

최대연결거리를 고려한 전기자동차 급속충전소 최적 위치선정 연구*

Electric Vehicle Fast-Charging Station Location Problem Considering Maximum Connection Distance

이 우 범(Lee, WooBeom)** · 황 태 성(Hwang, TaeSung)***

최근 들어 정부는 다양한 정책을 통해 국내 전기자동차 보급 활성화를 도모하고 있으나 전기자동차 충전인프라의 보급은 아직 부족함을 보이고 있다. 전기자동차는 친환경적인 특성을 갖추고 있음에도 1회 충전 시 주행가능거리 부분에서 기술적 한계점을 보이고 있다. 이는 전기자동차의 에너지 공급원인 배터리가 주행환경에 따라 기대치보다 빠른 속도로 방전될 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 이와 같은 문제를 고려하여 전기자동차를 이용한 장거리 운행 시 연속적인 충전서비스를 제공받기 위해 필요한 급속충전소의 위치에 대해서 분석하였다. 이를 위해 시설 설립에 따른 비용을 최소화하는 시설입지문제를 제안하였으며, 전기자동차의 제한된 배터리 용량으로 인한 최대 주행가능거리를 모형에 고려하기 위해 시설 간 연결성을 제약조건으로 추가하였다. 제안된 모형은 경부고속도로 하행선과 상행선에 적용하였으며 최적해를 도출할 수 있었다.

|주제어| 전기자동차 충전소, 입지선정모형, 연결성

1. 서론

1990년대 이후 세계 각국은 기후변화협약을 통해 온실가스 배출량을 점진적으로 감축하기로 합의하였다. 우리나라 또한 이 협약의 가입국이며 더불어 지구온난화 및 기후변화를 적극적으로 방지하기 위한 교토의정서 준수 국가로써 온실가스 배출량 저감을 위해 다각도로 노력하고 있다. 이와 같은 노력의 일환으로 정부에서는 전기자동차 보급의 활성화를 도모하고 있다. 현재 정부에서는 전기자동차 구입 시 세계 혜택, 보조금 지원, 고속도로 통행료 및 공영주차장 이용료 할인 등 다양한 정책적 지원을 통해 전기자동차 산업을 활성화시키고 있다(송미령 등, 2018).

전기자동차는 화석연료를 연소하여 엔진을 구동시키는 기존 내연

기관 자동차와는 다르게 차량구조가 단순하며 배터리와 전기모터를 이용하는 상대적으로 고효율의 차량이다. 이에 따라 전기자동차는 주행 중 소음, 진동이 거의 없으며 전기에너지만으로 구동되기에 이산화탄소 및 대기오염물질 배출의 문제에서 자유롭다고 할 수 있다. 이와 같이 전기자동차는 친환경적이며 미래지향적인 특성을 갖추고 있음에도 1회 충전 시 주행가능거리 부분에서 기술적인 한계점을 보이고 있다. 전기자동차의 1회 충전 주행가능거리는 일반적으로 제조사에서 제시한 수치만큼 운행하기가 쉽지 않은데, 이는 날씨 혹은 주행환경에 따라 배터리가 기대치보다 빠른 속도로 방전될 수 있기 때문이다(박세준, 2016). 더불어 고용량 배터리의 경우 매우 높은 가격에 비해 성능이 그에 미치지 못해서 전기자동차의 활성화가 어렵다는 지적도 있다(황성호, 2012).

이러한 상황을 고려했을 때 전기자동차 보급을 활성화하려는 정

* 본 논문은 2019년도 인하대학교의 지원(INHA-60566)에 의하여 연구되었으며, 제1저자의 인하대학교 물류전문대학원 석사학위 논문을 수정 및 보완한 것임.

** 제1저자, 인하대학교 물류전문대학원 석사, patrician48@hanmail.net

*** 교신저자, 인하대학교 아태물류학부 & 물류전문대학원 조교수, thwang@inha.ac.kr

부의 정책을 뒷받침하기 위해서는 충분한 수의 전기자동차 충전인프라 설치가 전제조건이라고 할 수 있다. 그러나 한국환경공단(2018)에 따르면 현재 국내 전기자동차 충전인프라 숫자는 전반적으로 부족함을 보이고 있으며, 특히 서울 경기 지역과 제주, 그리고 경북 지역에 편중되어 지역별 편차가 심한 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 고속도로를 이용하여 장거리 주행을 하는 전기자동차 이용자들은 부족한 충전인프라 문제로 불편함을 겪을 가능성이 크다고 사료된다(박세준, 2016).

본 연구에서는 이와 같은 문제를 고려하여 전기자동차를 이용한 고속도로 장거리 운행 시 목적지에 도착하기 까지 연속적인 충전서비스를 제공하기 위해 필요한 급속충전소의 위치와 설치 기기의 개수에 대해서 분석하고 최적해를 도출하였다. 환경부(2015)에 따르면 전기자동차는 외부 전력 공급을 통한 충전이 필요하다고 언급하고 있다. 급속충전기는 50kW급으로 방전상태에서 약 80% 충전까지 대략 30분 가량이 소요되며, 완속충전기는 약 6~7kW급으로 방전 상태에서 완전 충전까지 대략 4~5시간이 소요된다. 기존의 전기자동차 및 충전인프라 관련 연구로는 주로 기술적인 측면에서 배터리 성능 향상, 구동시스템 효율화, 전기 공급 시 전력손실 최소화, 충전시스템 개선 등에 관한 연구가 주로 진행되었고, 충전인프라 입지 선정에 관한 연구는 아직 활발히 이루어지지 않은 실정이다. 본 연구에서는 입지의 출발지와 도착지 사이를 주행하는 전기차량에 대해 정량적 측면에서 충전소 입지선정 모형을 제시하고 분석을 진행하였다. 더불어 전기자동차의 한정된 배터리 용량으로 인한 최대 주행가능거리 제약조건을 모델에 고려하기 위해 충전소간 일정거리 이내에 서로 입지하도록 하는 연결성을 모델에 포함하였다.

본 모형은 국내 고속도로 중 최상위의 교통량을 보이면서 최장거리를 보유한 경부선 하행과 상행 양방향에 적용하였다. 고속도로 상에서 전기자동차 충전은 휴게소 내에서만 가능하도록 하였으며, 장거리 운행을 가정하기 위해 기점과 종점을 각각 고속도로 상 처음과 마지막 휴게소로 설정하였다. 기존의 고속도로 휴게소에 설치된 급속충전소 현황을 반영하여 모형을 적용한 결과 목적지 까지 연속적인 충전서비스 제공을 위한 연결성이 보장되는 해를 산출 할 수 있었다.

