

## 충전 시점에 따른 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량 분석

이주하<sup>1,2</sup> · 김자롱<sup>3</sup> · 최원재<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>이화여자대학교 휴먼기계바이오공학부, <sup>2</sup>이화여자대학교 시스템헬스융합전공, <sup>3</sup>한국교통안전공단 자동차안전연구원

## Well-to-wheel Greenhouse Gas Emissions of Battery Electric Vehicles Depending on Charging Time

JUHA LEE<sup>1,2</sup>, CHARYUNG KIM<sup>3</sup>, WONJAE CHOI<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical and Biomedical Engineering, Ewha Womans University, 52 Ewhayeodae-gil, Seodaemun-gu, Seoul 03760, Korea

<sup>2</sup>Major in System Health & Engineering, Ewha Womans University, 52 Ewhayeodae-gil, Seodaemun-gu, Seoul 03760, Korea

<sup>3</sup>Korea Automobile Testing & Research Institute, Korea Transportation Safety Authority, 200 Samjon-ro, Songsan-myeon, Hwaseong 18247, Korea

†Corresponding author :  
wj\_choi@ewha.ac.kr

Received 21 August, 2024  
Revised 31 August, 2024  
Accepted 4 October, 2024

**Abstract >>** Conventional well-to-wheel (WTW) analyses of battery electric vehicles (BEVs) typically present a single value for WTW greenhouse gas (GHG) emissions using the national average electricity mix for a specific year. However, the power generation mix used in WTW analyses of BEVs is time-dependent. This study focuses on analyzing the variability of WTW GHG emissions depending on the time of BEV charging. For this analysis, the Korean GREET model was used, which was modified from the GREET model developed by Argonne National Laboratory to reflect local conditions. The analysis shows that the highest WTW GHG emissions occur when fossil fuels make up around 70% of the power mix, while the lowest emissions occur when fossil fuels account for about 44% and renewable energy for around 10%. WTW GHG emissions of BEVs are 16% higher at their peak and 28% lower at their minimum compared to scenarios that do not consider the power mix.

**Key words :** Electric vehicle(전기차), Temporal variability(시간적 변동성), Charging time(충전 시점), Well-to-wheel(웰투휠), Greenhouse gas emission(온실가스 배출), Power generation mix(전기발전믹스)

### 1. 서론

전기차는 배출구에서의 온실가스 배출량이 없어 운송 부문에서 온실가스 배출량을 줄이는 방안으로

주목받고 있다<sup>1)</sup>. 하지만 전기차 주행 시 충전에 사용하는 전력 발전으로 인한 온실가스 배출량은 존재하기 때문에 전기차의 전 과정적 온실가스 배출량 분석이 다른 차량과의 비교에 있어서 중요하다. 전기차

의 생산부터 주행, 폐기까지 전 과정을 분석한 결과에 따르면 전기차의 전 과정적 온실가스 배출량 중 85%가 전력 소비에 따른 것으로 나타났다<sup>2)</sup>. 대부분 국가에서는 신재생에너지를 활용한 전력 발전 비율이 화석 연료를 사용한 발전에 비해 현저히 낮으며 상당량의 전력이 석탄, 천연가스 등의 화석 연료로부터 생산되기 때문에 전력 발전에서의 온실가스 배출량이 많다<sup>3)</sup>. 따라서 전기차 well-to-wheel 분석 시 전기차 충전에 사용하는 전력에 대한 분석이 중요하다.

