

하이브리드형 수소공급방식을 고려한 수소충전소 입지 선정 모형 개발

Location problem of hydrogen refueling station considering hybrid hydrogen supply system

저자 (Authors)	김거중, 박준식, 고승렬 Kim, Gurjoong, Park, Junsik, Go, Seungryul
출처 (Source)	교통연구 26(2) , 2019.6, 53-70(18 pages) Journal of Transport Research 26(2) , 2019.6, 53-70(18 pages)
발행처 (Publisher)	한국교통연구원 The Korea Transport Institute
URL	http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE08746431
APA Style	김거중, 박준식, 고승렬 (2019). 하이브리드형 수소공급방식을 고려한 수소충전소 입지 선정 모형 개발. 교통연구, 26(2), 53-70
이용정보 (Accessed)	고려대학교 163.152.3.*** 2019/08/08 09:31 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

하이브리드형 수소공급방식을 고려한 수소충전소 입지 선정 모형 개발

김거중* · 박준식** · 고승렬***

Location problem of hydrogen refueling station
considering hybrid hydrogen supply system

Kim, Gurjoong (Research Specialist, The Korea Transport Institute)

Park, Junsik (Research Fellow, The Korea Transport Institute)

Go, Seungryul (Researcher, The Korea Transport Institute)

I 서론

II 기존 문헌 고찰

1. 수소충전소의 수소 공급 방식
2. 충전소 입지 선정 연구
3. 고속도로 요금소의 유희부지 현황

III 수소충전소 입지 선정 모형 개발

1. 시장 도입 단계에 적합한 수소 공급 방식
2. 수리적 모형 개발

IV 사례 분석

1. 분석 개요
2. 후보 입지 선정
3. 수소충전소 최적 입지 선정

V 결론

2019년 1월 31일 접수, 2019년 4월 10일 최종수정, 2019년 4월 15일 게재확정

* 한국교통연구원 전문연구원(주저자)

** 한국교통연구원 연구위원(교신저자)

*** 한국교통연구원 연구원

Abstract

수소차 시장을 활성화하기 위해서는 무엇보다 수소충전 인프라 구축이 시급하다. 그리고 효율적인 수소충전 인프라 구축을 위해서는 이용자와 공급자 측면에서의 다양한 요소를 고려한 계획적인 투자가 이루어져야 한다. 이와 관련하여 수소충전소와 같은 대체연료 충전소 입지 선정 연구들은 지금까지 많이 수행되어 왔다. 그러나 이러한 연구들의 대부분은 이용자 측면, 혹은 공급자 측면에서 입지를 최적화 하는 모형이라는 점에서 한계를 지닌다. 본 연구에서는 수소충전 인프라 구축 초기단계에 적합한 하이브리드형 수소 공급방식을 제안하고, 그러한 공급방식 하에서 이용자 측면의 이용수요를 최대화하며 공급자 측면의 충전소/개질기 설치비용 및 수송비용을 최소화하는 수소 충전소 최적 입지 선정 모형을 개발하였다. 그리고 개발된 방법론을 활용하여 전국 고속도로 요금소 유희부지를 대상으로 수소충전소의 최적 입지를 선정하였다. 이러한 연구결과는 중앙정부나 한국도로공사가 수소충전 인프라 구축계획과 같은 정책 사업을 추진하고자 할 때 정책적 판단을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

■ 주제어: 수소충전소, 대체연료충전소, 입지 선정, 고속도로 요금소 유희부지, 최적화

In order to activate the hydrogen vehicle market, it is urgent to construct hydrogen refueling infrastructure. And investment plans of the infrastructure should be established in consideration of various factors in terms of user and supplier. A number of studies have been carried out to select alternative-fuel station sites such as hydrogen stations. However, most of these studies have limitations in that they are models that optimize the location only on the user side or the supplier side. In this study, we propose a hybrid hydrogen supply method suitable for the early stage of hydrogen refueling infrastructure, and developed a model for optimal location of hydrogen refueling station that minimizes supply cost with maximizing user demand under the hybrid supply method. Using the developed model, the optimal location of the hydrogen refueling station was selected for the idle sites of the national expressway tollgates. The results of the study can be used as the basic data for the policy decision when the central government or Korea Expressway Corporation intend to pursue the policy project such as the hydrogen refueling infrastructure plan.

■ Keywords: Hydrogen Refueling Station, Alternative-Fuel Station, Location Problem, Idle Site of Tollgate, Optimization

I. 서론

몇 년 전까지만 해도 수소연료전지차량(Fuel Cell Electric Vehicle, 이하 수소차)의 가능성은 높지 않게 평가 받지 못했다. 수소차가 갖는 안정성문제 및 1회 충전 주행거리(항속거리)와 같은 몇 가지 문제점 때문이었다. 하지만 최근 국내자동차업체에서 수소차를 출시하면서 이러한 분위기는 바뀌는 듯하다. 기존의 수소차에 비해 항속거리도 대폭 개선되어 약 600km에 달하며, 가연성인 수소를 연료로 사용하는 차량의 안전성 문제도 상당히 개선되었다고 한다.¹⁾

하지만 고무적인 수소차 기술 개발에도 불구하고 수소차 시장을 활성화하는 데에는 아직 갈 길이 멀다. 그러한 이유 중 하나는 부족한 수소 충전 인프라 때문이다. 현재 구축되어 운영 중인 수소충전소는 전국적으로 10여개 정도이다.²⁾ 더욱이 그 중 절반은 연구용으로만 사용되고 있어 수소차가 실생활에서 활용되기에는 턱없이 부족한 실정이다.

국토교통부는 향후 예상되는 수소차 수요 증가에 선제적으로 대응하고 온실가스 및 미세먼지를 줄이기 위해 수소·전기차의 충전 인프라를 2025년까지 총 200개소로 확충하겠다고 발표하였다.³⁾ 한정된 재정 하에서 효율적인 수소 충전 인프라를 구축하기 위해서는 단계별 수소 충전계획을 수립할 필요가 있으며, 이를 위해서는 이용자 및 공급자 측면에서의 다양한 요소들을 고려한 수소충전소 최적 입지 선정 연구가 선행되어야 한다.

현실에서는 이용자 및 공급자의 요구사항이 항상 같지 않다. 전국에 흩어져 있는 수소차량 이용자의 장거리 통행을 고려한다면 수소충전소는 전국에

골고루 산재되어 있어야 하지만, 공급자 측면에서는 수소 운송비를 최소화하기 위해서 울산, 여수 등 부생수소를 생성하는 석유화학단지 인근에 설치하는 것이 경제적이다. 따라서 현실적인 수소 충전 입지 선정을 위해서는 이용자와 공급자 측면의 요소들을 모두 고려할 수 있어야 한다.

수소충전소와 같은 대체연료 충전소 입지 선정 연구는 지금까지 많이 수행되어 왔다(Kim & Kubry (2012), Hosseini et. al. (2017), Upchurch et. al. (2009), MirHassani & Ebrazi (2012), Chung & Kwon (2015)). 그러나 이러한 연구들의 대부분은 이용자 측면, 혹은 공급자 측면에서 입지최적화하는 모형이라는 점에서 한계를 지닌다. 일부 연구(Wang & Wang, 2010)의 경우 이용자의 편의와 공급자의 비용을 모두 고려한 최적 입지를 산정 모형을 제시하였으나, 이는 대체연료충전소를 대상으로 한 일반화된 최적 입지 모형으로 우리나라의 수소 공급방식의 특성을 제대로 고려하지 못한다는 한계를 지닌다. 이에 본 연구에서는 우리나라의 수소충전 인프라 구축 초기단계에 적합한 하이브리드형 수소공급방식을 제안하고, 이러한 수소 공급방식 하에서 공급자 비용 및 이용자 수요를 모두 고려할 수 있는 수소 충전소 최적 입지 선정 모형을 제안하고자 한다.

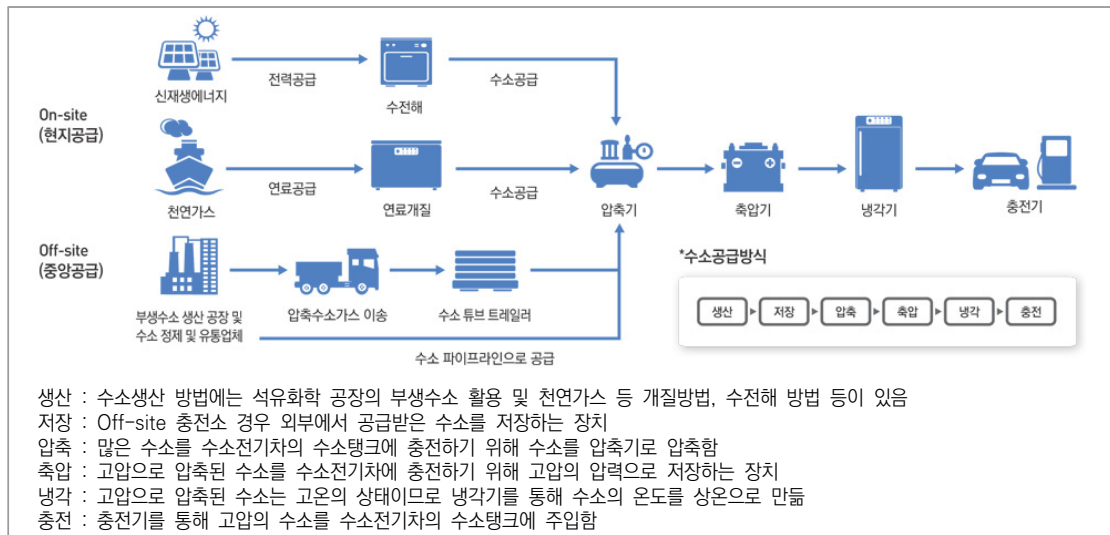
이를 위해 2장에서는 수소충전소의 수소 공급방식 및 기존의 입지선정 방법론을 검토하였으며, 3장에서는 이를 바탕으로 우리나라에 적합한 수소충전소 입지선정 모형을 구축하였다. 그리고 4장에서는 개발된 입지 선정 모형을 전국 고속도로에 적용하여 수소충전소 최적 입지를 산정하였다. 마지막으로 5장에서는 연구결과 및 한계점을 정리하였다.

