

## 전기차 온실가스 감축잠재량 계산을 위한 시간대별 배출계수 추정

### Greenhouse Gas Mitigation Potential of Electric Vehicle based on Hourly Emission Factor Estimation

김도원\* · 진태영\*\*

Dowon Kim · Taeyoung Jin

**요약:** 본 연구는 전기차의 온실가스 감축효과를 추정하고, 세분화된 정책적 시사점을 제시하기 위해 전기차와 발전부문의 시간대별 자료를 활용하여 배출계수를 추정한 연구이다. 2017년 1월 1일부터 2020년 12월 31일까지 시간대별 자료가 활용되었다. 분석 결과 발전부문의 배출계수는 평균 0.4030에서 0.3612로 감소하였으며, 배출계수 감소에 따라 전기차 에너지 소비량 당 온실가스 배출량이 감소하였다. 하지만 전기차 보급량과 활용도가 증가하여 전기차 1대당 온실가스 배출량이 급격히 증가하는 추세인 것으로 나타났다. 기존 수송부문과 비교할 시 전기차의 1대당 온실가스 배출량은 내연기관차의 약 15%인 것으로 나타나 감축효과가 크지만 향후 증가할 여지가 있어 배출계수 감소와 충전시간 분배가 필요한 것으로 나타났다. 배출계수는 시간대별보다는 월별로 편차가 큰 것으로 나타나 계절별 요금제가 적합하지만, 향후 재생에너지가 확대될 경우 시간별 편차도 커질 것이기 때문에 환경비용을 반영한 계시별 요금제를 함께 고려할 필요가 있다.

**핵심주제어:** 전기자동차, 배출계수, 감축잠재량, 시간대별자료

**Abstract:** Our study aims to measure the greenhouse gas (GHG) mitigation potential of electric vehicles (EVs) by estimating emission factors utilizing hourly data. The empirical data cover the period from 1st January 2017 to 31st December 2020. The annual average emission factor of 0.4030 in 2017 decreased to 0.3612 in 2020, resulting in the lower GHG emissions of EVs. An EV contributes to 15% of GHG emissions compared to internal combustion engine vehicles, implying that EV supply has a large mitigation impact in the transportation sector. However, ever since energy consumers with long drive distances have started purchasing EVs, the GHG emissions per one unit of EV would be skyrocketed. Therefore, efforts need to be made to decrease the emissions and charge time distribution. The hourly deviation of emission factor will grow when renewable energy such as solar PV is expanded. Hourly pricing reflecting environmental cost should be considered.

**Key Words:** Electric Vehicle, Emission Factor, Mitigation Potential, Hourly Data

\* 주저자, 에너지경제연구원 전력정책연구팀 부연구위원

\*\* 교신저자, 에너지경제연구원 집단에너지연구팀 부연구위원

## I. 서론

탄소중립은 전 세계적으로 새롭게 자리잡은 하나의 표준으로 더 이상 피할 수 없는 과제임이 분명하다. 탄소중립을 위해 가장 중요하다고 여겨지고, 시급한 정책이 필요한 부문이 에너지와 연관된 부문이다. 주요국들의 탄소중립 선언 및 법제화에 이어 COP26에서 합의된 석탄발전의 단계적 감축 등과 같은 그린에너지로의 전환은 탄소중립을 실현할 수 있는 유일한 방법으로 받아들여지고 있다(관계부처합동, 2021a).

전 세계 부문별 이산화탄소 배출 현황을 보면 전력 및 열생산에서 41.93%, 교통부문에서 24.77% 제조업 및 건설업에서 18.47% 차지하고 있음을 알 수 있다(IEA, 2021a). 이 중에서도 수송부문은 탄소배출 감축을 위한 세계 각국의 갖은 노력에도 지난 수년간 이산화탄소 배출 비중이 꾸준히 높아지고 있는 부문이다. 해외에서도 이러한 수송부문의 탄소 배출량의 지속적 증가세에 주목하고 있으며 다양한 정책들을 통해 배출량 감축에 노력을 기울이고 있다(GCEC, 2015).

국내 수송부문도 해외의 상황과 크게 다르지 않다. 2018년 기준 수송부문의 온실가스 배출량은 2000년 이후 2018년까지 연평균 2.12%씩 증가하여 9,811만 톤을 기록했다(관계부처합동, 2020). 이는 국내 전체 온실배출량의 13.54%를 차지하는 규모이며 그중에서도 육상수송(도로)에서 발생하는 온실가스는 수송부문 전체 배출량의 96.5% 가량 차지한다.<sup>1)</sup> 수송부문의 2030년 국가 온실가스 배출 목표치를 달성하기 위해서는 2018년 배출량 대비 37.8% 가량 감축해야 하고 탄소중립을 달성하기 위해서는 2050년까지 2018년 기준 대략 97%를 줄여야만 한다(관계부처합동, 2021b, 2021c).

이에 정부는 기존 내연기관차를 전기차로 대체하고 전기차에 쓰이는 전력을 청정에너지원을 통해 조달한다는 전략을 수립했다. 이를 달성하기 위해 정부는 보조금 지원 및 세제 혜택 등과 같은 전기차 보급·활성화 정

1) <https://www.kotems.or.kr/app/kotems/forward?pageUrl=kotems/ptl/emission/foreign/KotemsPtlEmissionForeignEmissionSectorLs&topmenu1=01&topmenu2=01&topmenu3=02>

책을 시행하고 있다. 그러나 전기차 보급목표를 달성한다고 해도 기존의 화석연료 중심 발전원들을 이용하여 전력을 생산한다면 수송부문의 탄소 배출 감축량은 미미할 것이다.

우리나라 전력시스템에서는 하루 전 계획을 통해 예상되는 전력 수요에 맞추어 연료원별 발전기들이 각 시간대별로 얼마만큼 전력을 생산할 것인지 결정된다. 즉 시간대별로 각각의 발전원들이 어느 정도 발전에 참여를 하는지 달라지며 이는 같은 양의 전력을 소비했다고 할지라도 어느 시간대에 사용했는지에 따라 탄소배출량이 달라질 수 있다는 뜻이다. 그러므로 현재 전기차의 탄소배출량 감축 기여율을 분석하기 위해서는 전기차의 주요 충전 시간대에 어떤 연료로 전력을 생산하고 있는지 살펴보아야 한다.

본 연구에서는 시간대별 전력 믹스 자료와 시간대별 전기차 충전량 실험 데이터를 활용해 전기차의 배출량 감축효과를 정량화하며 현 전기차 충전 시스템에 대한 시사점을 제시한다. 본 연구를 수행함에 따라 다음과 같은 부분들에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 첫째, 과거 전력 믹스 자료를 활용한 시간대별 배출계수 추산을 통해 전력 소비와 온실가스 배출량에 관련된 유용한 정보를 제공한다. 이 자료는 향후 전력을 소비하는 모든 부문의 탄소배출과 관련된 연구들의 기초 자료로 사용될 수 있을 것이다. 둘째, 시간대별 전기차 충전 샘플자료를 활용해 전기차의 전력 소비량을 추산하였다. 이는 국내 에너지 밸런스 중 수송부문의 통계 고도화에 기여할 수 있다. 마지막으로, 시간대별 배출계수 자료와 시간대별 전기차 배출량은 현재 수송부문의 탄소중립을 위해 고려할 수 있는 자원인 잉여전력의 ESS 운용, V2G(Vehicle-to-Grid) 등의 활용에 도움이 될 수 있는 정책적 시사점을 제시한다.

이 연구는 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 전기차의 온실가스 감축효과와 관련된 국내외 문헌을 정리한다. 3장에서는 본 연구에 사용된 자료와 전기차 충전량 자료, 배출계수 도출 방식과 전기차 온실가스 배출량 분석 결과를 기술한다. 4장에서는 분석 결과로부터 시사점을 도출하고 연구를 결론짓는다.

## II. 선행연구

전기자동차가 친환경 운송수단으로 소개되면서 전기자동차의 온실가스 감축효과를 정량화하는 연구가 주로 이루어져 왔다. 특히 환경에 대한 중요성이 날로 강조되면서 단순히 전기차가 내연기관차를 대체한다는 관점이 아니라 전기차 대체로 인한 환경 영향도를 파악하려는 연구가 수행되고 있다. 이러한 선행연구들은 전력 믹스에 방점을 두고 있다. 우종률(2016)은 전력 믹스와 전기차의 온실가스 배출량 간의 상관관계를 도출하여, 전력 믹스가 화석연료로 이루어져 있을 경우 전기자동차가 내연기관차에 비해 생애주기 관점에서 더 많은 온실가스를 배출시킨다는 결과를 얻었다. 심형욱·김성수(2018)는 첨두발전에만 초점을 맞추어 평가할 경우 전기자동차의 온실가스 감축효과가 저평가될 수 있음을 지적하면서 전력 수요방식을 고려한 전기자동차의 온실가스 배출량을 산정하였다. 우종률(2021)에서는 한국과 중국, 호주, 미국, 프랑스, 노르웨이의 전원믹스에 기반하여 각 국가별 전기차 온실가스 배출량을 산정하였으며 중국과 호주에서는 전기차의 온실가스 배출량이 내연기관 자동차에 비해 높게 나타날 수 있음을 지적하였다.

