

통행패턴을 고려한 대체연료 충전소 최적 입지선정*

Design of Optimal Refueling Network for Alternative-Fuel Vehicles Considering Travel Patterns

김종근**

Jong-Geun Kim

Abstract

Strategic development planning for an alternative-fuel refueling infrastructure is essential in accelerating the transition to a sustainable transportation system. This paper develops a spatial decision support system (SDSS) that integrates geographic information systems and an optimization model that locates refueling stations to refuel maximum volume of vehicle flows. Decision makers can use the SDSS when preparing data, exploring assumptions on driver behaviors or vehicle's driving ranges, evaluating tradeoffs, and reviewing the results. Using the SDSS this paper analyzes a variety of scenarios applied to a statewide network of Korea and develops a planning strategy that builds stations in clusters that can be connected later in multiple phases.

키 워 드 ▪ 최적입지, 네트워크 설계, 유동 주유, 대체연료차, 통행패턴

Keywords ▪ Optimal Location, Network Design, Flow Refueling, Alternative Fuel Vehicles, Travel Pattern

I. 서 론

1. 연구배경과 목적

화석연료에 기반한 교통체계로 야기되는 문제점을 해결하기 위한 방안 중 하나로 대체 에너지 자동차에 기반한 지속가능한 교통체계 구축 방안에 대한 관심이 높아지고 있다. 여기서 대체 에너지는 (청정)전기, 수소연료전지, 생물연료, 천연가스 등을 포함한다. 교통 관련 환경문제의 본질적인 해결방안이 될 수 있는 가능성에도 불구하고 대체연료 자동차가 현재 널리 보급되지 못하는 이유는 차량 개발의 기술적 문제(개발수준, 속도와 도로종류, 도로기하), 차량운행의 법적 문제, 인프라의 부족 등을 들 수 있다. 이 중 본 연구는 충전소를 비롯한

신재생 에너지 공급 기반시설이 미비하다는 점에 주목한다. 특히 미비한 기반시설은 반대급부로 대체연료 자동차 수요 촉진을 저해한다. 이러한 대체연료차 수요 확산과 기반시설 확충 간의 이른바 “닭이 먼저냐 달걀이 먼저냐”의 문제 해결은 대체연료 기반 교통체계 도래를 촉진하기 위해서 필요하다.

기존 연구에서는 효율적인 기반시설 구축전략을 제안하기 위해 고전적 시설물 입지모형을 활용하였다. 하지만 이러한 고전 입지모형은 대체연료차를 위한 시설물 입지 선정에 직접 적용하기에는 부적합한데 그 이유는 대체연료차의 기술적 특성과 운전자의 일상적 통행패턴, 높은 시설물 건설비용을 종합적으로 고려하지 못하기 때문이다.

우선 대체연료차 충전시설을 위한 효율적인 입지

* 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음(NRF-2011-354-B00122)

** 서울대학교 지리교육과 (주저자: jgkim25@snu.ac.kr)

선정 모델은 배터리 전기차 및 수소 연료전지차의 짧은 주행거리를 각별히 고려해야 한다. 현재 기술 발달 상태 및 전망에 따르면 대체연료차의 일회 충전/주유 후 주행거리는 혁신적으로 연장되기 어렵다. 따라서 운전자의 일상적 장거리 통행을 온전히 마칠 수 있기 위해서는 수차례의 충전/주유가 필요하며 그 시설물의 간격이 적절해야 한다.

이와 더불어 고가의 시설물 건설비용을 고려하면 시설물 수는 제한되게 되는데 입지선정 모델은 최대의 운전자가 편리하게 접근할 수 있는 효율적인 충전 네트워크를 제안하여야 한다. 이 때 충전 네트워크는 한정된 수의 시설물이 유기적으로 연계되어 사용자에게 서비스를 제공해야 한다. 이 때 고려하는 시설물의 접근 편의성에 대해 기존 입지 모델은 통행 기종착지점에 근접한 정도로 상정하고 있는데, 이는 운전자가 주유 및 충전만을 위한 특별한 통행을 하는 것으로 해석될 수 있으므로 이러한 가정은 비현실적이다. 따라서 운전자의 통행패턴을 고려하여 일상적 통행 경로 상에 주어진 수의 시설물을 효율적으로 입지하여 사용자 접근이 용이한 충전 네트워크를 구성할 수 있게 하는 입지모델을 적용하여야 한다.

위에서 밝힌 현실적 상황을 반영하여 전략적인 충전소 입지 네트워크를 계획할 수 있는 입지선정 모델의 개발과 적용은 대체연료 및 대체연료자동차의 실질적 수요를 촉진시키기 위해 매우 중요하다. 대체연료 충전소의 최적 입지문제는 그 시의성과 필요성이 국제적으로 주목받아 관련 연구가 진행되고 있으나 국내 연구는 미비하며 특히 대체연료 기반시설 네트워크 계획을 위한 입지모델이 국내에 적용된 사례는 부재하다. 따라서 본 연구는 일상적 기종점 통행량을 최대로 서비스할 수 있는 입지모델을 국내 전국 규모에 적용하여 최적의 대체연료 네트워크 구축 전략을 제안하는 것을 목적으로 한다.

2. 연구 범위 및 방법

본 연구는 Kuby and Lim (2005)의 Flow Refueling Location Model (FRLM)을 입지모델로 사용하여 국내 시군구를 기종점으로 하는 여객통행을 효율적으로 서비스할 수 있는 최적화된 대체연료 충전 시설물 네트워크를 제안한다. FRLM을 GIS(Geographic Information System)에 통합하여 공간의사결정시스템(SDSS)을 구축하고 이를 이용하여 다양한 시나리오 분석을 수행하였다. 구체적으로 일회 주유/충전 후 주행거리 (이하 주행거리)기준은 기술수준에 대해 보수적인 60km와 낙관적인 120km를 선정하였으며, 목적이 되는 최적화해야 할 수요를 그 특성에 따라 총통행량(trips)과 총통행거리(VTK: vehicle kilometers traveled)로 구분하였다.

연구의 공간적 범위는 도서지역을 제외한 전국인데, 수요자는 자동차 운전자이므로 연속적인 도로 네트워크에 한정하여 분석이 수행되어야 하기 때문이다. 하지만 이는 모델의 한계가 아니라 자료에 기인한 것으로 만일 도서지역으로의 해상 교통을 도로 네트워크에 연결할 수 있다면 향후에 도서지역 또한 분석 지역에 포함할 수 있을 것이다.

분석의 시간적 기준은 국가교통DB센터(2010)에서 제공하는 자료를 따라 전국 간선도로망 GIS 자료는 2009년, 그리고 전국 246개 기종점간 여객통행량은 2008년 기준 이다.

