

에너지 전환정책에 따른 전기자동차의 환경편익 추정연구[†]

전호철*

요약 : 전기자동차는 수송부문의 대표적인 온실가스 및 미세먼지 감축 대책으로 손꼽히고 있다. 세계 각 국가들은 전기자동차 보급 확대를 위해 구매 보조금 및 세제 감면 등의 자원제도를 시행하고 있다. 전기자동차는 주행 중에 발생하는 환경오염물질이 없다는 점에서 무배출차량(ZEV: Zero-Emission Vehicle)로 분류되지만 이는 전기자동차에 사용되는 전력을 생산하는 과정에서 발생하는 간접적인 배출을 고려하지 않은 것이다. 따라서 전기자동차의 보급에 따른 환경적 편익 증대는 전력 믹스에 따라 달라진다. 본 논문에서는 국내의 전원 구성 환경과 향후 진행될 에너지 전환에 따른 전기자동차의 환경적 영향을 분석하였다. 상세한 대기오염물질 배출 산정을 위해 각 발전소의 시간별 오염물질 배출과 발전량 데이터를 구축하여 발전소별 발전 효율 및 오염물질 배출량 저감 노력 등을 반영하였다. 분석결과 현재의 발전원별 비중에서는 전기자동차의 환경적 편익이 -0.41~10.83원/km에 불과한 것으로 분석되었다. 또한 에너지 전환 시나리오에 따른 전기자동차의 환경편익 분석결과 석탄 발전의 비중이 상당한 정도로 줄어드는 경우에만 전기자동차가 내연자동차에 비해 높은 수준의 환경 편익이 발생하는 것으로 나타났다.

주제어 : 전기자동차, 대기오염물질, 구매 보조금, 환경편익

JEL 분류 : H2, Q3, R4

접수일(2019년 1월 27일), 수정일(2019년 2월 21일), 게재확정일(2019년 3월 12일)

[†] 본 논문은 한국환경정책·평가연구원 연구과제(전기자동차 보급에 따른 지역간 오염물질 및 온실가스 배출 영향 분석)의 주요 결과를 활용하여 작성되었다. 또한 2018년 한국환경경제학회 하계학술대회에서 발표되었던 논문을 보완하여 수정한 것이다.

* 환경정책평가연구원 부연구위원, 교신저자(e-mail: hcjeon@kei.re.kr)

Analysis of Electric Vehicle's Environmental Benefits from the Perspective of Energy Transition in Korea

Hocheol Jeon*

ABSTRACT : The electric vehicle is a representative measure to reduce greenhouse gas and local air pollutants in the transportation sector. Most countries provide purchase subsidies and tax reductions to promote electric vehicle sales. The electric vehicles have been considered as zero-emission vehicles(ZEV) in light of the fact that there has been no pollutant emission during driving. However, recent studies have pointed out that the pollutant emitted from the process of generating electricity used for charging the electric vehicles need to be treated as emissions of the electric vehicles. Furthermore, the environmental benefits of electric vehicle replacing the internal combustion vehicle vary with the power mix. In line with the recent studies, this study analyzes the impact of electric vehicles based on the current power mix and future energy transition scenarios in Korea. To estimate the precise air pollutants emission profile, this study uses hourly electricity generation and TMS emission data for each power plant from 2015 to 2016. The estimation results show that the electric vehicles under the current power mix generate the environmental benefits of only -0.41~10.83 won/km. Also, we find that the environmental benefit of electric vehicle will significantly increase only when the ratio of the coal-fired power plant is reduced to a considerable extent.

Keywords : Electric vehicle, air pollutants, subsidy, environmental benefit

Received: January 27, 2019, Revised: February 21, 2019, Accepted: March 12, 2019.

* Research fellow, Korean Environmental Institute, Corresponding author(e-mail: hcjeon@kei.re.kr)

I. 서론

IEA(2017a) 통계에 따르면 수송부문은 2015년 총 에너지 소비량의 약 29%, 온실가스 배출량의 24%를 차지하고 있다. 또한 수송부문의 주요 에너지원인 휘발유와 경유는 대기오염의 주요 원인으로 지적되고 있다. 세계적으로는 중국 및 인도 등 개발도상국의 경제성장으로 인하여 수송부문의 에너지 소비, 온실가스 및 대기오염물질 배출은 꾸준히 증가할 것으로 전망되고 있다. 최근의 연구에 따르면 대기오염으로 인한 직접 및 간접 피해 비용이 총 소득의 6.6%에 달하는 것으로 분석되고 있다(OECD 2016).

수송부문의 에너지 소비를 줄여 온실가스 및 대기오염물질로 인한 피해를 최소화하기 위해 전 세계적으로 다양한 정책이 시행되고 있다. 대표적으로 연료세(fuel tax) 혹은 탄소세(carbon tax) 등과 같이 시장의 가격 기능을 통해 외부효과를 교정하는 정책과 연비 혹은 배출기준 등 직접 규제(Command and Control) 방법이 존재한다. 이러한 정책적인 접근과 더불어 친환경자동차의 개발 및 보급을 통해 수송부문의 환경오염물질을 줄이기 위한 노력도 지속되고 있다. 특히 전기자동차는 친환경자동차 시장의 핵심으로 부각되고 있고 판매량도 급증하고 있으며 2030년이면 시장 점유율이 10.8%에 이를 것으로 전망되고 있다(IEA 2017b).

전기자동차 보급은 국내에서도 수송부문의 온실가스 및 미세먼지 감축 대책의 핵심적인 정책수단으로 추진되고 있다. 다만 부족한 경제성을 보완하기 위해 구매 보조금 지급, 세제 감면 및 기타 다양한 지원제도를 수립하여 시행하고 있다. 전기자동차 지원 정책의 핵심적인 근거는 온실가스 및 대기오염물질 감소를 통해 기후변화에 대응하고 국민 건강을 증진하는 데 있다고 평가할 수 있다.¹⁾

전기자동차는 주행 중 발생하는 대기오염물질이 없다는 점에서 무배출 차량(ZEV: Zero-Emission Vehicle)으로 분류된다. 하지만 이는 전기자동차에 사용되는 전력을 생산하는 과정에서 발생하는 간접적인 배출을 고려하지 않은 것이다.²⁾ 최근 다양한 연구에서 발전 부문의 전원 구성에 따라 전기자동차의 환경적 특성이 변화할 수 있다는 점을

1) 「대기환경보전법」 제58조(저공해자동차의 운행 등)에 따르면 대기질 개선 또는 기후·생태계 변화유발물질 배출감소를 위하여 필요하다고 인정되는 경우 보조금을 지급할 수 있다.

2) 주행 중에도 브레이크 패드 및 타이어 마모에 의해 미세먼지(PM_{2.5}) 배출된다. 다만 화석연료 사용에 따른 배출이 없다는 점에서 무배출 차량으로 취급된다.

