

■ 論 文 ■

## 공간적 접근성 및 통행비용을 고려한 천연가스 충전소 최적 입지선정 모형

A Model of Location Decisions of Natural Gas Filling Station  
Considering Spatial Coverage and Travel Cost

**유 정 훈**

(아주대학교 환경건설교통공학부  
조교수)

**이 무 영**

(아주대학교 건설교통공학과  
석사과정)

**오 세 창**

(아주대학교 환경건설교통공학부  
교수)

### 목 차

- |   |   |
|---|---|
| <p>I. 서론</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 연구의 배경 및 목적</li> <li>2. 연구의 범위 및 특징</li> </ol> <p>II. 모형구축</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 모형구축</li> </ol> | <p>III. 모형의 적용</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 입력자료</li> <li>2. 모형분석</li> </ol> <p>IV. 결론 및 향후 과제</p> <p>참고문헌</p> |
|---|---|

**Key Words :** 천연가스 충전소, 입지 선정, 공간적 접근성, 통행비용 최적화, 휴리스틱 알고리즘.

CNG Filling Station, Facility Location, Spatial Coverage, Travel Cost Optimization, Heuristic Algorithm

### 요 약

본 연구에서는 천연가스버스 충전소 위치 선정의 객관성과 효율성을 확보하기 위한 노력의 일환으로 공간적 접근성과 통행 비용을 고려한 천연가스 충전소 입지선정 모형을 개발하였다. 본 연구에서 제시한 충전소 입지선정 모형은 고정식 충전소를 대상으로 하였으며, 2단계로 구성되었다. 1단계에서는 천연가스버스의 노선 기종점으로부터 이동거리 제약조건을 만족하는 충전소 입지 대안들을 Heuristic Algorithm을 통해 선정하였으며, 모형의 2단계에서는 변형된 Transportation Problem을 이용하여 충전소 입지대안별 최소 통행비용을 산출하고 이를 충전소의 설치 및 운영비용과 비교분석하여 충전소 최적 입지대안을 도출하였다. 본 모형의 적용가능성 분석을 위해 수도권내의 대표적 중소도시인 안양시를 대상으로 하여 천연가스버스 수요량에 따른 충전소의 입지와 규모를 산출하였다. 본 연구를 통해 객관적이고 합리적인 천연가스 충전소 입지선정 방법론의 기틀을 제시함으로써 향후 천연가스버스의 원활한 보급에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

This study proposes a facility location model in consideration of spatial coverage and travel cost as an effort to make objective and effective decisions of natural gas filling stations. The proposed model is developed for fixed stations and consists of two stages. The first stage employs a heuristic algorithm to find a set of locations which satisfy the spatial coverage constraints determined by the maximum travel distance between the filling stations and bus depots. In the second stage, the optimal location of filling stations is determined based on the minimum travel cost estimated by using a modified transportation problem as well as the construction and maintenance costs of the filling stations. The applicability of the model is analyzed through finding the optimal location of filling stations for the city of Anyang, a typical medium-sized city in metropolitan Seoul, based on the demand of natural gas buses. This study is expected to help promote the spread of natural gas buses by providing a starting point of a objective and reasonable methodological perspective to address the filling station location problem.

## 1. 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

우리나라 대도시의 대기오염 발생원별 오염물질 배출 증가율을 살펴보면 수송부분이 가장 높은 것으로 나타나, 대기오염 감소를 위한 자동차 배출가스 삭감이 주요 과제로 대두하고 있다. 특히 전체 등록 차량의 1.7%에 불과한 대형경유차가 자동차 오염물질의 22.2%를 배출하고 있어, 대형경유차 중 운행 빈도가 가장 높은 시내버스를 저공해 자동차인 천연가스버스로 전환하고자 하는 움직임이 활발히 진행되고 있다. Yang et al(1997)은 90년대 후반 천연가스 자동차의 환경오염물질 감소뿐만 아니라 운영측면에서의 경제적 이점을 분석하였다. 본 논문에서는 천연가스버스 도입에 따른 천연가스 충전소의 입지 선정 모형을 개발하였다.

천연가스충전소의 위치는 소비자 측면에서 천연가스버스의 충전 수요를 효과적으로 처리할 수 있는 지점에 위치해야 하며, 운영측면에서는 가스 충전을 위해 이동하는 비용이 최소가 되도록 해야 한다(Schwoon, 2006). 본 논문에서는 천연가스버스가 운영되는 노선들의 기종점을 중심으로 한 공간적 분석과 이동비용 최소화를 통해 객관적이고 합리적인 충전소 설치의 판단 근거를 제시하고, 이를 통해 천연가스버스 보급이 원활히 진행될 수 있도록 하는데 목적이 있다.

### 2. 연구의 범위 및 특징

입지선정 시 고려되어야 할 사항은 천연가스 버스 운행 행태, 충전소 후보지 조건, 충전소 개수 및 최적화하고자 하는 목적함수이다.