1) 도로위 수소폭탄 수소차, 안전·친환경·경제성 확보됐나, 투데이신문(<http://www.ntoday.co.kr/news/articleView.html?idxno=65466>), [2019.03.22]

전세계 최장 기록 현대차 '넥쏘'의 항속거리는?, 네이버 포스트(<http://naver.me/5HFoF1fa>), [2018.07.16]

2) 수소충전 가능 지역, (사)한국수소산업협회(<http://www.h2.or.kr/map.html>), [2018.07.16]

3) 선제적 충전인프라 구축으로 수소사회 앞당긴다, 대한민국 정책브리핑(<http://www.korea.kr/policy/pressReleaseView.do?newsId=156185999>), [2018.07.16]



출처: 수소충전소 정보, (사)한국수소산업협회(http://www.h2.or.kr/h2_01_4.html), [2018.02.03]

〈그림 1〉 수소충전소의 수소 공급방식

II. 기존 문헌 고찰

1. 수소충전소의 수소 공급 방식⁴⁾

수소차 시장 활성화를 저해하는 요인 중 하나인 높은 수소 비용을 낮추기 위해서는 수소 생산비용을 낮추거나 수소 운송비용을 낮추어야 한다. 본 연구에서는 교통측면에서 접근하여 수소 운송비용을 낮추는데 초점을 맞추어 수소 충전소의 수소 공급 방식을 검토하였다. 우리나라 수소충전소의 수소 공급방식은 〈그림 1〉과 같이 ‘중양공급 방식’과 ‘현지공급 방식’으로 나뉜다.

가. 중양 공급 방식

중양 공급 방식은 석유화학단지 등 특정 지역에서 대량생산된 부생수소를 파이프라인이나 튜브 트레일러를 통해 공급받는 방식이다. 이러한 공급방

식은 수소 생산 시 대량으로 생산하기에 수소 생산 비용이 상대적으로 저렴하다는 장점이 있으나 타 지역에서 수소충전소까지 수소를 수송하는데 운송 비용이 발생한다는 단점이 있다.

수소 운송방법으로는 지면에 매설된 수소 배관을 통해 수소를 운송하는 파이프라인 방식과 수소를 고압으로 압축하여 저장한 튜브를 트레일러로 운송하는 튜브 트레일러 방식이 있다.

파이프라인 방식은 수소를 안정적으로 운송할 수 있다는 장점이 있으나 파이프라인 초기 매설시 많은 비용이 소요되기 때문에 수소 수요가 많을 경우 주로 사용된다. 현재 수소 파이프라인은 석유화학단지(울산, 여수)를 중심으로 약 200km 정도 구축되어 있다.⁵⁾

반면, 튜브 트레일러 방식은 기체수소를 고압으로 압축해 저장하는 튜브용기를 운송하는 방법으로 기체수소를 고압으로 압축하는 컴프레서 시설만 갖

4) 수소 에너지 등 미래 친환경 에너지 사업을 하고 있는 해외 기업의 실무진 인터뷰(2018.02.08, 2018.04.16) 결과를 바탕으로 요약, 정리한 내용임

5) 수소융합얼라이언스추진단(2017), 수송용 수소연료가격 설정 및 수급관리방안 연구, 산업통상자원부

추면 수소 운송이 가능 하므로 파이프라인 방식에 비해 초기비용이 적게 든다. 하지만, 운송 시 운송 거리 및 운송횟수에 비례하여 운송비용이 발생한다는 단점이 있다. 파이프라인방식 수소운송이 톤당 200만원 소요된다면, 튜브트레일러 수송운송은 거리에 따라 톤당 600만원에서 1천만 원까지 소요된다.⁶⁾ 따라서 수소를 많이 소비하는 기업은 보통 파이프라인 방식을 이용하거나 천연가스를 개질하는 방식을 사용한다.⁷⁾ 참고로 국내 수소 운송은 12%가 튜브트레일러로, 88%는 파이프라인으로 수송되고 있다.⁸⁾

나. 현지 공급 방식

현지 공급 방식은 충전소에서 천연가스, LPG 등을 개질하여 직접 수소를 생산 공급하는 방식이다.

미국 에너지부(DOE)에서 수행중인 수소&연료전지 프로그램(Hydrogen & Fuel Cells Program)에 따르면 소형 개질기를 통한 현지공급방식은 생산지가 공급지에 위치하여 각 충전소 수요에 맞춰 수소를 생산할 수 있으며, 광역 운송 인프라가 필요 없어 운송비용을 최소화할 수 있다고 한다.⁹⁾ 또한 상대적으로 적은 투자비로 인해 수소 초기 시장 단계의 상대적으로 적은 수요를 처리하기 적합하다고 언급하고 있다.¹⁰⁾

최근 해외에서는 소형 개질기를 이용한 수소공급방식의 생산효율성을 높이기 위해 많은 연구를 수행하고 있다. 그러나 그럼에도 불구하고 현재 주로 사용되고 있는 개질기는 구조적/경제적 문제로 인해 한번 가동하면 중지가 어렵다는 단점을 지니고 있다. LPG/CNG를 수소로 개질하기 위해서는 높은 온도(섭씨 900도)의 공정이 필수적이기 때문

에 개질기를 한번 가동하는데 12~24시간 정도의 준비시간을 요한다. 이러한 이유로 현재 기술로서의 개질기는 필요한 만큼만 가동시키는 것이 아닌 용광로처럼 24시간 내내 가동시켜야하는 비효율성이 존재한다.

2. 충전소 입지 선정 연구

기존에 시설의 입지 선정 시 사용된 전통적인 입지산정 모형으로는 Set Covering (Garfinkel & Nemhauser, 1972), Maximal Covering (Church & ReVelle, 1974), P-median (Hakimi, 1964) 등이 있다. 이러한 모형들은 후보 시설 입지 주변의 점(노드) 수요를 최소화하는 최적 입지를 선정 한다는 공통점이 존재한다. 하지만 Hodgson (1990)은 편의점과 같이 재화나 서비스를 충동적으로 구매하는 시설의 경우 시설 주변의 노드 수요가 아닌 시설을 통과하는 경로기반의 통행량을 고려하는 것이 바람직하다고 주장하였다. 고속도로 등 주요 간선 도로에 위치한 주유소나 대체연료충전 시설 역시 이에 해당한다. 고속도로에 위치한 주유소의 경우 시설 인근에 위치한 교통존(노드) 수요를 최대화 하는 입지가 아닌 해당 시설 앞을 지나는 통행량들을 최대화할 수 있는 입지를 선정하는 것이 바람직하다. 이에 Hodgson (1990)은 해당 시설을 통과하는 경로 통행량 기반의 입지 산정 모형인 Flow capacity location model (FCLM)을 개발하였다. 그러나 FCLM 역시 수소충전소의 최적 입지를 산정하는데 큰 문제점을 지니고 있다. 바로 차량의 1회 충전 시 항속거리를 고려하지 못한다는 점이다. FCLM 모형은 차량의 항속거리와 상관없이 시설을 통과하는

6) 수소산업 분야에서 돌파구를 찾음, SK증권사 리포트(http://file.mk.co.kr/imss/write/20171023164411__00.pdf), [2018.07.16]

7) 위 자료

8) 위 자료

9) Distributed Hydrogen Production via Steam Methane Reforming, DOE(https://www.hydrogen.energy.gov/docs/cs_distr_steam_methane_reform.doc), [2017.07.17]

10) 위 자료

통행량을 최대화 하는 모형이기 때문이다.

이러한 FCLM의 한계점에 착안하여 Kuby & Lim (2005)은 FCLM에 추가적으로 차량의 항속거리 개념을 도입하여 충전소 입지선정 모형인 Flow refueling location model (FRLM)을 개발하였다. Kuby & Lim (2005)은 수식화하기 어려운 차량의 항속거리 개념을 외생변수로 처리하여 직관적이고 선형적인 수리적 모형을 구축하였고, 그 결과 다수의 연구자들이 FRLM에 관심을 갖았다. Kim & Kuby (2012), Hosseini et. al. (2017), Upchurch et. al. (2009), MirHassani & Ebrazi (2012), Chung & Kwon (2015) 등은 FRLM 모형이 지닌 비현실적인 가정들을 완화하여 다양한 확장 FRLM 모형들을 제시하였다.