II. 선행연구 고찰

대체연료 충전/주유 시설물 모델링과 분석은 시장 수요 예측이 필수적으로 수반되는데, 수요 예측에 사용된 가설 및 모델링 방법론에 따라 5가지 범주로 분류할 수 있다. 첫째, 로지스틱 선택 모델은 충전소의 존재 유무와 대체연료 가격을 다명목

로짓 분석을 통해 살펴 본다(Greene et al. 2008). 둘째, 공급사슬 모델은 대체연료의 공급 비용을 다양한 공급사슬 과정을 고려하여 산정한다(Ogden 2004, 부경진 2009). 셋째, 시스템 역학 시뮬레이션 모델은 이산적 선택 모델을 이용하여 소비자의 대체연료 충전 가능 범위에 대한 민감도를 분석할 때 이용된다(Welch 2007, 조상민 2011). 넷째, GIS 기반의 접근법은 기존 휘발유 주유소 또는 인구통계 자료를 이용한다. 기존 주유소에 대한 자세한 자료가 존재하는 경우 이를 바탕으로 대체연료 충전소의 크기, 숫자, 공간적 구성을 예측하였다(Melaina and Bremson 2008; 유정훈 외 2008). 한편 이런 상세 자료가 없는 경우는 단순 시장침투율을 인구 비례로 GIS로 나타내거나 (Ni et al. 2005), 대체연료 시장 소비에 영향을 미치는 속성들을 선형가중평균하여 대체연료 수요를 예측하기도 한다 (Melendez and Milbrandt 2006). 다섯째는 다음에서 다룰 최적화 기반 시설물 입지 모델이다.

시설물 입지 최적화 모델은 위의 접근법과는 달리 제약조건을 만족시키는 가능한 입지 대안 조합을 모두 검사한 후, 최적의 대안을 해로 제공한다. 주유 시설물 입지를 위한 최적화 기반 모델은 수요를 어떤 기하 형태로 표현하는 지에 따라 점-기반 수요와 경로-기반 수요의 둘로 나누어 볼 수 있다. 대부분의 고전 입지 모델 및 이를 기반으로 한 주유시설물 입지 모델(Goodchild and Noronha 1987)은 점-기반 수요에 대해 서비스를 제공하는 문제를 다룬다. 특히 주유시설물입지 문제에 대해선 Goodchild and Noronha (1987)를 시작으로 미디언 문제로 접근하려는 시도가 계속 있었지만 미디언적 접근법에는 시장 자기잠식효과(demand cannibalization)가 내포되어 있다고 Hodgson (1990)은 지적하였다. 미디언 접근법은 링크 상의 교통량을 수요의 기본단위로 보기 때문에, 하나의 경로 상에 있는 시설물들은

각각 교통량을 중복 계산할 수밖에 없다. 따라서 최대 수요지로 선택된 지점들은 실제로 기종점 경로를 따라 중복 입지되어 결국 한 지점의 시장을 다른 지점이 상당 부분 잠식하게 되는 비 최적 결과가 발생할 수 있다.

이러한 문제를 인식한 Hodgson은 그의 모델(FILM: flow intercepting location model)에서 기종점 통행경로 상의 소비자 흐름을 수요의 기본단위로 삼아 점-기반 수요의 미디언 모델의 단점을 뛰어넘었고, 이후에 다양한 확장 모델이 개발되었다(Hodgson and Berman 1997). 국내에선 FILM을 지하철망에 적용하기도 하였다(박종수, 이금숙, 2011). 그렇지만 FILM을 대체연료 시설물 입지에 직접 이용할 수는 없다. 그 이유는 FILM 기반 모델이 가정하고 있는 “경로 상에 입지한 하나의 시설이 해당 경로를 지나는 모든 수요를 완전히 포괄할 수 있다”는 점은 대체연료 차량 시설물의 경우에는 적용될 수 없기 때문이다. 특히 대체연료 차량의 장거리 통행(예: 서울-부산)에 대해서는 적절하지 않다. 즉, 일회 주유 후 주행 가능한 운행거리에 제약이 있는 대체연료차가 장거리 지역 간 통행이 가능하기 위해서는 적절한 간격으로 입지한 시설물의 조합이 필요하다. 이러한 조합을 고려해야만 대체연료 자동차와 같이 주행거리가 제한된 경우에 적합한 모델로 이용될 수 있다. 이때 주행거리는 충전소 간격과 관련이 있지만 그렇다고 충전소 간격에 완벽하게 대응하는 것은 아니다. <그림 1>의 예를 살펴보자. 만일 주행거리가 100km이고 노드 A와 C에 충전소가 입지해 있으며 그 거리가 100km 만큼 떨어져 있다면, A와 C간의 왕복통행 및 B와 C간의 왕복통행은 가능할 것이다. 하지만 이 때 A와 B간의 왕복통행은 160km이기 때문에 A에서 충전한 자동차는 B를 거쳐 다시 A로 돌아올 수는 없다.



그림 1. 주유거리와 시설물 간격의 관계
Figure 1. Vehicle range and station spacing

Kuby and Lim (2005)의 모델 (FRLM: flow-refueling location model)은 FILM을 확장하여 대체 연료 자동차의 일회 충전에 따른 한계주행거리를 명시적으로 고려하였다. 이 모델은 두 가지 점에서 본 연구의 목적에 적합하다. 즉, FILM의 연장선상에서 기종점 통행을 수요의 기본 단위로 설정하였다는 점과 입지선정 시에 수요를 충족시키기 위해서 필요한 시설물 조합을 고려한다는 점에서 대체연료차 충전 시설물의 입지 선정에 적합하다. 특히 전기차의 급속 및 완속 충전소 보다는 전기배터리 교체 및 수소 충전소 입지 선정에 더욱 적합할 것이다.

FRLM을 혼합정수계획(mixed-integer linear programming)모형으로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{Maximize } Z = \sum_{q \in Q} f_q Y_q \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{h \in H_q} V_h \geq Y_q \quad \forall q \in Q \quad (2)$$

$$X_k \geq V_h \quad \forall h \in H, k \in K_h \quad (3)$$

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

$$\begin{aligned} X_k, Y_q, V_h &\in \{0, 1\} \\ \forall k \in K, h \in H, q \in Q \end{aligned} \quad (5)$$

집합

Q : 모든 기종점(OD) 쌍

K : 모든 시설물 입지 후보지점

H : 모든 시설물 입지후보지점 조합

K_h : 조합 h 에 포함된 시설물 입지 후보지점

H_q : 경로 q 에 충전서비스 제공할 수 있는 시

설물 조합 h

매개변수

p : 입지선정 할 시설물의 수

f_q : 경로 q 상의 통행량

결정변수

X_k : 시설물이 k 에 존재하면 1, 아니면 0

Y_q : 경로 q 가 충전가능하면 1, 아니면 0

V_h : 조합 h 의 모든 시설물이 존재하면 1, 아니면 0

목적함수 (1)은 충전할 수 있는 통행량을 최대화 할 수 있는 p 개의 시설물을 입지선정 한다. 제약조건식 (2)는 하나의 OD쌍의 통행량이 목적함수에 기여하기 위해서는 그 OD쌍에 충전서비스를 제공할 수 있는 시설물 조합 h 가 적어도 하나 이상이 존재하도록 한다. 이 때, 특정 조합의 유효성 여부는 모델의 외부에서 결정되는데 시설물 조합은 네트워크 구조와 자동차의 주행거리에 의존하기 때문이다. Kuby and Lim (2005)은 이러한 조합을 생성해 주는 알고리즘을 제안하였는데, 그 알고리즘은 각 q 의 최단경로를 상정하고 해당 경로를 충전할 수 있는 조합 h 를 생성한다. 이 때, 하나의 q 에 대해 다수의 h 가 생성될 수 있으며 둘 이상의 q 가 동일한 h 를 이용할 수도 있기 때문에 집합 H 를 최대의 압축할 수 있는 기법 또한 제안되었다. 제약조건 (3)은 조합 h 에 속한 시설물이 모두 열려야만 V_h 가 1이 될 수 있게 하며, (4)는 입지 선정할 시설물의 수를 p 개로 제한한다. 마지막 제약조건 (5)는 일반적인 이진(binary) 제약조건이다.