김승연 등(2017)에서는 전기자동차 보급목표 100만대를 가정하여, 2030년 온실가스 감축량에 대해 추정하였다. 전력수급기본계획의 전원믹스 시나리오와 전기차 보급목표를 가정하고 추정한 결과 2030년 전체 감축량이 배출전망치 851억톤 수준의 0.1% 수준만 감소시키는 것으로 나타나, 전력부문의 에너지 전환이 시급한 것으로 도출되었다. 위 문헌들은 공통적으로 전력 믹스에 기반하여 배출계수를 평가하고 있다. 본 연구에서도 전력 믹스에 기반하여 전력 소비 온실가스 배출량을 평가하고자 한다.

국내에서 시간대별 배출계수 문헌은 사례가 많이 존재하지 않으며, 수송 부문에 치중되어 있다. 이규진·최기주(2015)에서는 내연기관차의 주행 패턴과 도로유형 등이 연료소모량에 영향을 미쳐 배출계수<sup>2)</sup>가 달라질

2) 여기서의 배출계수는 차량의 배출계수로, 단위 주행거리 당 배출량을 의미한다

수 있음에 착안하였다. 이를 통해 시간대별로 연료 배출계수를 보정해야만 운수업의 배출량을 정확히 구할 수 있음을 제시하였다. 강태석·장현호(2016)에서는 전력을 에너지원으로 사용하는 국내 고속철도의 온실가스 배출량을 산정하기 위해 고속철도 운행 시간대인 오전 5시부터 익일 2시까지의 평균 발전소 온실가스 배출계수를  $0.555\text{tCO}_2\text{e/MWh}$ 로 산정하였다. 전호철(2019)의 연구에서는 배출계수를 추정하지는 않았으나, 발전소의 시간대별 오염물질과 발전량 데이터를 활용해 전기자동차의 환경적 영향을 분석한 결과 환경 편익이 보조금 및 세제혜택에 비해 크지 않다는 결론을 내렸다.

김상일 등(2021)의 연구는 수송부문은 아니지만 시간대별 배출계수 추정을 통해 수요자원의 환경가치를 산정하였다. 이 연구에서는 소비자단 수요감축에 의해 대체되는 발전량의 평균 배출계수는  $0.543\text{tCO}_2\text{e/MWh}$ 라고 제시하였으며, 2016년부터 2018년까지 시간대별 배출계수를 도출하였다. 주간에는  $0.4\text{tCO}_2\text{e/MWh}$ 로 낮은 배출계수를 보이거나 야간에는  $0.6\text{tCO}_2\text{e/MWh}$ 를 초과하는 것으로 나타났으며, 시간대별 배출계수 적용에 따라 수요자원시장의 배출회피 편익이 달라질 수 있음을 보였다.

해외 문헌에서도 시간대별로 달라질 수 있는 배출계수의 중요성을 강조하고 있다. Gordon and Fung(2009)에서는 재생에너지기술의 효과를 추정하기 위해 온타리오를 대상으로 전력부문의 시간대별 배출계수를 추정하였다. 2004년부터 2006년까지 3개년을 대상으로 추정한 결과 연평균 배출계수는 각각  $0.208$ ,  $0.221$ ,  $0.189\text{tCO}_2\text{e/MWh}$ 인 것으로 도출되었으며, 계절별 및 시간대별 배출계수 편차를 확인하였다. Kopsakangas- Savolainen et al.(2017)은 핀란드 가정과 산업부문 온실가스 감축 잠재량을 확인하기 위해 시간대별 배출계수를 분석하여 평균  $0.233\text{tCO}_2\text{e/MWh}$ 를 도출하였으며, 근무시간 변경을 통해 주간 5.9%의 온실가스 배출 감축이 가능함을 확인하였다.

Kono et al.(2017)은 2011년부터 2015년까지 독일의 시간대별 배출계수

추세를 평균 배출계수 대비 정규화한 형태로 비교한 결과 +22%에서 -34%까지의 변화가 나타남을 도출하였다. 평균 배출계수는 2015년에  $676\text{tCO}_2\text{e}/\text{MWh}$ 인 것으로 나타났다. 또한, 2011년부터 2015년까지 재생에너지 전력 비중이 증가하면서 배출계수 최소치를 보이는 시간대가 많아지는 것으로 나타난다. Marrasso et al.(2019)에서도 재생에너지 비중을 고려한 이탈리아의 2016년과 2017년 전력부문 평균 배출계수로  $0.334\text{tCO}_2\text{e}/\text{MWh}$ 와  $346\text{tCO}_2\text{e}/\text{MWh}$ 를 도출하였다. 또한, 재생에너지 비중이 증가함에 따라 시간대별로 상당히 큰 변화를 확인하여 향후 에너지나 환경 분석 시에 변동폭을 고려해야 함을 제시하였다. 상기 정리된 배출계수 관련 선행연구를 살펴보면 국가 별로 배출계수가 상이함을 알 수 있으며, 재생에너지 보급에 따라 배출계수는 완화됨과 동시에 변동성이 커짐을 알 수 있다.

발전부문 배출계수를 활용해 전기차의 온실가스 감축효과를 극대화하려면 전기차를 가격기반 수요반응으로 활용하기 위한 정책이 필요하다. Gai et al.(2019)에서는 온타리오의 전력부문 배출계수와 전기차 충전패턴을 분석하여, 전기차의 배출량 감축효과 극대화를 위해서는 충전소 인프라가 보장되어 있어야 하며, 스마트 충전이나 부하이동에 대한 인센티브가 지급되어야 할 것이라고 제안하였다.

단, 전기차 충전에 대한 가격설계는 신중하게 접근하는 것이 좋다. Stelmach et al.(2020)에서는 가정용 계시별 요금제의 성공 여부가 소비자 유연성에 달렸다고 주장한다. 하지만, 전기차 충전의 가격탄력성은 일반적인 전력소비와 다르게 나타난다(Soltani et al., 2015). 소비자 유연성에 영향을 주는 요인이 전기차 충전소의 가용성(availability)이기 때문이다. 때문에 Valogianni et al.(2020)에서는 적응형 가격결정(adaptive pricing)을 통해 전기차의 전기 소비를 조절할 수 있다고 제시하였다. 전기차 소유자의 선호에 따라, 지능형 의사결정 지원 시스템(DSS)이 현재 전기차 요금에 따른 충전패턴을 최적화하는 것이다. 또한, 이 문헌에서는 V2G가 가능해질 경우 전기자동차의 유연한 충전이 더욱 확대될 것을 제시하고 있다.

국내 문헌에서는 전력 믹스를 고려하여 전기차의 감축효과를 분석하였

으나 연도별 자료를 활용한 한계가 있다. 전호철(2019)과 김재엽 등(2020)에서는 시간대별 자료와 전기차의 충전패턴을 가정하여 사용하였으나 해외 전기차 충전부하 패턴을 차용하였으므로 국내 상황을 대변한다고 보기는 어렵다. 해외 문헌에서는 시간대별 배출계수를 활용한 사례가 있으나 전기차의 실사용 자료를 활용한 경우가 없다.

Kopsakangas-Savolainen et al.(2017)의 사례와 같이, 시간대별 배출계수를 참고하여 전기소비 패턴을 변경시킬 경우 배출량을 감축할 수 있다. 본 연구는 시간대별 발전믹스 자료로 배출계수 패턴을 살펴보고, 실측 충전량 자료를 활용해 전기차의 배출량 현황을 파악하여 전기차의 온실가스 배출량을 감축을 위한 정책제언에 활용하고자 한다.

### Ⅲ. 자료 및 분석결과

#### 1. 전기차 충전량 분석

2019년 6월 수립된 제3차 에너지기본계획에서는 2040년까지 PHEV 차량을 포함하여 전기차를 830만대 보급할 것을 목표로 삼고 있다. 국토교통부(2021)의 자동차등록현황보고 통계에 따르면, 2021년 10월 기준으로 전기차는 승용, 승합, 화물, 특수 용도를 전부 합쳐 21만 1,677대가 등록되어 있다. 전기차 등록은 2013년 제주를 시작으로, 2013년에는 1,464대가 등록되었지만 최근 들어 급격한 상승세를 보이고 있다. 2017년에는 약 2만 5천대, 2019년에는 약 9만대, 2020년에는 약 13만 5천대의 증가추세를 보인다.<sup>3)</sup> 전기차 10만대 등록까지 2013년부터 2020년의 7년의 시간이 걸렸지만, 2020년과 2021년 사이 20만대가 등록되어, 전기차 보급 추세는 향후에도 지속될 것으로 보인다.

본 연구의 목적은 시간대별 배출계수를 활용해 시간대별 전기차로 인한

3) <https://www.joongang.co.kr/article/25009209#home>.

온실가스 배출량을 추정하는 것이기 때문에 실증분석을 위해선 전국의 시간대별 전기차 충전량 자료가 필요하다. 그러므로 충전량 데이터 중에서 시간대별 구분이 없는 하루나 한달 등 일정 기간 동안의 총량 데이터 보다는 시간대별 계측자료를 사용해야 한다. 본 연구에서 사용한 전기차 충전량 자료는 한국전력공사의 전기차 충전소 AMI(Advanced Metering Infrastructure) 계측자료로 국내에서 현재로써 유일하게 가용한 시간대별 충전량 데이터라고 볼 수 있다. 분석 기간은 최초로 전기차 보급량이 1만 대를 초과한 2017년부터 2020년 12월 31일까지로 설정하였다.