그럼에도 불구하고, 이러한 연구들은 대부분 이용자 측면, 혹은 공급자 측면에서 입지를 최적화 하는 모형이라는 점에서 한계를 지닌다. Wang & Wang (2010)의 연구와 같이 일부 연구의 경우 이용자의 편익과 공급자의 비용을 모두 고려하여 최적 입지를 산정할 수 있는 모형을 제시하였으나, 이는 대체연료충전소를 대상으로 한 일반화된 최적 입지 모형으로 수소 공급방식 등 수소 충전소의 특성을 제대로 고려하고 있지 못하고 있다. 이에 본 연구에서는 앞서 검토한 우리나라의 수소 공급방식과 함께 공급자 비용 및 이용자 수요를 모두 고려할 수 있는 수소충전소 최적 입지 선정 모형을 개발하고자 한다.

이에 앞서 기존 Kuby & Lim (2005)이 제시한 FRLM모형의 수리적 모형은 다음과 같다. 식(1)은 목적함수로 모든 기종점쌍의 왕복통행 가능한 통행량을 최대화함을 의미한다. 식(2)는 특정 기종점쌍 q 가 왕복통행 가능하려면 기종점쌍 q 를 왕복통행 가능케 하는 시설 조합이 운영되어야 함을 의미한다. 식(3)은 특정 시설조합 h 가 운영되려면 그 시설 조합에 해당하는 시설들이 설치되어야 한다는 것을 의미한다. 식(4)는 설치되어야 하는 시설수 조건을 의미하며, 마지막 식(5)는 결정변수들의 이진조건을 의미한다.

$$\max \sum_{q \in Q} f_q y_q \quad (1)$$

$$\text{subject to } \sum_{h \in H} b_{qh} v_h \geq y_q \quad \forall q \in Q \quad (2)$$

$$a_{hk} x_k \geq v_h \quad \forall h \in H; k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} x_k = p \quad (4)$$

$$x_k, v_h, y_q \in \{0, 1\} \quad \forall k, h, q \quad (5)$$

where,

q : OD쌍의 인덱스번호

Q : 모든 OD쌍 집합

f_q : q 의 통행량

y_q : q 의 왕복통행 가능여부 {0:불가능, 1:가능}

k : 후보 시설 입지(노드)

K : 모든 후보 시설 입지 집합

x_k : k 입지의 시설 설치여부 {0:미설치, 1:설치}

p : 설치할 시설수

h : 시설 조합의 인덱스번호

H : 모든 잠재 시설 조합 집합

a_{hk} : h 조합의 k 시설 포함여부

b_{qh} : h 조합이 q 를 왕복통행 가능케 하는지 여부

v_h : h 조합 내 모든시설 설치여부

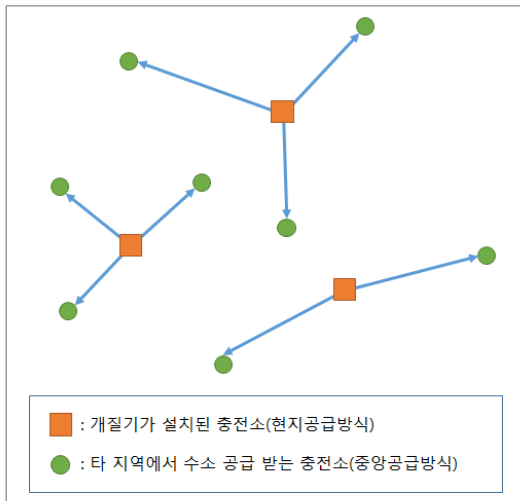
Ⅲ. 수소충전소 입지 선정 모형 개발

1. 시장 도입 단계에 적합한 수소공급방식

앞서 살펴본 바와 같이 수소충전소의 수소 공급 방식은 타 지역에서 대량생산된 부생수소를 파이프 라인이나 튜브 트레일러를 통해 공급받는 중앙공급 방식과 수소충전소에서 천연가스, LPG 등을 개질하여 직접 수소를 생산 공급하는 현지공급 방식으로 나눌 수 있으며, 그 중 타 지역에서 생산된 부생 수소를 공급받는 중앙공급방식은 수소 생산 시 대량으로 생산하기에 상대적으로 수소 생산비용이 저렴하다는 장점이 있으나 타 지역에서 수소충전소가 지 수소를 이송하는데 운송비용이 든다는 단점이 있어 수소 수요가 적은 수소차 시장 초입 단계에서는 적합하지 않다.

반면, 소형 개질기를 이용한 현지공급방식의 경우 공급지에서 바로 수소를 생산하기 때문에 운송 비용이 따로 들지 않는다는 장점이 있으나 현재 개질 기술로는 개질기를 24시간 운영해야 한다는 비효율성이 존재한다는 단점이 있다. 특히 수소차 시장 초입 단계에 수소 수요가 적을 경우에는 이러한 비효율성이 더욱 커질 수밖에 없다.

이에 본 연구에서는 소형 개질기를 통해 생산한 수소를 개질기를 보유하지 않은 인근 충전소에 공급하는 하이브리드(중앙&현지) 공급 방식을 검토하였다. 하이브리드 방식은 <그림 2>와 같이 물류에서 흔히 사용하는 Hub&Spoke 방식과 유사하게 거점 충전소에 소형 개질기를 설치하여 수소를 생산하고 인근 충전소에 공급하는 방식이다. 수소충전소 설치 비용이 약 30억 원¹¹⁾이고, 개질기 설치비용이 약 20억 원¹²⁾임을 감안한다면, 모든 충전소에 개질기를 설치하는 것보다 허브역할을 하는 거점 충전소에만 개질기를 설치한 후 인근 충전소에 수소를 공급하는 방식의 운영이 효율적일 것으로 판단된다.



〈그림 2〉 하이브리드형 수소공급 방식

따라서 수소 공급방식 중 본 연구에서 제시한 하이브리드(중앙&현지) 수소 공급방식을 대상으로 하여 이용자측면과 공급자측면을 모두 고려한 최적 입지 선정 모형을 검토하였다.

2. 수리적 모형 개발

개발한 모형을 수리적으로 표현하면 다음과 같다. 식(6)은 목적함수로 이용자 총 수익에서 개질기 설치비용, 충전소 설치비용, 수소 운송비용을 제외한 총 편익을 최대화함을 의미한다. 식(7)은 특정 기종점쌍 q 가 왕복통행 가능하려면 기종점쌍 q 를 왕복통행 가능케 하는 시설 조합이 운영되어야 함을 의미한다. 식(8)은 특정 시설조합 h 가 운영되면 그 시설 조합에 해당하는 시설들이 설치되어야 한다는 것을 의미한다. 식(9)는 설치된 충전소에만 개질기를 설치할 수 있다는 제약 조건을 의미한다. 식(10)은 개질기가 설치되어야 수소를 공급할 수 있다는 것을 의미한다. 식(11)은 설치된 충전소는 하나의 개질기에서만 공급받을 수 있다는 조건을 의미한다. 식(12)는 공급한 수소량은 개질기의 공급용량을 넘을 수 없다는 것을 의미한다. 마지막 식(13)과 식(14)는 결정변수들의 이진조건을 의미한다.

$$\max \alpha \sum_{q \in Q} f_q y_q - (\beta \sum_{i \in K} x_i + \gamma \sum_{i \in K} r_i + \sum_{i \in K} \sum_{j \in K} t_{ij} z_{ij}) \quad (6)$$

subject to

$$\sum_{h \in H} b_{qh} v_h \geq y_q \quad \forall q \in Q \quad (7)$$

$$a_{hi} x_i \geq v_h \quad \forall h \in H; i \in K_h \quad (8)$$

$$r_i \leq x_i \quad \forall i \in K \quad (9)$$

$$z_{ij} \leq r_i \quad \forall i \in K, \forall j \in K \quad (10)$$

11) 수소융합얼라이언스추진단(2017), 수송용 수소연료가격 설정 및 수급관리방안 연구, 산업통상자원부

12) LPG업계는 '수소車' 주목, 이투데이(<http://www.etoday.co.kr/news/section/newsview.php?idxno=1586481>), [2018.07.19]

$$\sum_{i \in K} z_{ij} = x_i \quad \forall j \in K \quad (11)$$

$$\sum_{j \in K} d_j z_{ij} \leq s_i r_i \quad \forall i \in K \quad (12)$$

$$x_i, r_i, v_h, y_q \in \{0, 1\} \quad \forall i \in K, h \in H, q \in Q \quad (13)$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in K, \forall j \in K \quad (14)$$

where,

- q : OD쌍의 인덱스번호
- Q : 모든 OD쌍 집합
- i : 후보 시설 입지(노드)
- K : 모든 후보 시설 입지 집합
- h : 시설 조합의 인덱스번호
- H : 모든 잠재 시설 조합 집합
- a_{hi} : h 조합의 i 시설 포함여부
- b_{qh} : h 조합이 q 를 왕복통행 가능케 하는지 여부
- f_q : q 의 통행량
- v_h : h 조합 내 모든시설 설치여부 (단, $h \in K$)
- x_i : i 충전소 설치여부 (단, $i \in K$)
- y_q : q 의 왕복통행 가능여부 (단, $q \in K$)
- r_i : i 충전소의 개질기 설치여부 (단, $i \in K$)
- z_{ij} : i 충전소에서 j 충전소로 운송여부 (단, $i, j \in K$)
- α : 인당 수익(원/명)
- β : 충전소 설치비용(원/개소)
- γ : 개질기 설치비용(원/개소)
- t_{ij} : i - j 거리에 따른 수송비용(원)
- s_i : i 충전소 개질기의 일일 총생산량(Nm^3)
- d_j : j 충전소의 일일 총수요량(Nm^3)

본 모형은 이용자 측면에서 이용수요를 최대화하고 공급자 측면에서 충전소/개질기 설치비용 및 수송공급에 필요한 수송운송비용을 최소화하는 입지 선정 모형이다.