본 논문의 구성은 아래와 같다. 제 2장은 선행연구에 대해 분석하며, 제 3장에서는 본 연구에서 제안하는 연결성을 고려한 입지선정모형에 대해 기술한다. 제 4장에서는 연구 진행을 위한 몇 가지 가정과 데이터를 기술하고 분석 결과를 도출한다. 마지막으로 제 5장에서는 본 연구의 요약 및 시사점을 언급하고 한계점을 명시한 후 추후 발전 방향을 제시한다.

II. 선행연구

1. 전기자동차 충전시설 관련 선행연구

전기자동차에 대한 기존 연구는 배터리, 구동시스템 등의 기술적

측면과 소비자 인식, 경제성 평가 등과 같은 사회적 측면에서 진행되었다. Egbue & Long(2012)은 전기자동차의 확산을 위해서는 소비자의 전기자동차에 대한 신뢰도 향상 그리고 새로운 기술에 대한 진입장벽을 극복해야 함을 언급하였고, Lu et al.(2013)은 리튬-이온 전지의 장점과 문제점을 밝히며 해결책으로 효과적인 전지관리시스템을 제안하였다. Kiani(2017)에서는 아랍에미리트에서 온실가스 배출량 저감을 위해서는 전기자동차 활성화가 필요함을 언급하며 전기자동차 시장의 침투효과에 관하여 분석하였다. 더불어 유두영(2017)은 친환경 자동차의 운영적 문제를 해결하기 위해서는 연료 의존성이 없으며 운영비용이 저렴해야 함을 언급하며 대용량 전기자동차의 구동시스템에 대한 설계 기준을 제시하였다.

전기자동차 충전인프라 관련 선행연구로는 기술적 측면에서 충전인프라 효율성을 향상시키는 연구가 많이 이루어졌으며, 사회적으로는 전기자동차 보급률에 비해 부족한 충전인프라에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. Clement-Nyns et al.(2010)은 전기자동차와 같은 대체에너지를 사용하는 차량의 증가로 인하여 추가적인 전기 부하가 발생할 경우 이는 주거용 배전망에 영향을 미칠 수 있음을 언급하였다. 따라서 저자는 국지적 규모에서 전력 공급을 효율적으로 조정해야 함을 제시하고 연구방법론으로는 Quadratic and Dynamic Programming을 사용하였으며 주거용 배전망에 대하여 전력손실을 최소화 하는 요소들을 분석하였다. Sortomme et al.(2011)은 Plug-in 하이브리드 전기차의 점유율이 증가함에 따라 전력공급, 특히 배전과정에서 과부하, 효율성 및 전력품질 저하와 같은 문제를 언급하며 전력량 손실을 최소화하는 3가지 충전 알고리즘을 제시하였다. 변완희 등(2013)에서는 로짓모형을 기반으로 전기자동차 충전시간과 충전요금 지불 의사 간의 관계를 분석하였고, 임유석 등(2013)은 가상의 전기자동차 충전시설 시뮬레이터를 통해 전기차 충전인프라 보급의 효율화를 도모하였다. Islam et al.(2018)은 전기자동차 보급 확대에 따라 일반 사업장에서 상당한 양의 추가적인 주간 충전이 필요할 것을 언급하며 특히 가정에서 전기 수요를 충분히 부담하지 못한다면 현재의 전력망에 상당한 악영향을 미칠 수 있음을 지적하였다. Sarikprueck et al.(2018)은 Plug-in 전기자동차 증가에 따른 DC 레벨 3-급속 충전이 가능한 새로운 충전시스템을 제안하였고, 이는 풍력 발전과 태양광 발전 등으로 충전되는 분산 에너지 저장 시스템을 갖추도록 설계되었다. 한진석(2018)에서는 국내 전기자동차 충전시설 설립현황, 설문조사 및 승용차 이용자의 통행 경향분석, 해외 사례 연구 등을 통해 전기자동차 충전인프라 최우선 설치 지점으로 사용자의 직장을 언급하였다.

2. 입지선정모형 관련 선행연구

입지선정모형은 입지의 시설에 대해 다양한 제약조건을 고려하여 최적의 위치를 선정하는 문제를 다룬다. 전기자동차 충전인프라 입지선정 문제의 경우 고준호(2009)에서는 전기자동차 보급 활성화가 아직 이루어지지 않은 상태에서 전기차 충전소 입지 선정을 위한 방

법론으로 정보통신기술과 정보시스템의 중요성을 언급하였다. Cai et al.(2014)은 중국 베이징 시내 택시 주행기록에 관한 빅데이터 분석을 통해 사용자 운행 패턴을 전기자동차 충전인프라의 입지 선정 과정에 반영하는 것이 매우 유용함을 보여주었다. Zhu et al.(2016)에서도 중국 베이징 시내 주요지점에 전기자동차 충전소를 신규 설립하는 문제를 다루었고, 이를 위해 혼합정수모형을 구성한 후 Genetic Algorithm을 적용하여 해를 구하였다. 김태경 등(2016)은 네비게이션 사용자 데이터를 기반으로 서울시의 전기자동차 공용 충전기기 위치 선정을 분석하였다. 저자는 디자인 과학 연구법을 적용하였고 전기차의 주행 범위에 대한 불안감을 고려하여 여정 설계 알고리즘을 제안하였다.

연결성을 고려한 입지선정문제의 경우 Peng et al.(2013)에서는 임의의 시설 간 최단거리가 일정 기준 이하이면 이들 간에는 연결성이 성립된 것으로 정의하는 혼합정수모형을 제시하였다. 메타휴리스틱을 활용하여 미국 일리노이 주의 고속도로 네트워크 상에 모형을 적용하여 최적해를 구하였다. Bardossy & Raghavan(2016)은 불확실성을 내재한 상황에서 연결성을 고려한 시설입지모형을 제안하였고, 대규모 그리드 네트워크 상에 ARO 휴리스틱을 적용하여 해를 산출하였다. 류규상, 황태성(2019)에서는 국내 재해재난대비 물류창고 입지 선정을 위한 연결성을 고려한 최대지역 커버모형을 제안하였으며, 앞서 Peng et al.(2013)에서 정의된 연결성을 적용하여 혼합정수모형을 구성하였다.