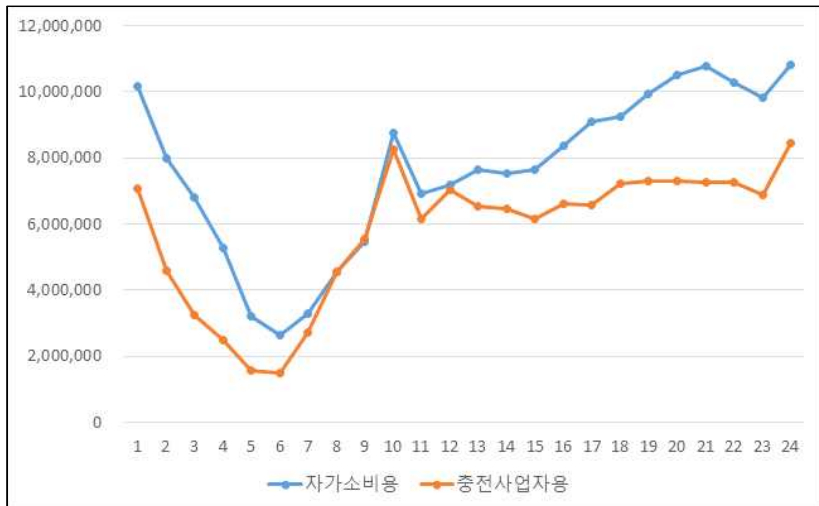
전기차 충전 자료에는 충전사업자와 자가소비용 충전이 존재한다. 충전사업자는 말 그대로 전기차 충전소의 전력판매량 자료이며, 자가소비용 충전은 가정용 전력을 활용해 전기차 소비자가 충전한 전력량을 집계한 자료이다. 2017년 1월 1일부터 2020년 12월 31일까지 전기차 충전소의 AMI 설치 대수를 살펴보면 가파르게 증가하는 것으로 나타난다. 특히 2017년에는 한국전력공사에서 운영하는 충전사업자용 AMI 설비가 100대 중반에서 1,000대 이상으로 증가하였으며, 분석기간 말인 2020년 말에는 가동 중인 충전사업자의 AMI기기 대수가 증가하여 10,000대를 초과한다. 자가소비용 AMI 계기수도 상당히 증가하였는데, 분석기간 초기에는 100대 미만으로 나타나나 2020년 말에는 12,000대 이상인 것으로 집계된다. 전기차 보급에 따라 향후 계기수는 더욱 늘어날 것으로 보인다.

〈그림 1〉에 본 자료에 포함된 AMI 설치 충전사업자와, AMI를 설치한 자가소비용도의 전기차 충전소의 시간대별 충전량이 도시되어 있다. 해당 충전량은 2017년 1월 1일부터 2020년 12월 31일까지를 시간대별로 합산한 자료이다. 충전량을 살펴보면 오전 10시 이후에 충전량이 잠시 감소하나 오후부터 전기차 충전량이 지속적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 충전량은 24시까지 증가하다가 오전 12시부터 6시까지 급격히 감소한다. 이렇게 급격히 감소한 충전량은 다시 오전 7시부터 10시 사이에 급등하는 것으로 보인다. 즉, 전기차 사용자들의 생활패턴에 따라 시간대별로 충전량은 상이하게 나타난다.

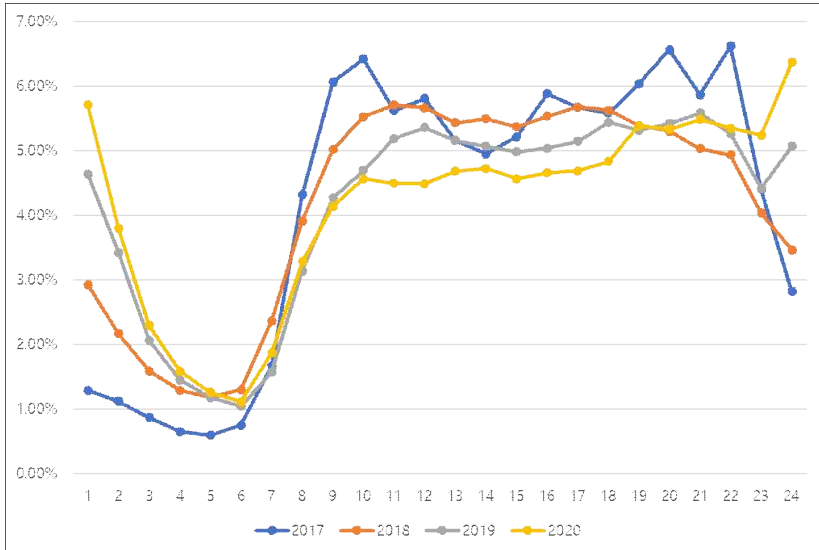
본 연구에서 사용한 자료로 국내 전기차 현황을 대변하기 위해서는 한국전력공사에서 제공한 충전량 자료의 전체 대비 비중을 파악해야 한다. 21년 5월 기준 사용 가능한 충전소는 대략 21,000개소였으며 한전이 운영하는 충전소는 4,000개소로 집계되었다. 이를 통해 한전에서 제공받은 충전량 자료는 전체 충전량의 약 20%를 차지하는 것으로 가정하였다. 이러한 자료는 전체 충전량과는 차이가 있겠지만 한전이 운영하는 충전소가 전체 충전소에 비해 적지 않은 비중이라 할 수 있으므로 충전기의 위치, 충전 차종, 충전량, 충전패턴 등에서 일정 수준이상의 대표성을 지닌다고 볼 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 충전사업자용 시간대별 전력 판매량에 5배를 한 후, 자가소비용 충전량과 합쳐 이를 국내 전기차가 소비하고 있는 시간대별 전력소비량이라고 가정한 후 사용한다. 이러한 시간대별 충전량 자료를 각각의 시간대별로 평균충전량을 산출하고 이를 충전비중으로 나타낸 것이 <그림 2>이다. 시간이 지날수록 점차 저녁부터 새벽까지의 충전비중이 늘어나는 것을 확인할 수 있는데 이는 공용완속충전기와 개인용 충전기의 보급으로 인한 영향이라 볼 수 있다. 특히 개인용 충전기의 이용자가 늘어난다는 것은 시간대별로 요금이 다른 한전의 자가용 충전요금제에 영향을 받는 이용자가 늘어난다는 의미이기도 하다. <그림 1>에서 알 수 있듯, 전기차 충전량은 시간대별로 최소 충전량과 최대 충전량이 약 4배 이상까지 차이를 보인다.

〈그림 1〉 한국전력공사 용도별/시간대별 충전량 합산(kWh) (2017-2020)



〈그림 2〉 시간대별 충전비중 (2017-2020)



현재 충전서비스 이용고객들이 충전사업자의 충전기를 사용할 때는 충전사업자가 제시한 단일요금을 지불하고 자가용 충전기 이용할 때는 시간

대별로 다른 요금(계시별요금)을 지불한다. 점차 자가용 충전기 이용 고객 이 늘어나는 상황에서 환경편익을 고려한 계시별 요금제를 적용하게 된다면 배출량이 적은 시간대로의 전기차 충전부하의 이전이 가능할 수 있을 것으로 보인다.

## 2. 시간대별 배출계수 추정

배출계수란 에너지 소비단위 당 온실가스 배출량을 뜻한다. 온실가스종합정보센터(2019)의 국가 온실가스 인벤토리 보고서에 화석연료별 배출계수가 나와 있다. 온실가스 인벤토리는 연간 자료이기 때문에, 온실가스 인벤토리를 산정하기 위해서는 에너지 부문에서 소비된 연료의 연간 합계와 배출계수만 있으면 에너지 부문의 배출량을 산정할 수 있다. 따라서 연간 소비된 화석연료를 집계한 후 IPCC에서 고시하거나, 국가가 개발한 연료별 고유 배출계수를 적용하면 배출량을 얻을 수 있는 구조이다. 하지만, 본 연구에서 필요한 배출량은 단위 전력 소비량 당 배출계수로 발전원의 단위 발전량 당 온실가스 배출량이 필요하다. 이런 경우 온실가스 인벤토리와 같은 논리로 배출계수를 추정하려면 시간대별 발전량을 알고 있어도 발전소의 효율별로 연소하는 화석연료량이 달라지기 때문에 배출량을 산정하기 어렵다. 이러한 이유로 본 연구에서는 선행연구 조사를 통해 발전원별 배출계수( $\text{kgCO}_2\text{e/MWh}$ )를 얻고자 하였다.

시간대별 전력믹스에 기반하여 배출계수를 추산하기 위해, 전력거래소의 2017년 1월 1일부터 2020년 12월 31일까지의 시간대별 전력 거래량 자료를 사용하였다. 발전량은 전력거래소에서 집계한 자료로, 송전단 기준의 전력거래량을 표시하기 때문에 발전단과 사용단에서의 에너지 소비량과는 다르다.<sup>4)</sup> 본 연구의 목적은 전기차의 전기 소비를 위해 발전 부문에서 발생하는 온실가스 배출량을 추정하는 것이므로 발전단의 전력량이

4) 발전단은 발전전력량에 의한 전력수요를 측정하며, 송전단은 발전단으로부터 발전소 소내용 전력을 차감한 것을 의미한다. 마지막으로 소비단(판매단)은 전기가 수용가에 판매되는 최종수요를 의미한다.

가장 적합할 것이나, 이는 자료 가용성의 한계로 남겨두고자 한다. 국내 발전단과 송전단 간의 차이를 대표할 수 있는 계수(coefficient)가 있다면 해당 계수를 단순히 적용해서 계산해보는 것도 의미가 있을 수 있겠다.

