, Planning and Deployment of Hydrogen Refueling Infrastructure for Fuel Cell Electric Vehicles,” *eTransportation*, Vol. 6, 100086, November 2020. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100086>
- [12] R.-H. Lin, Z.-Z. Ye, and B.-D. Wu, “A Review of Hydrogen Station Location Models,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 39, pp. 20176-20183, August 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.035>
- [13] R. Lin, Z. Ye, Z. Guo, and B. Wu, “Hydrogen Station Location Optimization Based on Multiple Data Sources,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 17, pp. 10270-10279, March 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.069>
- [14] S. L. Hakimi, “Optimum Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph,” *Operations Research*, Vol. 12, No. 3, pp. 379-517, May-June 1964. <https://doi.org/10.1287/opre.12.3.450>
- [15] S. L. Hakimi, “Optimum Distribution of Switching Centers in a Communication Network and Some Related Graph Theoretic Problems,” *Operations Research*, Vol. 13, No. 3, pp. 462-475, June 1965. <https://doi.org/10.1287/opre.13.3.462>
- [16] O. Derse, E. Göçmen, E. Yılmaz, and R. Erol, “A Mathematical Programming Model for Facility Location Optimization of Hydrogen Production from Renewable Energy Sources,” *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 44, No. 3, pp. 6648-6659, 2022. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1812769>
- [17] M. Kuby, L. Lines, R. Schultz, Z. Xie, J.-G. Kim, and S. Lim, “Optimization of Hydrogen Stations in Florida Using the Flow-Refueling Location Model,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, No. 15, pp. 6045-6064, August 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.05.050>
- [18] Q. Zhao, S. B. Kelley, F. Xiao, and M. J. Kuby, “A Multi-Scale Framework for Fuel Station Location: From Highways to Street Intersections,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 74, pp. 48-64, September 2019. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.07.018>
- [19] B. Gim, J. H. Kook, and S. M. Cho, “A Construction Plan of Hydrogen Fueling Stations on Express Highways Using Geographic Information System,” *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 25, No. 3, pp. 255-263, June 2014. <https://doi.org/10.7316/KHNES.2014.25.3.255>
- [20] G. Kim, J. Park, and S. Go, “Location Problem of Hydrogen Refueling Station Considering Hybrid Hydrogen Supply System,” *Journal of Transport Research*, Vol. 26, No. 2, pp. 53-70, June 2019. <http://dx.doi.org/10.34143/jtr.2019.26.2.53>
- [21] M. A. Nicholas and J. Ogden, “Detailed Analysis of Urban Station Siting for California Hydrogen Highway Network,” *Transportation Research Record*, Vol. 1983, No. 1, pp. 121-128, January 2006. <https://doi.org/10.1177/0361198106198300117>

- [22] K. Itaoka, S. Kimura, and K. Hirose, "Methodology Development to Locate Hydrogen Stations for the Initial Deployment Stage," in *Proceedings of the 2018 International Symposium on Hydrogen Energy and Energy Technologies (HEET 2018)*, Nagoya, Japan, 01014, November 2018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198301014>
- [23] S. Bae, E. Lee, and J. Han, "Multi-Period Planning of Hydrogen Supply Network for Refuelling Hydrogen Fuel Cell Vehicles in Urban Areas," *Sustainability*, Vol. 12, No. 10, 4114, May 2020. <https://doi.org/10.3390/su12104114>



양충헌(Choongheon Yang)

2000년 : 명지대학교 교통공학 학사
2002년 : 명지대학교 교통공학 석사
2008년 : Ph.D. in Civil Engineering at
Univ. of California, Irvine

2009년~현 재: 한국건설기술연구원 도로교통연구본부 연구
위원

※ 관심분야 : 도로안전, 도로관리, 육상수송



임기원(Ki-won Lim)

2012년 : 인하대학교 산업공학 박사
2015년 : 인하대학교 산업공학 석사
2021년 : 인하대학교 물류전문대학원
박사

2021년~2022년: 인하대학교 산학협력단 정석물류통상연구원

2022년~현 재: 한국건설기술연구원 도로교통연구본부

※ 관심분야 : 도로교통, 교통수요, 물류수요, 공급망관리