3. 기존연구와의 차별성

앞서 살펴본 것처럼 전기자동차 및 충전인프라 관련 선행연구는 배터리 성능 향상, 전기 공급 시 전력 손실 최소화, 충전 시스템 효율성 제고와 같은 기술적 측면에 주로 맞추어져 있다. 전기자동차 충전인프라의 입지선정에 관한 기존 연구는 수리적 모델을 통한 분석, 혹은 GIS 분석과 같은 정량적 기법이나 설문조사와 같은 정성적 기법이 적용되었다. 다만 우리나라에서는 전기자동차 충전인프라에 관한 연구는 아직 활발히 이루어진 단계가 아니며, 특히 충전인프라 입지선정에 관한 연구는 많이 부족한 실정이다.

본 논문에서는 전기자동차를 이용하여 고속도로 장거리 주행 시 목적지에 도착할 때 까지 연속적인 충전서비스를 제공하기 위한 충전소입지모형을 다루었다. 본 연구는 경부고속도로 하행선과 상행선을 대상으로 기존 고속도로 휴게소에 설치된 전기자동차 급속충전소 현황을 반영하였으며, 이를 바탕으로 추가 및 신규 설립 위치와 충전기 개수에 대해 분석하였다.

특히 출발지에서 목적지까지 연속적인 충전서비스 제공을 모형화하기 위해서 본 연구에서는 연결성을 고려한 시설입지문제를 제안하였다. 전기자동차는 한정된 배터리 용량으로 인해 최대 주행가능거리 제약을 내재하고 있다. 따라서 배터리 충전소가 전기자동차의 최대 주행가능거리 이내에 서로 위치하게 된다면 이들 시설 간에는 연결성을 보장하게 된다.

III. 모형설계

다양한 입지선정모형 중 대표적인 몇 가지 정량적 모델로 Set Covering Problem, P-Center Problem, P-Median Problem, 그리고 고정 비용을 고려하는 시설입지문제(Fixed Charge Facility Location Problem) 등이 많이 연구되어 왔다(Daskin, 1995). 이와 같이 다양한 수리적 모형 중 본 연구는 고정 비용을 고려하는 시설입지문제를 근간으로 하며, 보다 구체적으로는 충전시설 설립에 따르는 비용의 총합을 최소화하는 최적의 위치를 결정하는 것을 목적으로 한다.

더불어 본 연구에서는 시설 간의 최대 연결거리를 모델에 고려하였다. 이는 선행연구에서 살펴본 Peng et al.(2013)에서 제시된 연결성의 개념을 적용하여, 고속도로 상 전기자동차 급속충전소에 대하여 전기자동차의 최대 주행가능거리 이내에 충전소가 설립되었을 때 각 시설 간에는 연결성이 성립된다고 변형하여 정의하였다. 이를 네트워크 모델링 관점에서 노드 간의 연결성이 보장되는지 확인하기 위해서 먼저 가상의 source node와 sink node를 설정한다. 그리고 설치된 시설의 수만큼 가상의 흐름(flow)를 source node에서 sink node로 네트워크 상 설립된 시설을 통해 흘러보낸다. 만약 네트워크 상 임의의 후보지에 하나의 충전소를 건설하기로 결정한다면 source node에서는 해당 후보지에 하나의 흐름(unit flow)를 보내준다. 또한 시설이 설립된 노드에서는 최대 연결거리 이내에서 연결성이 성립된 다른 노드로 유입된 총 흐름을 보내준다. 궁극적으로 마지막 노드에서는 연결성이 성립된 이전 노드로부터 “설치된 시설의 수 - 1”만큼의 흐름을 받고 또한 source node로부터 하나의 흐름을 받게 되며, 이와 같은 총 흐름은 sink node로 나가게 된다. 이와 같은 교통류 보존법칙(flow conservation)을 통하여 본 연구에서는 일반적인 시설입지문제에서 시설 간 연결성 확보라는 추가 제약조건을 고려하게 된다.

모형을 구성하기 위해 전기자동차 충전소를 세우기 위한 고속도로 휴게소 후보지의 집합을 J 라고 정의한다. 더불어 집합 J 는 가상의 sink node도 포함하며 이는 1번으로 나타낸다. 연결성 관련하여 C 는 후보지에 설립된 시설 간의 연결성이 보장되는 최대거리를 의미하며, 본 연구에서는 전기자동차의 최대 주행가능거리와 같은 의미를 가진다. 임의의 후보지 $j \in J$ 에서 최대연결거리 C 내에 위치하는 후보지들의 집합은 N_j 로 나타낸다. 그리고 후보지 $j \in J$ 에 시설이 들어설 때 발생하는 고정비용을 f_j 로 나타내며, M 은 임의의 큰 수를 의미한다. 마지막으로 결정변수 x_j 는 임의의 후보지 $j \in J$ 에 시설 입지 여부를 나타내며 충전소가 건설되는 경우 1, 그 외의 경우 0을 가지는 이진변수이다. 또한 l_{ij} 는 두 후보지 $i, j \in J$ 에 대하여 시설 간의 연결성을 보장하는 교통류 보존법칙을 나타내기 위해 정의한 두 시설 간 가상의 흐름을 의미한다. 이와 같이 정의한 모든 상수 및 변수를 이용하여 아래와 같이 모형이 구성될 수 있다.