이용자 측면을 고려하기 위해 Kuby & Lim (2005)이 제시한 FRLM모형을 활용하였으며, 공급자 측면을 고려하기 위해 수송거리를 최소화하는 입지모형인 P-median모형을 응용하였다.

본 모형은 목적함수와 제약식이 선형으로 이루어진 정수선형계획(Integer linear programming) 모델이다. 정수선형계획법은 분기한정법(Branch and bound)을 적용하여 유한 시간 안에 최적해를 도출해 낼 수 있다는 장점이 있다.

한편, 본 모형은 기존의 FRLM을 확장한 모형이기 때문에 FRLM에서 가정하는 기본 가정들 또한 동일하게 적용된다. Kim & Kuby (2012)가 제시한 FRLM의 기본가정을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 충전소의 잠재고객은 충전소 앞을 지나가며, 왕복통행 가능한 기종점 통행량이다.

둘째, 왕복통행 시 목적지로 이동하는 경로와 되돌아올 때의 경로는 동일하다.

셋째, 충전소는 노드에 위치한다. 만약 링크 상에 후보 충전소 입지를 정의할 경우, 링크 상에 노드를 추가로 정의할 수 있다.

넷째, 모든 차량은 동일한 항속거리를 지닌다.

다섯째, 차량의 연료소비량은 거리에 비례한다.

여섯째, 기점에서 출발하는 모든 차량은 연료탱크의 절반 수준의 연료를 지닌다.

IV. 사례 분석

1. 분석 개요

본 장에서는 개발된 수소충전소 입지 선정 모형을 활용하여 수소차의 지역간 장거리 이동성을 향상시키기 위한 전국 고속도로의 수소충전소 최적 입지를 검토하였다.

다만, 실용적인 입지 선정 결과를 산출하기 위해서는 현실적으로 확보 가능한 후보 부지를 대상으로 입지를 선정해야 한다. 이에 본 연구에서는 개발된 수소충전소 입지 선정 모형 적용에 앞서 현실적으로 수소충전소가 설치 가능한 후보 부지를 검토하였다. 전국 고속도로 상에 수소충전소 설치 가능 부지를 확보할 수 있는 방안은 다양하겠으나 본 연구에서는 고속도로에 스마트톨링시스템이 전면적으로 도입됨으로써 발생될 수 있는 고속도로 요금소 유희부지에 초점을 맞췄다.¹³⁾

스마트톨링 시스템은 ‘하이패스 또는 영상인식 기술을 활용한 무인 자동 요금수납 시스템’¹⁴⁾으로

향후 이러한 시스템이 본격적으로 도입되면 고속도로 내 대부분의 영업소는 무인화 되어 요금소가 차지하던 공간은 유헴부지로 남게 된다. 고속도로의 요금소는 도로 네트워크에서 가장 중요한 결절점상에 위치한다. 따라서 스마트톨링 도입으로 발생하는 요금소 유헴부지를 수소충전소로 활용한다면 국가기간망의 공공성을 확보함과 동시에 새로운 가치를 창출할 수 있다는 장점이 있다.

이에 본 장에서는 스마트톨링 시스템 도입으로 발생하는 고속도로 요금소 유헴부지를 검토한 후, 충전소 설치가 가능한 유헴부지를 대상으로 수소충전소 최적 입지를 선정하였다.

2. 후보 입지 선정

가. 고속도로 요금소 유헴부지 현황

스마트톨링 시스템 도입으로 발생하는 요금소 유헴부지를 수소충전소 부지로 활용하기 위해 전국 고속도로 요금소 유헴부지 현황을 조사하였다. 이때 요금소 유헴부지는 <그림 3>과 같이 “고속도로 본선 도로 부지 외 요금징수를 위해 확장된 도로 등의 부지”로 정의하였다.

먼저 스마트톨링 시스템 도입 시 설치 대상이 되는 고속도로 영업소의 현황을 파악하기 위해 한국도로공사 고속도로 공공데이터 포털사이트에서 제공하는 영업소 위치정보 API¹⁵⁾를 활용하였다. 2018년 3월 기준, 영업소 위치정보 API에 등록된 전국 고속도로 영업소 수는 394개인 것으로 나타났다.

그리고 조사된 고속도로 영업소의 유헴부지에

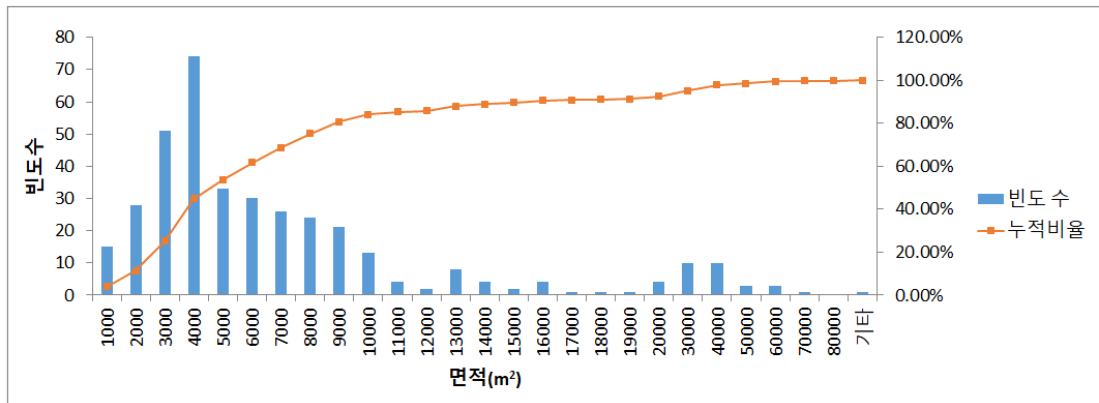
충전소 설치가 가능한지 검토하기 위해 각 영업소의 유헴부지의 면적을 산정하였다. 조사의 효율성을 고려하여 인터넷 포털사이트에 등록된 위성지도 정보를 활용하여 유헴부지 면적을 추정하였다. 다만, 공개된 위성사진 정보의 경우 전반적으로 해상도가 높지 않아 정확한 도로구역 및 차선을 인지하기 어렵고, 지역에 따라 위성사진의 해상도 차이가 존재하는 등 실무적으로 많은 어려움이 존재하기 때문에 조사된 유헴부지 면적은 개략적인 수치임과 동시에 향후 스마트톨링 도입으로 발생하는 실제 유헴부지 면적과는 차이가 있을 수 있음을 미리 밝힌다.



지도출처: 네이버지도(<http://map.naver.com>), [2018.09.08]

〈그림 3〉 동서울(중부선)영업소의 유헴부지 조사예시

- 13) 최근 일자리 문제와 개인정보보호 등의 문제로 스마트톨링 시스템의 전면 도입 대신 다차로 하이패스와 기존 요금소를 병행 추진하는 단계도입으로 선회함. 그러나 언젠가는 전면 도입될 것이라는 장기적 관점에서 전면 도입에 따른 전국의 요금소 유헴부지를 후보 대상으로 설정함
- 14) 달리던 속도 그대로 통과하는 다차로 하이패스 도입, 국토교통부(http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?id=95078761), [2018.03.03]
- 15) 영업소 위치정보, 한국도로공사 고속도로 공공데이터 포털(http://data.ex.co.kr/openapi/basicinfo/openApiInfoM?apiId=0123&serviceType=OPENAPI&keyWord=%EC%98%81%EC%97%85%EC%86%8C&searchDayFrom=2014.12.01&searchDayTo=2018.05.29&CATEGORY=&GROUP_TR=), [2018.03.06]



〈그림 4〉 요금소 유휴부지 면적 히스토그램

인터넷 포털사이트¹⁶⁾의 지도서비스에서 제공하는 위성사진 정보를 활용하여 요금소 유휴부지 면적을 산정하기 위해 앞서 조사된 전국의 394개의 고속도로 영업소의 위성사진을 검토한 결과, 2018년 4월~5월 기준으로 약 373개의 고속도로 영업소의 위성사진을 구득할 수 있었다. 따라서 373개의 고속도로 영업소를 대상으로 요금소 유휴부지 면적을 검토하였다.