지적하고 있다(Holland et al., 2016; Huo et al., 2015; Ji et al., 2015; McLaren et al., 2016; 김재경, 2017; 안상진, 2017). 예를 들어 미국의 경우 지역별로 전원 구성이 다양하여 전기자동차가 내연자동차에 비해 가지는 환경적 편익은 지역적인 차이가 크다. 특히 화석연료에 의한 발전 비중이 높은 지역은 온실가스 및 대기오염물질 배출이 휘발유 차량에 비해 더 많은 것으로 나타났다(Graff Zivin et al., 2014; Holland et al., 2015).

국내의 2017년 총발전량에서 에너지원별 비중을 보면 원자력이 26.8%, 석탄발전 43.1%, 천연가스 22.2%, 유류 1.5% 및 신재생 5.6%를 차지하고 있다. 화석연료인 석탄, 천연가스 및 유류 발전이 66.8%를 차지하고 있다. 에너지 전환의 목표로 수립된 제8차 전력수급계획에 따르면 2030년에는 신재생에너지 비중이 20%로 크게 상승하지만 석탄발전은 여전히 40% 수준을 상회할 것으로 전망되고 있다.

이와 같은 점에서 전기자동차가 현재의 전원 구성에서 내연자동차에 비해서 가지는 환경적 편익을 분석함으로써 수송부문의 온실가스 및 미세먼지 감축 대책으로서의 효과성을 살펴볼 필요가 있다고 하겠다. 아울러 장기적인 관점에서 에너지 전환에 따라 전기자동차의 환경적 편익 변화를 분석하는 것은 환경정책 수립에 중요한 시사점을 가진다고 할 수 있다.

본 논문에서는 전기자동차의 대기오염물질 배출 분석에 있어 발전원별 거시 데이터를 사용한 기존의 국내 문헌에서 나타나는 배출량 산정의 문제점을 해결하였다. 특히 분석의 주요 변수가 되는 발전량과 대기오염물질 배출량의 시간별 데이터를 이용하여 시간별 전원구성에 따른 오염물질 배출량의 차이를 분석하였다. 더불어 대기오염물질 배출량 산정에 있어 기존 문헌에서 사용된 대기오염물질 배출량 통계(CAPSS)가 아닌 실측 원격감시체계(Telemonitoring Systems, TMS) 자료를 사용하여 대기오염물질 배출량 산정의 정확도를 향상하였다. 또한 편익이전(benefit-transfer)을 통해 산정한 대기오염물질별 환경비용을 바탕으로 전기자동차 차종별 환경피해비용을 추정하여 기존의 내연자동차와의 비교를 통해 환경편익을 산정하였다. 또한 분석된 환경편익의 결과를 바탕으로 전기자동차의 적정 구매보조금 수준을 도출하고 에너지 전환 시나리를 설정하여 환경편익의 변화를 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 선행연구를 살펴보고, 기존의 연구의 한계점 및 본 연구의 차별점을 제시하였다. 제 III장에서는 본 연구에 사용된 자료와 추정

방법론을 소개하고 제 IV장에서는 추정결과를 제시한다. 제 V장에서는 에너지 전환 정책 시나리오에 따른 적정 구매보조금 수준을 산출하였다. 마지막으로 제 VI장에서 결론 및 시사점을 도출하였다.

II. 선행연구

전기자동차의 대기오염 및 온실가스 배출 감소와 석유 의존도 완화 등 친환경적인 특성에도 불구하고 낮은 시장 점유율을 극복하기 위해 필요한 요인들을 분석하는 연구가 주를 이루고 있다(Liao et al., 2017). 하지만 전기자동차가 가지는 다른 사회·환경적 특성, 특히 전기자동차에 사용되는 전력 생산에서 비롯되는 환경적 피해 및 편익에 대한 연구는 미국과 중국의 사례를 중심으로 매우 제한적으로 이루어졌다.³⁾ 미국의 사례를 분석한 연구는 지역별 혹은 주별 전원 구성의 차이에서 오는 전기자동차의 환경영향의 실질적 특성에 대해서 주로 연구가 되었다. 반면 2015년 기준 석탄발전의 비중이 70.1%에 달하는 중국의 사례에서는 전기자동차의 환경적 피해에 대해 주로 연구가 이루어졌다. 또한 중국은 지역적으로는 소득이 낮은 지역에 주로 석탄발전소가 위치해 있어 환경 정의(Environmental Justice) 문제가 제기되고 있다.

앞서 언급한 바와 같이 지역적으로 전원 구성의 차이에서 비롯되는 전기자동차의 환경적 특성에 대해 일부 연구가 존재한다. GraffZivin et al.(2014)은 미국의 지역별 전원 구성의 차이가 전기자동차의 운행 거리당 온실가스 배출량, 즉 한계 온실가스 배출량(marginal emission rates)의 차이를 발생시킨다는 점을 보였다. 분석된 결과를 지역별로 플러그인 하이브리드와 가솔린 하이브리드 차량의 온실가스 배출량을 비교하여 지역별로 온실가스 감축 정책의 차이가 있어야 한다는 점을 강조하였다. GraffZivin et al.(2014)이 전 지구적 오염물질(Global Pollutant)인 CO₂만을 대상으로 한 반면 Holland et al.(2016)은 통합평가모형(IAM: Integrated Assessment Model)을 활용하여 온실가스는 물론 대기오염물질 배출에 있어 전기자동차의 영향을 분석하였다. 특히 대기오염물질 배출은 지역에 따라 다른 환경편익을 나타내고 있음을 보였다. 또한 이산선택모형(discrete choice model)를 바탕으로 이론적인 적정보조금 수준이 전기자동차가 내연자

3) 전기자동차 보급에 장애 요인 및 소비자 행동에 대해서는 Rezvani et al.(2015)를 참조.

동차에 비해 가지는 환경편익의 크기 만큼이라는 해(solution)를 도출하였다. 이러한 결과는 사회적 효용 극대화를 위해서는 지역적으로 차등적인 보조금 정책이 필요성을 제기하였다. 한편 Archsmith et al.(2015)은 생애주기분석방법(Life-Cycle Assessment, LCA)을 통해 미국에서의 전기자동차의 온실가스 배출 영향을 분석하였다.⁴⁾ 분석결과 평균적으로 전기자동차가 내연자동차에 비해 온실가스 배출량이 낮으나 지역적 차이가 크게 나타남을 보였다. Huo et al.(2015) 역시 생애주기 분석 방법을 통해 중국과 미국의 지역별로 온실가스 및 대기오염물질의 영향을 분석한 결과 기존 연구의 결과와 마찬가지로 중국의 경우 모든 지역에서 전기자동차가 내연자동차에 비해 온실가스 및 대기오염물질 배출이 높으며 미국의 경우는 지역적으로 크게 차이가 남을 보였다.