$$\text{minimize } \sum_{j \in J} f_j x_j \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{j \in N_j \setminus \{1\}} x_j \geq 1 \quad (2)$$

$$x_j + \sum_{n \in N_j} l_{nj} = \sum_{m \in N_j} l_{jm} \quad \forall j \in J \setminus \{1\} \quad (3)$$

$$l_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in J \quad (4)$$

$$l_{ij} \leq Mx_j \quad \forall i, j \in J \setminus \{1\} \quad (5)$$

$$l_{ij} \leq \sum_{j \in J} x_j - 1 \quad \forall i, j \in J \setminus \{1\} \quad (6)$$

$$l_{1j} = 0 \quad \forall j \in J \quad (7)$$

$$l_{j1} \in \left\{0, \sum_{j \in J} x_j\right\} \quad \forall j \in J \setminus \{1\} \quad (8)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \setminus \{1\} \quad (9)$$

$$x_1 = 0 \quad (10)$$

목적함수인 식(1)은 네트워크 상 전기자동차 충전소의 총 설치비용을 최소화하는 것을 나타내고 있다. 제약식(2)는 임의의 충전소로부터 전기자동차의 최대 주행가능거리 안에 적어도 한 개 이상의 충전소가 위치해서 충전서비스를 제공할 수 있도록 한다. 제약식(3)은 연결성 보장을 위한 교통류 보존법칙을 의미한다. 이는 앞서 언급된 것처럼 네트워크 상 모든 전기차 충전소 후보지에 대해 source node로부터 그리고 앞에서 연결되어 있는 다른 시설로부터 유입되는 모든 유량(inflow)는 이후에 연결되는 다른 시설로 유출되는 모든 유량(outflow)와 같다고 제약함으로써 최대 주행가능거리 내에서 목적지까지 연속적인 충전을 가능케 한다. 제약식(4)부터 제약식(8)까지는 연결 가능거리 내에 설립된 충전소 간에 발생하는 가상의 흐름에 대한 다양한 고려조건을 나타낸다. 제약식(4)는 해당 흐름의 비음조건을 나타내며, 제약식(5)는 후보지에 충전소가 설립될 때에만 다른 노드로 가상의 흐름이 발생하도록 한다. 제약식(6)은 네트워크 상에서 최대 가상 흐름의 크기는 충전소의 개수보다 하나 작도록 제약한다. 이는 마지막 충전소의 경우 앞에서 연결된 충전소로부터 받는 흐름에 더불어서 source node로부터 하나의 유량을 추가로 받기에 설정된 제약식이다. 제약식(7)은 sink node로부터 네트워크 방향으로 가상의 흐름이 발생하지 못하도록 하며, 제약식(8)은 최종적으로 네트워크에서 sink node로 흐르는 유량의 크기를 정의하고 있다. 제약식(9)는 모든 후보지에 대하여 시설 입지 여부를 나타내는 이진변수를 정의하며, 제약식(10)은 sink node에는 어떠한 경우에도 시설이 입지하지 않음을 나타낸다.

IV. 분석과정 및 결과

본 장에서는 앞서 제안한 모델을 토대로 실제 국내 고속도로 네트워크 상에서 전기자동차 사용자에게 연속적인 급속충전 서비스를 제

공하기 위한 충전소 입지를 선정하였다. 보다 구체적으로 국내 고속도로 중 최다 교통량을 보이면서 최장거리를 보유한 경부선 하행과 상행 양방향을 대상으로 휴게소의 위치, 기존 급속충전소 설치여부 및 설치대수, 휴게소 부지의 공시지가 등과 같은 실제 데이터를 반영하여 노선별로 급속충전소 설치 위치 및 이에 따르는 총비용을 산출하였다. 모형 분석을 위하여 CPLEX V12.7.1이 사용되었으며, 지도화 작업을 위해 Tableau Desktop을 사용하였다.

1. 분석을 위한 기본가정

분석 과정에서 고속도로 내 전기자동차의 현실적인 주행상황과 전기자동차 충전시설의 구체적인 상황을 모두 반영하기 어려운 한계점 때문에 본 연구에서는 다음과 같은 몇 가지 가정 하에서 분석을 진행하였다.

- 가정 1. 전기자동차 급속충전소 추가 설립을 위한 가용예산은 충분하다. 이는 신규 설립되는 고속도로 휴게소 내 전기자동차 급속충전소에 대하여 연결성을 고려한 서비스 제공이라는 본 연구의 주된 목적에 초점을 맞추기 위해 예산에 관한 제약 조건은 고려하지 않음을 의미한다.
- 가정 2. 고속도로 상에서 전기자동차 충전은 휴게소 내에서만 가능하며, 장거리 운행 상황을 고려하기 위해 기점과 종점을 각각 고속도로 상 처음과 마지막 휴게소로 가정하였다.
- 가정 3. 운행 기점에서 전기자동차 출발 시 완전히 충전된 상태이며, 종점까지 주행 중 중간 휴게소 충전시설 이용 시 마다 잔량에 관계없이 항상 완전히 충전한다고 가정한다.
- 가정 4. 전기자동차 급속충전기 설치비용은 한국에너지공단(2017)의 전기자동차 급속충전기 설치비용 지원 기준을 참고하여 설치 장소에 관계없이 대 당 4천만원으로 가정한다.
- 가정 5. 전기자동차 급속충전기 1대 설치 시 필요한 대지 면적은 환경부(2018)의 전기자동차 충전인프라 설치 및 운영지침예시를 참고하여, 기기 설치면적과 충전 중인 전기자동차의 주차면적을 합하여 총 10㎡가 소요된다고 가정하였다. 또한 후보지의 해당 면적 지가는 한국감정원 부동산 공시지가 알리미의 정보를 반영하였다.
- 가정 6. 전기자동차 사용자가 휴게소 내의 급속충전소에 도착했을 때 서비스를 바로 받을 수 있는 이용 가능률은 0.5로 가정한다. 이는 휴게소에 전기자동차 충전인프라가 설치되어 있다고 해도 기기고장, 점검, 혹은 다른 사용자의 이용으로 인해 충전기를 바로 이용할 수 없는 상황을 반영하였다. 실제로 이고은(2017)에 의하면 전국 전기자동차 충전소 중에서 약 20% 정도는 고장이나 점검 등의 이유로 이용이 불가능하다고 하며, 전기차 이용자들은 이보다 비율이 더 높다고 토로하고 있다. 이와 같은 상황에서 기존 사용자로 인한 대기 상황까지 고려하여 이용 가능률을 0.5로 상정하였다.

2. 데이터 수집 및 가공

한국도로공사(2018)에서는 전국의 36개 고속도로 노선별로 일평균 교통량을 제공하고 있다. 이 자료를 바탕으로 본 연구에서 제시한 수리적 모형을 현실에 적용하기 위해 교통량이 최상위 분포를 보이면서 동시에 휴게소 설치현황, 장거리 운행을 위한 노선의 길이 등을 고려하여 연구목적에 적합한 경부선 하행과 상행 두 노선을 선별하였다. <표 1>은 일평균 양방향 통행량 기준 국내 상위 10개 고속도로 노선(한국도로공사, 2018)을 나타내고 있으며, 이 중에서 본 연구에서 선택된 노선을 볼드체로 표시하였다.