FRLM은 여러 방식으로 개선되고 적용되었는데 Kuby and Lim(2007)은 모델에서 제시하는 해의 품질을 향상시키기 위해 링크 상에 후보지점을 효율적으로 추가하는 기법을 제안하였다. Upchurch et al.(2009)은 각 시설물 입지점의 서비스 용량을

고려할 수 있도록 모델을 확장하였으며, Kim and Kuby (2012; 2013)는 최단거리로 이동한다는 비현실적인 가정을 완화하고 운전자가 주유 및 충전을 위해 최단경로에서 우회하는 행태를 가정한 모델을 개발하였다. FRLM 문제의 최적해를 찾는 것은 계산을 위한 자원과 시간이 많이 소요되기 때문에 실세계 문제에 적용하기 위해 발견적 해법을 개발(Lim and Kuby, 2010)하거나 새롭게 문제를 정식화(Capar and Kuby, 2012)하였다. 운전자의 우회행태 및 대체연료차에 대한 잠재수요의 지역차를 함께 고려한 연구(김종근, 2012) 및 이를 모두 통합한 SDSS의 개발 및 적용(김종근, 2011)을 통해 모델의 현실성과 적용가능성을 높였다. FRLM은 또한 미국 플로리다 주 전체 및 올랜도 대도시권(Kuby et al., 2009) 및 호주 남부 대도시권(McPherson et al., 2011)을 대상으로 전략적인 대체연료 충전시설 입지지를 제안하기 위해 이용되었다.

III. 대체연료 네트워크 계획 시스템 구축

1. FRLM 기반의 의사결정지원시스템

본 연구에서는 FRLM을 Microsoft Visual C#을 이용하여 ESRI ArcGIS의 확장기능으로 구현한 후 상용 관계형 데이터베이스 관리시스템과 연계한 SDSS를 구축하였다. 구축된 SDSS는 다음과 같은 주요 작업을 수행한다: 1) GIS 원본 자료를 처리하여 도로 네트워크 구축 및 솔루션 알고리즘에 이용될 수 있는 형식으로 변환; 2) 주행거리 및 시설물 수를 입력받아 FRLM 실행; 3) 결과를 지도와 그래프로 표현. 본 SDSS 구동을 위해 개발된 직관적 사용자 인터페이스를 통해 자료 입력, 변환, 모델 실행, 결과 표현 등을 사용자가 쉽게 수행할 수 있다.

전 처리 과정에서 SDSS는 다섯 개의 레이어를

이용한다. 우선 인구중심점에 해당하는 포인트 레이어가 필요한데 이는 통행의 기종점에 해당된다. 이 외에도 모든 도로 교차점을 나타내는 포인트 레이어, 도로 네트워크의 선형 성분을 나타내는 라인 레이어, 시설 입지 후보지점에 해당하는 포인트 레이어, 마지막으로 모든 기종점 간 최단경로를 나타내는 라인 레이어가 필요하다. 비공간적 입력자료는 OD 통행표 이다 모든 OD쌍 간의 최단경로를 생성할 때 OD쌍의 수가 커지면 ArcGIS의 Network Analyst의 기본 기능이 감당할 수 없을 정도로 메모리 이용이 커지기 때문에 이를 해결할 수 있는 새로운 도구를 개발하였다. 또한 결과로 생성되는 최단거리 경로는 OD를 직선으로 연결하는 것이 아니라 실제 위치 및 도로 형태를 반영한다. 이와는 별도로 솔루션 알고리즘에서 사용하는 네트워크는 각 경로를 구성하는 노드와 아크의 연결성, 순서, 구간 길이 정보로 구성된 논리적 네트워크이다. 물론 이 두 네트워크 버전간의 연결성에 대해서 SDSS가 이해하고 있기 때문에 알고리즘의 수행 및 그 결과의 표현은 서로 다른 네트워크를 대상으로 이루어지지만 사용자는 그 차이를 느낄 수 없다. 사용자는 실제 도로네트워크에 직관적으로 표현되는 결과에 집중하여 제시된 해의 적합성을 판단할 수 있다.

혼합정수선형계획법을 위한 범용 소프트웨어를 이용하여 작은 규모의 FRLM 문제에 대한 최적해를 찾을 수는 있겠지만 실세계 문제를 해결하기에는 부적합하다. 따라서 본 연구의 SDSS에 Lim and Kuby(2010)이 개발한 두 가지의 발견적 해법을 구현하여 포함하였다. 이 발견적 해법은 비록 최적해를 항상 찾는다라는 보장은 없지만 제한된 수행시간 내에 실세계의 문제를 해결할 수 있다. 본 연구에서 사용된 해법은 탐욕적 추가 및 교체(greedy-adding-and-substitution) 알고리즘으로 단순 탐욕 알고리즘이 기본이 된다. 탐욕 알고리즘은 매번 목적함수 증가분이 최대가 되도록 하는 시

시설물의 위치를 선정하여 입지한다. 즉 입지선정을 수행할 때마다 기존의 시설물들이 제공할 수 있는 충전/주유 서비스에 더해 가장 많은 양의 통행량에 대한 주유 서비스를 가능하게 하는 지점이 선정된다. 하지만 이러한 탐욕 알고리즘은 특히 FRLM과 같은 모델에 적용되었을 때 준최적해를 도출할 수 있기 때문에(Kuby and Lim, 2005), 이를 개선한 탐욕적 추가 및 교체 알고리즘에서는 선정되지 않은 여러 후보 지점과 선택된 지점을 교체하는 과정을 추가하여 그 문제해결을 도모하였다. 예를 들어 첫 번째에서 여덟 번째 지점을 선정한 후 세 번째 지점에 의해 서비스되는 통행경로가 일부 중복된다면 교체 알고리즘에 의해 해당 지점을 다른 후보 지점으로 바꿀 수 있다. 이러한 교체 과정은 아홉 번째 지점을 선정하기 전까지 여러 번 수행될 수 있다.

탐욕적 추가 및 교체 해법과 더불어 구현된 두 번째 발견적 해법은 유전자 알고리즘(genetic algorithm)이지만 본 연구에서는 분석에 이용되지 않았다. 두 가지 알고리즘은 공통적으로 사용자가 아래의 매개변수를 사용자로부터 입력을 받는다:

1. 차량 주유 후 한계 주행거리.
2. 입지 선정할 지점의 수 (p).
3. 최대화할 목적함수 (TRIPS 또는 VKT).
4. 계획가가 항상 포함시키고자 하는 입지 지점 목록. 이 지점은 기존 구축 지점이거나 정책 상 선호되는 지점이다.