다른 한편으로 최근의 몇몇 연구들은 전기자동차가 가지는 사회·환경적 영향에 주목하였다. 특히 Ji et al.(2015)는 중국의 석탄발전소가 소득이 낮은 지역에 위치한 반면 상대적으로 소득이 높은 지역에서 전기자동차의 구매 및 운행이 발생한다는 특징을 분석하였다. 다시 말해 내연자동차는 주행이 발생하는 지역을 중심으로 환경피해가 발생하나 전기자동차는 석탄발전소가 위치한 곳에 환경피해가 집중된다는 점이다. 이는 결국 전기자동차로 인해 대기오염물질이 소득이 높은 곳에서 낮은 곳으로 전가되는 현상, 즉 환경정의에 위배되는 사회적 현상이 발생하게 된다. Holland et al.(forthcoming)은 미국의 사례에서 유사한 현상을 발견하였으며 이러한 분석결과를 바탕으로 전기자동차 보급에 따라 환경피해가 발생하는 지역에 보조금 규모를 상향해야 한다는 정책을 제시하였다.

국내에서 발전부문의 온실가스 및 대기오염물질 배출을 고려하여 전기자동차의 환경적 영향에 대해 분석한 연구는 제한적이다. 우종률(2015)은 국외문헌 연구를 통해 전력믹스에 따라 전기자동차의 CO₂ 배출이 달라질 수 있음을 지적하였다. 다만 국내의 발전믹스 및 세부적인 데이터를 적용하는 대신 국외 문헌의 연구 결과를 이용한 분석에 목적이 있었으며 특히 대기오염물질 배출은 연구범위에서 포함되지 않았다. 안상진(2017)이 CAPSS 자료의 배출계수와 평균적인 차량의 연비 등을 이용하여 2030년까지의 환경오염물질 배출을 산정한 결과 전기자동차 보급이 PM_{2.5}의 배출을 높일 것으로 전망하였

4) 생애주기분석은 크게 4단계로 구분된다. 1) 차량 운행에 따른 에너지 사용으로 부터의 배출 2) 원유의 추출에서 처리 및 수송에 따른 배출 3) 차량 생산 배출 4) 차량의 운행 지역 및 연비에 따른 차이 분석.

다. 다만 장기적인 관점에서 전력수급과 환경영향을 분석하기 위해 지나친 가정을 사용하여 엄밀한 분석에는 한계가 있다. 또한 분석 대상을 $PM_{2.5}$ 배출만을 고려하여 다른 대기오염물질 및 온실가스에 대한 영향을 고려하지 못하였다. 다른 한편 김재경(2017)은 미국 아르곤 국립연구소(Argonne National Laboratory)의 GREET(Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model) 프로그램을 이용하여 전과정 평가를 수행하였다. 분석결과 단위 거리당 전기자동차의 온실가스 배출량은 휘발유 차량에 비해 절반수준에 불과하며 PM_{10} 의 경우는 92.7% 수준으로 큰 차이가 없는 것으로 분석되었다. 하지만 김재경(2017)의 연구는 대기오염물질 중 NO_x 나 SO_2 등(초)미세먼지의 전구물질을 고려하지 못한 한계가 있다. 또한 생애주기분석은 에너지원의 생산에서 운송, 저장 및 최종소비 단계를 고려하여 종합적인 분석이 가능하다는 장점이 있는 반면 복잡한 과정에서 데이터의 부족 등의 한계로 인하여 가정과 통합적인 데이터(aggregated data)를 사용해야 하는 단점이 존재한다(Messagie, 2017).

III. 자료 및 추정 방법

전기자동차의 환경적 영향, 즉 내연자동차에서 전기자동차로 대체하였을 때 발생하는 환경적 편익 혹은 피해를 산정하기 위해 본 논문에서는 두 가지 주요 자료를 이용하였다. 하나는 각 발전소의 시간별 발전량 자료이고 다른 하나는 각 발전소의 시간별 대기오염물질 배출량 실측 자료(TMS)이다. 화석연료를 사용하는 발전소 중 TMS가 설치된 67개 발전소의 2015년 1월 1일부터 2016년 12월 31일까지 2년간 시간별 자료를 결합하여 사용하였다.

전기자동차가 내연자동차에 비해 가지는 환경적 편익을 산정하기 위해서 본 논문에서는 단위거리 당 한계배출(marginal emission) 개념을 이용하였다(Graff-Zivin et al., 2014; Holland et al., 2016). 또한 본 논문에서는 온실가스로는 CO_2 와 대기오염물질은 NO_x , SO_2 및 $PM_{2.5}$ 로 한정하여 분석하였다.⁵⁾ 전기자동차와 내연자동차의 온실가스 및 대기오염물질 산정에 있어 데이터의 한계 및 논의의 편익성을 위해 다음과 같은 가정을

5) 대기오염물질에서 3가지의 대기오염물질을 고려한 이유는 대기환경보전법상 3가지 물질에 대해서만 측정을 의무화하고 있기 때문이고, 또한 인체에 대한 영향은 $PM_{2.5}$ 에 의해 대부분 설명된다. 다만 NO_x 와 SO_2 는 $PM_{2.5}$ 의 전구물질로 2차 생성을 통해 인체에 영향을 미치게 된다.

하였다. 첫째, 총 주행거리는 연간 15,000km로 전기자동차와 내연자동차 간에 차이가 없으며 차량의 수명은 10년으로 가정하였다.⁶⁾ 둘째, 내연자동차에 대해서는 Tier 3 수준의 배출계수를 사용하였다.⁷⁾ Tier 3의 배출계수는 주행속도의 함수로 표시되는데 주행 속도는 광역시도별로 조사된 통계를 사용하였다.⁸⁾ 전기자동차는 저속과 고속에서 에너지 사용효율 차이가 크지 않아 주행속도에 따른 배출량 차이가 없는 것으로 가정하였다. 셋째, 주행에 따른 타이어 및 브레이크 패드 마모에 따른 오염물질 배출은 전기자동차와 내연자동차간에 차이가 없는 것으로 설정하였다.⁹⁾ 마지막으로 전기자동차에 의한 전력 소비량 산정을 위한 송배전 손실률을 2016년 평균 3.59%를 적용하였다.¹⁰⁾