<표 1> 노선별 국내 고속도로 통행량 중 상위 10개 노선(한국도로공사, 2018)

노선명	일평균 통행량(천대)	비중(%)
경부선	1,312	18.1
영동선	597	8.2
서해안선	447	6.2
남해선	418	5.8
중부선(통영대전선)	413	5.7
호남선(논산천안선)	360	5.0
중부내륙선	316	4.4
평택제천선	209	2.9
당진영덕선	203	2.8
동해선	80	1.1

이 후 노선별로 휴게소 간 거리를 GIS의 네트워크 분석기능을 통하여 확보하였다. 또한 연결성을 위한 전기자동차의 최대 주행가능거리는 150km로 가정하였다. 하만승(2017)에 따르면 국내에 시판되

는 전기자동차 중 대중적인 모델들은 일반적으로 200km 내외의 최대 주행가능거리를 제시하고 있다. 그러나 전기자동차의 최대 주행가능거리는 주행상황과 기후조건에 따라 급격히 감소할 가능성이 크기에 본 연구에서는 제조사에서 제시한 수치보다 보수적으로 가정하였다. 더불어 각 고속도로 휴게소 별로 전기자동차 급속충전소를 신규 및 추가 설립할 때 발생하는 고정비용(f_j)은 m^2 당 공시지가를 고려한 토지비용과 기기 설치비용의 합으로 정의되며, 구체적인 수치는 앞 절의 가정 4와 가정 5로부터 산정가능하다. 마지막으로 각 고속도로 휴게소 내 전기자동차 급속충전소의 설치여부 및 설치 대수현황을 파악하기 위해 한국환경공단(2018)에서 제공하는 전기차 충전소 모니터링의 현황 충전소 시설 운영 정보를 이용하였다. 이를 바탕으로 가정 6에서 제시한 이용 가능률을 반영하여 각 휴게소 별로 급속충전소 개수의 기대치를 산정하였다. 각 휴게소 별로 기대치가 1.0에 미치지 못하는 경우 신규 혹은 추가 설치 가능지역, 즉 후보지로 선정하였고, 더불어 기대치가 최소 1이 되도록 신규 혹은 추가 설치 개수를 산정하였다.

3. 분석결과

1) 국내 고속도로 노선 네트워크 적용

본 연구의 국내 고속도로 네트워크 적용 문제에서는 전기자동차 사용자의 이용 가능률 0.5를 반영한 휴게소 별 기 설치된 충전기 개수의 기대치를 기반으로 각 노드를 필요할 경우 신규 혹은 추가 설립이 가능한 후보지로 선정하였다. 아래의 <표 2>와 <표 3>은 경부선 하행과 경부선 상행 두 노선에 대해 기점부터 종점까지 모든 휴게소

<표 2> 모델 적용을 위한 경부선 하행 데이터 구성

휴게소명	기점부터의 거리(km)	설치대수	신규 혹은 추가 설치대수	휴게소 공시지가(천원/ m^2)	고정비용(천원)
만남의 광장	0	4	0	1,690	-
기흥	27	2	0	1,100	-
안성	54	1	1	232	42,321
망향	73	0	2	870	97,400
천안	91	1	1	261	42,621
옥산	111	1	1	400	44,000
죽암	131	1	1	530	45,300
옥천	162	1	1	248	42,475
금강	170	3	0	960	-
황간	188	1	1	152	41,520
추풍령	203	0	2	305	86,100
김천	215	2	0	250	-
철곡	255	5	0	710	-
평사	306	1	1	391	43,910
건천	333	2	0	370	-
경주	360	1	1	181	41,810
통도사	376	3	0	660	-

<표 3> 모델 적용을 위한 경부선 상행 데이터 구성

휴게소명	기점부터의 거리(km)	설치대수	신규 혹은 추가 설치대수	휴게소 공시지가(천원/㎡)	고정비용(천원)
양산	0	0	2	300	86,000
언양	34	1	1	750	47,500
건천	66	1	1	370	43,700
경산	101	1	1	653	46,526
철곡	148	2	0	710	-
김천	184	2	0	250	-
추풍령	203	0	2	305	86,100
황간	220	2	0	160	-
옥천	245	2	0	248	-
신탄진	270	1	1	300	43,000
죽암	279	2	0	530	-
청주	306	1	1	700	47,000
천안삼거리	326	3	0	1,200	-
입장	344	2	0	350	-
안성	360	1	1	232	42,321
죽전	390	3	0	1,230	-

명과 기점부터의 거리(km), 그리고 충전소 설치 현황을 보여주고 있다. 이를 바탕으로 신규 혹은 추가설치가 필요한 경우 각 휴게소별 공시지가와 필요충전 대수에 따른 기기 설치비용을 고려하여 휴게소별 급속 충전기 설치 관련 고정비용을 산출하였다.

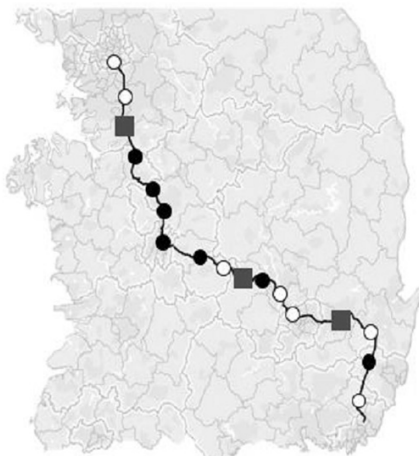
본 분석에서 전기차 운전자의 기점과 종점은 각각 첫 번째와 마지막 휴게소로 가정하였고 전기자동차의 최대 주행가능거리는 150km로 설정하였다. <그림 1>과 <그림 2>는 분석 결과를 보여주고 있다. 두 그림에서 하얀색 원은 기존 충전기 개수가 충분하여 후보지에서 제외된 휴게소를 나타내며, 후보지 휴게소 중에서 해가 아닌 지역은 검은색 원으로 표시되었다. 반면 후보지 휴게소 중에서 최적해로 선정된 곳은 사각형으로 표시하였다.