본 연구에서는 충전소가 천연가스버스 운행노선상의 기종점에서만 위치한다고 가정하고 천연가스 충전소의 입지를 결정하였다. 이는 현실적으로 버스가 운행도중 충전을 위해 노선을 이탈하는 경우는 발생하기 어려우며, 충전소 설치를 위한 공간과 안전성을 고려할 때 노선 기종점 이외의 지점에 충전소를 설치하는 것은 실질적으로 바람직한 대안이 아니라고 판단하였기 때문이다.

본 연구에서 제안한 천연가스버스 충전소 입지선정 최적화 모형은 모든 천연가스버스가 가스 충전을 원활히 받을 수 있는 반경 이내에 적절한 수의 충전소를 설치함

으로써, 충전소 설치 및 운영비용과 천연가스버스들의 충전소까지 통행비용을 최소화하도록 구성되었다.

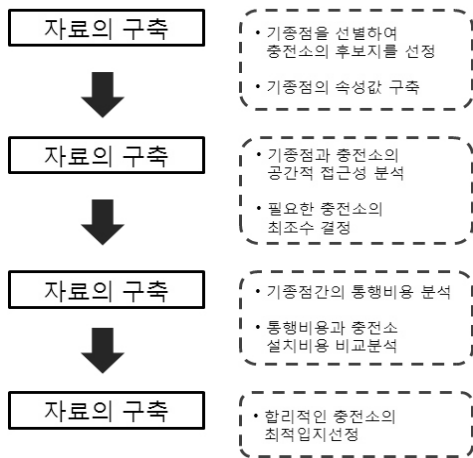
다음 2장에서는 최적화 모형의 내용과 구축방법을 제시하였으며, 3장에서는 안양시를 대상으로 하여 본 최적화 모형의 실제 적용가능성을 분석하였다. 4장에서는 본 연구의 주요 결론과 현재 제시된 천연가스버스 충전소 입지선정 최적화 모형의 한계를 극복하기 위한 향후 연구방향을 제시하였다.

## II. 모형구축

### 1. 모형구축

천연가스 충전소의 설치와 관련된 기존연구들은 주로 천연가스 자동차 도입과 관련된 사회·경제적 편익 분석을 중심으로 개략적으로 이루어져 왔다. Janssen et al(2005)은 천연가스 자동차의 시장도입을 위해 기존 차량의 천연가스 자동차로의 전환을 통한 사회적 편익과 정책적 분석을 시도하였고, Frick et al(2005)은 자동차 소유자들의 효용을 극대화할 수 있는 충전소의 입지 지점을 Logit 모델을 이용하여 도출하였다. 본 연구는 보다 실질적이고 구체적인 천연가스버스 충전소 입지선정을 위해 천연가스 수요지점과 공급지점간의 공간적 분석과 충전에 소요되는 통행비용 최적화를 활용한 계량적 분석에 중점을 두었다.

본 연구에서 제안한 천연가스버스 충전소 입지선정 모형은 2단계(Two-staged)로 구성되어 있으며, 고정식 천연가스 충전소만을 대상으로 하였다. 본 연구에서는 필요한 적정수의 천연가스 충전소의 수를 구하기 위하여 정수계획법(Integer Programming) 등의 방법론을 활용하기보다 본 연구가 천연가스 충전소 입지선정을 위한 시작단계의 연구이며, 자료의 구축 등 현실적으로 휴리스틱 모형을 통한 근사해(Near-optimal Solution)의 도출이 보다 효율적인 방법이라 판단하였다. 이를 살펴보면, 천연가스 충전소는 천연가스버스의 운행행태 고려 후, 현실적으로 이동 가능한 거리 이내에 존재하여야 한다는 사실에 주목하였으며, 이러한 특성을 고려한 휴리스틱 모형을 개발하였다. 앞서 기술한 바와 같이 천연가스버스는 노선기종점에서 충전을 위해 충전소로 이동하며, 충전소는 링크의 교차점인 노드(기종점)에 설치된다. 만약 천연가스버스 노선들의 기종점이  $n$ 개 있고, 충전소를  $m$ 개 설치하고자 한다면, 이때 가능한 충전소 설



(그림 1) Framework

치 시나리오는  $\sum_{i=1}^m C_i$  개나 존재한다. 따라서 충전소 설치 위치 조합 각각에 대해서 가스 충전을 위한 통행비용과 충전소 설치비를 분석하여 최적대안을 산정한다는 것은 연산시간(Computation Time) 측면에서 매우 비현실적이다. 따라서 본 연구에서는 충전소 설치위치 대안을 보다 합리적이고 능동적으로 찾을 수 있는 방법을 개발하였다.