내연자동차의 단위 거리당 한계배출량은 기존의 배출계수를 사용하여 산정하는 것과 달리 전기자동차의 한계배출량은 차량별 연비(km/kWh)와 1kWh 발전에 따른 오염물질의 평균 배출량을 통해 산정 가능하다. 1kWh당 오염물질 배출 수준은 전원 구성에 따라 달라지는데 전원 구성은 총 수요량에 따라 발전 단가가 낮은 에너지원(원자력 및 석탄)부터 발전을 가동하여 총 수요량이 충족되는 수준까지 높은 에너지원(LNG 및 석유 등)을 가동하게 된다. 총 수요량은 계절 및 시간에 따라 달라지며 발전설비는 예방정비 및 고장 정비 등의 일정에 따라 다르게 구성되어 계절별·시간별로 오염물질 배출량이 달라진다. 따라서 시간별 발전량, 전원구성 및 오염물질 배출량의 차이를 모형화하여야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 각 발전소의 시간별 발전량 및 원격감시체계의 시간별 대기오염물질 배출량 자료를 이용하였다. 앞서 논의한 바와 같이 데이터를 통해 월별 혹은 계절별 및 시간별로 전원의 구성에 차이가 있는지를 검증하여 차이가 존재한다면 각기 다른 배출계수를 추정하여야 한다. 하지만 <그림 1>에서 알 수 있듯이 월별 전원 구성에는 큰 차이를 보이고 있지 않다.¹¹⁾ 상대적으로 전력 수요량이 적은 봄과 가을에 기저발

6) 총 주행거리는 연료비용, 즉 전력요금 및 휘발유·경유 가격에 영향을 받는다. 현재 전기자동차 충전에 사용되는 전력 요금은 휘발유 및 경유와 비교하여 매우 낮게 설정되어 리바운드 효과(rebound effect)으로 인해 총 주행거리가 늘어날 것으로 예상되나 이에 대한 데이터가 부재하며, 또한 최근의 실증연구에 따르면 대체로 리바운드 효과가 매우 낮은 수준이거나 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다(Gillingham et al., 2016).

7) 내연자동차의 대기오염물질 배출계수는 차종에 따른 평균적인 값을 사용하였으며(부록 참조) 온실가스 배출계수는 ‘자동차의 에너지소비효율 및 등급표시에 관한 규정’에 의해 실측된 각 차량 모델별 배출계수를 사용하였다.

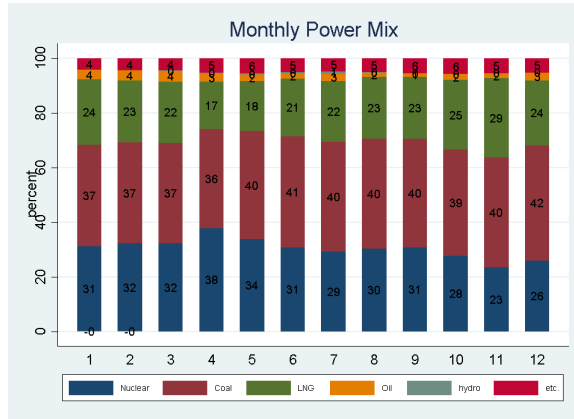
8) 통계청(지역별 차량통행속도 조사 보고서).

9) 타이어 및 브레이크 패드 마모 따른 PM_{2.5} 배출계수는 각각 0.004494g/km, 0.002925g/km으로 사용(환경부 2012).

10) 한국전력통계(2017).

전에 해당하는 원자력과 석탄발전의 정비가 실시되어 공급능력이 낮아 첨두부하를 담당하는 LNG 발전이 가동되기 때문이다.

<그림 1> 2016년 월별 발전량 믹스 추이



자료: 전력거래소(KPX).

따라서 본 연구에서는 Holland et al.(2016)와 같이 시간에 따라 달라지는 한계배출계수를 추정하였다. 식 (1)은 한계 배출계수를 추정하기 위한 회귀 방정식으로 시간과 월별 더미변수의 교차항을 통해 고정효과(fixed effects)를 포함하였다.¹²⁾

$$y = \sum_{h=1}^{24} \beta_{ih} HOUR_h * TPG_t + \sum_{h=1}^{24} \sum_{m=1}^{24} \alpha_{ihm} HOUR_h * MONTH_m + \varepsilon \quad (1)$$

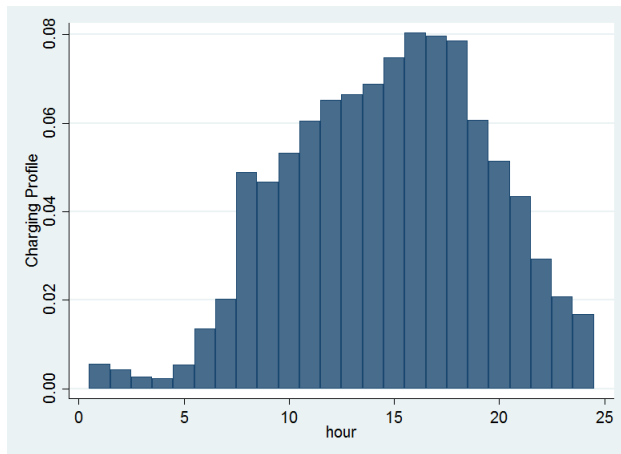
$Hour_h$ 는 시간에 대한 지시변수이고, TPG_t 는 일별 총 발전량, $MONTH_m$ 은 표본기간 24개월(2015년 1월~2016년 12월)에 해당하는 월에 대한 지시변수(indicator variable)이다.¹³⁾ β_{ih} 는 추정계수로서 h 시각에 전국에서 1kWh의 전력이 생산될 때 i 발

11) 월별 전원 구성의 차이를 보면 원자력 발전은 23~38%, 석탄화력 발전은 36~42%, 천연가스 발전은 17~29%의 비중을 보이고 있다.
 12) 시간별 대기오염물질 배출량 데이터가 존재하지 않는 경우 연별 총 배출량과 총 발전량 데이터를 이용하여 보정하였다.
 13) 연별 트렌드를 고려하기 위해 월별 12개의 지시변수가 아닌 2년간 24개월 각 월에 대한 지시변수를 포함하였다.

전소에 배출되는 대기오염물질(SO_x , NO_x , $PM_{2.5}$) 양을 의미한다.¹⁴⁾ 대기오염물질과 달리 온실가스는 실측이 되지 않아 제2차 국가 에너지 기본계획에 사용되었던 발전부문의 배출계수를 이용하여 산정하였다.¹⁵⁾

전기자동차에 의한 대기오염물질을 산정하는 데 있어 고려해야 할 다른 요인으로는 충전시간에 대한 분포이다. <그림 2>는 전력거래소에서 조사한 국내의 충전 시간에 대한 분포를 나타내고 있는데 미국의 경우 개별 주택에서 충전되어 야간 시간대에 충전이 집중되는 반면 국내에서는 공공 충전소에서 주로 주간 시간대에 충전한다는 것을 확인할 수 있다.¹⁶⁾ 하지만 국내에서도 개별 아파트 단지의 주차장 등에서 충전 설비가 확대되고 있어 이를 반영하기 위해 현재의 충전시간대 분포를 포함하여 총 9개의 다른 충전 시간 분포를 가정하여 분석을 진행하였다.