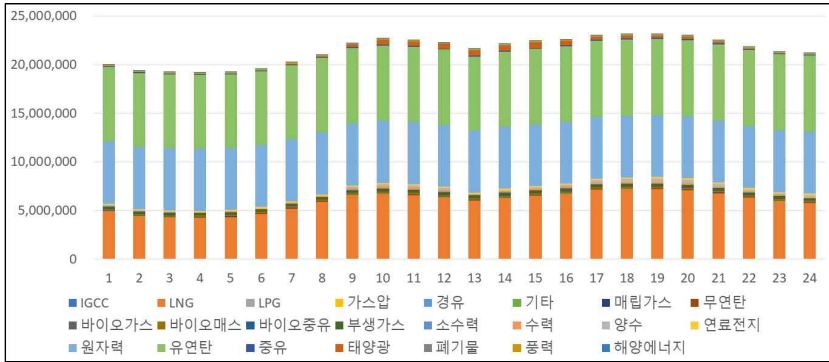
시간대별/발전원별/일별 전력거래량 자료는 23개의 발전원<sup>5)</sup>으로 이루어져 있어 상당히 많은 관측수를 포함하고 있다. <그림 3>에는 2020년 발전량 자료를 시간대별로 합산한, 시간대별 발전 믹스가 나와 있다. 발전량은 대체로 오전 9시부터 오후 8시까지 높은 것으로 나타났으며, LNG 발전의 변동성이 상당히 큰 것으로 나타난다. 이는 LNG발전이 첨두발전원 역할을 하기 때문이다. <표 1>에 2020년도 기준 발전원별 기술통계량이 나와 있다. 마찬가지로 첨두발전원인 LNG의 표준편차가 상당히 높은 것으로 나타난다.

<표 2>에 선행연구 분석을 통해 도출한 배출계수가 정리되어 있다. 발전원별 배출계수에 있어 공신력을 확보하기 위해 IPCC(2014)의 AR5(Fifth Assessment) 자료를 주로 참고하였다. IPCC AR5 보고서의 7장에는 에너지 부문에서의 온실가스 배출량 감축을 위해 문헌정리를 통해 발전원별 온실가스 배출계수 범위를 보고하고 있다. 대부분의 발전원 배출계수를 IPCC(2014)로부터 참고하였으며, 해당 문헌에서 다루지 않는 발전원은 개별적 문헌조사를 통해 도출하였다. IPCC(2014)에서는 IGCC, LNG, LPG, 무연탄 및 유연탄, 수력발전, 원자력, 태양광, 풍력, 해양에너지에 대해 배출계수를 보고하고 있다. 한국전력거래소의 시간대별 발전량 자료와 매칭을 위해서는 경유, 매립가스, 바이오가스, 바이오매스, 바이오중유, 부생가스, 연료전지, 중유, 폐기물에 대한 배출계수를 별개로 도출할 필요가 있다. 바이오가스 및 바이오매스의 경우 IPCC(2014)에서 보고하고 있으나 정확한 수치는 제시되어 있지 않고 그래프로만 나타나 있어 수치를 반영하기에는 무리가 있다.

5) 23개의 발전원은 석탄가스화복합발전(IGCC), LNG, LPG, 가스압, 경유, 기타(차압 및 부생가스), 매립가스, 무연탄, 바이오가스, 바이오매스, 바이오중유, 부생가스, 소수력, 수력, 양수, 연료전지, 원자력, 유연탄, 중유, 태양광, 폐기물, 풍력, 해양энер지를 포함한다.

〈그림 3〉 2020년도 시간대별 전력거래량 믹스

(단위: MWh)



가용한 배출계수 자료의 한계로 인해 본 연구에 몇 가지 가정이 필요하다. 발전원 중 “기타”로 분류되어 있는 것은 재생에너지로 분류되지 않는 차압 및 부생가스로, 해당 발전소에 대한 정확한 자료가 존재하지 않아 부생가스로 가정한다. 부생가스의 경우 산업공정으로부터 발생하는 가스를 활용한 발전이기 때문에 재생에너지원으로 인정받고 있으나 부생가스를 생성·활용 시 온실가스가 배출되기 때문에 화석연료로 분류하고 천연가스 발전과 동일한 배출계수를 적용하고자 하였다. 소수력발전은 수력발전과 동일한 배출계수를 사용하였다. 마지막으로 바이오중유의 경우 가용한 자료가 없어 바이오가스와 배출량이 같은 수준이라 가정하였다.

일본 경제산업성(MEIT)과 환경성(MOE)의 주관 하에 만들어진 양자 온실가스 감축 메커니즘인 JCM(Joint Credit Mechanism)의 인도네시아 프로젝트 문서로부터 경유 발전소 배출계수를 얻을 수 있었다(MEIT and MOE, 2017). 이 문건에서 따르면 경유 발전소의 배출계수는 533kgCO<sub>2</sub>/MWh로 추정되며, 석탄발전소는 795kgCO<sub>2</sub>/MWh의 배출계수를 가진다. 석탄발전의 경우 IPCC(2014)에서 밝힌 배출계수 범위 내에 들어가는 수치이다.

〈표 1〉 2020년도 발전원별 거래량 기술통계량

(단위: MWh)

| 발전원   | 합계          | 시간별평균     | 표준편차      | 최대        | 최소        |
|-------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| IGCC  | 1,836,128   | 76,505    | 390       | 77,134    | 75,763    |
| LNG   | 141,013,739 | 5,875,572 | 1,007,891 | 7,138,423 | 4,153,994 |
| LPG   | 9,098       | 379       | 91        | 526       | 254       |
| 가스압   | 0           | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 경유    | 67,290      | 2,804     | 910       | 4,670     | 1,838     |
| 기타    | 539,155     | 22,465    | 106       | 22,647    | 22,307    |
| 매립가스  | 177,625     | 7,401     | 61        | 7,485     | 7,253     |
| 무연탄   | 1,878,660   | 78,278    | 426       | 78,808    | 77,681    |
| 바이오가스 | 352,115     | 14,671    | 85        | 14,816    | 14,509    |
| 바이오매스 | 2,876,213   | 119,842   | 262       | 120,315   | 119,302   |
| 바이오중유 | 1,247,271   | 51,970    | 2,442     | 56,613    | 48,166    |
| 부생가스  | 5,618,483   | 234,103   | 27,935    | 269,703   | 197,209   |
| 소수력   | 563,479     | 23,478    | 593       | 24,266    | 22,422    |
| 수력    | 3,247,058   | 135,294   | 52,349    | 216,595   | 78,410    |
| 양수    | 3,262,118   | 135,922   | 118,246   | 354,099   | 3         |
| 연료전지  | 3,430,502   | 142,938   | 379       | 143,528   | 142,409   |
| 원자력   | 152,582,938 | 6,357,622 | 9,068     | 6,368,302 | 6,341,903 |
| 유연탄   | 185,502,437 | 7,729,268 | 98,844    | 7,872,709 | 7,574,564 |
| 중유    | 2,120,261   | 88,344    | 4,075     | 93,387    | 81,737    |
| 태양광   | 5,079,552   | 211,648   | 207,974   | 546,122   | 365       |
| 폐기물   | 991,159     | 41,298    | 563       | 42,003    | 40,318    |
| 풍력    | 3,133,997   | 130,583   | 6,367     | 141,306   | 116,951   |
| 해양에너지 | 457,257     | 19,052    | 10,249    | 32,691    | 4,801     |
| 합계    | 515,986,536 |           |           |           |           |

자료: 한국전력거래소 자료 기반으로 저자작성

천연가스 배출계수는 IPCC(2014)에 따르면  $410\text{kgCO}_2\text{e/MWh}$ 와  $650\text{kgCO}_2\text{e/MWh}$ 사이에 존재한다. 하지만, 한국의 화석연료 발전원별 온실가스 배출계수를 비교한 황욱 등(2018)에서 도출한 결과 천연가스 복합터빈은  $374\text{kgCO}_2\text{e/MWh}$ 의 배출계수를 가지며, 국내 천연가스 발전소들의 99.78%가 복합발전시스템을 활용한다는 것을 고려할 때 국내 사례연구 시 천연가스의 대표적 배출계수는  $374\text{kgCO}_2\text{e/MWh}$ 를 사용하는 것이 합리적이다. 매립가스는 김영준 등(2010)의 연구에서 매립가스 발전의 환경

편의 산정을 위해 추정한 값인 538kgCO<sub>2</sub>e/MWh을 사용한다. 이 값의 추정에는 이미 국내 사례에서 적용된 매립가스 CDM 사업의 온실가스 감축 추정치가 사용되었다.