1단계에서는 포함문제(Coverage Problem)를 적용하여 합리적인 충전소 위치대안들을 찾아낸다. 즉, 충전소는 노선 기종점으로부터 충전을 위해 현실적으로 이동 가능한 거리 내에 존재하여야 한다. 따라서 천연가스버스의 운행스케줄을 바탕으로 충전소로의 공간적 접근성을 반영한 최적 입지대안 집합을 선정함으로써 충전소 설치의 최소값(Lower Bound)을 설정하였다. 이를 위해 각 노선 기종점의 공간적 접근성을 분석하여 대안 집합을 결정하는 Heuristic Algorithm을 개발하였다.

2단계에서는 천연가스 충전소의 최적입지선정을 위하여 변형된 Transportation Problem을 적용하여, 1단계에서 선정된 충전소 입지대안들 중에서 충전을 위해 이동하는 천연가스버스의 총 통행비용을 최소화하는 위치를 찾아 내었다. 여기서 산출된 충전을 위한 천연가스버스들의 통행비용은 충전소 용량, 설치 및 운영비용과 함께 객관적이고 합리적인 최적입지를 도출하기 위한 기초자료로 사용된다.

1) 1단계

천연가스를 공급받기 원하는 버스에게 충전의 기회를

제공하는 것은 천연가스버스의 기종점과 충전소간의 최단거리에 의존한다고 볼 수 있다. 즉, 천연가스버스들은 일반적으로 기종점에서 가장 가까운 곳의 충전소를 이용하게 된다. 또한 일반적으로 버스노선의 1일 운행회수는 9~10회로 운행사이의 휴식을 위한 시간은 2시간정도이다. 따라서 안전한 운행을 위한 버스기사의 휴식과 충전소까지의 운행시간, 천연가스의 충전시간 등을 고려해 볼 때 노선 기종점과 충전이 가능한 충전소까지의 거리는 최대 5km이고, 천연가스버스가 1회 충전에 허용된 시간은 충전소까지의 통행시간과 천연가스버스에 충전을 하는 시간을 포함하여 최대 30~40분 정도라고 할 수 있다.

1단계 모형에서는 충전소의 위치가 노선 기종점으로부터 천연가스버스의 충전가능 거리인 5km이내에 있으면 충전이 가능하며, 거리가 임계치 5km를 초과한다면 충전이 이루어질 수 없다고 간주되어진다. 이를 기본으로 Coverage Problem의 수식을 이끌어내기 위해 노선 기종점(Depot)은  $D_i$ , 충전소(Filling Station)는  $F_i$ ,  $F_i$ 가 커버하는  $D_i$ 의 Subset은  $S_i$ 로 설정하였다. 즉, 충전소  $F_i$ 로부터  $R(=5km)$ 이내의 있는  $D_i$ 들은 Subset  $S_i$ 의 원소가 된다.

1단계 해를 구하기 위한 Heuristic Algorithm은 다음과 같으며 충전소 설치 개수의 Lower Bound를 구하기 위해 충전소의 용량을 무한대로 가정하였으며, 이는 천연가스버스의 충전을 위해 반드시 필요한 충전소의 수이다.

- [Step 1]** 각 기종점의 Subset  $S_i$ 을 구축하고  $n(S_i)$ 의 수가 가장 큰 곳에 충전소를 설치한다.
- [Step 2]** 선정된  $S_i$ 에 속한 기종점  $D_i$ 는 충전소 후보지에서 제외한다. 즉,  $S_i$ 에 속한 기종점  $D_i$ 는 **[Step 1]**에서 선정된 충전소에 의해서 충전을 받으므로 충전소의 후보지에서 제외한다.
- [Step 3]** 삭제된 기종점  $D_i$ 는 모든 Subset  $S_i$ 의 원소에서 삭제한다.
- [Step 4]** 남은  $S_i$ 가 있다면 **[Step 1]**로 돌아간다.
- [Step 5]** 남은  $S_i$ 가 없다면 Stop한다.

위 알고리즘의 Step 1에서 단순히  $n(S_i)$ 를 찾아내어 충전소를 설치하는 이유는 다음과 같다. 각 기종점의

Subset  $S_i$ 의 원소 중 가장 높은 Frequency를 나타내는 지점은 가장 많은 기종점과 근접하고 있어 이 지점을 충전소의 유력한 입지 지점으로 합리적으로 생각할 수 있다. 한편, 각 기종점의 거리는 상대적인 수치로 기종점 A에서 B까지의 거리는 B에서 A까지의 거리와 같다. 그러므로 각 Subset  $S_i$ 에서 기종점 A의 Frequency는 기종점 A의  $n(S_i)$ 와 같다. 따라서  $n(S_i)$ 의 수가 가장 큰 지점은 Subset에서 Frequency가 가장 높으며, 가장 많은 기종점과 근접하고 있어 충전소의 입지 지점으로 선정할 수 있다.