<그림 2> 전기자동차 충전 시간 분포



<한국 전기차 충전서비스 부하패턴>

자료: 한국전기차충전서비스, 전력거래소.

-
- 14) TMS에서는 $PM_{2.5}$ 가 직접 측정되지 않아 국립환경과학원(2013)의 $PM_{2.5}/TSP$ 분율(유연탄: 0.795, 무연탄: 0.303125)를 이용하여 산정하였다.
 - 15) 제2차 에너지 기본 계획에 사용된 온실가스 배출계수는 LNG: 0.3625 kg- CO_2 e/kWh, 석유: 0.7018 kg- CO_2 e/kWh, 석탄: 0.8320 kg- CO_2 e/kWh 이다. 각 발전소별 추정계수 중 보령 석탄화력 및 안양 복합화력 발전소의 결과를 부록에 수록하였다.
 - 16) 미국 Electric Power Research Insititue(EPRI)에서 조사한 미국의 전기자동차 충전시간은 오후 8시에서 오전 5시 사이에 충전 비율이 높은 것으로 나타났다. 자세한 사항은 전호철(2017) p57에서 참조.

대기오염물질 배출에 따른 피해의 가치화를 위해서는 단위 환경비용 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 Parry et al.(2014)에서 제시된 한국의 대기오염물질별 피해비용을 2016년 기준으로 환율과 GDP를 고려하여 편익 이전하였다.¹⁷⁾

온실가스의 환경비용은 국내의 배출권 평균거래 가격으로 하는 방법도 존재하나 현재 국내 배출권 거래 시장에서는 배출권의 상당수가 무상 할당되어 시장이 정상적으로 작용하였다고 생각하기 어렵다. 본 논문에서는 EPA(2016)에서 제시하고 있는 CO₂의 환경피해비용을 편익 이전하는 방법으로 43,354원/ton CO₂으로 산정하여 이용하였다.

〈표 1〉 대기오염물질의 단위당 환경비용 편익이전 결과

PM _{2.5}			NO _x			SO ₂		
석탄발전	LNG 발전	수송	석탄발전	LNG 발전	수송	석탄발전	LNG 발전	수송
68,314,439	67,503,044	809,352,703	37,735,072	37,640,138	6,308,710	52,255,636	51,454,624	30,945,756

본 논문에서는 Holland et al.(2016)에서 도출한 사회 후생을 극대화하는 보조금 수준, 즉 전기자동차와 내연자동차가 총 운행거리동안 발생시키는 환경피해비용을 차이를 적정 보조금 수준으로 설정하였다.¹⁸⁾

IV. 추정 결과

<표 2>은 총 9개의 충전시간 분포에 따른 전기자동차의 1km 운행에 따른 대기오염물질 온실가스 배출량을 추정한 결과를 보여준다.¹⁹⁾ 주로 야간 시간대 충전하는 미국의 경우(EPRI)와 주로 주간 시간대에 충전하는 한국의 경우와 더불어 4시간씩 충전하는 경우와 24시간 균등하게 충전하는 경우를 비교하였다. 충전시간대에 따라서 1km 운행당

17) 편익이전에 있어 소득탄력성(ϵ)은 0.8로 가정하였다.

18) 후생극대화를 보조금 수준에 대한 이론적 도출은 Holland et al.(2016)의 Proposition 1과 Proposition 2 및 전호철(2017) p65-66을 참조.

19) 2017년 판매된 전기자동차 중 Ionic을 대상으로 산정하였으며, 다른 차량 모델에 대한 추정결과는 부록에 수록하였다.

11.16원에서 11.53원의 환경피해비용이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 9시에서 12시에 충전하는 경우가 가장 낮은 피해 비용을 발생하는 것으로 나타난 반면 5시에서 8시에 높게 나타난다. 이러한 결과의 가장 큰 원인은 연간 시간별 전력수요량에 기인한다. 다시 말해 상대적으로 총 수요가 낮은 시간대인 5-8에는 총 발전량에서 1kWh를 발전하는데 있어 석탄발전의 비중이 높아 환경오염물질 배출이 높은 편이며 총 수요가 높은 시간대인 9-12에는 총 발전량에서 침투부하를 담당하는 LNG발전의 비중이 상대적으로 높아 1kWh당 환경오염물질 배출이 낮게 나타난다.

〈표 2〉 충전시간대별 대기오염물질 배출량 및 환경피해 비용

충전시간	NOx (g/km)	SO ₂ (g/km)	PM _{2.5} (g/km)	CO ₂ (g CO ₂ eq/km)	환경피해비용 (원/km)
Hr 1-4	0.0377	0.0274	0.0082	72.49	11.47
Hr 5-8	0.0396	0.0270	0.0082	72.49	11.53
Hr 9-12	0.0360	0.0237	0.0081	68.96	11.14
Hr 13-16	0.0366	0.0241	0.0082	69.27	11.19
Hr 17-20	0.0361	0.0240	0.0081	69.33	11.16
Hr 21-24	0.0358	0.0250	0.0082	70.03	11.22
Hr 1-24	0.0370	0.0252	0.0082	70.43	11.29
EPRI	0.0368	0.0258	0.0008	70.88	11.32
전기차 충전시간 분포	0.0365	0.0243	0.0082	69.50	11.20

주: EV Ionic 2017년 연비(km/kWh) 기준.

전기자동차가 내연자동차에 비해 발생시키는 환경편익, 즉 적정 보조금 수준에 대해 살펴보기 위해 앞서 언급한 바와 같이 차량의 수명은 전기 및 내연자동차 모두 10년으로 가정하였으며, 연간 주행거리는 15,000km와 자동차 주행통계의 1일 주행 거리 33.9km를 1년으로 환산하여 12,373.5km로 가정하여 추정된 결과를 <표 3>에 제시하였다. 현재 시장에서 판매되고 있는 전기자동차의 대부분이 소형 차량이기 때문에 대체 대상이 되는 내연자동차 역시 소형 경유 및 휘발유 차량을 선정을 하였다. 전기자동차의 연비에 따라 적정보조금의 수준이 많게는 약 160만 원에서 낮은 경우는 음의 보조금으로 추정되었다. 이는 전기자동차에 대한 정부 구매지원금보다 매우 낮은 수준인 것을 확인할 수 있다.²⁰⁾

〈표 3〉 전기자동차의 환경편익 및 적정보조금 수준 추정결과

차종	대체 대상 내연자동차	환경편익 (원/km)	적정보조금 ^{a)} (원)	적정보조금 ^{b)} (원)
Soul	경유	9.48	1,421,366	1,172,484
	휘발유	0.48	72,195	59,554
SM3	경유	8.58	1,287,531	1,062,085
	휘발유	-0.41	-61,639	-50,846
Ionic	경유	10.83	1,623,887	1,339,545
	휘발유	1.83	274,717	226,614

주: a) 10년 수명, 자동차 주행통계(2016), b) 10년 수명, 1일평균주행거리:33.9km(1년:12,373.5km)

이와 같이 현재 전원 구성 및 경제급전(economic dispatch) 방식에서는 내연자동차를 전기자동차로 대체하는 경우에도 환경적 편익이 매우 낮은 수준이며 전기자동차의 친환경성이 현재의 구매 보조금 수준에 대한 합리적 근거를 제시하지 못한다는 것을 알 수 있다.