모델이 완전히 수행된 후에는 해법 알고리즘의 결과가 텍스트 파일과 데이터베이스에 저장되고 ArcMap 창에 결과를 지도화하여 표시한다. 선택된 입지 지점들과 충전가능 경로가 실세계 위치와 형태를 유지하면서 표현된다. 이 지점들과 경로들을 나타내는 레이어는 시나리오 수행 시 매번 새롭게 생성되기 때문에 상이한 시나리오에 따른 결과의 차이를 시각적으로 비교하기에 용이하다. 각 해에 따른 충전가능 통행량의 총통행량에 대한 비율 또

는 충전가능 통행거리의 총통행거리에 대한 비율은 데이터베이스에 표로 저장되고, 커버리지와 시설물 수와의 상충관계(trade-off)는 그래프로 표현 및 저장된다.

2. 자료

SDSS를 통한 분석에 필요한 자료는 크게 도로네트워크, 교통분석존(TAZ: Traffic Analysis Zone), 기종점 통행표이다. 우선 TAZ는 전술한 바와 같이 국가교통DB센터(2011) 제공하는 2008년 행정구역 기준 248개 시군구 단위 구역을 이용하였고 TAZ를 대표할 수 있는 점은 단순한 기하중심(centroid)이 아닌 각 시군구형의 주소를 지오코딩하여 그 위치점을 포인트로 구하였다. 도로네트워크는 국가교통DB센터(2011)에서 제공하는 전국 2009년 12월 기준 레벨2 수준을 원자료로 하였다. 원자료는 총 20만여 개의 링크와 15만여 개의 노드로 구성되어 있으나 분석의 효율성을 위해 최소시간경로를 구성하는 1만여 개의 링크와 7천여 개 노드로 단순화하였다. 즉 원자료에서 구축된 네트워크에서 모든 OD 쌍 간의 최소시간경로를 구한 뒤 이 경로들과 중첩되는 링크와 노드만을 고려대상으로 삼았다. 이와 더불어 경로를 계산할 때 현실성을 높이기 위해 도로특성정보(제한속도, 도로 종류, 일방통행 등)을 고려하였다. 즉 각 구간별 이동시간을 계산할 때 고속국도 및 도시고속화도로 이외의 도로는 최대속도에서 15% 감소하여 신호 등에 의해 증가되는 통행 시간을 고려하였다. 또한 일방통행 정보를 이용하여 고속화도로에서 램프를 거치지 않은 채 차하위 계층의 도로로 이동하는 것과 같은 현실적으로 불가능한 경로의 계산이 이루어지지 않도록 하였다. 울릉군을 제외한 248 X 248 (6만여) 개의 최소시간 경로 중 하나인 인천 남구에서 서울시 서초구까지의 최소시간 경로가 <그림 2>에 점선으로 표시되었

다. 그림에서 알 수 있듯이 최소시간경로는 가능한 고속국도 및 고속화도로를 이용하게 된다.



그림 2. 최소시간경로 예 (인천남구-서울 서초구)
Figure 2. Sample path from Nam-gu, Incheon to Seocho-gu, Seoul

기종점 통행표는 2008년 전국 지역간 여객통행 자료 중 전체 통행목적의 통행량 자료를 이용하였다. OD통행표의 통행량 값을 모든 OD간 최소시간 경로에 할당한 후 각 링크에서 그 링크를 지나가는 모든 경로에 해당하는 통행량을 합산하여 지도화하였다. 이는 결국 도로의 용량 및 사용자 균형상태를 고려하지 않은 채 모든 OD 통행량이 최소시간 경로를 따라 이동가능하다고 가정한 것인데 예측된 OD통행량의 적절성을 판단하기 위해 2011년 교통량정보제공시스템에서 제공하는 교통량도와 비교하였다. 그 둘을 함께 나타낸 <그림3>을 보면 예측된 OD통행량과 교통량정보제공시스템에서 제공하는 교통량 패턴이 매우 유사함을 알 수 있다.

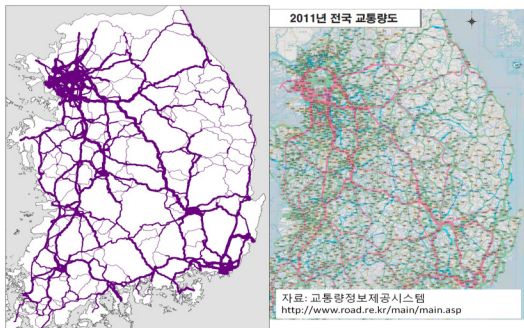


그림 3. OD통행량(왼쪽)과 전국교통량도(오른쪽)
Figure 3. Estimated (left) and counted (right) traffic pattern

IV. 모델 수행 결과 분석

국내 여객통행을 효율적으로 서비스할 수 있는 대체연료 충전시설물 입지 네트워크를 제안하기 위해 입지선정 모델 FRLM이 통합된 SDSS를 구축하고 시나리오 분석을 수행하였다. 주행거리에 대한 모든 가능한 가정을 적용할 수 없기 때문에 보수적 기준(60km)과 낙관적 기준(120km)을 적용하였다. 또한 최적화할 수요 특성을 통행량(trips)과 주행거리(VKT)로 구분하였다.

1. 통행량(TRIPS) 최대화 시나리오 결과

주어진 수의 충전소가 최대의 통행량을 서비스할 수 있도록 입지 선정한 결과는 <그림 4>와 같다. 이 때 사용된 일 회 주유 후 주행가능 거리는 120km이고 충전소 수는 5개이다. FRLM-SDSS는 서울 지역에 4개(종로구, 중구, 강남구, 영등포구)와 부산지역 1개 (부산진구)에 충전소 입지를 선정하였다. 그림에서 강조된 선은 서비스될 수 있는 기종점 통행경로를 의미하는데 그 해석에 있어서 주의가 요한다. 예를 들어 부산진구에 입지한 충전소는 부산진구에서 출발하거나 도착하는 기종점 통행에 대해 충전서비스를 제공할 뿐만 아니라 주변 통행의 기종점 경로가 해당 지점을 통과하는 경우에도 서비스를 제공할 수 있다. 서울 지역의 경우 통행량이 많은 종로구-중구, 중구-강남구, 영등포구-강남구 등의 경로에 대한 서비스를 제공할 수 있을 뿐만 아니라 강남구에서 출발하거나 도착하는 통행에 대해서도 서비스를 제공할 수 있다. 총 커버리지, 즉 총 기종점 통행량에서 5개의 충전소 입지선정을 통해 서비스할 수 있는 기종점 통행량의 비율은 약 18.6%이다. 물론 이를 해석할 때도 주의가 필요한데, 모델의 가정에서 각 지점에서의 용량에 대해 제

약을 두지 않았기 때문에 5개의 충전소에 의해 제공 가능한 서비스 비율이 아니라 각 지점에는 복수의 충전소가 건설될 수 있고 해당 지점을 방문하는 모든 차량에 대해 최대로 서비스가 제공 가능할 때 달성 가능한 커버리지 비율로 이해해야 할 것이다.