## 2) 2단계

2단계모형에서는 1단계에서 공간적 접근성에 기초하여 선정된 충전소들의 용량, 설치 및 운영비용, 충전소와 기종점간의 통행비용 등을 이용하여 최적 입지 지점을 선정한다. 천연가스버스는 운행노선의 기종점에 도착한 후 충전을 하게 되며 충전소 또한 기종점이 되는 도로망의 교차지점에 위치하게 된다. 따라서 기종점과 충전소간의 통행비용을 최소화하기 위한 문제로 볼 수 있으며 본 논문에서는 이를 위해 선형계획법의 하나인 Transportation Problem을 적용하였다.

Transportation Problem은 최소한의 운행비용으로 한정된 Supply와 Demand를 만족하는 최적화된 상황의 구현을 위해 재화의 운송방법을 결정하는 방법이다. Transportation Problem은 지금까지 다양한 분야에 매우 광범위하게 이용되었으며, 최근에는 수요가 일정치 않은 재화에 관한 운송형태(Gabor and Ommeren, 2006)와 규모가 정해지지 않은 시설의 위치결정(Averbakh et al, 2007)과 같은 문제들에까지 적용이 확대되었다.

본 논문에서는 Transportation Problem의 변형된 형태를 사용하였으며, 다음과 같이 구성된다.

$$\text{Min } Z = \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Q_{ij} C_{ij} \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{j=1}^n Q_{ij} \leq G_i, \quad \forall_i \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m Q_{ij} = B_j, \quad \forall_j \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m G_i \geq \sum_{j=1}^n B_j \quad (4)$$

$$C_{ij} = \begin{cases} C_{ij}, & \text{if } C_{ij} \leq R \\ \infty, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$Q_{ij} \geq 0, \quad \forall_i, j \quad (6)$$

여기서,

$Q_{ij}$  : 충전소 i에서 충전하는 노선기종점 j에 위치한 천연가스버스의 수

$C_{ij}$  : 가스충전을 위해 충전소 i에서 노선기종점 j에 이동하는 데 소요되는 비용

$G_i$  : 충전소 i에서 충전할 수 있는 천연가스버스의 최대 대수

$B_j$  : 노선 기종점 j에 위치한 충전이 필요한 천연가스버스의 수

식(1)은 목적함수 식으로 본 연구에서 통행비용은 통행거리로 설정하였다. 따라서 노선기종점과 충전소간의 이동거리의 합을 최소화 하는 것이다.

식(2)~(5)는 제약조건식으로써, 식(2)는 충전소 i에서 충전하는 천연가스버스의 수는 충전소의 용량을 넘을 수 없는 용량에 관한 제약조건이며, 식(3)은 각 노선기종점에 위치한 천연가스버스의 수이다. 식(4)는 충전소의 용량이 충전이 필요한 모든 천연가스버스를 처리할 수 있어야 함을 의미한다. 식(5)는 각 기종점과 충전소간의 거리가 임계치 R(km) 이내이면 충전이 이루어지며, R(km)를 초과하면 충전할 수 없음을 나타낸다. 식(6)는 통행량 변수로 비음수조건식이다.

## III. 모형분석

### 1. 입력자료

천연가스 충전소의 입지를 선정하기 위한 기본 입력 데이터로는 첫째, 천연가스버스의 기종점과 버스의 수로 표현되는 충전가스 수요량, 둘째, 알고리즘 풀이를 위해 거리를 속성 값으로 가지는 네트워크이다.

천연가스는 설치 시 위험성, 유해성, 교통난 등 역기능에 대한 강한 인식을 주고 있으며, 천연가스버스의 기종점은 동시에 충전소의 입지 후보지가 되므로 기종점에 대한 명확한 자료의 제시가 필요하다. 본 연구에서는 '고압가스안전관리법'에 따라 충전소 입지 선정의 결정요인으로 판단되는 주요시설물의 유무,

토지이용, 건축물의 밀집정도, 혼잡도를 각 기종점별로 구축하였다.

- 노선번호 : 대상버스의 ID
- 기종점 : 대상버스의 기점과 종점의 행정구역상의 위치. 순환버스의 경우에는 기점과 종점을 같은 곳으로 지정하였다.
- 주요시설물의 유무 : 지하철역, 공항 등의 교통 주요시설과 시청, 대학교 등 대형 건축물들을 충전소 입지선정의 결정에 영향을 미치는 주요 시설물로 판단하여(Y, N)로 나타내었다.
- 토지이용 : 기종점 지역의 토지이용을 현행 토지이용 구분에 따라 주거지역, 공업지역, 자연녹지지역, 개발제한구역, 상업지역으로 구분하였다.
- 건축물의 밀집도 : 단위면적당 건축물의 수를 나타내는 정량적인 방법을 사용할 수 있지만 연구의 성격이 상업지역과 다른 지역과의 분리가 주요사항인 점과 연구의 효율성을 위하여 (Y, N)로 나타내었다.
- 혼잡도 : 건축물의 밀집정도에서 사용한 방법과 같이 혼잡도를 정성적으로 평가하여 (Y, N)로 표시하였다.