V. 정책 시나리오 분석

정부는 2017년 10월 에너지전환 로드맵과 이를 바탕으로 하여 2017년 12월 제8차 전력수급계획을 통해 원자력 및 석탄발전의 비중을 축소하고 재생에너지의 발전 비중을 확대하는 계획을 발표하였다. 더불어 미세먼지 배출을 줄이기 위해 노후 석탄발전을 조기 폐지, 방지시설 개선, 배출허용기준 상향 등 다양한 계획을 함께 발표하였다. 다만 제8차 전력수급계획에서도 2030년까지 석탄발전의 발전량 비중이 기준 시나리오 기준 40%으로 현재의 전원 구성과 큰 차이가 없어 정책 효과가 크지 않을 것으로 전망된다. 따라서 본 논문에서는 에너지 전환 시나리오를 단순화하여 보다 다양한 형태의 시나리오를 구성하여 전기자동차의 환경적 편익 및 보조금 수준에 대해서 살펴보았다.

20) 2017년 전기자동차에 대한 정부 지원금은 1,400만 원이었으며, 각 지방자치단체별로 별도의 보조금이 추가로 지급되었다. 2018년에는 차량별로 최대 1,200만 원 구매 보조금이 지급되었다.

- 시나리오1: 태안, 삼천포, 보령 석탄 화력발전소의 2016년 발전량만큼을 LNG발전으로 대체²¹⁾
- 시나리오2: 모든 석탄 화력발전을 LNG 발전으로 대체
- 시나리오3: 모든 석탄 화력발전을 신재생에너지발전으로 대체
- 시나리오4: 석탄 화력발전소의 이용률을 현재의 절반 수준으로 낮추고 해당 발전량만큼을 현재의 LNG 발전소에 균등하게 분배하여 LNG 발전소의 이용률을 높임²²⁾
- 시나리오5: 시나리오4 + 현재 전기자동차 연비 2배로 향상

<표 4>는 위에서 설정한 5가지 시나리오를 바탕으로 추정된 단위 환경편익(원/km) 및 적정 보조금 수준에 대한 결과를 나타내고 있다. 본 논문에서 설정한 어떠한 시나리오에서도 현재의 정부 보조금 수준에는 미치지 못하지만 에너지 전환 및 연비향상 시나리오에 따라 환경편익이 커짐을 확인할 수 있다. 더불어 차량별 연비의 차이에 따라 환경적 편익의 차이가 큰 것을 확인할 수 있는데 이는 전기자동차의 효율에 따라 보조금의 차등 지원 및 연비 규제가 필요함을 나타내고 있다.

<표 4> 에너지 전환시나리오에 따른 환경편익 및 적정보조금 수준

시나리오	차종	대체 대상 내연자동차	환경편익 (원/km)	적정보조금 ^{a)} (원)	적정보조금 ^{b)} (원)
1	Soul	경유	40.68	6,102,605	5,034,039
		휘발유	5.57	834,999	688,791
	SM3	경유	40.06	6,009,124	4,956,926
		휘발유	4.94	741,518	611,678
	Ionic	경유	41.63	6,244,063	5,150,728
		휘발유	6.51	976,457	805,480
2	Soul	경유	42.32	6,348,489	5,236,869
		휘발유	7.21	1,080,883	891,620
	SM3	경유	41.92	6,288,538	5,187,415
		휘발유	6.81	1,020,932	842,167
	Ionic	경유	42.93	6,439,209	5,311,704
		휘발유	7.81	1,171,603	966,456

21) LNG 발전에 따른 배출량 배출 수준은 하남 복합화력 발전의 2016년 배출량 원단위를 기준으로 추정하였다.

22) 2016년 기준 유연탄발전소의 이용률은 77.7%, 복합화력 발전소는 39.3%.

〈표 4〉 에너지 전환시나리오에 따른 환경편익 및 적정보조금 수준(계속)

시나리오	차종	대체 대상 내연자동차	환경편익 (원/km)	적정보조금 ^{a)} (원)	적정보조금 ^{b)} (원)
3	Soul	경유	43.68	6,552,483	5,405,143
		휘발유	8.57	1,284,877	1,059,895
	SM3	경유	43.47	6,520,349	5,378,636
		휘발유	8.35	1,252,743	1,033,388
	Ionic	경유	44.01	6,601,109	5,445,255
		휘발유	8.89	1,333,503	1,100,007
4	Soul	경유	38.91	5,836,094	4,814,194
		휘발유	3.79	568,488	468,946
	SM3	경유	38.04	5,706,271	4,707,103
		휘발유	2.92	438,665	361,855
	Ionic	경유	40.22	6,032,546	4,976,248
		휘발유	5.10	764,941	631,000
5	Soule)	경유	42.08	6,312,113	5,206,862
		휘발유	6.96	1,044,507	861,614
	SM3c)	경유	41.65	6,247,202	5,153,317
		휘발유	6.53	979,596	808,069
	Ionice)	경유	42.74	6,410,340	5,287,889
		휘발유	7.62	1,142,734	942,641

주: a) 10년 수명, 자동차 주행통계(2016), b) 10년 수명, 1일평균주행거리:33.9km(1년:12,373.5km),
c) 시나리오 5에서는 기존의 전기자동차의 연비가 2배 향상되는 것을 가정

VI. 결론

본 연구는 내연자동차를 전기자동차로 대체하는 경우에 발생하는 환경적 편익에 분석하고 이를 바탕으로 전기자동차에 지급되는 구매 보조금의 적정 수준을 도출하였다. 더불어 에너지 전환 및 전기자동차의 연비가 향상되는 시나리오를 설정하고 시나리오에 따른 전기자동차의 환경편익을 분석하였다.