영업소별 유휴부지 면적 분포는 〈그림 4〉와 같다. 유휴부지가 존재하는 요금소들의 전체 유휴부지는 약 2.76km^2 (약 84만평)인 것으로 나타났다. 이는 여의도 면적의 1/3에 달하는 면적이다. 영업소 평균 유휴부지 면적은 $7,402\text{m}^2$ 이며, 표준편차는 $9,106\text{m}^2$ 이다. 최대 유휴부지 면적은 $80,133\text{m}^2$ 로 중부선의 동서울 영업소의 요금소가 가장 큰 유휴부지를 지닌 것으로 나타났다. 그리고 유휴부지 면적을 $1,000\text{m}^2$ 단위로 계급을 나누어 빈도수를 살펴보면, $3,000\sim 4,000\text{m}^2$ 의 유휴부지를 지닌 영업소가 가장 많은 것(74개소, 전체 약 20%)으로 나타

났다. 그리고 대부분(약 84%)의 영업소가 $10,000\text{m}^2$ 이하의 유휴부지를 지닌 것으로 나타났다.

나. 수소충전소 설치를 위한 필요면적 추정

조사된 요금소 유휴부지는 면적과 공간적 형태가 다양하며, 충전소 설치 가능한 유휴부지와 설치 불가능한 유휴부지가 혼재되어 있다. 이에 유휴부지의 공간적 형태와 면적정보를 활용하여 전국 고속도로 영업소의 유휴부지 중 공간적으로 수소충전소 설치가 가능한 입지를 선별하는 작업이 필요하다.

이에 앞서 수소충전소를 설치하기 위해 필요한 최소면적을 검토하였다. 고압가스 안전관리법 시행규칙¹⁷⁾의 별표 5에서는 수소자동차 충전시설의 배치기준을 제시하고 있다. 저장식과 제조식 수소자동차충전소는 제1종 보호시설로 부터 최소 17m이상¹⁸⁾, 도로경계로부터는 5m이상, 사업소경계로부터 10m이상 떨어져 있어야 한다. 그러나 최근 특례기준¹⁹⁾이 제정되면서 방호벽을 설치할 경우에는 보호시설과의 거리를 8m로 완화할 수 있게 되었다.

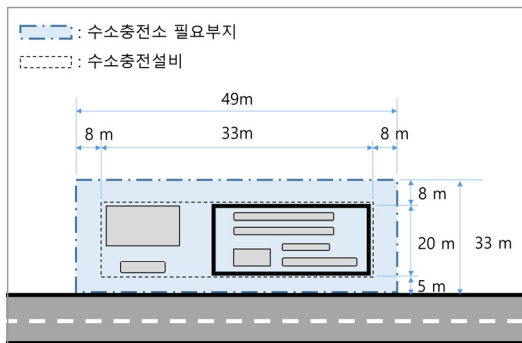
16) 네이버 지도(<http://map.naver.com>), [2018.09.08]

17) 고압가스 안전관리법 시행규칙, 법제처(<http://www.law.go.kr/법령/고압가스안전관리법시행규칙>), [2018.09.20]

18) 충전소의 처리능력 및 저장능력이 1만 이하일 경우

19) 용·복합, 패키지형 및 이동식 자동차충전소 시설기준 등에 관한 특례기준, 법제처(<http://www.law.go.kr/행정규칙/용·복합, 패키지형이동식자동차충전소시설기준등에관한특례기준>), [2018.09.20]

국내 설치된 수소충전소 충전설비의 평균 면적이 약 $660\text{m}^2(33\text{m} \times 20\text{m})$ 이고²⁰⁾ 요금소의 유희부지는 최소 한 면이 도로에 인접하고 있으며 방호벽을 설치한다는 것을 감안한다면, 요금소 유희부지에 수소충전소를 설치하기 위한 최소 부지면적은 <그림 5>와 같이 정의될 수 있다. 이때 면적은 약 $1,617\text{m}^2(49\text{m} \times 33\text{m})$ 이다.



〈그림 5〉 수소충전소 필요면적 추정

다. 충전소 설치가 가능한 유희부지 선정

조사된 영업소별 요금소 유희부지의 충전소 설치 가능 여부를 판단하기 위해서는 각 유희부지 면적과 앞서 검토된 최소 필요면적을 비교하는 방법이 있을 수 있다. 그러나 단순히 면적만 비교하게 되면 최소 면적기준을 만족하지만 짧은 변의 길이가 상대적으로 작아 충전소 설치가 불가능한 유희부지 또한 설치 가능한 유희부지로 분류될 수 있다. 따라서 공간적인 충전소 설치 가능 여부를 판단하기 위해서는 최소 면적 기준과 유희부지의 공간적 형상을 동시에 고려해야 할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 공학적 관점에서 분석가의

임의성을 배제하고 객관성을 높이기 위해 GIS 프로그래밍 기법을 이용하였다. 프로그래밍 기법과 조사된 요금소 유희부지의 GIS 형상 정보를 이용하여 부지 내 최대 사각형 면적을 산출한 후, 산출된 유희부지 내 최대 사각형 면적 대비 수소충전소 최소 설치면적 비교와 동시에 최대 사각형의 짧은 변의 길이와 수소충전소 최소설치면적의 짧은 변 길이를 비교함으로써 충전소 설치 가능 여부를 판단하였다.

본 연구에서는 무작위 대입 접근 및 가지 치기방식을 사용한 D3plus의 근사 최대사각형 산정 알고리즘을 사용하여 유희부지의 최대 사각형 면적을 산정하였다.²¹⁾ D3plus의 최대 직사각형 산정 알고리즘은 전역 최적해를 보장하는 것은 아니지만 직관적이며 구현이 쉽고 수행속도가 빠르다는 장점이 있다. D3plus의 최대 직사각형 산정 알고리즘의 의사코드를 통해 개략적으로 살펴보면 <그림 6>과 같다.

D3plus의 최대 직사각형 산정 알고리즘을 이용하여 조사된 영업소별 유희부지 내 최대 직사각형 면적을 산정하였다. 그리고 산출된 직사각형 중 짧은 변의 길이가 33m 이상이며, 최대 직사각형 면적이 $2,000\text{m}^2$ 이상인 영업소를 산출하였다.²²⁾ 전국 373개 영업소 중 유희부지가 있는 것으로 조사된 약 364개 영업소를 대상으로 충전소 설치 가능 여부를 판단한 결과, 그 중 19개 영업소가 최소 면적 기준 및 최소 폭 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

충전소 최소설치면적 기준을 만족하는 19개의 영업소는 <표 1> 및 <그림 7>과 같다. 최소면적기준을 만족하는 영업소는 대부분 수도권과 부산권에 집중되어 있었다. 이는 많은 교통량이 밀집되는 대도시권을 연결하는 고속도로 영업소가 많은 교통량

20) 박지원·허운실·강승규(2017), 국내 LPG 충전소 내 수소 융복합충전소 구축 가능 부지 연구, 한국수소 및 신에너지학회 논문집 제28권 제6호

21) D3plus는 오픈소스기반의 데이터 분석 및 시각화 툴로써, 다각형의 최대사각형 산정 알고리즘이 공개됨.

22) 앞서 정의된 수소충전소 최소설치면적은 $1,617\text{m}^2$ 이지만, 조사된 면적의 오차를 고려하기 위해 보수적 관점에서 후보시설 설치 기준을 $2,000\text{m}^2$ 으로 상향 조정함

```

// 다각형 내 임의의 점  $n$ 개 생성
 $P = \{\emptyset\}$ 
for  $i = 0$  to  $n$  step 1
    Create random point  $p$  in polygon
    Add  $p$  to  $P$ 
// 방위각을 변경하면서 해당 방위각의 최대 사각형 산출
for orientation  $\alpha = 0$  to 180 step  $a$ 
    for each point  $p$  in  $P$ 
        // 다각형 내 임의의 점 좌표정보를 이용하여 사각형 중심점 생성
         $(c_h, c_w) = \text{CalculateCenterPoint}(p, \alpha)$ 
         $C = \{c_h, c_w\}$ 
        for  $c$  in  $C$ 
            // 임의의 점에서 해당 방위각 및 방위각 및 수직으로 접하는 다각형 점점들을
            // 좌표 정보를 이용하여 사각형의 최소 및 최대 중횡비를 추정
             $aRatios = \text{CreateRatioRange}(p, c_h, c_w, \alpha, z)$ 
            for each aspect ratio  $r$  in  $aRatios$ 
                //중심점과 방위각, 중횡비를 이용하여 사각형 생성
                 $rect = \text{CreateRectangle}(c_h, c_w, \alpha, r)$ 
                //사각형이 다각형 내에 위치하며, 최대면적보다 클 경우 최대사각형정보 기록
                if  $rect$  is inside a polygon && area of  $rect >$  maximum area  $w$  then
                     $w = \text{area of } rect$ 
                     $maxRect = rect$ 

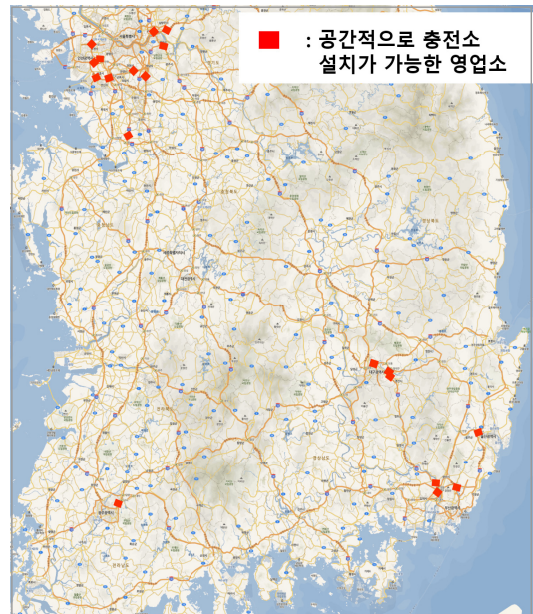
```