〈표 2〉 발전원별 배출계수 정리 및 출처

(단위: kgCO<sub>2</sub>e/MWh)

| 발전원   | 최소    | 최대   | 출처 및 비고                 |            |
|-------|-------|------|-------------------------|------------|
| IGCC  | 720   | 890  | IPCC(2014)              |            |
| LNG   | 374   | 650  | 황옥 등(2018)              | IPCC(2014) |
| LPG   | 290   | 930  | IPCC(2014)              |            |
| 경유    | 533   | -    | MEITJ and MOEJ(2017)    |            |
| 기타    | 410   | 650  | IPCC(2014)의 LNG 배출계수 준용 |            |
| 매립가스  | 538   | -    | 김영준 등(2010)             |            |
| 무연탄   | 675   | 1689 | IPCC(2014)              |            |
| 바이오가스 | 12    | 252  | 윤영만 등(2012)             |            |
| 바이오매스 | 10    | 101  | WNA(2011)               |            |
| 바이오중유 | 12    | 252  | 바이오가스 배출계수 준용           |            |
| 부생가스  | 410   | 650  | LNG 배출계수 준용             |            |
| 소수력   | 3     | 40   | 수력발전 배출계수 준용            |            |
| 수력    | 3     | 40   | IPCC(2014)              |            |
| 연료전지  | 261   | 358  | 가스신문(2021)              |            |
| 원자력   | 4     | 110  | IPCC(2014)              |            |
| 유연탄   | 678   | 1689 | IPCC(2014)              |            |
| 중유    | 701.8 | 778  | 한국전력거래소(2018)           | Hugo(2008) |
| 태양광   | 18    | 180  | IPCC(2014)              |            |
| 폐기물   | 652   | -    | 김승진 등(2013)             |            |
| 풍력    | 7     | 56   | IPCC(2014)              |            |
| 해양에너지 | 2     | 23   | IPCC(2014)              |            |

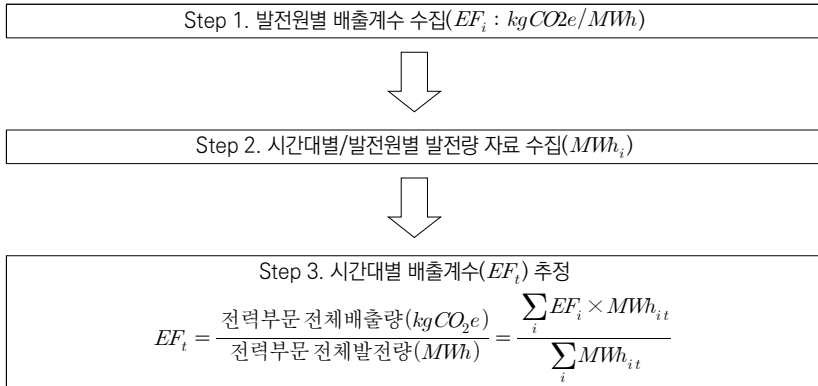
바이오가스의 경우 윤영만 등(2012)에서 바이오가스 생산시설의 비용 편의 분석에 사용된 배출계수를 활용하였다. 이 연구에서는 바이오가스 생산을 통해 활용 시 기존 발전시설로부터 398kgCO<sub>2</sub>e/MWh의 배출계수가 절감된다고 밝혔다. 본 연구에서는 LNG 발전을 대체한다고 가정하고, LNG 발전 배출계수의 원 출처인 IPCC(2014)의 410~650kgCO<sub>2</sub>e/MWh로부터 대체효과를 제한 값을 사용하였다. 바이오매스는 여러 출처로부터

얻을 수 있었는데, 세계원자력기구(World Nuclear Association, WNA)로부터 배출계수를 얻어 분석에 활용하였다(WNA, 2011).

연료전지 발전소의 배출계수는 산업통상자원부(2021)의 보도설명자료로부터 얻었다. 폐기물의 배출계수는 김승진 등(2013)의 연구에서 산정한 폐기물자원회수시설의 전력 배출계수를 사용하였다. 마지막으로, 중유발전소의 경우 한국전력거래소에서 2011년에 산정한 국내 배출계수 자료로부터 도출하였다(한국전력거래소, 2018). 양수발전은 본 연구의 배출계수 산정에서 제외되었는데, 양수발전 자체의 발전량이 적기도 하고, 전력이 저렴한 시점에 사용한다는 것은 배출계수가 작을 때를 의미하기도 하여 제외시켜도 무리가 없다고 판단하였다.

발전원별 배출계수를 도출하고, 시간대별 발전량 자료와 연산하면 <그림 4>에 도식화되어있는 과정을 통해 시간대별 전력부문 배출량을 구할 수 있다. 국내 발전부문이 전세계 대비 효율이 높은 편에 속하기 때문에 본 연구에서는 최소치를 기준으로 배출계수를 계산하였다. <그림 4>의 식에서  $EF_i$ 는 시간대별 전력부문 배출계수,  $i$ 는 각 발전원을 나타낸다.  $EF_i$ 는 선행연구 정리를 통해 도출한 발전원  $i$ 의 배출계수를 의미하며,  $MWh_{it}$ 는 시간대별 발전원  $i$ 의 발전량을 가리킨다. 위 과정을 통해 도출한 연도별 배출계수가 아래 <표 3>에 나와 있다. 연도별로 평균 배출계수는 2018년에는 전년도 대비 증가하였으나, 2019년과 2020년에는 급격히 감소해 온 것으로 나타난다.

〈그림 4〉 시간대별 배출계수 추정과정



김승도·나승혁(2008)의 연구에서 제시한 0.650의 배출계수보다 상당히 완화된 것으로 나타난다. 한국전력거래소에서는 2011년의 발전단 온실가스 배출계수를 0.4428로 제시하였다.<sup>6)</sup> 이상림(2015)에서는 제2차 에너지 기본계획에서 제시한 값을 바탕으로 2016년과 2017년의 발전부문 배출계수를 각각 0.4400과 0.4307로 예측하여 본 연구와 추정치가 유사하다.

2017년 대비 2018년에는 기저발전원 중 원자력 비중이 낮았으며, 유연탄 발전 믹스가 높아 평균 배출계수가 높은 것으로 나타난다. 2018년부터 발전부문에서 청정 전원으로의 전환 효과가 나타나고 있다. 연도별로 최대배출계수가 최소배출계수의 약 1.5배 이상으로 도출되므로, 충전 시간대 조절을 통해 전기차 편익을 확대할 수 있다.

〈표 3〉 연도별 배출계수 추이

(단위: tCO<sub>2</sub>e/MWh)

|        | 2017   | 2018   | 2019   | 2020   |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| 평균배출계수 | 0.4030 | 0.4116 | 0.3935 | 0.3612 |
| 표준편차   | 0.0178 | 0.0208 | 0.0289 | 0.0274 |
| 최대배출계수 | 0.4434 | 0.4585 | 0.4374 | 0.4372 |
| 최소배출계수 | 0.3408 | 0.3438 | 0.3074 | 0.2840 |

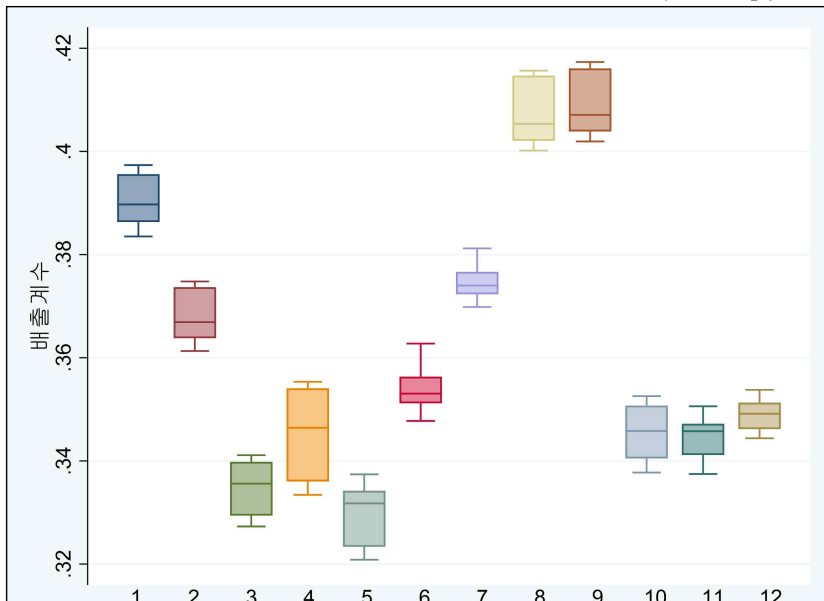
6) <https://www.kpx.or.kr/www/contents.do?key=222>.

가장 최근 자료인 2020년의 배출계수를 증점적으로 살펴본다. <그림 5>에 2020년의 월별 배출계수 추이가 나와 있다. 배출계수가 가장 높은 구간은 9월 부근인 반면, 배출계수가 가장 낮은 구간은 3월부터 5월 사이인 것으로 보여 배출계수에 계절성이 존재함을 알 수 있다. 냉난방이 필요한 겨울철(1~2월)과 여름철(7~9월)이 가장 큰 값을 보인다.

시간대별 배출계수 평균치는 큰 차이가 나타나지 않지만, 최소값으로 살펴보면, 전기차 충전으로부터 배출량을 감소시킬 수 있는 구간이 존재한다. <표 4>는 2020년 시간대별 배출계수의 최소값을 산정한 것이다. 배출계수가 0.29보다 낮아지는 구간은 오전 10시부터 오후 3시 사이로 도출되었다. 따라서 해당 구간에 전기차 충전을 하게 되면 전기차로부터 온실가스 배출량을 더욱 감소시킬 수 있을 것으로 보인다. 충전소마다 ESS를 운영하여 배출량이 적은 시점에 미리 전력을 소비한 후, 배터리를 활용해 전기차를 충전하는, 양수발전 시스템의 사업모델을 반영하는 것도 한 가지 방법일 수 있다.