천연가스버스의 가스충전 수요량은 기종점의 버스노선 수에 비례하여 설정하였다. 하나의 노선의 버스의 수는 평균 20대 정도이다. 따라서 버스기종점의 천연가스 수요량은 기종점의 천연가스버스의 수 A와 노선의 평균 버스대수 20의 곱 ( $A \times 20$ )으로 나타낼 수 있다.

위와 같이 예측된 수요량을 기반으로 적정 입지를 구

〈표 1〉 기종점 속성값의 예

좌석버스							
업체명	노선번호	기점	종점	주요시설물	건축물밀집도	토지이용	혼잡도
보영	3030	군포차고지	신사역	N	N	개발제한구역	N
우신	9502	의왕	신세계	N	N	일반주거지역	N

하기 위해서는 기종점간의 통행거리를 포함한 도로망 네트워크 구축이 필수적인 요소이다. 본 논문에서는 국가교통DB에서 제공하는 수도권 도로망 네트워크를 이용하여 통행거리 분석을 실시하였다.

## 2. 모형분석

모형의 적용 용이성과 신뢰성을 위하여 수도권의 대표적인 중소형 도시인 안양시를 대상으로 하여 다양한 실험분석을 실시하였다.

### 1) 기종점의 선별

운행되는 버스 중 순환노선인 경우는 기점과 종점을 같은 곳으로 파악하였으며, 천연가스 버스는 이동 중 충전하지 않으며 기종점 위치에 도착한 후 충전소의 위치로 이동하여 충전을 한다고 설정하였다. 안양시에서 운행되는 버스 중 기종점의 위치가 안양시를 벗어나는 광역버스와 천연가스로의 전환이 이루어지지 않은 마을버스를 제외한 후 총 12곳의 기종점(차고지 6곳 포함)이 가려졌으며 이러한 12곳이 충전소의 입지후보지가 된다.

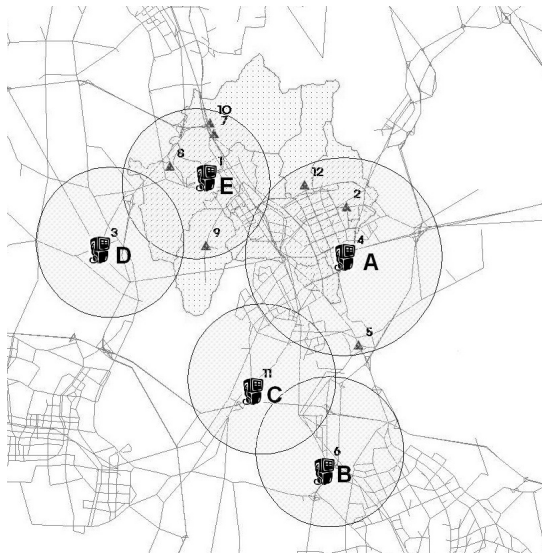
〈표 2〉 안양시 천연가스버스 기종점

기종점	버스노선	기종점	버스노선
1	1-2(적, 청)	7	20
2	1, 3	8	6, 8, 8-1, 8-2, 9, 9-3, 88
3	81	9	10, 11-3, 15, 15-2
4	51	10	11-1
5	5, 5-2, 60, 4424, 9502	11	11-2, 11-5, 917, 5531, 5624, 4425, 5623, 5530, 540, 9503, 3030
6	1-1, 1-2	12	5625, 5626, 5713

### 2) 충전소 입지점의 선정

#### (1) Heuristic Algorithm의 적용

천연가스 충전소의 최종입지를 선정하는데 있어 기종점과 충전소간의 공간적 접근성을 반영하여 최적입지대안 집합을 선정하는 작업은 충전소 입지선정 문제의 핵심이라고 할 수 있다. 충전소의 Lower bound를 구하기 위하여 충전소의 용량은 무한으로 설정하였으며, 이를 통해 안양시의 천연가스버스의 기종점과 충전소와의 접



〈그림 2〉 천연가스 충전소의 입지선정

근성을 반영한 최소한의 충전소의 수와 충전소의 충전가능 범위를 구할 수 있다.

각 충전소에서 충전을 하는 기종점과 버스용량은 다음과 같다.(단위 : 대/일)

- 충전소 A : 기종점 2(60), 4(20), 5(80), 12(60)
- 충전소 B : 기종점 6(60)
- 충전소 C : 기종점 11(220)
- 충전소 D : 기종점 3(20)
- 충전소 E : 기종점 1(40), 7(20), 8(140), 9(80), 10(20)

## (2) 천연가스 충전소 최종입지 선정

충전소의 용량을 무한대로 가정하고 총통행비용을 최소로 하기 위한 통행배정을 하면 각 기종점의 천연가스 버스는 다음과 같이 충전소를 이용하게 된다.