출처 : Largest rectangle in a polygon, D3plus(<https://d3plus.org/blog/behind-the-scenes/2014/07/08/largest-rect/>)을 바탕으로 저자 작성

〈그림 6〉 근사된 최대 직사각형 산정 알고리즘(D3plus)

〈표 1〉 공간적으로 충전소 설치 가능한 영업소 현황

영업소명	고속도로	최소 길이 (m)	최대사각형 면적(m ²)
서울	경부선	49.51	19,308
청계	서울외곽순환선	66.40	15,885
동서울	중부선	60.73	15,549
서서울	서해안선	41.34	14,261
대구	중앙선(대구부선)	39.44	13,980
남양주	서울양양선	49.09	13,977
부산	경부선	37.17	12,093
구리남양주	서울외곽순환선	35.96	12,079
대동	남해제2지선	35.71	11,774
군자	영동선	42.74	11,109
김해부산	중앙선(대구부선)	36.76	10,676
남인천	제2경인선	39.44	9,867
북평택	평택화성선	34.32	9,784
동광주	호남선	35.52	8,538
울산	울산선	35.29	8,508
북대구	경부선	44.21	7,631
인천	경인선	34.25	7,176
시흥	서울외곽순환선	35.15	6,384
동대구	중앙선(대구부선)	34.81	4,256



지도출처: 네이버 지도(<http://map.naver.com>), [2018.09.08]

〈그림 7〉 공간적으로 충전소 설치 가능한 영업소 현황

을 원활히 처리하기 위해 상대적으로 큰 규모의 요금소 처리시설을 보유하고 있기 때문인 것으로 추정된다.

3. 수소충전소 최적 입지 선정

앞서 산정한 19개의 후보 충전소 입지를 대상으로 본 연구에서 개발한 입지 최적화모형을 적용하여 고속도로의 수소충전소 최적 입지를 선정하였다.

가. 입력 파라미터 설정

모형적용에 앞서 모형에 필요한 입력 파라미터를 검토하면 다음과 같다.

① 고속도로 이용자의 기종점간 통행량(f_q)

고속도로 이용자의 기종점간 통행량을 설정하기 위해서 본 연구에서는 한국도로공사에서 배포하는 고속도로 영업소간 기종점 통행량 정보²³⁾를 활용하였다. 2018년 4월 17일 기준, 401개 영업소간 기종점 통행량 정보를 차량 유형별로 구분하여 제공하고 있다. 그 중 테스트 영업소 및 물리적으로 같은 영업소이나 논리적으로 구분한 영업소 등을 삭제 및 통합하여 388개 영업소간 기종점 통행량을 대상으로 하였다. 그리고 모형의 효율성을 고려하여 150,156개(388X387)의 OD쌍 중 실제 통행량이 발생된 52,423개의 OD쌍만을 추출하여 모형에 적용하였다. 또한 한국도로공사에서 제공하고 있는 기종점 통행량정보는 차종별 통행량 정보이지만 본 연구에서는 모든 차종을 합한 총 통행량 정보를 사용하였다. 조사된 모든 OD쌍의 총 일일 통행량은

3,232,948 통행인 것으로 확인된다.²⁴⁾

② 충전소 운영자의 차량 당 수익(α)

충전소 운영자가 고속도로 이용자 1차량(통행)을 처리함으로써 발생하는 수익이다. 최근 개발되어 판매되고 있는 수소차²⁵⁾의 수소충전용량은 6.33kg이며, 판매되는 수소비용이 8,000원/kg²⁶⁾이라고 가정했을 때 1대의 수소차량의 충전비용은 약 5만 원이다. 본 연구에서는 충전소 운영자가 취하는 이익률이 10%이며, 모든 고속도로 이용자는 연료를 완충한다는 가정 하에 충전소 운영자의 차량 당 수익을 약 5천원으로 설정하였다. 한편, 특정 충전소의 일일총수익을 산출하기 위해서는 본선교통량 대비 충전소 이용률을 알아야 한다. 이를 위해 한국도로공사(2014)에서 조사한 주유소/충전소 이용률(1.87%) 정보를 활용하였다. 주유소/충전소 이용률은 한국도로공사(2014)에서 제시한 조사된 주유소/충전소 이용자수 총합(83,748대/일)에서 본선 교통량 총합(4,473,850대/일)을 나눈 값이다.

③ 충전소 및 개질기 설치비용(β , γ)

수소충전소는 설치하려는 수소 저장소의 규모에 따라 다양하다. 수소융합얼라이언스추진단(2017)에 따르면 현재 구축되어있는 수소충전소의 구축비용은 26~31억 원 정도인 것으로 나타났다. 개질기 비용 역시 비슷하다. 규모에 따라 설치비용은 천차만 별이지만, 알려진 바에 따르면 소형 개질기의 설치비용은 약 20억 원 정도인 것으로 확인되었다.²⁷⁾ 이에 본 연구에서는 충전소 및 개질기 설치비용을 각각 30억 원, 20억 원으로 설정하였다.²⁸⁾ 또한 각

23) 영업소간 교통량: 한국도로공사(<http://data.ex.co.kr/portal/fdwn/view?type=TCS&num=35&requestfrom=dataset>), [2018.04.17]

24) 장기적 관점에서 대부분 수소차 통행이 이루어 질 것이라는 긍정적 가정에 모든 통행을 수소차 통행으로 가정함

25) 현대 넥쏘(2018년 형) 기준

26) 비싼 수소운반비, 어떻게 낮추나, 중앙일보(<https://news.joins.com/article/22638581>), [2018.07.16]

27) LPG업계는 '수소車' 주목, 이투데이(<http://www.etoday.co.kr/news/section/newsview.php?idxno=1586481>), [2018.07.19]

28) 수소 에너지 등 미래 친환경 에너지 사업을 하고 있는 해외 기업의 실무진 인터뷰(2018.02.08, 2018.04.16) 결과, 충전소 및 개질기 설치비용은 계약 규모(개수, 용량 등)에 따라 상이하나 개략 추정시 각각 30억, 20억원임을 확인함

시설의 내구 연한을 20년(730일)으로 가정하여 일일 감가상각비(정액법)를 수소충전소, 개질기 각각 41만원/일, 27만원/일로 설정하였다.

④ 개질기의 총 생산량 및 충전소 일일 수요량(s_i, d_j)

배정환·정경화(2007)에 따르면, 소형 개질기의 일일 총 생산량(용량)은 약 432kg(480kg)인 것으로 확인되었다. 한편 수소충전소의 일일 수소수요량은 현재 시장이 활성화되지 않아 실측한 수소수요량을 알기 어렵기 때문에 현재 구축되어 있는 수소충전소의 수소용량값을 사용하였다. 수소융합얼라이언스추진단(2017)에 따르면 현재 구축되어 있는 수소충전소의 수소용량은 약 160kg/일인 것으로 확인되었다. 즉, 1개의 개질기당 3개의 충전소를 담당할 수 있을 것으로 판단되므로, 모형의 효율성을 고려하여 충전소의 일일수요량은 1단위, 개질기의 최대 일일공급량(용량)은 3단위로 설정하였다.²⁹⁾

⑤ 수소 수송비용(t_{ij})

개질기가 설치된 충전소에서 수소를 공급받는 경우 트레일러를 이용한 수소 수송비용은 일반적으로 트레일러 운송업자와의 상호간 장기계약을 통해 가격이 설정되어 명확한 기준을 제시하기 어렵다.³⁰⁾

일반적으로 화물운송요금은 화물의 종류, 무게, 이동거리 등에 따라 상이하지만 주로 화물 무게 및 이동거리에 따라 가격이 크게 변동되는 것에 착안하여, 수소 수송비용을 <표 2>와 같이 거리에 따라 설정하였다. 이는 일반화물운송비용이 거리에 따라 증가하고, 200bar 튜브 트레일러의 평균 일일 운영비가 22만원³¹⁾ 인 것을 감안하여 거리에 따라 임의 설정한 값을 미리 밝힌다.

<표 2> 거리에 따른 수소 수송비용

구분	~100km	~200km	~300km	300km~
운송비용	15만원	20만원	25만원	30만원

주: 거리에 따른 일반화물운송비용과, 200bar 튜브 트레일러의 평균 일일 운영비가 22만원 인 것을 감안하여, 거리에 따라 임의 설정한 값임

⑥ 기종점 쌍 별 최단경로를 왕복 통행 가능케 하는 후보 시설 조합 관련 계수(b_{gh}, a_{hk})

지금까지 언급한 파라미터 외에도 기종점 쌍 별 최단경로를 왕복통행 가능케 하는 후보 시설 조합 관련계수인 b_{gh}, a_{hk} 가 필요한데, 이는 Kuby & Lim (2005)이 제시한 b_{gh}, a_{hk} 생성 알고리즘을 통해 산정하였다. 이때, 특정 시설 조합이 해당 경로를 왕복통행 가능하게 하는지를 검토하기 위해서는 수소차량의 항속거리를 결정해야 하는데, 본 연구에서는 보수적 관점에서 400km로 가정하였다.³²⁾ Kuby & Lim (2005)이 제시한 b_{gh}, a_{hk} 생성 알고리즘을 요약하면 <그림 8>과 같다.