<그림 5> 2020년 월별 배출계수 추이

(단위: tCO<sub>2</sub>e/MWh)



〈그림 6〉은 각각 월별로, 시간대당 배출계수의 평균을 나타내고 있다. 월별로 동일한 추세를 보이며, 〈그림 5〉와 마찬가지로 8월과 9월에 배출계수가 높은 것으로 나타나고, 5월과 1월, 2월이 그 뒤를 잇는다. 오전 7시까지 높은 배출계수를 보이다가 점점 줄어들어 오전 10시부터 오후 3시 사이의 최솟값을 보이는 것도 모든 연도에서 동일하게 나타나는 추세이다. 월별 평균 배출계수는 상당한 차이를 보이므로, 전기차 사용을 통한 환경편익도 계절별로 상이할 것이다. 환경편익을 극대화하기 위해서는 전기차 연료를 친환경적으로 생산할 수 있는 방안을 강구할 필요가 있다. 공급 관점에서는 배출계수가 높은 구간에 제어가 가능한 재생에너지 발전원 가동을 늘리는 것이다. 수요 관점에서는 전기차만의 요금제도 개발을 통해 저배출 기간 동안 소비와 고배출기간 동안 절약 권장을 이끌어낼 수 있는 체계가 필요하다.

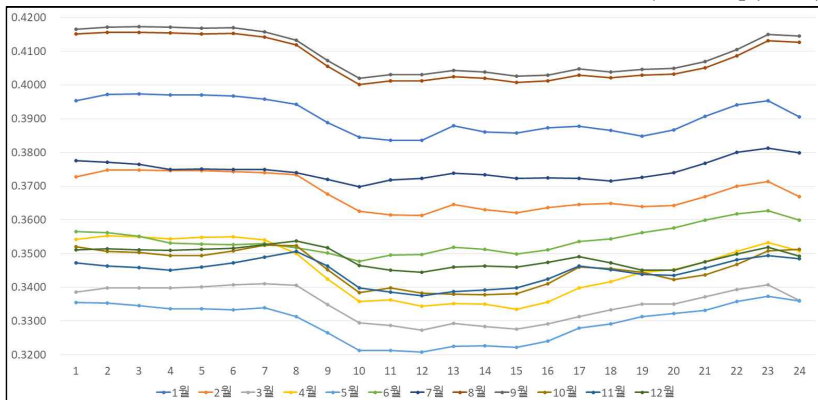
〈표 4〉 시간대별 배출계수 최솟값

(2020년, 단위: tCO<sub>2</sub>e/MWh)

| 시간   | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | 11     | 12     |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 배출계수 | 0.3019 | 0.3107 | 0.3092 | 0.3063 | 0.3075 | 0.3112 | 0.3124 | 0.3060 | 0.2985 | 0.2892 | 0.2903 | 0.2848 |
| 시간   | 13     | 14     | 15     | 16     | 17     | 18     | 19     | 20     | 21     | 22     | 23     | 24     |
| 배출계수 | 0.2857 | 0.2849 | 0.2840 | 0.2912 | 0.3007 | 0.3046 | 0.3063 | 0.3044 | 0.2963 | 0.2934 | 0.2942 | 0.2986 |

〈그림 6〉 2020년 월별 시간대별 평균 배출계수

(단위: tCO<sub>2</sub>e/MWh)



### 3. 배출계수에 기반한 전기차의 온실가스 배출량 분석

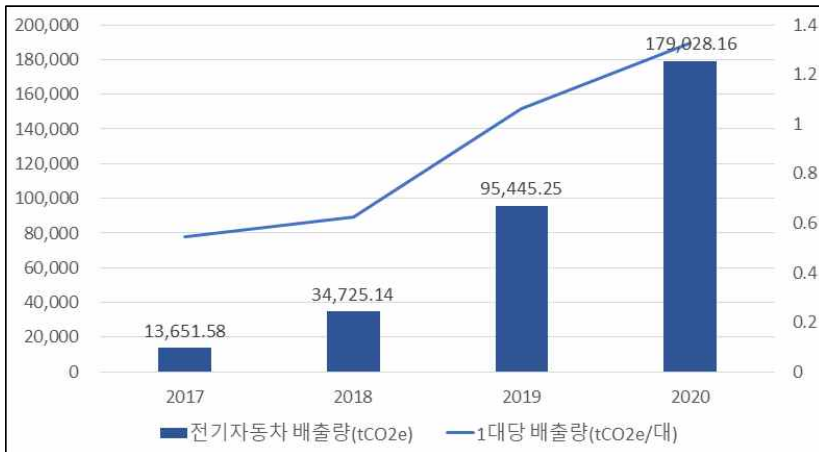
앞선 과정을 통해 추정된 시간대별 배출계수와 시간대별 전기차 충전량 자료를 사용하면 시간대별 전기차로부터 발생하는 온실가스 배출량을 산출할 수 있다. 추정된 전기차의 연도별 온실가스 배출량이 아래 <그림 7>에 나와있다. 연간 배출량은 시간대별 배출계수와 전기차 충전량을 곱한 후, 해당 연도의 모든 시간대를 합산한 값이다. 전기차 보급대수와 마찬가지로 분석 기간 동안 전기차로부터의 온실가스 배출량이 급등한 것으로 나타난다. <표 5>에는 국토교통부의 전기차 등록수 자료를 통해 도출한 1대당 온실가스 배출량이 나와 있다.

상기 기술한 대로 2017년부터 전기차 등록대수는 급격히 증가해 왔다. 전기차 배출량은 배출계수와 전기차 등록대수에 비례하는 전기차 충전량이 결정한다. 즉, 전기차 1대당 배출량은 전력부문의 배출계수가 완화된에 따라 감소하는 것이 자연스러운 현상이다. 하지만, 실 자료로 살펴본 결과 2019년과 2020년에 1대당 배출량이 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 배출계수의 완화속도보다 1대당 전기차 충전량 증가율이 빠르기 때문이다. 이는 충전소의 보급으로 인해 평균주행거리가 긴 소비자들의 전기차 구매 의사결정이 진행되었음을 의미한다. 향후 충전소가 보급될수록, 편의성 부족으로 전기차 구매 의사결정을 망설이던 소비자들의 구매가 증가할 것이므로 1대당 전기차 충전량은 더욱 증가할 여지가 있을 것으로 예상된다.

2018년 기준으로, 우리나라의 수송부문에서 도로운수업의 석유가스 소비량은 32,487ktoe(석유 31,272ktoe + 가스 1,215ktoe)이다(IEA, 2021b). 도로수송의 온실가스 배출량은 94,711.41ktCO<sub>2</sub>e로 나타난다(온실가스종합정보센터, 2020). 2018년의 총 등록차 대수는 23,202,555대인 반면, 전기차는 55,756대가 존재한다. 전기차 보급이 급증한 2019년과 2020년의 자료를 활용하는 것이 현시적인 정책적 시사점을 제시할 수 있으나, 온실가스 배출량 자료가 없으므로 2018년 자료를 활용한다. <표 6>에 온실가스 인벤토리와 에너지 밸런스를 활용해 단순계산한 내연기관 차의 1대당

배출량이 나와 있으며, 이를 <표 5>에서 추정한 전기차 배출량과 비교하였다.

〈그림 7〉 연도별 전기차 온실가스 배출량



〈표 5〉 전기차 보급 및 배출량

|                              | 2017      | 2018      | 2019       | 2020       |
|------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|
| 전기차 에너지 소비량(MWh)             | 33,618.13 | 84,941.78 | 241,604.90 | 495,230.72 |
| 전기차 배출량 (tCO <sub>2</sub> e) | 13,651.58 | 34,725.14 | 95,445.25  | 179,028.16 |
| 전기차 등록대수                     | 25,108    | 55,756    | 89,918     | 134,962    |
| 1대당 배출량 (tCO <sub>2</sub> e) | 0.5437    | 0.6228    | 1.0615     | 1.3265     |

전기차 1대당 연간 배출량이 최근 들어 증가하여 약 1.33tCO<sub>2</sub>e인 것으로 도출되었으나(2020년 기준), 2018년의 내연기관 1대당 연간 배출량은 약 4.09tCO<sub>2</sub>e로, 여전히 내연기관보다는 낮은 수준인 것으로 보인다. 도로운수업의 1대당 배출량은 전기차를 고려할 시 감소할 수 있기 때문에, 전기차 보급이 도로운수업의 온실가스 원단위 개선에 기여할 수 있음을 시사한다. 단, 온실가스 배출원단위가 하지만 둘 간의 간격이 좁혀지는 점을 고려할 때 전환부문의 온실가스 원단위 감축이 꾸준히 이루어져야 할 것으로 보인다.

3.1장에서 언급한 바와 같이 <그림 6>에서 나온 결과를 활용하여 환경 편익을 고려한 계시별 요금제를 적용해볼 수 있다. 2장에서 언급하였듯, 전기차의 요금제도를 통한 부하이전은 충전소의 접근성이 높아야 한다. 현재 내연기관차 사용자의 주유소와 같이 전기차 충전소가 보급되어 있는 상황을 가정하도록 한다. 계시별 요금격차가 충전시간 이전에 대한 효용 격차에 비해 클 경우, 전기차 사용자는 충전 시간대를 옮기고자 할 가능성이 높다. 충전 시간대를 옮기면, 발전량과 발전 믹스, 발전 믹스에 따른 배출계수가 시간대별로 차이난기 때문에 전력 부하이전과 온실가스 배출 감축이 일어날 수 있다.