전기자동차는 수송부문의 대표적인 온실가스 및 미세먼지 감축 대책으로 손꼽히고 있다. 전기자동차는 타이어 및 브레이크 패드 마모에 따른 오염물질을 배출을 제외하면 주행 중에 직접적으로 발생하는 배출이 존재하지 않는다는 점에서 무배출 차량으로 간주되고 있다. 특히 국가 온실가스 및 대기오염물질 산정에 있어서 전기자동차에 충전되

는 전력은 발전 부문에 해당하기 때문에 이중 계산(double counting)의 문제로 인해 수송 부문에서 고려되지 않고 있다. 다만 미국과 중국의 사례를 중심으로 전기자동차의 실질적인 환경적 영향에 대해서 꾸준히 분석되어 왔으며 그에 따른 보조금의 적정성 문제가 지적되고 있다. 특히 Holland et al.(2016)의 연구는 미국의 사례를 통해 재생에너지의 비중이 높은 지역에서는 전기자동차의 환경적 편익이 매우 큰 반면 화석연료를 통한 발전 비중이 높은 지역은 내연자동차에 비해서도 환경피해가 큰 것을 보였다. 앞서 언급한 바와 같이 전기자동차 보급은 온실가스 및 미세먼지 대책 수송부문의 가장 중요한 수단 인식되고 있다. 하지만 그간 국내에서는 전기자동차의 잠재적 환경적 영향에 대한 분석이 일부 연구에서 거시적 수준의 분석에 그치고 있다. 특히 향후 에너지 전환 등으로 인한 전기자동차의 환경적 편익의 가치화 문제에 대한 분석은 전무한 상황이다. 본 논문은 이러한 국내의 전원 구성 환경과 향후 진행될 에너지 전환에 따른 전기자동차의 환경적 영향을 분석하고자 하였다. 특히 전력 생산에 따른 대기오염물질 배출량 산정에 있어 발전 원별 일률적인 배출계수를 적용한 기존의 연구와는 차별적으로 각 발전소의 시간별 배출량 및 발전량 데이터를 구축하여 발전소의 효율 및 오염물질 배출량 저감 노력 등을 반영하고자 하였다. 또한 환경오염물질에 대한 가치화를 통해 전기자동차의 환경 편익과 구매 보조금의 적정성을 검토하였다. 본 연구의 분석결과를 통해 다음의 두 가지 시사점을 도출할 수 있다. 첫째, 2015~2016년의 전원 믹스에서는 전기자동차가 내연자동차에 비해 가지는 환경적 편익의 수준은 -0.41~10.83원/km에 불과하며 사회적 적정 보조금 수준은 최대 약 160만 원 수준에 불과한 것으로 나타났다. 이는 현재의 정부 및 지방자치단체에서 지급되는 보조금 및 세제 혜택에 비해 상당히 낮은 수준이다. 둘째, 에너지 전환 및 연비 향상을 바탕으로 한 시나리오 분석 결과 석탄 발전의 비중이 상당한 정도로 줄어드는 경우에는 전기자동차가 내연자동차에 비해 매우 높은 환경 편익을 발생하는 것으로 분석되었다. 특히 대규모 에너지 전환과 더불어 전기자동차의 연비 향상을 통해 환경적 편익을 높일 필요성이 제기되었다. 이를 위해 현재의 구매 보조금 제도를 전기자동차의 연비에 따라 크게 차등을 두는 형태로 전환할 필요가 있다.

본 연구는 기존의 문헌에서 사용되지 않았던 세부 자료와 최근 이론을 적용하여 전기자동차가 국내에서 가지는 환경적 영향의 문제를 분석하였음에도 다음과 같은 한계점을 지니고 있다. 첫째, 대기오염물질의 환경적 피해의 엄밀한 분석을 위해서는 대기질

모형(Air Quality Model)을 바탕으로 대기오염물질의 확산을 분석하여야 하나 본 논문에서는 대기오염물질의 발생하는 장소와 무관하게 국내에서는 균일한 환경적 영향을 가정하였다. 둘째, 본 논문에서 인용한 적정 보조금의 개념은 환경적 관점에서만 고려되었다. 하지만 전기자동차가 가지는 산업적 가치는 고려되지 않은 한계가 존재한다. 특히 전기자동차라는 신규 기술이 시장에 진입하는 과정의 초기 단계에서는 산업 경쟁력을 고려하여 보조금을 지급할 필요가 있기 때문이다. 더불어 경제 전체적인 측면에서 보았을 때 전기자동차가 내연자동차를 대체하는 경우 휘발유 및 경유 등 에너지 수입의 감소를 통해 나타나는 사회적 편익이 고려되지 않았다.

향후 연구에서는 대기질 모형을 기반으로 하는 통합평가모형(Integrated Assessment Model)을 통해 전기자동차의 다양한 환경적 특징이 연구될 필요가 있다. 특히 최근 중국과 미국의 사례를 중심으로 연구되고 있는 전기자동차의 대기오염의 사회 분배적 효과(distributional effect)에 대한 분석과 그에 따른 정책적 시사점을 분석할 필요가 있다.

[References]

- 국립환경과학원, “국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람(III)”, 2013.
- 김재경, “자동차의 전력화(electrification) 확산에 대비한 수송용 에너지 가격 및 세제 개편 방향 연구”, 에너지경제연구원, 2017.
- 안상진, “대기오염을 유발하는 전기차의 역설 : 전기차 보급 및 전력수급 정책의 고려사항”, KISTEP 한국과학기술기획평가원, 2017.
- 우종률, “전력믹스에 따른 전기자동차의CO2 배출량 비교분석”, 과학기술정책, 통권220호, 2016. 11.
- 전호철, “전기자동차 보급에 따른 지역간 오염물질 및 온실가스 배출 영향 분석”, 한국환경정책평가연구원, 2017.
- 환경부, “타이어 및 브레이크 패드 마모에 의한 비산먼지 배출량 및 위해성 조사”, 2012.
- Archsmith, J., A. Kendall, and D. Rapson, “From Cradle to Junkyard: Assessing the Life Cycle Greenhouse Gas Benefits of Electric Vehicles,” *Research in Transportation Economics*, Vol. 52, 2015, pp. 72~90.
- EPA, *Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis Under*