전기차의 전 과정 분석은 국내외에서 여러 차례 진행되어 왔다<sup>4,7)</sup>. 기존의 전기차 well-to-wheel 분석은 특정 연도의 국가 평균 전기 생산의 전 과정적 온실가스 배출량을 이용하여 전기차가 1 km 주행할 때 발생하는 전 과정적 온실가스 배출량을 하나의 평균 값으로 계산하였다. 하지만 전기차의 온실가스 배출량을 계산하는 요소들은 시간적 변수에 따라 값이 변한다. 따라서 기존에 하나의 값으로 계산된 전기차의 전 과정적 온실가스 배출량은 시간적 변수에 따라 변화한다는 점을 고려하여 정확한 추정이 필요하다. 기존 전기차의 전 과정적 온실가스 배출량 계산은 전기 발전 원료에 대한 전 과정 분석, 전기 발전에 대한 전 과정 분석, 차량 주행 시의 연비에 대한 분석을 통해 계산한다. 전기 발전 원료에 대한 전 과정 분석은 시간에 따라 크게 변화하지 않지만 전기 발전의 전 과정 분석과 차량 연비는 시간에 따라 결과값이 변화한다.

전력 발전 믹스는 전력이 발전된 시점에 따라 변경된다. 여름철과 겨울철에는 전력 소비량이 많아 화석 연료 기반의 전력을 추가로 발전한다. 전력 발전 믹스는 매달 달라질 뿐만 아니라 심지어 하루 내의 시간대에 따라서도 달라진다<sup>8)</sup>. 전력 발전 믹스가 시간에 따라 변화하기 때문에 전기차를 충전하는 시점에 따라 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량이 달라진다.

따라서 본 연구에서는 시간에 따라 변화하는 전력 발전 믹스 변화를 통해 해당 시점에서 발전한 전기로 충전한 전기차를 주행할 시에 발생하는 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량을 분석하고자 한다.

또한 충전 시점을 고려하지 않은 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량과 비교, 분석하여 전기차 well-to-wheel 분석에서의 시간적 변동성의 영향을 파악하고자 한다.

## 2. Well-to-wheel 분석 방법론

### 2.1 범위 및 프레임워크

본 연구에서는 전기차 well-to-wheel 범위에서의 온실가스 배출량을 산정하였다. 전기차 well-to-wheel 온실가스 배출량은 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O를 의미하며 각 과정에서 발생하는 온실가스 배출량에 CO<sub>2</sub>를 기준으로 지구온난화에 기여하는 정도를 나타내는 global warming potential을 곱하여 g-CO<sub>2</sub>-eq로 나타내었다. Global warming potential로는 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O에 대해서 1, 29.8, 273을 사용하였다<sup>9)</sup>. 따라서 functional unit은 g-CO<sub>2</sub>-eq/km이다. 전 과정 분석에 사용한 프로그램은 Argonne National Laboratory (Lemont, IL, USA)에서 개발한 GREET 프로그램을 사용하였다. Choi 등<sup>10)</sup>이 한국 상황에 맞게 확장 및 수정한 Korean GREET를 사용하였으며 Korean GREET에 사용된 fuel 1 GJ 당 발생하는 life cycle 온실가스 배출량은 Table 1과 같다.

전기의 경우 그 생산 방법에 따라 온실가스 배출량이 다르며 생산 방식에 따른 전기의 전 과정적 온실가스 배출량은 Table 2와 같다.

### 2.2 전력 발전 믹스 분석

전력 발전 믹스는 한국 전력 거래소 데이터에서 제공하는 2022년 시간별 연료별 발전량 데이터를 사

Table 1. Life cycle GHG emissions of fuel in South Korea

Fuel	Upstream (g-CO <sub>2</sub> -eq/GJ)	Fuel use (g-CO <sub>2</sub> -eq/GJ)
Coal	6,160	87,627
Natural gas	15,384	55,106
Uranium	2,433	0

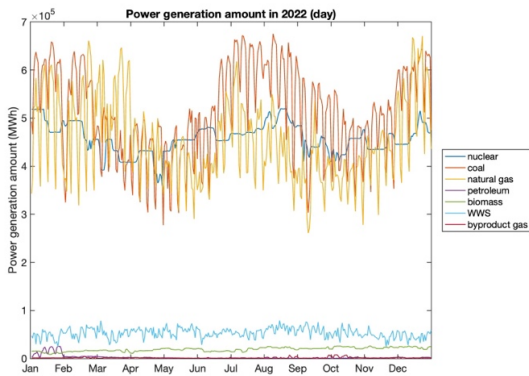
용하여 분석하였다<sup>11)</sup>. 한국 전력 거래소에서는 1시간 단위의 데이터를 제공하기 때문에 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량 역시 2022년 기준 1시간 단위로 계산하였다. 전체 전력 발전량의 0.5% 이하의 발전량은 cut-off하여 분석에 이용하였다.