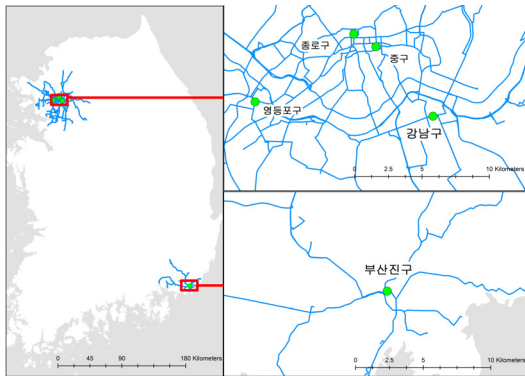


그림 4. TRIPS, R=120km, p=5 결과
Figure 4. Solution for p=5, TRIPS, R=120km

총통행량 최대화라는 목적과 일회 주유 후 주행 가능 거리를 고정하고 충전소 수를 늘어감에 따라 커버리지 및 서비스할 수 있는 기종점 통행 경로는 확장된다. 이는 <그림 5>에서도 알 수 있다. 충전소 수가 10개가 되었을 때 기존 선정된 입지점에 더해 서울 서초구, 인천 남구, 대전 서구, 대구 달서구가 추가로 선정되었다. 이를 통해 수도권 지역 간 통행이 더욱 확장되었는데 구체적으로 인천에서 서울까지의 통행이 가능해지게 되었다. 이와 더불어 대구와 대전 지역에 대한 대체연료차 서비스 가능 범위가 새로이 추가되었다. 10개의 충전소 선정으로 총 29.4%의 커버리지를 얻을 수 있었다. 이렇게 서비스 공간 범위가 주요 통행량이 많은 지역에 대한 독립적 서비스 영역 확보에서 점차 개별 지역을 연계하는 경향은 <그림 6>과 같이 충전소 수가 15개로 추가되었을 때 역시 유지되고 있다. 기존 충전소 위치에 더해 부평구, 마포구, 동대문구, 송파구, 그리고

울산 남구에 시설물이 추가되어 총 15개의 시설물로 38.4%의 커버리지를 얻게 되었다. 이로 인해 서울 지역의 공간적 서비스 범위는 더욱 확장되었으며 부산-울산 지역 간 통행이 가능하게 되었다.

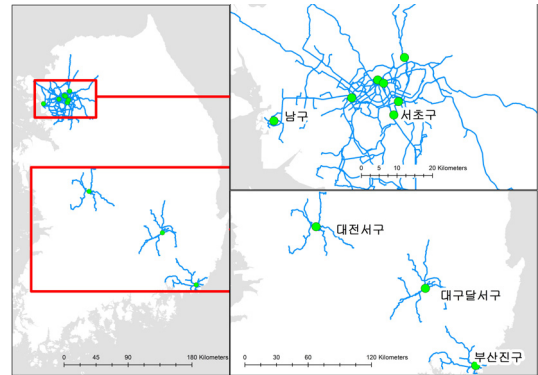


그림 5. TRIPS, R=120km, p=10 결과
Figure 5. Solution for p=10, TRIPS, R=120km

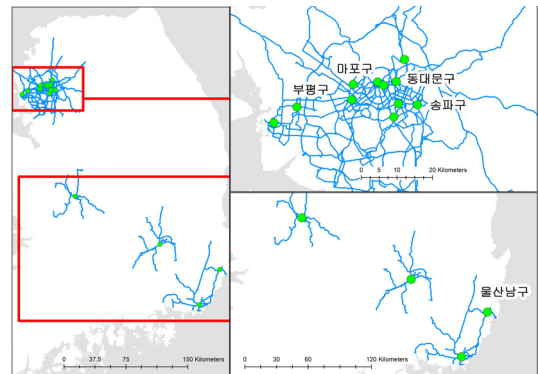


그림 6. TRIPS, R=120km, p=15 결과
Figure 6. Solution for p=15, TRIPS, R=120km

<그림 7>의 왼쪽 지도는 충전소의 수가 20개일 때의 결과를 나타내는데 이 때 서비스 커버리지는 45.8%이다. 그리고 오른쪽 지도는 총 커버리지 50%를 얻을 수 있는 23개의 충전소 위치이다. <그림 7>을 보면 50%의 커버리지를 얻을 때 서울-천안-대전 간의 통행 및 부산-대구-울산 간의 통행

이 가능하게 되었으며 광주 지역에 대한 서비스가 가능하게 된 것을 알 수 있다.

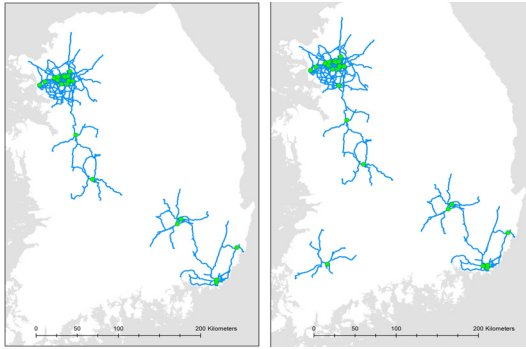


그림 7. TRIPS, R=120km, p=20 및 p=23 결과
Figure 7. Solutions for p=20 and p=23, TRIPS, R=120km

2. 통행량(TRIPS) 및 총통행거리(VKT) 최대화 결과 비교

입지선정 목적에 대한 모델의 민감도를 확인하기 위해 총통행 최대화(TRIPS)와 총통행거리 최대화(VKT)에 대해 공통적으로 커버리지 50%를 획득하기 위한 충전소의 숫자 및 선정된 위치를 비교하였다. 그 결과는 <그림 8>과 같다.

충족 수요가 TRIPS인 경우 총 23개의 위치, VKT인 경우 49개의 위치가 선정되었다. 동일한 커버리지를 얻기 위해 필요한 충전소의 숫자는 VKT가 목적인 경우 더 많은 것을 알 수 있는데, 그 이유는 일반적으로 단거리 통행의 양이 장거리 통행량보다 많기 때문이다. 즉 VKT가 목적인 경우 모델이 충족하고자 하는 주요 서비스 대상은 장거리 통행이고, 장거리 통행은 단거리 통행보다 더 많은 수의 시설물이 필요하다. 따라서 통행량이 많은 단거리 통행을 서비스할 수 있는 지점을 선정해 주는 TRIPS의 결과에 더하여 일부 지점에 시설물이 추가될 필요가 있다. 추가되는 지점은 대체로 장거리

통행을 위한 경로 상에 존재한다. 하지만 <그림 8>을 보면 알 수 있듯이 주요 통행을 충족하기 위해 기본적으로 필요한 충전소 군집의 위치는 비슷하다.

비록 VKT가 목적인 경우 필요로 하는 위치점은 많을 수 있으나 이것이 반드시 비효율적인 것은 아니다. VKT 목적은 장거리 통행에 더욱 비중을 두며 즉, 연료사용이 많은 통행에 더 큰 가중치를 주게 되어 이는 곧 탄소배출 대체효과를 산정할 때 유용하게 사용될 수 있기 때문이다.