각 기종점간의 통행거리를 구하기 위한 패키지로는 TransCAD를 사용하였다. TransCAD는 여러 가지 분석기능과 응용기술을 가진 GIS Package이다. 한편, 충전소의 용량을 고려하여 통행비용을 최소화하기 위한 통행배정을 위한 최적화 소프트웨어는 다양한 산업분야에서 의사결정을 위해 사용되고 있는 LINDO 6.1을 사용하였다.

용량을 무한으로 설정하여 용량제약을 고려하지 않은 상황을 설정하여 구한 천연가스 충전소의 최소수는 5개이다. 충전소의 용량의 반영, 설치 및 운영비용과 통행비

〈표 3〉 1차 천연가스버스 통행배정 (단위:대/일)

기종점 충전소	A	B	C	D	E	계
1					40	40
2	60					60
3				20		20
4	20					20
5	80					80
6		60				60
7					20	20
8					140	140
9					80	80
10					20	20
11			220			220
12	60					60
계	220	60	220	20	300	820

용과의 비교를 위해 다음과 같은 상황을 설정하여 분석을 하였으며, 이를 통해 합리적인 충전소의 최적입지점을 선정하였다.

### ① 충전소의 설치 및 운영비용과 줄어든 통행비용과의 비교 :

충전소 A의 경우 충전소가 설치된 4번 기종점의 천연가스버스의 수는 20(대)로 버스의 수가 적다. 천연가스의 수요량이 적은 기종점에 충전소가 설치되어 다른 기종점에서 충전을 하기 위한 통행비용이 크다. 한편, 기종점 5번의 경우 80(대)의 버스가 이용하고 있어 5번 기종점에 충전소를 설치할 경우 천연가스버스의 통행비용을 줄일 수 있을 것으로 보인다. 이에 대한 합리적 해결을 위해 4번 기종점의 충전소를 대신하여 천연가스버스의 수가 많은 5번 기종점과 5번 기종점의 충전소가 충전할 수 없는 기종점을 위해 2번 기종점에 충전소를 추가로 설치한다. 충전소를 추가 설치하였을 경우의 통행배정 결과를 토대로 추가로 건설되는 충전소의 설치 및 운영비용과 충전소를 설치하여 줄어든 통행비용과의 비교를 통해 충전소의 최적입지선정을 평가하였다.

충전소의 추가로 2번, 4번, 12번 기종점의 버스가 추가로 건설된 충전소로 유입되었으며, 총 통행거리는 499(=1399.6-900.6)km 감소하였다. 통행거리를 금액으로 환산하기 위해 시간비용, 운행비절감편익, 환경비용편익을 고려하였으며(한국개발연구원, 2004), 435,283,526(원)의 편익이 발생하였다.

한편 추가로 충전소를 설치 및 운영하기 위한 비용은 시설투자비에 대한 이자비용, 감가상각비, 인건비, 보험료, 운영비용, 보수·점검비, 연료비를 고려하였으며(한국환

〈표 4〉 2차 천연가스버스 통행배정 (단위:대/일)

기종점 충전소	A	B	C	D	E	F 추가	계
1					40		40
2						60	60
3				20			20
4						20	20
5	80						80
6		60					60
7					20		20
8					140		140
9					80		80
10					20		20
11			220				220
12						60	60
계	80	60	220	20	300	140	820

경정책평가연구원, 2001), 충전소 용량(150대/일)을 기준으로 추가 충전소 설치 및 운영비용은 375,804,000(원)의 비용이 발생한다.

충전소의 추가로 발생하는 통행비용 절감편익이 충전소의 설치 및 운영비용보다 크므로 비용 면에서 충전소의 설치가 합리적으로 생각된다. 또한 이로 인해 발생하는 사회적 효용과 앞으로 천연가스버스가 추가로 운행될 것으로 예상하여 충전소를 추가로 설립하는 것이 바람직하다.

② 부족한 용량증대를 위해 충전소의 설치 유무 판단 :

고정식 충전소의 용량을 반영하여 충전소의 용량을 150(대/일)설정하였을 경우, 충전소 C와 충전소 E에서 용량부족이 나타난다. 먼저 E번 충전소를 대상으로 추가로 충전소를 설치하였을 경우 충전소의 설치 및 운영비용과 줄어든 통행비용과의 비교분석을 통해 충전소의 최적입지선정을 평가하였다.