### 2.3 전기차 분석

전기차 분석에는 Choi와 Song<sup>4)</sup>이 분석한 방법론을 사용하였다. 본 연구에서는 IONIQ5 Long Range 2WD 모델(Hyundai Motors, Seoul, Korea)을 기준으로 분석을 진행하였다. IONIQ5 Long Range 2WD 차량의 복합 전비는 4.8 km/kWh로 설정하여 well-to-

**Table 2.** Life cycle GHG emissions of electricity according to production technology

g-CO <sub>2</sub> -eq/GJ	Upstream process	Power generation	Total
South Korea average	18,572	130,734	149,307
Coal steam turbine	18,213	280,017	298,230
Natural gas combined cycle	34,192	126,052	160,244
Uranium steam turbine	2,433	0	2,433
Renewable (wind, water, solar)	0	0	0
By-product gas	0	395,961	395,961



**Fig. 1.** Power generation amount in 2022 (hour)

wheel 온실가스 배출량을 계산하였다<sup>12)</sup>.

## 3. 전기차 well-to-wheel 시간적 변동성

### 3.1 전력 발전 믹스에 따른 전과정 분석

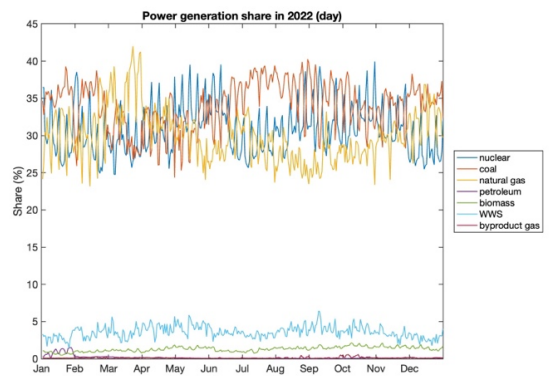
전기차의 well-to-wheel 분석에 앞서 2022년 한 해 동안의 전력 믹스 변화에 따른 전기의 전 과정적 온실가스 배출량을 분석하였다. 먼저 2022년 시간별 전력 발전 믹스 변화는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1을 보면 전력 발전에는 원자력, 석탄, 천연가스가 중점적으로 사용되었으며 석유 기반의 원료, 바이오매스, 부생가스, 신재생에너지가 추가로 사용되는 것을 알 수 있다.

Fig. 1에서 알 수 있듯이 전력 사용이 많은 여름철과 겨울철에 석탄 기반의 발전량이 증가한다. 일반적으로는 여름철과 겨울철에는 추가적인 전력 생산을 위하여 천연가스 기반의 전력 발전량이 증가한다. 하지만 2022년은 다른 해와 달리 우크라이나 전쟁으로 인해 천연가스 수요가 불안정하고 에너지 원자재 가격 상승으로 인하여 석탄을 이용한 load following을 한 것을 알 수 있다<sup>13)</sup>.

일별 원료별 전력 발전량을 비율로 나타내어 Fig. 2에 정리하였다.

Fig. 2는 2.2에서 언급했듯이 0.5% 이하의 전력 발



**Fig. 2.** Power generation share in 2022 (day)

전량은 제외한 원료별 발전량 비율을 산정한 결과이다. Fig. 2는 Fig. 1과 유사한 영향을 보인다. 이를 통해 전체 전력 발전량의 90% 이상은 화석 연료 기반의 발전이며 5% 내외는 신재생에너지 기반의 발전을 알 수 있다.