〈표 6〉 2018년 기준 전기차와 내연기관차 비교

|                                            | 도로운수업<br>(추정치) | 내연기관<br>(통계량) | 전기차<br>(추정치)        |
|--------------------------------------------|----------------|---------------|---------------------|
| 등록대수(수소차 제외)                               | 23,201,662     | 23,145,906    | 55,756              |
| 에너지 소비량(ktoe)                              | 32,494.30      | 32,487        | 7.30(≒84,941.78MWh) |
| 온실가스 배출량(k <sub>t</sub> CO <sub>2</sub> e) | 94,711.41      | 94,676.68     | 34.73               |
| 1대당 배출량(tCO <sub>2</sub> e)                | 4.0821         | 4.0904        | 0.6228              |

예를 들면, 현재 겨울철 충전요금제의 경부하 시간대가 23시부터 9시까지로 지정되어 있다. 그러나 <그림 7>에서 볼 수 있듯 23시부터 8시까지 는 비교적 높은 배출계수를 보인다. 높은 배출계수를 보이는 시간대와 현재 요금제의 경부하 시간대가 겹치는 일부 시간대에 중부하 요금을 부과 하는 방식을 통해 배출계수가 낮은 시간대로 부하이전을 할 수 있다. 이때 전기차의 증가와 미래 전원믹스의 변화에 대한 전망치를 활용하여 계통에 과중한 부담은 주지 않으면서 배출계수가 높은 시간대의 부하를 배출계수가 낮은 시간대의 부하로 이전시켜야 한다.

이런 요금제도 하에서는 배출계수가 낮을 때 전기차 충전 요금이 저렴 해진다. 전기차 충전소를 운영하는 사업자 측면에서는 ESS 기술을 활용하여 저렴한 시간에 전력을 저장하고 급속충전 전력으로 판매하는 사업모델을 활용할 수 있고, 전기차 사용자 측면에서는 스마트 시스템을 통해 실시

간 배출계수와 요금을 모니터링하여 충전을 결정하는 모형이 개발되면 충전 최적화가 더욱 편리해질 수 있다. 추후 환경편익과 계통편익을 동시에 달성할 수 있는 새로운 충전요금제에 관한 후속 연구를 기대해본다.

## VI. 결론

정부의 전기차의 보급 정책은 기존 화석연료를 연소하여 동력을 얻는 구동계인 엔진을 전기화(electrification)하여 모터로 대체함과 동시에 구동계의 효율 증대를 통한 연료 소비 감소 효과를 누리겠다는 목적이 있다. 궁극적으로는 전기차에 쓰이는 전력을 청정에너지원에서 조달하여 수송부분의 탄소중립을 달성하겠다는 계획이다. 그러나 서론에서 언급한 바와 같이 우리나라는 2030년까지 수송부분의 온실가스를 37.8% 가량 줄여야 한다는 단기 목표가 있다는 것을 명심해야 한다. 또한 2050년까지 전환부분의 탄소중립을 달성하기 위해서는 전기차 충전부하가 전력시스템에 과도한 부담을 주어서는 안될 것이다.

전기차를 주로 충전하는 시간대가 오후에서 점차 저녁-야간 시간대로 밀려나고 있으며 해가 지고나면 태양광과 같은 재생에너지원을 주력 전원으로 사용할 수 없다. 이 때문에 전기차 충전부하는 전력시스템에 과도한 부담을 주게 되어 화석연료 기반 발전기를 가동시키는 트리거 역할을 할 수 있다. 결국 전기차 충전을 위해서 주로 화석연료를 통해 생산한 전력을 사용하게 될 수 있으며 탄소 저감에 악영향을 미치게 될 것이다. 또한 전기차 충전을 위한 전력 생산에 화석연료를 활용한다면 화석연료로부터 전환손실을 감수하며 차량을 운행한다는 의미가 된다. 때때로 화석연료를 직접 사용하는 내연기관보다 에너지 소비 효율이 떨어지는 상황이 벌어져 전기차 보급 의도를 퇴색시키는 결과를 초래할 수 있다. 이러한 이유로 단순히 친환경차의 보급만으로는 수송부문에서 탄소중립은 물론 2030 온실가스 감축 목표를 달성하기 어려울 수 있다. 온실가스를 효과적으로 저

감하기 위해서는 전기차 보급과 동시에 배출량을 줄일 수 있는 실질적인 보조 정책이 뒷받침 되어야 할 것이다.

본 연구에서는 현 상황에서의 전기차 충전부하량의 분석을 통해 주요 충전시간대를 파악하고 해당 시간대별 발전 믹스를 고려해 배출감소 효과를 살펴보았다. 분석 과정에서 배출계수 산정에 관한 기본적인 프레임워크를 제공함으로써 수송부문의 저감량을 산출할 수 있는 가이드라인을 제시한다. 이를 통해 향후 전기차 보급목표를 달성했을 때의 온실가스 저감량을 추산해보고 다양한 정책을 입안해야 할 것이다.

전력부문의 배출계수와 전기차의 충전량 자료를 통해 전기차의 온실가스 배출량을 도출할 수 있기에 이전 연구들에서 전기차의 온실가스 배출량을 산출하기 위한 시도가 없었던 것은 아니다. 하지만 지금까지의 국내 연구에서 수송부문의 도로운수업에서 전력 소비량 통계는 실측 자료에 기반하지 않아 정확하다고 하기 어렵다. 또한 전력의 특성상 생산과 소비가 동시에 일어나기 때문에 시간대별로 살펴보아야 정교한 정책을 수립할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 점들에 착안하여, 시간대별/발전원별 발전량과 시간대별 전기차 충전량 자료를 활용해, 전기차로부터 온실가스 배출량을 시간대별로 산정하고 추이를 파악하였다.

실증분석 결과를 요약하면 다음과 같다. 2017년부터 2020년까지 배출계수는 감소 추세에 있다. 연도별로 최대배출계수는 최소배출계수의 약 1.5배 차이가 있어 전력 소비 시간대를 잘 조절하면 온실가스 감축 효과를 얻을 수 있다. 전기차는 2017년부터 보급량이 급격히 증가하여 2020년에는 약 13만 5천대가 등록되었으며 이에 따라 충전량도 급격히 증가한 것으로 나타난다.

전기차 1대당 온실가스 배출량도 증가하였다. 2017년부터 2020년까지 전력부문 배출계수는 완화된 것으로 1대당 충전량이 동일하면 1대당 온실가스 배출량은 감소했어야 하지만 1대당 에너지 소비량이 배출계수 완화속도에 비해 빠른 것으로 나타난다. 이는 평균주행거리가 긴 소비자들 이 자동차 구매 의사결정 시 전기차 선택 비중이 높아졌음을 뜻한다. 내연

기관의 온실가스 배출량에 비해 낮은 수준이지만, 1대당 온실가스 배출량은 지속적으로 증가할 것으로 생각된다. 전기차의 전력소비량이 증가한다는 뜻이므로, 전력부문의 배출계수 감소와 전기자동차 충전 시간대 조절 등이 필요할 것이다.

시간대별로 살펴보면 오전 10시부터 오후 3시까지 배출계수가 낮으며, 월별로는 3월~5월, 10월~12월이 가장 낮다. 여름철보다 겨울철 배출계수가 높다는 것은 현재 난방보다는 냉방에 전력이 더 사용되고 있다는 뜻이다. 향후 건물부문과 주거부문의 전기화가 심화될수록 겨울철 배출계수는 여름철과 동일 수준까지 증가할 수 있다. 단, 이는 현재의 전력 믹스 하에 서이며 전력 부문의 에너지 전환으로 배출계수가 완화되면 모든 계절에서 배출량은 감소할 수 있다.

수송부문의 탄소중립을 위한 적극적인 해결책은 전력부문의 재생에너지 확대이지만 급격한 에너지 전환은 과도한 설비투자를 요하기 때문에 비용효과적인 해결책이 아닐 수 있다. 에너지 전환을 점진적으로 확대하면서 수송부문에서는 전기차를 활성화함과 동시에 환경영향을 고려한 충전요금제 개발을 통해 충전시간대 조정 유도가 필요하다. 본 연구의 결과는 계절별/계시별로 충전요금을 다르게 하여 충전량 변화를 유도한다면 더 큰 온실가스 감축 효과를 거둘 수 있음을 암시한다. 한국전력공사에서 계절별/계시별 요금제를 시행하고 있으나 전기차로부터 배출량을 줄이기 위해서는 전기차만의 요금제를 개발하는 것이 필요하다.

향후 태양광 중심의 재생에너지가 확대될 경우 배출계수는 시간대별로 차이가 매우 커질 가능성이 높다. 그러므로 계시별 전기차 충전 요금제의 부하시간대 구분을 화석연료 중심 발전원의 사용 시간대를 고려하여 결정하는 것도 검토해보아야 할 것이다. 또한 전기차의 한 대당 전력 소비량과 탄소배출량이 점점 늘어나고 있다는 점을 주목해야한다. 탄소중립으로 넘어가는 과도기를 고려하면 지금부터 수소차 보급 확대 정책을 병행하여 수소를 대체 연료원으로 사용할 필요가 있다.

본 연구는 다음과 같은 한계를 가진다. 한전에서 제공하는 자료를 사용

할 때, 전체 충전량으로 스케일업 하기 위해서 다양한 가정이 들어간다. 전술한 바와 같이 현재 자료 가용성의 한계로 인해 이와 같은 가정하에서 연구를 진행할 수 밖에 없었다. 향후 수송부문의 전기화에 대한 연구를 본격적으로 진행하기 위해서는 관련 통계자료를 미리 구축해야 한다. 전기차의 상태 및 전기차 충전량에 대한 다양한 통계가 작성된다면 더욱 의미있는 후속 연구를 기대해볼 수 있을 것이다. 마지막으로, 전기자동차 운전자의 행태를 예측하기 위해 충전시간 이전에 대한 최소 요금변동 수준을 설문기법 기반으로 추정해 볼 필요가 있다.