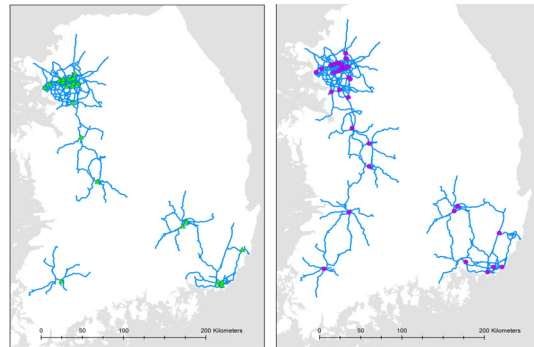


그림 8. TRIPS와 VKT 결과비교 (커버리지 = 50%)
Figure 8. Solutions of TRIPS and VKT maximization scenarios (coverage = 50%)

TRIPS와 VKT가 목적함수일 때의 결과 차이는 공통적으로 시설물 수를 23으로 지정한 결과를 나타낸 다음 <그림 9>에서 더욱 명확히 드러난다.

구체적으로 TRIPS가 목적인 때는 서비스 제공 가능한 최장경로는 119km이고 왼쪽 그림에 강조되어 있다. 그 경로는 부산 영도구와 대구 중구를 연결하는데, FRLM-SDSS는 양 끝 노드에 시설물 입지하여 그 긴 통행을 가능하게 하고 있다.

이에 비해 VKT 최대화가 목적인 경우의 결과는 오른쪽 그림에 표현되어 있는데 서비스 가능한 최장경로는 191km로 TRIPS가 목적인 경우보다 더 길다. 특이한 점은 강조되어 있는 경로이다. TRIPS가 목적인 경우 경로의 양 끝단에 주로 시설물을 입지했던

것과는 달리, VKT 최대화의 경우 시설물이 경로 상에 존재하는데 그 이유는 통행의 기점 및 종점을 서비스하는 것에 대한 비중보다는 장거리 통행에 비중을 두게 되어 나타난 결과이다. 즉 해당 경로인 인천 남구에서 옥천군 및 인천 남구에서 보은군까지의 경로는 이 경로 중간에 있는 시설물에서 충전을 함으로써 왕복 통행이 가능해 지게 되는 것이다. 물론 이 경로의 통행량은 상대적으로 많지 않아 TRIPS가 목적인 경우 고려되지 않았겠지만 VKT가 목적이 됨에 따라 서비스해야 할 중요한 경로가 된 것이다. 참고로 TRIPS가 목적인 경우 서울 및 인천에서 충북지역까지 길게 연결된 것처럼 보이는 경로는 실제로 연결되어 있지 않고 천안 서북구 및 대전 서구의 두 시설물 지점이 지역의 통행만을 서비스하고 있다. 만일 FRLM-SDSS가 사용자의 우회 가능성을 고려하는 유연한 모델이라면 그 시설물 선정의 결과 및 커버리지 등이 상이했을 것으로 예상된다. 따라서 향후에는 이러한 가능성을 고려한, 즉 우회거리에 따른 거리조각 효과를 고려한 모델 적용에 따른 분석이 필요하다.

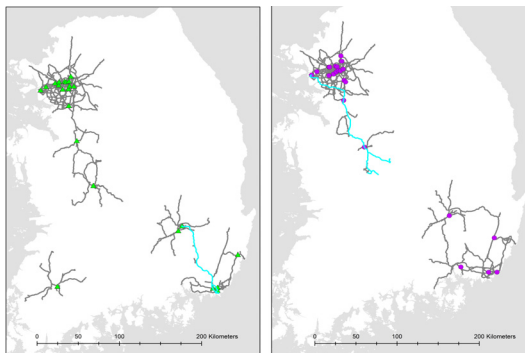


그림 9. 목적함수가 TRIPS와 VKT일 때 결과 차이 (p=23), Figure 9. Solutions of TRIPS and VKT maximization scenarios (p=23)

3. 주행거리 변화에 따른 차이

기술수준에 대해 낙관적인 주행거리 120km와 보

수적 60km를 선정하고 동일하게 23개 시설물의 입지를 선정한 결과가 <그림 10>에 표현되어 있다. 동일한 시설물 수를 지정하였을 때 커버리지는 50%와 46.01%로 약 4%포인트 차이가 있다. 공간적 특성을 비교하면 선정된 입지지점에 있어서 큰 차이는 없다. 이는 각 통행중심지에서 출발 또는 도착하는 통행의 비율에 있어 단거리 통행이 다수를 차지하기 때문에 대부분의 대응량 단거리 통행은 보수적인 주행거리로 선정하였을 때에도 서비스될 수 있다는 점을 의미한다. 물론 주행거리가 길어짐에 따라 대응량 단거리 통행에 더불어 서비스될 수 있는 통행의 길이가 길어진 것을 확인할 수 있다. 따라서 보수적 주행거리를 가정하면 대도시권(서울, 부산)을 서비스하기 위해서는 낙관적 주행거리를 가정하였을 때보다 더 많은 시설물이 필요하다는 점을 확인할 수 있다. 선정된 입지지점의 패턴을 보면 대부분 독립적인 클러스터를 형성하고 있어 장거리 통행 즉, 천안-대전 또는 부산-울산, 부산-대구 연결 경로가 서비스될 수 없다. 따라서 120km로 다소 낙관적인 주행거리로 가정하더라도 떨어진 도시권을 연결하는 서비스를 제공하기 위해서는 통행 중심점 이외에 떨어진 지역을 연계하는 지점에 시설물 입지선정이 필요하다는 점을 확인할 수 있다.

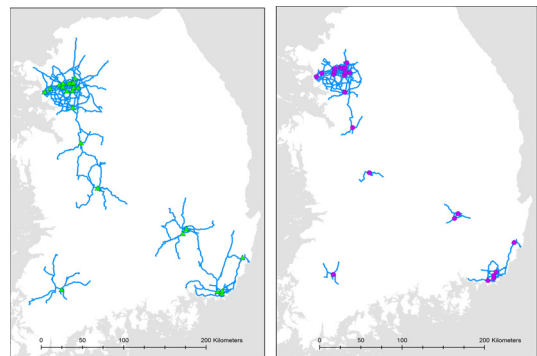


그림 10. 낙관적(120km) 및 보수적(60km) 주행거리 선정 결과 비교, Figure 10. Solutions of different ranges (left: 120km, right: 60km)

4. 커버리지와 시설물 수의 상관관계

주행거리와 서비스 충족비율, 시설물 수의 상관관계는 아래 <그림 11>에 표현되어 있다. 첫째, 그림에서 알 수 있듯이 시설물 수가 증가함에 따라 기종점 통행 수요의 충족정도가 증가하지만 그 한계 증가량은 감소한다. 하지만 이는 항상 그런 것은 아닌데 VKT 최대화가 목적인 경우 하나의 지점 추가로 인해 서비스 가능한 경로가 없고 대신 두 개(또는 그 이상)의 시설물을 추가해야만 장거리 경로 서비스가 가능해 질 수도 있기 때문이다. 둘째, 주행거리가 짧으면 시설물이 더 많이 필요하다. 이는 주행거리가 짧은 경우를 나타내는 곡선이 그래프의 아래에 위치하는 것으로 확인할 수 있다. 셋째, TRIPS 최대화의 경우 VKT 최대화의 곡선보다 더 가파르다. 이는 단거리 통행이 많이 이루어지고 있다는 점을 반영한다. 즉 동일한 수의 시설물이면 TRIPS의 커버리지가 더 높으며 그 이유는 VKT가 목적인 경우 더 긴 경로를 서비스하기 위해서는 더 많은 시설물이 필요하기 때문이다. 또한 이러한 결과는 도로 네트워크의 노드와 링크의 공간적 배열에 따른 공간구조에 따른 결과일 수도 있다. 따라서 노드에 입지하기 보다는 링크의 중간에 입지한다면 커버리지 증가라는 효과를 얻을 가능성도 존재한다.