경부선 하행의 경우 이용 가능률을 반영한 기대치가 1 보다 작아

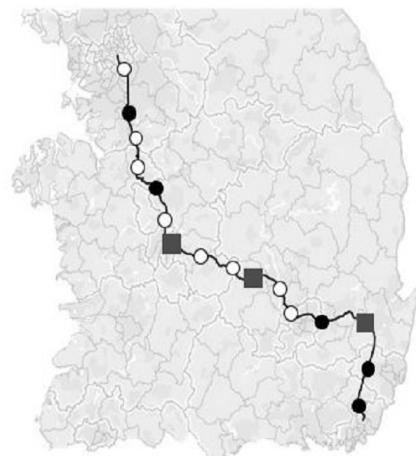
후보지로 선정된 노드는 안성, 망향, 천안, 옥산, 죽암, 옥천, 황간, 추풍령, 평사, 경주를 포함한 총 10개 휴게소이다. 이를 바탕으로 전기자동차 급속충전소 신규 및 추가설립을 위한 분석을 시행하였을 때 안성, 황간, 그리고 평사를 포함한 3개 휴게소에 각각 1대씩, 총 3대의 전기자동차 급속충전소를 추가 설립하는 것으로 나타났으며, 이때 총 설치비용은 127,751,000원으로 계산되었다.

경부선 상행의 경우 이용 가능률을 반영한 기대치가 1 미만을 보이는 휴게소로 양산, 언양, 건천, 경산, 추풍령, 신탄진, 청주, 안성을 포함한 총 8개 노드가 후보지로 고려되었다. 이 중에서 건천휴게소에 1대 추가설립, 추풍령휴게소에 2대 신규설립, 그리고 신탄진휴게소에 1대 추가설립 하는 것으로 최적해가 나타났으며, 이와 같이 4대를 설치함에 따른 총 비용은 172,800,000원으로 산출되었다.

<그림 1> 경부선 하행 분석결과



<그림 2> 경부선 상행 분석결과



2) 민감도 분석

본 연구에서는 전기자동차의 최대 주행가능거리 이내에 충전소가 설립되었을 때 시설 간에 연결성이 성립되는 것으로 정의하였고 전기자동차의 최대 주행가능거리를 150km로 가정하였다.

전기자동차의 최대 주행가능거리를 결정하는 배터리의 효율성은 계절, 날씨, 혹은 도로의 경사도와 같은 외부 요소에 절대적인 영향을 받기에 본 연구에서는 보수적인 측면에서 분석을 진행하였다. 그러나 최근 들어 국내 전기자동차 및 이와 관련된 배터리 기술이 발전함에 따라 최대 주행가능거리도 증가하는 추세이며, 이를 반영하기 위해 본 장에서는 전기자동차의 다양한 최대 주행가능거리에 따른 최적해의 특성을 파악하는 민감도 분석을 수행하였다. 최대 주행가능거리는 110km부터 250km까지 10km씩 증가시켰으며 이용 가능률은 0.5로 고정시킨 상태에서 경부선 상행에 대해서만 분석을 진행하였다.

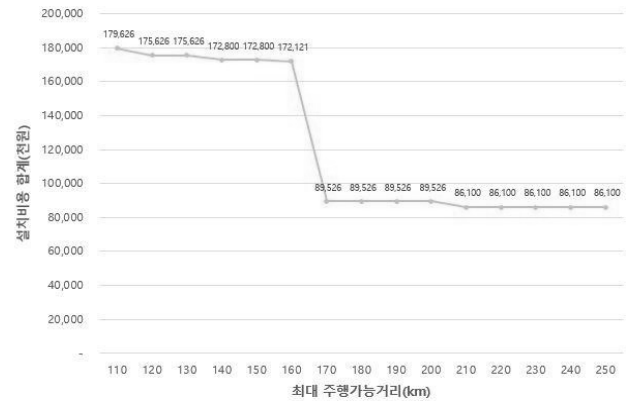
분석 결과 <표 4>에 나타나 있듯이 최대 주행가능거리가 110km부터 160km까지 증가함에 따라 모두 4대의 충전소를 설치하는 것으로 나타났으며, 비록 설치대수는 같아도 최적 입지에는 변화가 있음을 관측할 수 있었다. 먼저 110km일 때에는 경산휴게소(1대), 추풍령휴게소(2대), 청주휴게소(1대)에 최적입지가 형성되는 것으로 나왔다. 그리고 120km와 130km일 때에는 경산휴게소(1대), 추풍령휴게소(2대), 신탄진휴게소(1대)에 4대를 설치하며, 140km와 150km일 때에는 건천휴게소(1대), 추풍령휴게소(2대), 신탄진휴게소(1대)에 설치를 하는 것이 최적인 것으로 나타났다. 그리고 160km일 경우에는 건천휴게소(1대), 추풍령휴게소(2대), 안성휴게소(1대)에 4대를 설치하는 것이 최적으로 나타났다. 반면 최대 주행가능거리가 170km부터 200km까지인 경우 경산휴게소(1대)와 신탄진휴게소(1대)에 2대를 설치하는 것이 최적으로 나타났으며, 210km 이후로는 추풍령휴게소(2대)에 2대 설치하는 것이 최적해로 계산되었다.

결과적으로 최대 주행가능거리가 증가함에 따라 신규 및 추가 설치해야 하는 전기자동차 충전소의 설치대수가 줄어들었고, 이는 <그림 3>에서 볼 수 있듯이 설치비용 합계를 감소시키는 것으로 나타났다.

<표 4> 민감도 분석에 따른 입지 및 총 비용 변화(경부선 상행)

최대 주행가능거리(km)	충전소 설치대수	입지명(휴게소)	최소 설치비용(천원)
110	4	경산(1), 추풍령(2), 청주(1)	179,626
120	4	경산(1), 추풍령(2), 신탄진(1)	175,626
140	4	건천(1), 추풍령(2), 신탄진(1)	172,800
160	4	건천(1), 추풍령(2), 안성(1)	172,121
170	2	경산(1), 신탄진(1)	89,526
210	2	추풍령(2)	86,100

<그림 3> 최대 주행가능거리 증가에 따른 총 설치비용의 변화(경부선 상행)



V. 결론

최근 들어 자동차의 배기가스 오염물질과 이산화탄소 배출에 대한 규제가 더욱 엄격해지고 더불어 환경보호에 대한 대중의 관심이 높아짐에 따라 전기자동차 보급이 점차 확대되고 있다. 전기자동차는 기존 내연기관 자동차와는 달리 배터리를 충전하여 모터만으로 구동되기에 공해물질 배출이 없어서 환경보호에 기여할 수 있다. 더불어 전기자동차는 기존 내연기관 자동차에 비해 구조가 단순하고 부품수도 적으며 이에 따라 열효율이 상대적으로 더 우수하다. 이러한 장점을 바탕으로 디젤게이트 이후 차세대 자동차 산업으로 전기자동차의 발전 및 보급이 전 세계적 주목을 받고 있는 상황이며, 국내에서도 현재 전기자동차 저변 확대를 위해 다양한 정책을 통해 지원하고 있다.