〈표 5〉의 Scenario-1, 2, 3의 경우 각각 1번, 8번, 9번 기종점에 설립된 충전소에서 용량을 초과하여 충전소의 용량을 증대하거나 충전소를 하나 더 건설하여 3개의 충전소가 필요하다. 이는 비용 측면에서 현실적으로 불가능하다. 한편, 충전소의 용량은 충전을 원하는 버스의 크기와 충전기의 성능에 따라 정해진다. 본 논문에서는 기

〈표 5〉 충전소 용량제약을 위한 Scenario (단위:km, 대/일)

Scenario	충전소	총통행비용	초과용량
1	기종점1, 9번	609.4	1번 : 70
2	기종점8, 9번	506	8번 : 70
3	기종점7, 9번	1045.6	9번 : 70
4	기종점1, 8번	658.4	1번 : 10

〈표 6〉 3차 천연가스버스 통행배정(Scenario-4) (단위:대/일)

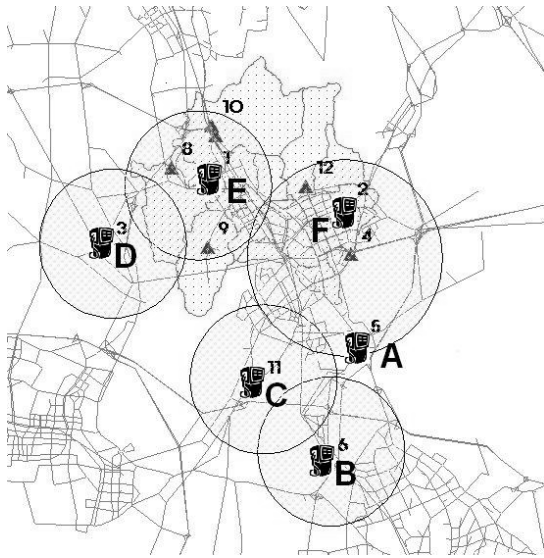
기종점 충전소	A	B	C	D	E	F 추가	G 추가	계
1					40			40
2						60		60
3				20				20
4						20		20
5	80							80
6		60						60
7					20			20
8							140	140
9					80			80
10					20			20
11			220					220
12						60		60
계	80	60	220	20	160	140	140	820

존의 연구결과를 토대로 충전소의 용량을 150(대/일)로 가정하였으며, 이는 해당 충전소의 상황에 따라 변할 수 있다. 또한 Transportation Problem의 문제 풀이를 위해 충전소의 용량을 150(대/일)로 정하였지만, 충전소의 용량은 고정된 값이 아닌  $150 \pm \alpha$ 의 값을 지닌다고 판단된다. 이를 근거로 초과용량 10(대/일)인 Scenario-4에 의한 통행배정은 최적화 모델을 기반으로 한 해는 아니지만, 모형에서 제시된 해를 기반으로 결정한 최적의 대안으로써, 실현 가능하다고 간주하였다.

8번 기종점의 설립된 충전소에서 천연가스버스를 충전함으로써, 총 통행거리는 242.2km 감소하였으며, 211,295,988(원)의 편익이 발생하였다. 이는 앞서 언급한 충전소의 설치 및 운영비용 375,804,000(원)의 56% 정도로 충전소의 추가설치는 비용측면에서 타당하지 않다. 따라서 충전소의 추가설치보다는 현실적으로 충전소 E의 용량을 증대하여 부족한 용량을 해결하는 것을 최적 대안으로 결정하였다.

다음으로 충전소 C의 경우 기종점 11번의 천연가스 버스만을 충전하지만 11번 기종점의 수요량이 많아 용량을 넘어서고 있다. 이를 해결하기 위해선 충전소E와 마찬가지로 충전소 C의 충전기수 증대를 통한 용량 증대를 통해 기종점 11번의 천연가스버스 수요량을 충족하여야 할 것이다.

본 논문의 모형을 적용하여 설립된 천연가스 충전소의 최적입지선정은 위의 〈그림 3〉에 제시된 바와 같으며, 충전소 F의 신설과 충전소 C와 E에서 용량증대를 하였다. 필요한 천연가스 충전소의 개수는 6개로 안양시의 40개 노선의 천연가스버스를 충전한다.



〈그림 3〉 천연가스 충전소 최종입지선정

#### IV. 결론 및 향후과제

본 논문에서는 대형경유차 중 운행 빈도가 가장 높은 시내버스를 저공해 자동차인 천연가스 버스로 대체·보급할 필요성을 인식하여 천연가스 충전소의 입지선정을 위한 객관적이고 합리적인 방법을 개발하였다.

본 연구는 천연가스 충전소 입지선정 방법론의 정립을 위한 시작단계의 연구로서 천연가스버스로의 전환에 대한 필요성을 부각시키며, 기존의 연구가 천연가스 자동차 도입과 관련된 사회적 및 경제적 편익 분석을 중심으로 개략적으로 이루어진데 반하여 천연가스버스 충전소 입지선정을 위해 천연가스 수요지점과 공급지점간의 공간적 분석과 충전에 소요되는 통행비용 최적화를 활용한 계량적 분석을 통해 천연가스 충전소 입지선정 방법론의 방향의 제시라는 새로운 시도의 의미를 갖는다.