나. 모형 적용

19개 후보 충전소의 최적 입지를 검토한 결과는 <표 3> 및 <그림 9>와 같다. 분석 결과, 19개의 후보입지 중 13개의 입지에 충전소를 설치하고, 5개의 충전소에 개질기를 설치하는 것이 효율적인 것으로 나타났다.

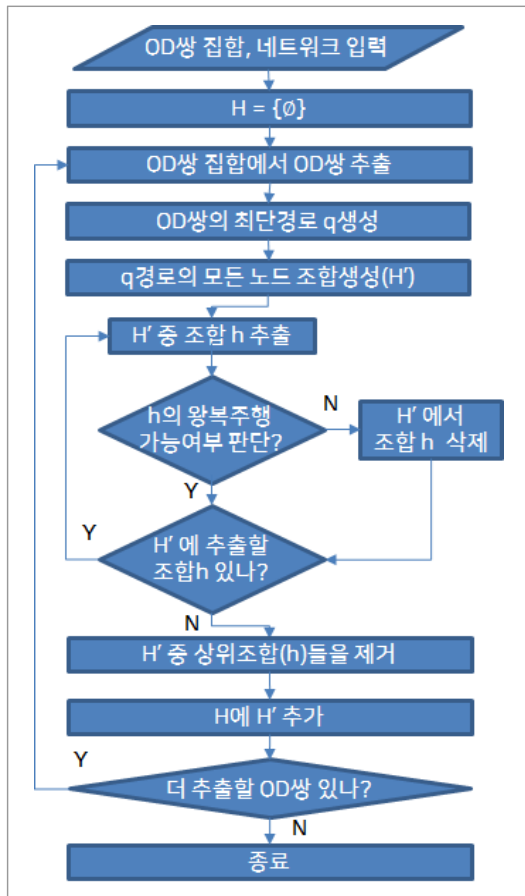
충전소의 경우 수도권 인근 5개와 부산권 1개를 제외한 나머지 후보입지에 설치하는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 충전소는 특성상 네트워크 중심에 위치할수록 더 많은 통행자들이 경유할 수 있기 때문에, 상대적으로 네트워크 외곽에 위치하며 통

29) 수소 에너지 등 미래 친환경 에너지 사업을 하고 있는 해외 기업의 실무진 인터뷰(2018.02.08, 2018.04.16) 결과, 개질기의 평균 처리 충전소 수는 약 3개인 것을 확인함

30) 수소 에너지 등 미래 친환경 에너지 사업을 하고 있는 해외 기업의 실무진 인터뷰(2018.02.08, 2018.04.16) 결과임

31) 수소융합얼라이언스추진단(2017) 연구에서 추정한, 용량이 250kg/일인 충전소의 250bar 튜브 트레일러 연간운영비(300일/년 기준) 66백만원을 활용하여 계산한 값임

32) 현대자동차의 넥쏘(2018년형)의 항속거리는 593~609km이나 보수적 관점에서 전기차 항속거리 수준인 400km로 설정



출처: Kuby & Lim (2005)를 바탕으로 저자 작성

〈그림 8〉 왕복주행 가능시설 조합 생성 알고리즘

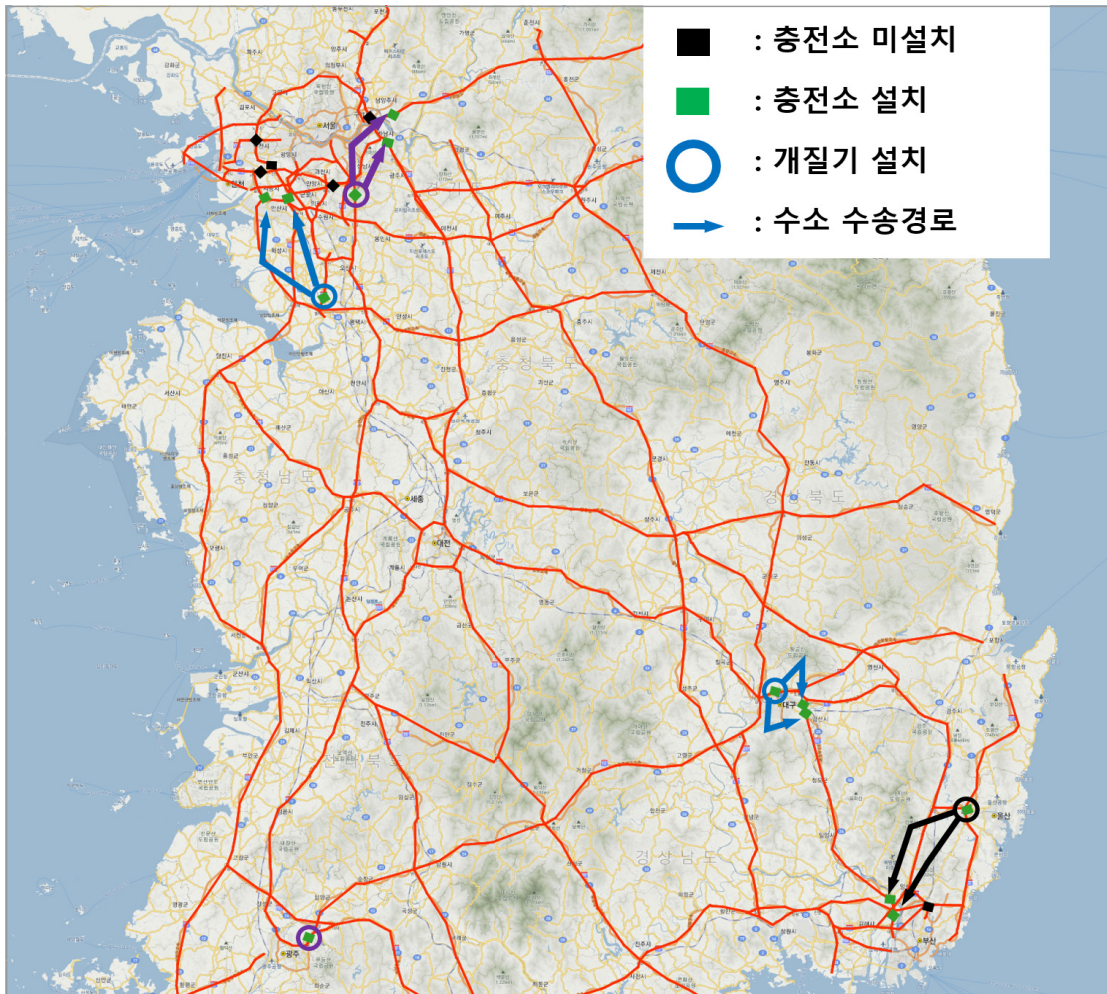
과교통량이 작은 후보입지들이 제외된 것으로 보여진다. 참고로 제외된 후보지들의 대부분은 도시고속도로 상에 위치한 영업소이다.

선정된 13개의 후보지에 충전소를 설치하게 되면, 전체 고속도로 기종점쌍 통행량(3,232,948명) 중 약 37.6%인 1,215,466명의 고속도로 이용자가 왕복통행 가능케 된다. 참고로 19개의 후보 입지에 모두 수소충전소를 설치하게 되면 전체 통행량 중 약 37.8%인 1,221,506명의 통행량이 왕복통행 가능하다는 것을 감안한다면, 19개의 충전소를 모두 설치하지 않고, 13개의 입지만 충전소를 설치하는 것은 경제효율적인 것이라 판단된다.

〈표 3〉 최적입지 분석결과

영업소명	충전소 설치여부	개질기 설치여부	수소 공급 영업소
서울	O	O	서울, 동서울, 남양주
청계	X	X	
동서울	O	X	
서서울	O	X	
대구	O	X	
남양주	O	X	
부산	X	X	
구리남양주	X	X	
대동	O	X	
군자	O	X	
김해부산	O	X	
남인천	X	X	
북평택	O	O	서서울, 군자, 북평택
동광주	O	O	동광주
울산	O	O	대동, 김해부산, 울산
북대구	O	O	북대구, 동대구, 대구
인천	X	X	
시흥	X	X	
동대구	O	X	

개질기는 충전소가 설치된 입지 중 수소운송거리를 고려하여 적절히 산포되도록 설치하는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 이는 수소운송거리를 고려하여 개질기 위치가 선정되기 때문에 당연한 결과이다. 다만, 개질기의 위치는 수소운송비용 산정정책에 따라 민감하게 변동될 수 있다. 현재는 현실성을 최대한 반영하기 위해 실무적으로 운영되고 있는 운송비용 산정정책과 유사하게 운송거리를 크게 4단계로 구분하여 운송비용을 산정하기 때문에, 수도권 인근에서 선정된 개질기는 가장 가까운 거리의 충전소에 수소를 공급하는 것이 아닌 동일운송단가의 거리범위 안의 충전소에 수소를 공급하도록 분석되었지만, 만약 운송거리등급에 따라 비용을 산정하지 않고 운송거리에 선형비례하게 비용을 산정하게 되면 가장 가까운 거리의 충전소에 수소를 공급하도록 하는 개질기 위치가 선정될 것이다. 또한 향후 트레일러 운송업자와의 장기계약 등의



지도출처: 네이버 지도(<http://map.naver.com>), [2018.09.08]

〈그림 9〉 수소충전소 및 개질기 최적입지 분석결과

이유로 수소운송단가가 변동되어도 개질기의 최적 위치는 달라질 수 있기 때문에 주의가 필요하다.