이와 같이 급속한 전기자동차 시장 성장에 따라 전기자동차 충전 인프라 보급 및 설치 후 관리에 대해서도 필요성이 증가하고 있다. 그러나 현재 국내에는 전기자동차 보급이 활발한 지역을 중심으로 충전인프라를 우선 보급하였기에 전기자동차를 이용하여 장거리 이동을 하는 경우 부족한 충전인프라 때문에 불편함을 겪는 경우가 다수 발생하고 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 고속도로 네트워크 중 가장 교통량이 많으며 장거리 운행이 가능한 경부고속도로 하행선과 상행선을 대상으로 전기자동차로 장시간 주행 시 급속충전소가 필요한 최적의 위치를 분석하였다.

다수의 선행 연구에서 채택한 정성적 방법과는 달리 본 연구에서는 시설 입지에 따른 고정비용의 총합을 최소화하는 정량적 입지분석 모형을 제시하였다. 더불어 네트워크 상에서 시설의 입지를 결정할 때에는 서로 간 최대 연결가능 거리 이내에 위치하도록 제약하는 조건을 추가하였는데, 이는 전기자동차의 제한된 배터리 용량으로 인한 최대 주행가능거리를 모형에 고려한 것이다.

분석 결과 각 노선별 휴게소의 급속충전소 이용 가능률을 0.5로 상정하고 전기자동차의 최대 주행가능거리를 150km로 가정하였을

때, 경부선 하행의 경우 총 10개의 후보지 중에서 3개 휴게소, 즉, 안성휴게소, 황간휴게소, 그리고 평사휴게소에 각각 1대씩, 총 3대의 급속충전소를 추가 설립하는 것이 최적으로 나타났다. 경부선 상행의 경우 총 8개 후보지 중에서 건천휴게소에 1대 추가설립, 추풍령휴게소에 2대 신규설립, 그리고 신탄진휴게소에 1대 추가설립 하는 것이 최적해로 산출되었다. 더불어 본 연구에서는 최대 주행가능거리를 변동시키면서 이에 따른 최적해의 특성을 파악하는 민감도 분석을 수행하였고, 결과적으로 최대 주행가능거리를 110km부터 250km까지 10km 단위로 증가시킴에 따라 신규 및 추가 설치해야하는 충전소의 개수가 줄어들고 총 설치비용도 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

전기자동차를 이용한 장거리 운행이 가능하기 위해서는 이상적으로는 충전 인프라가 전국 곳곳에 충분히 설치되어 있어 연속적인 충전서비스 제공이 가능해야한다. 그러나 실제로는 비용 상의 문제로 최다 수요지 근방에만 밀집되어 있는 것이 현실이다. 따라서 전기자동차의 최대 주행가능거리를 급속충전소 간 최대 연결거리로 고려한 본 연구는 전기자동차 사용자의 실제 문제를 다루고 있다는 점에서 의의가 있다. 더불어 이와 같은 연구는 이충배 등(2017)과 정창근(2017)에서 언급되었듯이 궁극적으로 4차 산업혁명과 관련된 물류기술, 특히 전기자동차를 이용한 자율주행 기술에 이바지 할 수 있을 것이라 사료된다.

본 연구는 특정 전기자동차가 정해진 출발지에서 도착지까지 수행하는 단방향의 네트워크만 고려하는 한계점을 내재하고 있다. 실제 도로 상에는 수많은 전기자동차가 서로 다른 출발지와 도착지 사이를 운행하고 있으며, 중간 경유지에 따라 무수히 많은 경로가 가능하다. 따라서 향후에는 다수의 전기자동차 이용자를 동시에 고려하는 방향으로 모형 개발이 필요할 것이다. 또한 본 연구에서는 이용가능률을 도입하여 전기자동차 사용자가 고속도로 휴게소의 급속충전소를 바로 사용할 수 있을 확률을 정의하였지만, 이는 각 휴게소마다 정차하는 전기자동차의 실제 통행량을 고려하지 않은 한계점이 있다. 향후 연구에서는 충전시간에 따른 충전소 이용 가능률의 명확한 관계에 대한 분석이 필요하며, 더불어 각 휴게소 별 전기자동차의 통행량과 충전소의 용량 등 다양한 변수를 반영하여 사용자가 급속충전 서비스를 바로 받을 수 있는 보다 정확한 확률을 적용할 필요가 있다. 마지막으로 향후 연구에서는 고속도로 외에도 국도나 간선, 지선 등 도로 네트워크의 범위를 확장하여 분석을 진행시킬 수 있다. 이는 고속도로 중간 차량의 진출입을 고려할 수 있고 더불어 실질적인 교통상황을 반영할 수 있어서 보다 현실적인 연구를 가능케 할 것이다.

-논문접수일: 2019. 07. 23.

-수정접수일: 2019. 08. 14.

-게재확정일: 2019. 08. 19.