## ■ 참고문헌 ■

- 가스신문, 2021.10.21., “국내 발전용 연료전지, LNG 발전소보다 CO<sub>2</sub> 배출량 적어,” <http://www.gasnews.com/news/articleView.html?idxno=101432>.
- 관계부처합동, 2020, 『미래자동차 확산 및 시장선점 전략』, 세종 : 관계부처 합동.
- \_\_\_\_\_, 2021a, 『에너지 탄소중립 혁신전략』, 세종 : 관계부처 합동.
- \_\_\_\_\_, 2021b, 『2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안』, 세종 : 관계부처 합동.
- \_\_\_\_\_, 2021c, 『2050 탄소중립 시나리오안』, 세종 : 관계부처 합동.
- 강태석·장현호, 2016, “고속철도는 고속도로에 비하여 저탄소 친환경적인가?,” 『한국도로학회논문집』, 18(5), pp.83-93.
- 김상일·이효섭·전의찬, 2021, “수요자원시장의 기후 환경편익 연구,” 『대한전기학회 하계 학술대회 논문집』, 용평리조트, pp.676-677.
- 김승연·이상림·이지용, 2017, “전기자동차 보급으로 인한 2030년 온실가스 감축량 추정,” 『환경정책』, 25(4), pp.39-61, DOI: 10.15301/jepa.2017.25.4.39.
- 김승도·나승혁, 2008, “온실가스 배출량 산정방법,” 『전자공학회지』, 35(11), pp.73-82.
- 김승진·임기교·이지영·이시형·사재환·전의찬, 2013, “폐기물자원회수시설의 이산화탄소 배출계수 개발,” 『한국기후변화학회지』, 4(1), pp.51-61.
- 김영준·이종연·구준모·강용태, 2010, “환경편익을 고려한 매립가스 자원화 사업의 경제성분석,” 『설비공학논문집』, 22(4), pp.181-188.
- 김재엽·김비아·박명덕, 2020, “수송부문 연료전환 효과 분석: 사업용 승용차 부문을 중심으로,” 『자원·환경경제연구』, 29(4), pp.443-468, DOI: 10.15266/KEREA. 2020. 29.4.443.
- 산업통상자원부, 2021.10.20., “발전용 연료전지의 온실가스 배출량, LNG 발전 1.4배?

- 사실 아니다,” 보도설명자료, <https://www.korea.kr/news/actuallyView.do?newsId=148894580>.
- 심형욱·김성수, 2018, “전력수요방식을 고려한 전기자동차의 CO<sub>2</sub> 감축효과 분석,” 『대한교통학회지』, 36(6), pp.403-414, DOI: 10.7470/jkst.2018.36.6.403.
- 온실가스종합정보센터, 2019, 『2018 국가 온실가스 인벤토리 보고서』, 서울: 온실가스종합정보센터.
- 우종률, 2016, “전력 믹스에 따른 전기자동차의 CO<sub>2</sub> 배출량 비교 분석,” 『과학기술정책』, 220, pp.42-47.
- \_\_\_\_\_, 2021, “친환경차 보급 확대를 위한 국가 단위 선행조건: 전원믹스,” 『국토 특집』, 473, pp.12-17.
- 윤영만·박현태·김연중·한혜성, 2012, “바이오가스 생산시설의 비용·편익 사례 분석,” 『농촌경제』, 35(4), pp.97-116, DOI: 10.36464/jrd.2012.35.4.006.
- 이규진·최기주, 2015, “실 주행 자료를 이용한 도로유형·시간대별 연료소모량 차이 검증 및 배출계수 보정 지표 분석,” 『대한교통학회지』, 33(5), pp.449-460, DOI: 10.7470/jkst.2015.33.5.449.
- 이상림, 2015, 『7차 전력수급 기본계획하에서 배출권거래제가 전력시장에 미치는 영향』, (수시연구보고서; 2015-04), 울산: 에너지경제연구원.
- 전호철, 2019, “에너지 전환정책에 따른 전기자동차의 환경편익 추정연구,” 『자원·환경경제연구』, 28(2), pp.307-326, DOI: 10.15266/KEREA.2019.28.2.307.
- 중앙일보, 2021.9.24, “국내 전기차, 보급 8년 만에 내달 20만대 돌파,” <https://www.joongang.co.kr/article/25009209#home>.
- 한국전력거래소, 2018, 『온실가스 제약이 발전사업자 입찰전락과 전력시장에 미치는 영향 연구』, 나주: 한국전력거래소 전력경제연구실.
- 한국전력공사, 2021, 『제90호 한국전력통계』, 나주: 한국전력공사 경영혁신처.
- 황욱·서현정·이민철, 2018, “통계자료에 근거한 한국 연료연소 발전원별 이산화탄소 배출 지수 비교,” 『대한기계학회 논문집 B권』, 42(2), pp.111-116.
- Gai, Y., A. Wang, L. Pereira, M. Hatzopoulou, and I. D. Posen, 2019, “Marginal greenhouse gas emissions of Ontario’s electricity system and the implications of electric vehicle charging,” *Environmental Science & Technology*, 53, pp.7903-7912, DOI: 10.1021/acs.est.9b01519.
- Global Commission on the Economy and Climate (GCEC), 2015, *New climate economy technical note: Abatement reduction potential*, London: GCEC.
- Gordon, C. and A. Fung, 2009, “Hourly emission factors from the electricity generation sector - A tool for analyzing the impact of renewable technologies in Ontario,” *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 33(1), pp.105-118, DOI: 10.1139/tcsme-2009-0010.

- Hugo, A., 2008, "Computer simulation and life cycle analysis of a seasonal thermal storage system in a residential building," Master thesis, Concordia University, Canada.
- IEA, 2021a, *Greenhouse gas emissions from energy*, Paris, France: IEA.
- \_\_\_\_\_, 2021b, *World energy balances 2021*, Paris, France: IEA.
- IPCC, 2014, *Climate change 2014: Mitigation of climate change*, (Contribution of working group III to the fifth Assessment report of the intergovernmental panel on climate change), In O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, and K. Seyboth et al., (eds.), Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Kopsakangas-Savolainen, M., M. K. Mattinen, K. Manninen, and A. Nissinen, 2017, "Hourly-based greenhouse gas emissions of electricity - Cases demonstrating possibilities for households and companies to decrease their emissions," *Journal of Cleaner Production*, 153, pp.384-396, DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.11.027.
- Kono, J., Y. Ostermeyer, and, H. Wallbaum, 2017, "The trends of hourly carbon emission factors in Germany and investigation on relevant consumption patterns for its application," *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22, pp.1493-1501, DOI: 10.1007/s11367-017-1277-z.
- Marrasso, E., C. Roselli, and M. Sasso, 2019, "Electric efficiency indicators and carbon dioxide emission factors for power generation by fossil and renewable energy sources on hourly basis," *Energy Conservation and Management*, 196, pp.1369-1384, DOI: 10.1016/j.enconman.2019.06.079.
- MEITJ and MOEJ, 2017, *JCM proposed methodology: Installation of solar PV system-for Indonesia-Additional information on calculating the emission factors of Indonesia for the JCM*, Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies.
- Soltani, N. Y., S. Kim, G. B. Giannakis, 2015, "Real-time load elasticity tracking and pricing for electric vehicle charging," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(3), pp.1303-1313, DOI: 10.1109/TSG.2014.2363837.
- Stelmach, G., C. Zanocco, J. Flora, R. Rajagopal, and H. S. Boudet, 2020, "Exploring household energy rules and activities during peak demand to better determine potential responsiveness to time-of-use pricing," *Energy Policy*, 144, 111608, DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111608.
- Valogianni, K., W. Ketter, J. Collins, and D. Zhdanov, 2020, "Sustainable electric vehicle charging using adaptive pricing," *Production and Operations*

*Management*, 29(6), pp.1550-1572, DOI: 10.1111/poms.13179.

WNA, 2011, *Comparison of lifecycle greenhouse gas emissions of various electricity generation sources*, (WNA Report), London: WNA.

국토교통안전공단 교통부문 온실가스관리 시스템(KOTEMS), 2020, “부문별 온실가스 배출량,” <https://www.kotems.or.kr/app/kotems/forward?pageUrl=kotems/ptl/emission/foreign/KotemsPtlEmissionForeignEmissionSectorLs&topmenu1=01&topmenu2=01&topmenu3=02>, [2021.12.22]

국토교통부 통계누리, 2021, “자동차등록현황보고,” <http://stat.molit.go.kr/portal/cate/statFileView.do?hRsId=58&>, [2021.12.20]

한국전력거래소, 2011, “발전단 온실가스 배출계수,” <http://www.kpx.or.kr/www/couteuts.do?.key=222>, [2021.12.10]

---

**김도원:** KAIST에서 산업및시스템공학 박사학위를 취득하였으며, 현재 에너지경제연구원 부연구위원으로 재직 중이다. 최적화 및 시뮬레이션 기법을 활용해 전력정책, 기후변화 위험 등에 관련된 연구를 수행하고 있다(dwkim@keei.re.kr).

**진태영:** 한양대학교에서 자원경제 및 정책 박사학위를 취득하였으며, 현재 에너지경제연구원 부연구위원으로 재직 중이다. 계량경제학적 기법과 경제분석 모형을 활용해 집단에너지와 에너지 효율, 기후변화에 관련된 연구를 수행하고 있다(tyjin@keei.re.kr).

투 고 일: 2022년 01월 23일

심 사 일: 2022년 02월 02일

게재확정일: 2022년 02월 18일