- Executive Order 12866*, 2016.
- Gillingham, K., D. Rapson, and G. Wagner. “The Rebound Effect and Energy Efficiency Policy,” *Review of Environmental Economics and Policy*, Vol. 10, No. 1, 2016, pp. 68~88.
- Graff Zivin, J. S., M. J. Kotchen, and E. T. Mansur, “Spatial and Temporal Heterogeneity of Marginal Emissions: Implications for Electric Cars and Other Electricity-Shifting Policies,” *Journal of Economic Behavior and Organization*, Vol. 107, 2014, pp. 248~68.
- Holland, S. P., E. T. Mansur, and A. J. Yates, “Are There Environmental Benefits from Driving Electric Vehicles? The Importance of Local Factors,” *American Economic Review*, Vol 106, 2016, pp. 3700~3729.
- Huo, H., H. Cai, Q. Zhang, F. Liu, and K. He, “Life-Cycle Assessment of Greenhouse Gas and Air Emissions of Electric Vehicles: A Comparison between China and the U.S.,” *Atmospheric Environment*, Vol. 108, 2015, pp. 107~116.
- International Energy Agency(IEA), *Global EV Outlook 2017: Two Million and Counting*, IEA Publication, 2017b.
- International Energy Agency(IEA), *World Energy Balances*, IEA Publication, 2017a.
- Ji, S., C. R. Cherry, W. Zhou, R. Sawhney, Y. Wu, S. Cai, S. Wang, J. D. Marshall, “Environmental Justice Aspects of Exposure to PM_{2.5} Emissions from Electric Vehicle Use in China,” *Environmental Science and Technology*, Vol. 49, No. 24, 2015, pp. 13912~13920.
- Liao, F., E. Molin, and B. V. Wee, “Consumer Preferences for Electric Vehicles: A Literature Review,” *Transport Reviews*, Vol. 37, No. 3, 2017, pp. 252~275.
- Messagie, M., “Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles,” *Transport & Environment*, 2017.
- McLaren, J., J. Miller, E. O’Shaughnessy, E. Wood, and E. Shapiro, “CO₂ Emissions Associated with Electric Vehicle Charging: The Impact of Electricity Generation Mix, Charging Infrastructure Availability and Vehicle Type,” *Electricity Journal*, Vol. 29, No. 5, 2016, pp. 72~88.
- OECD, “The Economic Consequences of Outdoor Air Pollution,” 2016.
- Parry, I., D. Heine, E. Lis, and S. Li., *Getting Energy Prices Right: From Principles to Practice*, International Monetary Fund, 2014.
- Rezvani, Z., J. Jansson, and J. Bodin, “Advances in Consumer Electric Vehicle Adoption Research: A Review and Research Agenda,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 34, 2015, pp. 122~136.

[부록]

〈부록 표 1〉 내연자동차의 대기오염물질 배출계수

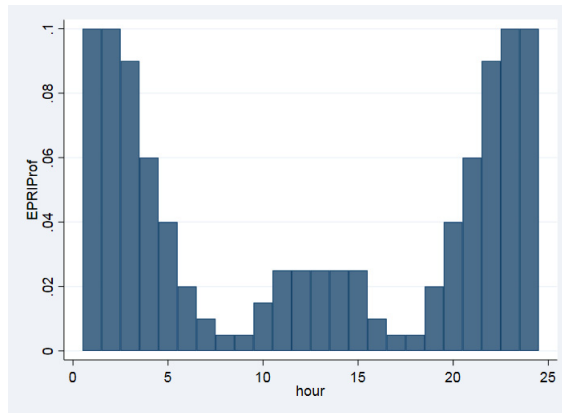
유종	차종	물질	산출식
경유	경형	NOx	$V \leq 65km/h, Y = 1.1849 \times V^{(-0.5476)}$ $V > 65km/h, Y = 0.000002 \times V^2 + 0.0021 \times V - 0.0110$
		SOx	$Y = (0.014 \times V^2 - 2.084 \times V + 118.489) \times 0.825 \times 0.017 / 100 \times 2$
		PM	$Y = 0.0420 \times V^{(-0.3420)}$
	소형	NOx	$V \leq 65km/h, Y = 1.1849 \times V^{(-0.5476)}$ $V > 65km/h, Y = -0.000002 \times V^2 + 0.0021 \times V - 0.0110$
		SOx	$Y = (0.014 \times V^2 - 2.084 \times V + 118.489) \times 0.825 \times 0.017 / 100 \times 2$
		PM	$Y = 0.0420 \times V^{(-0.3420)}$
휘발유	경형	NOx	$Y = 0.4819 \times V^{(-0.9108)}$
		SOx	$Y = (0.01090 \times V^2 - 1.5100 \times V + 93.672) \times 0.730 \times 0.001 / 100 \times 2$
	소형	NOx	$Y = 1.2279 \times V^{(-0.7864)}$
		SOx	$Y = (0.01090 \times V^2 - 1.5100 \times V + 93.672) \times 0.730 \times 0.001 / 100 \times 2$

주: 1) Y: 배출계수(g/km), V: 평균차속

2) NOx 및 PM 배출계수는 차량 연식에 따라 달라지나 본 연구에서는 2017년형을 기준으로 산정하였기 때문에 2006년 이후 기준의 배출계수를 사용하였다.

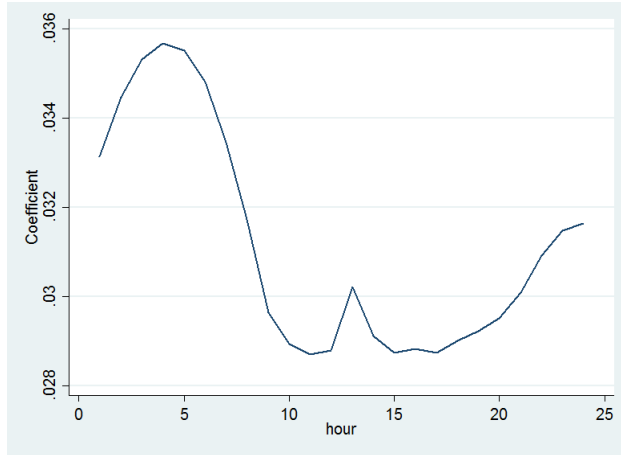
3) SOx 배출계수 = 연료소비계수×연료비중×황함량(%)/100×2, 황함량은 2009년 자료 이용
자료: 국립환경과학원(2013).

〈부록 그림 1〉 EPRI(2007) 전기자동차 충전 시간별 분포

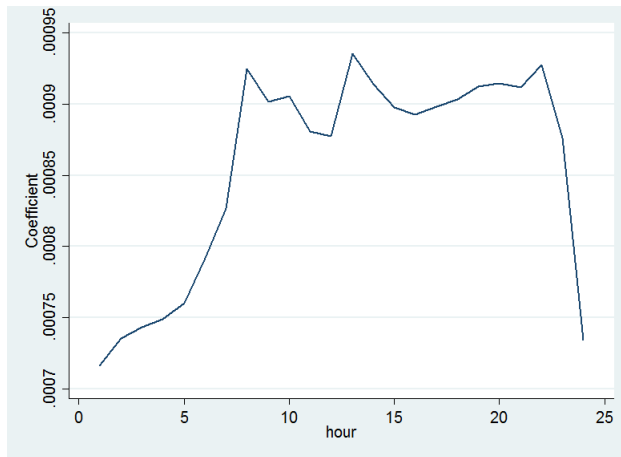


자료: Electric Power Research Insititue, 한국전기차충전서비스.

<부록 그림 2> 시간별 한계배출계수 추정결과 예시
(보령 석탄화력 및 안양 복합화력 발전소)



<보령 석탄화력 발전소>



<안양 복합화력 발전소>