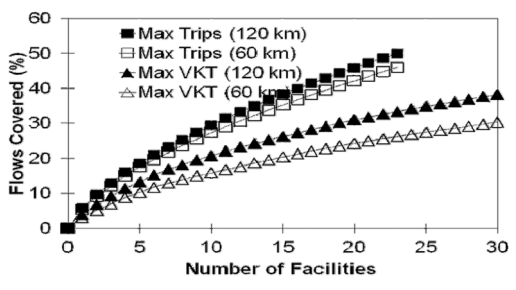


그림 11. 시설물 수와 목적함수 및 주행거리의 상관관계, Figure 11. Tradeoff between covered flows and vehicle range

FRLM-SDSS의 실행결과로 제공되는 <그림 11>과 같은 그래프는 활용가능성이 높다. 예를 들어 예산상의 제약으로 건설 가능 사이트 수가 고정된 경우 해당 예산 투자로 기대되는 서비스 커버리지를 산정할 수 있다. 또는 목표 서비스 커버리지 도달을 위해 필요한 시설물 사이트의 수를 확인할 때 역시 이용될 수 있다. 이를 통해 예를 들어 <표 1>과 같이 50%의 커버리지를 위해 필요한 시설물의 수를 목적함수 및 주행거리에 대한 가정에 따라 산정할 수 있다. 이에 따르면 50%커버리지를 위해서는 23-87개의 시설물 입지 지점이 선정되어야 한다.

표 1. 목적 커버리지 50%를 위한 시설물 수

Table 1. Needed facilities to achieve 50% coverage

주행거리 (Range)	TRIPS	VKT
120km	23	49
60km	27	87

V. 결 론

대체연료차량의 숫자 부족과 대체연료 충전 인프라의 부족이라는 서로 밀접히 연관된 문제는 대체연료차 보급확산과 더 나아가 지속가능한 교통체계 구현에 걸림돌이 되고 있다. 특히 대체연료차 운전자는 대체연료차가 가진 짧은 주행거리 때문에 자신이 목적인 통행을 마칠 수 없을 지도 모른다는 불안을 가지고 있다. 이 문제의 해결을 위해서는 배터리 전기차 및 수소 연료전지차와 같은 대체연료차를 위한 효율적인 기반시설 구축이 무엇보다도 중요하다. 기존에 기반시설 구축과 관련하여 고전적 입지모델에 근거를 둔 연구가 있었으나 대부분 대체연료 네트워크 설계를 위한 고려사항 중 일부만 입지선정 모델의 가정에 포함하고 있다. 따라서 본 연구에서는 대체연료차의 기술적 특성, 운전자의 통행패턴, 높은 건설비용을 종합적으로 고려한 입지선

정 모델(FRLM)을 국내 전국을 대상으로 적용하여 최적의 주유/충전 시설물 네트워크 설계 전략을 제시하였다.

입지선정 모델을 다양한 시나리오를 통해 수행한 결과 시설물 네트워크의 단계별 개발 및 확장을 위한 몇 가지 중요한 결론을 내릴 수 있다.

첫째, 모델 자체에는 거점 군집 개발 또는 지역 연계와 같은 특정 개발 전략을 가정하고 있지 않았지만 수행 결과를 종합하면 우선 주요도시 또는 대규모 통행발생 및 통행유입 지역을 중심으로 일단의 시설물을 건설하고 점차로 각 대도시권을 연계하는 시설물을 건설할 필요가 있다. 초기 대도시권 지역 내 시설물 클러스터는 도시 내 대다수의 단거리 통행에 대해 서비스를 제공할 수 있을 뿐 아니라 각 시설물의 조합을 통해 복수 충전이 필요한 중거리 통행 역시 가능하게 한다.

현재 도시 간 연계를 위한 시설물의 선정 시기를 결정할 수 있는 지점이 존재하지 않는다. 대체 연료 기반시설 건설비용이 높기 때문에 FRLM과 같은 최적화 도구를 이용하여 주행거리, 통행량, 통행패턴, 지역 도로 네트워크 구조를 함께 고려하여 개발 전략의 핵심적 요소를 결정하는 것은 매우 중요하다. 이때 연계 시설물은 기능적으로 지나가는 통행뿐만 아니라 주변의 국지적 통행에 대해서도 서비스를 제공할 수 있어야 하며 개발 초기단계인 경우 특히 홍보성이 높은 도로 교차점과 같은 지점에 입지하는 것이 중요하다.

둘째, 도시 간 통행 연계 시설물의 간격 계획에 신중을 기해야 한다. 만일 그 간격이 크면 응급상황이 발생했을 때 차량 운행이 불가능해질 수 있으며 이는 곧 공공인식에 악영향을 미칠 수 있다. 반대로 간격이 조밀하면 다른 지역에 대한 서비스 제공을 불가능하게 하며 서비스 영역의 중복으로 과소이용 시설물이 발생할 수도 있다. 물론 기술적 한계주행거리보다는 반드시 낮아야 할 것이다. 또한

손쉽게 생각할 수 있는 등간격 설치의 자원의 낭비를 초래할 것이다.

셋째, 초기단계의 시설물은 도로 네트워크에서 통행이 집중되는 지점에 입지하는 것이 중요하다. 즉 많은 기종점 통행경로가 공통적으로 지나가서 다수의 통행을 “포착”할 수 있는 지점이 효율적이다. 이런 지점의 예는 통행량이 많은 고속국도 및 간선도로 교차점, 통행발생/유입 지점이다. 하지만 통행집중점에 입지 선정할 때 주의할 것은 개별 지점이 서비스하는 통행수요가 중복되어 서로의 서비스 구간을 잠식하지 않도록 하는 것이다. 따라서 주요 고속국도 및 간선도로에서는 시설물이 너무 조밀하지 않도록 해야 한다.

넷째, 네트워크 설계 전략 수립에 고려되어야 하지만 본 연구의 분석에 이용된 자료에 포함되지 못한 요소가 있다. 예를 들어 시설물 후보지점 중 제반여건이나 정책상 선호되는 지점인지 유무에 대한 정보가 필요할 것이다. 또한 경로 상에서 연료 잔량과 관련하여 선호하는 주유 시점과 같은 운전자 주유행태에 관한 경험적 자료가 유용할 것이다. 다. 입지 분석이 좀 더 세분화된 지역 규모에서 이루어지면 이러한 자료는 각 지역의 특성을 반영할 수 있을 것이다. 그렇기 때문에 의사결정지원 도구는 본 연구에서 구현된 SDSS과 같이 다양한 시나리오를 수행하고 그 결과를 신속히 시각적으로 확인할 수 있는 것이 중요하다.