본 연구에서 제안한 천연가스버스 충전소 입지선정모형은 고정식 충전소만을 대상으로 하였으며 2단계로 구성되어 있다. 1단계에서는 최소로 필요한 천연가스 충전소 개수를 구하기 위하여 노선기종점에서 충전소까지의 공간적 접근성을 고려한 Heuristic Algorithm을 개발하였다. 2단계에서는 변형된 Transportation Problem을 적용하여 1단계에서 선정된 충전소 입지대안들 중에서 충전을 위해 이동하는 천연가스버스의 총 통행비용과 충전소의 용량, 설치 및 운영비용을 고려한 통행배정을 분석하여 객관적이고 합리적인 최적입지점들을 선정하였다.

본 연구는 충전소 입지선정 모형 정립을 위한 첫 단계로써, 수리적 모형을 통한 학술적 연구이며, 보다 구체적인 천연가스 충전소의 입지선정을 위해서는 본 연구를 바탕으로 충전소 입지선정을 위한 다양한 요소들을 고려한 천연가스 충전소 입지선정의 목적식 및 제약조건이 구축되어야 할 것이다. 이를 통해 보다 현실적인 천연가스 충전소 입지선정 모형이 정립되리라 생각된다.

본 모형에서는 이동식 충전소를 제외한 고정식 충전소만을 대상으로 이루어졌으므로 향후 연구에서는 이동식 충전소를 포함한 최적화 문제로 확대될 필요성이 있다. 또한, 기존 천연가스버스의 운행기록을 살펴보면 천연가스버스는 일반 경유 차량과 똑같이 운행되고 있으며, 하루 평균 약 300km의 운행거리를 주행하고 있다. 천연가스버스의 경우 일일 평균 충전량(일일CNG소모량)은 167m<sup>3</sup>이다. 그러나 평균 충전량은 140m<sup>3</sup>이므로 일부 버스는 일일 2회 충전하는 것으로 파악된다. 향후, 천연가스버스를 보급하기 위해서는 대상지역에서 운행되고 있는 노선의 1일 운행거리 및 운행에 필요한 충전횟수 등 노선의 특성을 반영한 충전소의 보급이 이루어져야 할 것이다. 이와 함께 충전소 용량증대에 따른 비용효과 분석 부분 역시 추후에 보다 세밀하게 접근해야 할 부분이다.

향후, 전국 각지에 천연가스버스를 보급하기 위해서는 천연가스 충전소가 계획적으로 건설되어야 하며, 이를 위해 객관적이고 합리적인 충전소 입지선정 방법이 필요하다. 본 논문에서 제시한 천연가스 충전소 입지선정 최적화 모형을 기반으로 대상지역의 지역적 특성을 고려한 제약조건을 추가로 반영한 충전소 입지선정이 이루어진다면, 계획단계에서부터 시민들의 동의를 이끌어 내어 천연가스버스 보급이 보다 활발히 진행될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

1. 한국개발연구원 (2004), "도로·철도 부문사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완 연구".
2. 한국환경정책평가연구원 (2001), "이동충전차량 시범사업 그 영향에 관한 연구 I", pp.50~115.
3. Averbakh, I., O. Berman, Z. Drezner, and G. O. Wesolowsky (2007), "The Uncapacitated Facility Location Problem with Demand-dependent Setup and Service Costs and Customer-choice Allocation", European Journal of



- Operation Research 179, pp.956~967.
4. Frick, M., G. Carle, A. Wokaun, K. W. Axhausen (2005), "Optimization of The Compressed Natural Gas (CNG) Refueling Station Distribution: Swiss Case Studies".
  5. Gabor, A. F. and J. C. W. van Ommeren (2006), "An Approximation Algorithm for A Facility Location Problem with Stochastic Demands and Inventories", Operation Research Letters 34, pp.257~263.
  6. Jassen, A., S. F. Lienin, F. Gassmann, A. Wokaun (2006), "Model aided Policy Development for the Market Penetration of Natural Gas Vehicles in Switzerland", Transportation Research Part A 40 pp.316~333.
  7. Schwoon, M. (2006), "A Tool to Optimize The Initial Distribution of Hydrogen Filling Stations", Transportation Research Part D 12, pp.70~82.
  8. Yang, M., T. Kraft-Oliver, G. X. Yan, and W. T. Min (1997), "Compressed Natural Gas Vehicles: Motoring Towards a Cleaner Beijing", Applied Energy, Vol. 56, Nos 3/4, pp.395~405.

- ♣ 주 작성자 : 유정훈
- ♣ 교신저자 : 유정훈
- ♣ 논문투고일 : 2007. 5. 19
- ♣ 논문심사일 : 2007. 9. 5 (1차)  
2008. 4. 29 (2차)
- ♣ 심사관정일 : 2008. 4. 29
- ♣ 반론접수기한 : 2008. 10. 31
- ♣ 3인 익명 심사필
- ♣ 1인 abstract 교정필