그리고 현재 분석에서는 하나의 개질기가 담당할 수 있는 최대 충전소 수(용량)를 3개로 한정하였기 때문에 대체적으로 하나의 개질기는 개질기가 설치된 충전소와 다른 두 곳의 충전소에 수소를 제공하도록 분석되었다. 그러나 동광주 영업소의 경우 주변에 수소를 공급받지 못한 충전소가 존재하지 않아 수소 운송 없이 스스로 자급자족하는 것이 효율적인 것으로 나타났다. 이는 본 모형의 특성에

의한 것으로 개질기의 수소 공급대안을 개질기가 설치된 타 충전소에서 공급받거나 스스로 개질기를 설치하여 자급자족하는 것으로 제한하였기 때문이다. 따라서 실제 실무에서는 동광주 영업소와 같이 수소 운송 없이 개질기 설치 후 자급자족하는 대안의 경우, 개질기를 설치하여 자급자족하는 대안과 석유화학단지 등 특정 지역에서 대량생산된 부생수소를 튜브 트레일러를 통해 공급받는 대안 간의 경제성을 따져 적절히 적용해야 할 것이다.

V. 결론

본 연구에서는 수소충전 인프라 구축 초기단계에 적합한 수소 공급방식인 하이브리드(중앙&현지)형 방식을 제시하고, 하이브리드형 수소공급방식 하에서 공급자 비용 및 이용자 수요를 모두 고려할 수 있는 수소 충전소 최적 입지 선정 모형을 개발하였다. 그리고 스마트톨링 시스템 도입으로 발생하는 전국 고속도로 요금소 유희부지를 대상으로 수소충전소 최적 입지를 선정하였다.

유희부지가 발생될 것으로 추정되는 전국 364개 영업소 중 수소충전소 설치가 가능한 19개 영업소를 대상으로 최적 입지를 탐색한 결과, 13개의 충전소를 설치하고, 그 중 5개의 충전소에 개질기를 설치하는 것이 최적인 것으로 나타났다. 선정된 13개의 후보입지에 충전소를 설치하게 되면, 전체 고속도로 기종점쌍 통행량(3,232,948명) 중 약 37.6%인 1,215,466명의 고속도로 이용자가 왕복통행이 가능하게 되는 것으로 추정되었다. 19개의 후보입지에 모두 수소충전소를 설치하게 되면 전체 통행량 중 약 37.8%인 1,221,506명의 통행량이 왕복통행 가능하다는 것을 감안한다면, 19개의 충전소를 모두 설치하지 않고 13개소에만 충전소를 설치하는 것은 경제적으로 효율적인 것이라 판단된다.

한편, 고속도로 요금소의 유희부지는 높이가 짧고 밀변이 긴 사다리꼴 형태를 띠고 있는 것이 대부분이어서 수소충전소 최소설치면적 기준에 준하는 유희부지는 많지 않은 것으로 분석되었고, 그 결과 전체 고속도로 통행량 중 최대 37%만 처리할 수 있는 제한적인 대안만이 제시되었다. 따라서 향후 고속도로 요금소 유희부지의 수소충전소 활용도를 높이기 위해서는 소형의 수소충전소 개발을 통해 설치 가능한 유희부지 수를 늘리거나, 고속도로 요금소 유희부지 이외에 휴게소 유희부지를 추가적으로 고려하는 대안을 검토하여 모든 고속도로 기종점쌍 통행자가 왕복통행 가능한 수소충전소 최적 입지 연구가 필요할 것으로 판단된다.

※ 본 논문은 한국교통연구원에서 2018년 수행한 “스마트톨링 도입에 따른 고속도로 여유공간의 효율적 활용방안” 연구를 요약하여 정리한 것입니다.

참고문헌

1. 고압가스 안전관리법 시행규칙, 법제처(<http://www.law.go.kr/법령/고압가스안전관리법시행규칙>), [2018.09.20]
2. 네이버지도(<http://map.naver.com>), [2018.09.08]
3. 달리던 속도 그대로 통과하는 다차로 하이패스 도입, 국토교통부(http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?id=95078761), [2018.03.03]
4. 도로위 수소폭탄 수소차, 안전·친환경·경제성 확보됐나, 투데이신문(<http://www.ntoday.co.kr/news/articleView.html?idxno=65466>), [2019.03.22]
5. 박지원·허윤실·강승규(2017), 국내 LPG 충전소 내 수소 융복합충전소 구축 가능 부지 연구, 한국수소 및 신에너지학회 논문집 제28권 제6호
6. 비싼 수소운반비, 어떻게 낮추나, 중앙일보(<https://news.join.com/article/22638581>), [2018.07.16]
7. 선제적 충전인프라 구축으로 수소사회 앞당긴다, 대한민국 정책브리핑(<http://www.korea.kr/policy/pressReleaseView.do?newsId=156185999>), [2018.07.16]
8. 수소산업 분야에서 돌파구를 찾음, SK증권사 리포트(http://file.mk.co.kr/imss/write/20171023164411_00.pdf), [2018.07.16]
9. 수소융합얼라이언스추진단(2017), 수송용 수소연료가격 설정 및 수급관리방안 연구, 산업통상자원부
10. 수소충전 가능 지역, (사)한국수소산업협회(<http://www.h2.or.kr/map.html>), [2018.07.16]
11. 수소충전소 정보, (사)한국수소산업협회(http://www.h2.or.kr/h2_01_4.html), [2018.02.03]
12. 영업소 위치정보, 한국도로공사 고속도로 공공데이터 포털(http://data.ex.co.kr/openapi/basicinfo/openApiInfoM?apiId=0123&serviceType=OPENAPI&keyWord=%EC%98%81%EC%97%85%EC%86%8C&searchDayFrom=2014.12.01&searchDayTo=2018.05.29&CATEGORY=&GROUP_TR=), [2018.03.06]
13. 영업소간 교통량, 한국도로공사(<http://data.ex.co.kr/portal/fdwn/view?type=TCS&num=35&requestfrom=dataset>), [2018.04.17]
14. 용·복합, 패키지형 및 이동식 자동차충전소 시설기준 등에 관한 특례기준, 법제처(<http://www.law.go.kr/행정규칙/용·복합,패키지형및이동식자동차충전소시설기준등에관>

한특례기준), [2018.09.20]

15. 전세게 최장 기록! 현대차 ‘넥쏘’의 항속거리는?, 네이버 포스트(<http://naver.me/5HFoF1fa>), [2018.07.16]
16. Chung, S. H. and Kwon, C., “Multi-period planning for electric car charging station locations: A case of Korean Expressways”, *European Journal of Operational Research*, 242(2), 2015, pp. 677-687.
17. Church, R. and ReVelle, C., “The maximal covering location problem”, *Papers of the Regional Science Association*, 32 (1), Springer-Verlag, 1974, pp. 101-118.
18. Distributed Hydrogen Production via Steam Methane Reforming, DOE(https://www.hydrogen.energy.gov/docs/cs_distr_steam_methane_reform.doc), [2017.07.17]
19. Garfinkel, R. S. and Nemhauser, G. L., *Integer Programming*, John Wiley & Sons, New York, 1972.
20. Hakimi, S. L., “Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph”. *Operations research*, 12(3), 1964, pp. 450-459.
21. Hodgson, M. J., “A Flow-Capturing Location-Allocation Model”. *Geographical Analysis*, 22(3), 1990, pp. 270-279.
22. Hosseini, M., MirHassani, S. A. and Hooshmand, F., “Deviation-flow refueling location problem with capacitated facilities: Model and algorithm”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 54, 2017, pp. 269-281.
23. Kim, J. G. and Kuby, M., “The deviation-flow refueling location model for optimizing a network of refueling stations”, *International journal of hydrogen energy*, 37(6), 2012, pp. 5406-5420.
24. Kuby, M. and Lim, S., “The flow-refueling location problem for alternative-fuel vehicles”, *Socio-Economic Planning Sciences*, 39(2), 2005, pp. 125-145.
25. Largest rectangle in a polygon, D3plus(<https://d3plus.org/blog/behind-the-scenes/2014/07/08/largest-rect/>), [2018.8.28]
26. LPG업계는 ‘수소車’ 주목, 이투데이(<http://www.etoday.co.kr/news/section/newsview.php?idxno=1586481>), [2018.07.19]
27. MirHassani, S. A. and Ebrazi, R., “A flexible reformulation of the refueling station location problem. *Transportation Science*”, 47(4), 2012, pp. 617-628.
28. Upchurch, C., Kuby, M. and Lim, S., “A Model for Location of Capacitated Alternative-Fuel Stations”, *Geographical Analysis*, 41(1), 2009, pp. 85-106.
29. Wang, Y. W. and Wang, C. R., “Locating passenger vehicle refueling stations”. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(5), 2010, pp. 791-801.