본 연구는 최적의 대체연료 충전/주유 네트워크 계획을 위한 전략을 분석하였다. 하지만 사용된 입지선정모델은 몇 가지 측면에서 개선할 필요성이 있다. 우선 현 모델은 각 선정 지점에서의 서비스 용량에 대한 제약이 없는 것으로 가정하고 있기 때문에 이를 개선하여 각 지점에 필요한 용량을 추정할 수 있는 모델이 필요하다. 또한 운전자의 우회 경로 선택 가능성과 지역별 구매잠재력의 차이, 소비자 특성(공공기관, 일반소비자)을 고려할 필요가

있다. 마지막으로 공간범위에 있어 대도시권 또는 도시 내부의 대체연료 네트워크 계획과 분석에 관한 연구가 요구된다.

인용문헌

1. 김종근, 2011. "대체연료 충전소 최적입지 계획을 위한 공간의사결정지원 시스템 개발," 「한국지도학회지」, 11(1):47-59.
Kim, J.-G., 2011. "Prototype SDSS for refueling service infrastructure planning," *Journal of the Korean Cartographic Association*, 11(1):47-59.
2. 김종근, 2012. "수요의 지역차를 고려한 대체연료 충전소 최적입지선정: 플로리다 올랜도를 사례로," 「한국경제지리학회지」, 15(1):95-115.
Kim, J.-G., 2012. "Location of refueling stations for geographically based alternative-fuel vehicle demand," *Journal of the Economic Geographical Society of Korea*, 15(1):95-115.
3. 박종수, 이금숙, 2011. "Pickup Point 최적입지선정을 위한 Greedy Heuristic Algorithm 개발 및 적용: 서울 대도시권 지하철 시스템을 대상으로," 「한국경제지리학회지」, 14(2):116-128.
Park, J. S. and Lee, K., 2011. "Greedy Heuristic Algorithm for the Optimal Location Allocation of Pickup Points: Application to the Metropolitan Seoul Subway System," *Journal of the Economic Geographical Society of Korea*, 14(2):116-128.
4. 부경진, 2009. 미래 수소경제 실현을 위한 기반구축연구-수송부문의 수소공급 인프라 구축, 기본연구보고서 2009-13, 서울: 에너지경제연구원.
Boo, Kyung-Jin, 2009. *Infrastructure Building for Materialization of a Future Hydrogen Economy: H2 Supply Infrastructure in the Transportation Sector*, KEEL research paper 2009-13, Seoul: Korea Energy Economics Institute.
5. 유정훈·이무영·오세창, 2008. "공간적 접근성 및 통행비용을 고려한 천연가스 충전소 최적 입지선정 모형," 「대한교통학회지」, 26(3):145-153.
Yu, J.-H, Lee, M.-Y, and Oh, S.-C, 2008. "A Model of Location Decisions of Natural Gas Filling Station Considering Spatial Coverage and Travel Cost," *Journal of Korean Society of Transportation*, 26(3):145-153.
6. 조상민, 2011. 차세대 에너지공급시스템 기반구축 연구: 수소인프라 투자행태의 예측- 에이전트 기반 모델링, 기본연구보고서 11-09, 서울: 에너지경제연구원.
Cho, Sangmin, 2011, *Forecasting of investment behavior for hydrogen-fuelcell infrastructure - Using Agent Based Modeling and Simulation*, KEEL research paper 11-09, Seoul: Korea Energy Economics Institute.
7. Berman, O., Hodgson, M. J., and Krass, D., 1995. "Flow-interception problems," In *Facility location : a survey of applications and methods*, edited by Drezner, Z., New York: Springer.
8. Capar, I. and Kuby, M., 2012. "An efficient formulation of the flow refueling location model for alternative-fuel stations," *IIE Transactions*, 44(8): 622-636.
9. Goodchild, M. and Noronha, V., 1987. "Location-allocation and impulsive shopping: the case of gasoline retailing," In *Spatial analysis and location-allocation models*, edited by Ghosh, A. and Rushton, G., New York: van Nostrand Reinhold.
10. Greene, D. L., Leiby, P. N., James, B., Perez, J., Melendez, M., Milbrandt, A., Unnasch, S., Rutherford, D., and Hooks, M., 2008. *Hydrogen Scenario Analysis Summary Report: Analysis of the Transition to Hydrogen Fuel Cell Vehicles and the Potential Hydrogen Energy Infrastructure Requirements*, Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory.
11. Hodgson, M. J., 1990. "A flow-capturing location-allocation model," *Geographical*

- Analysis*, 22:270-279.
12. Kim, J.-G. and Kuby, M., 2012. "The deviation-flow refueling location model for optimizing a network of refueling stations," *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(6):5406-5420.
 13. Kim, J.-G. and Kuby, M., 2013. "A network transformation heuristic approach for the deviation flow refueling location model," *Computers & Operations Research*, 40(4):1122-1131.
 14. Kuby, M. and Lim, S., 2005. "The flow-refueling location problem for alternative-fuel vehicles," *Socio-Economic Planning Sciences*, 39(2):125-145.
 15. 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.
 16. Kuby, M. J. and Lim, S., 2007. "Location of Alternative-Fuel Stations Using the Flow-Refueling Location Model and Dispersion of Candidate Sites on Arcs," *Networks & Spatial Economics*, 7(2):129-152.
 17. Lim, S. and Kuby, M., 2010. "Heuristic algorithms for siting alternative-fuel stations using the Flow-Refueling Location Model," *European Journal of Operational Research*, 204(1):51-61.
 18. McPherson, C., Richardson, J., McLennan, O., and Zippel, G., 2011. "Planning an Electric Vehicle Battery-Switch Network for Australia", *Australasian Transport Research Forum 2011 Proceedings*, Adelaide, Australia: Australasian Transport Research Forum
 19. Melaina, M. and Bremson, J., 2008. "Refueling availability for alternative fuel vehicle markets: Sufficient urban station coverage," *Energy Policy*, 36(8):3233-3241.
 20. Melendez, M. and Milbrandt, A., 2006. *Geographically Based Hydrogen Consumer Demand and Infrastructure Analysis: Final Report*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
 21. Ni, J., Johnson, N., Ogden, J. M., Yang, C., and Johnson, J., 2005. "Estimating Hydrogen Demand Distribution Using Geographic Information Systems (GIS)," *Presentation Series*. Davis, California: Institution of Transportation Studies.
 22. Ogden, J. M., 2004. *Hydrogen Delivery Model for H2A Analysis: A Spreadsheet model for Hydrogen Delivery Scenarios*. Davis, California: Institute of Transportation Studies, University of California, Davis.
 23. Upchurch, C., Kuby, M., and Lim, S., 2009. "A Model for Location of Capacitated Alternative-Fuel Stations," *Geographical Analysis*, 41: 85-106.
 24. Welch, C. J., 2007. "Quantifying Consumer Sensitivity to Hydrogen Refueling Station Coverage," In *2007 Annual Progress Report for the DOE Hydrogen Program*, edited by Department of Energy, Golden, CO: Department of Energy.
- | | |
|-----------|------------|
| 논 문 투 고 | 2013-01-17 |
| 심 사 완 료 | 2013-03-10 |
| 게 재 확 정 일 | 2013-03-10 |
| 최 종 본 접 수 | 2013-03-18 |