참고문헌

- 고준호 (2009). 전기자동차와 충전인프라. 도로, 11(4), 45-49.
- 김태경, 김장영, 양윤기 (2016). 네비게이션 데이터를 바탕으로 한 서울시의 공공 전기차 충전소 위치. *Information Systems Review*, 18(4), 1-15.
- 류규상, 황태성 (2019). 연결성을 고려한 최대지역 커버문제를 활용한 재해구호 창고 최적위치 분석. *한국SCM학회지*, 19(1), 19-30.
- 박세준 (2016. 7. 27). *전기차 대중화 안 되는 3가지 이유*. 주간동아. <http://weekly.donga.com/3/all/11/544417/1> 에서 검색.
- 변완희, 이기홍, 기호영 (2013). 로짓모형을 이용한 전기자동차 충전시설 선택모형 및 충전요금 지불의사 분석 연구. *한국ITS학회논문지*, 12(4), 56-65.
- 송미령, 주우진, 임미자 (2018). 한국 전기차 시장의 소비자 특성 분석. *경영학연구*, 47(2), 271-306.
- 유두영 (2017). *대용량 전기자동차 구동시스템의 고장사례 분석 및 개선방안*. 박사학위논문, 숭실대학교 대학원.
- 이고은 (2017. 11. 23). *멈춘 전기차 충전기 수두룩 네비 보고 찾아가도 낭패*. 뉴스핌. <http://www.newspim.com/news/view/20171123000242> 에서 검색.
- 이충배, 노진호, 김정환 (2017). 제4차 산업혁명의 기술이 물류성에 미치는 영향에 대한 인식 연구. *물류학회지*, 27(5), 1-12.
- 임유석, 방창현, 한승호 (2013). 전기자동차 운행특성 모의를 통한 충전패턴 분석에 관한 연구. *전자공학학회논문지*, 50(1), 205-214.
- 정창근 (2017). 제4차 산업혁명 - 주요 기술과 공급사슬관리 탐색 연구. *물류학회지*, 27(6), 193-209.
- 하만승 (2017. 4. 7). *테슬라, 볼트EV, 아이오닉 어디까지 갈까 전기차 주행거리 총정리*. 모터그래프. <https://www.motorgraph.com/news/articleView.html?idxno=11957> 에서 검색.
- 한국도로공사 (2018). *2017 고속도로 교통량 통계*. <http://www.ex.co.kr/> 에서 검색.
- 한국에너지공단 (2017). *전기차충전서비스산업육성 사업 운영지침*. <http://www.alio.go.kr/etcEtcinfoView.do?seq=2263073> 에서 검색.
- 한국환경공단 (2018). *전기자동차 정보 포털 서비스 [환경부 전기차 충전소]*. <https://ev.or.kr/portal> 에서 검색.
- 한진석 (2018). 서울시 전기차 충전인프라 설치 방안 연구: 직장 고용 충전인프라를 중심으로. *서울도시연구*, 19(3), 131-147.
- 환경부 (2015). *친환경 자동차*. <http://www.me.go.kr/home/file/readDownloadFile.do?fileId=123720&fileSeq=1&openYn=Y> 에서 검색.
- 환경부 (2018). *2018년 전기차 충전인프라 설치운영지침*. http://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?menuId=10262&seq=7077 에서 검색.
- 황성호 (2012). *전기자동차의 경제성 평가를 위한 모형 개발에 관한*

연구 박사학위논문, 경남대학교 대학원.

- Bardossy, M.G., & Raghavan, S. (2016). Approximate Robust Optimization for the Connected Facility Location Problem. *Discrete Applied Mathematics*, 210, 246-260.
- Cai, H., Jia, X., Chiu, A., Hu, X. & Xu, M. (2014). Siting Public Electric Vehicle Charging Stations in Beijing Using Big-Data Informed Travel Patterns of the Taxi Fleet. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 33, 39-46.
- Clement-Nyns, K., Haesen, E., & Driesen, J. (2010). The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid. *IEEE Transactions on Power Systems*, 25 (1), 371-380.
- Daskin, M.S. (1995). *Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications*. New York: John Wiley and Sons.
- Egbue, O., & Long, S. (2012). Barriers to Widespread Adoption of Electric Vehicles: An Analysis of Consumer Attitudes and Perceptions. *Energy Policy*, 48, 717-729.
- Islam M.S., Mithulananthan, N., & Hung, D.Q. (2018). A Day-Ahead Forecasting Model for Probabilistic EV Charging Loads at Business Premises. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 9(2), 741-753.
- Kiani, A. (2017). Electric Vehicle Market Penetration Impact on Transport-Energy-Greenhouse Gas Emissions Nexus: A Case Study of United Arab Emirates. *Journal of Cleaner Production*, 168, 386-398.
- Lu, L., Han, X., Li, J., Hua, J., & Ouyang, M. (2013). A Review on Key Issues for Lithium-Ion Battery Management in Electric Vehicles. *Journal of Power Sources*, 226, 272-288.
- Peng, F., Hwang, T., & Ouyang, Y. (2013). Formulation and Algorithms for Discrete Minimum-Cost Group Assembly Problem. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2333, 9-15.
- Sarikprueck, P., Lee, W.J., Kulvanitchaiyanunt, A., Chen, V.C.P., & Rosenberger, J.M. (2018). Bounds for Optimal Control of a Regional Plug-in Electric Vehicle Charging Station System. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(2), 977-986.
- Sortomme, E., Hindi, M.M., James-MacPherson, S.D., & Venkata, S.S. (2011). Coordinated Charging of Plug-In Hybrid Electric Vehicles to Minimize Distribution System Losses. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(1), 198-205.
- Zhu, Z.H., Gao, Z.Y., Zheng, J.F., & Du, H.M. (2016). Charging Station Location Problem of Plug-in Electric Vehicles. *Journal of Transport Geography*, 52, 11-22.

Electric Vehicle Fast-Charging Station Location Problem Considering Maximum Connection Distance*

Lee, WooBeom** · Hwang, TaeSung***

Abstract

Recently market share of electric vehicles is gradually growing in South Korea due to its high energy efficiency as well as significant role in reducing emissions. However, the number of electric vehicle charging stations is still not enough and they are mostly installed in the areas where the demand is high. In general, electric vehicles have lower maximum driving range comparing to the vehicles equipped with conventional internal combustion engine. The electric vehicles are powered by batteries, the performance of which are easily affected by unexpected external factors such as ambient temperature or road topology. This paper proposes a method to find the optimal locations of charging stations for those who plan to travel long distance using an electric vehicle. The proposed model considers connectivity between two consecutive charging stations due to the maximum driving range of the electric vehicle. A case study is conducted to find the optimal locations of additional electric vehicle charging stations on a Gyeongbu Expressway in South Korea.

Key words: Electric Vehicle Charging Station, Facility Location Problem, Connectivity

* This work was supported by INHA UNIVERSITY Research Grant (INHA-60566) and has been adapted from the first author's master's thesis.

** First Author, Master, Graduate School of Logistics, Inha University, patrician48@hanmail.net

*** Corresponding Author, Assistant Professor, Asia Pacific School of Logistics & Graduate School of Logistics, Inha University, thwang@inha.ac.kr