하루 동안의 전력 믹스 변화를 보기 위해서 하루를 기준으로 전력 발전량 변화를 분석하였다. 하루 시간대별 평균 전력 믹스 변화는 Fig. 3에 나타내었다.

하루 동안 시간대별 원료별 전력 발전량은 Fig. 1과 유사하게 원자력 발전, 석탄 발전, 천연가스 발전이 상당량을 차지한다. 석유 기반의 발전, 바이오매스 발전, 신재생에너지 발전, 부생가스 발전은 상대적으로 적다. 또한 Fig. 3을 통해 하루 동안의 load following은 천연가스를 이용한다는 점을 알 수 있다. 이는 가동 시간이 길고 발전 정지 후 재가동이 어려운 석탄, 원자력과 달리 liquefied natural gas의 경우 가동 시간이 짧아 신속히 전력 수요에 대응할 수 있어 전력 수요의 peak load에 천연가스를 이용하기 때문이다<sup>14)</sup>. 다른 원료 기반의 전력과 달리 신재생에너지의 경우 태양광 발전의 영향으로 오전 8시 이후의 발전량이 증가하며 시간대별로 변화하는 전력 발전량을 가진다.

Fig. 4는 시간대별 원료별 평균 발전량 비율을 나타내었다.

시간대별 발전 비율의 변화를 보면 오전 시간에 석탄 발전의 비율이 최대 38%로 높은 비율을 차지하

고 천연가스 발전 비율이 25%로 상대적으로 낮은 비율을 차지한다. 천연가스 발전 비율은 하루 동안 약 10% 변화를 둔다. 낮 시간대에는 재생에너지 비율이 높아지며 최대 5%의 비율을 차지한다. 따라서 시간대별 전력 발전 믹스의 변화가 큰 것을 알 수 있다.

2022년 한 해 동안의 전력 발전 믹스 변화로 인한 전기 생산의 전 과정적 온실가스 배출량을 산정하였으며 그 결과는 Fig. 5와 같다.

Fig. 5는 1 kWh의 전력당 전 과정적 온실가스 배출량을 g-CO<sub>2</sub>-eq 단위로 나타내었다. x축은 날짜, y축은 시간을 나타내며 해당 날짜, 시간에서의 전기의 전 과정적 온실가스 배출량을 컬러 바로 나타내었다. 분석 결과 석탄을 사용한 전력 발전이 증가하는 여

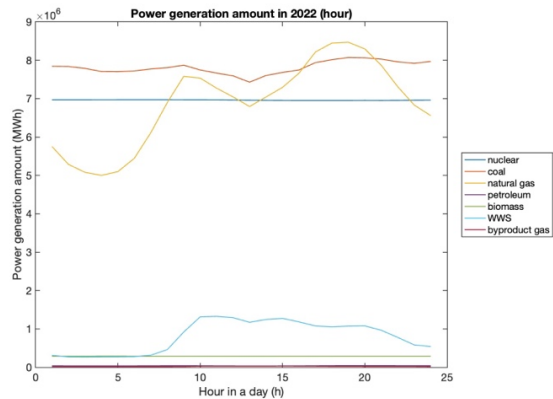


Fig. 3. Power generation amount in 2022 (hour)

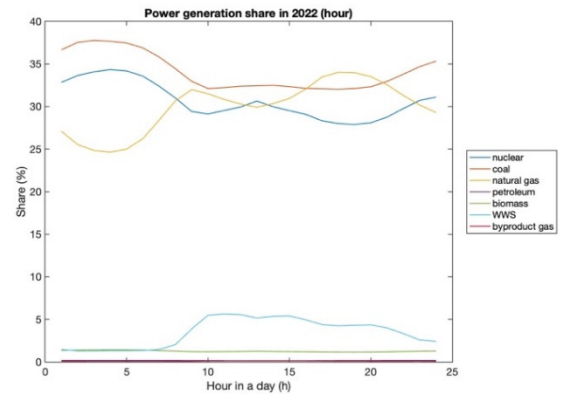


Fig. 4. Power generation share in 2022 (hour)

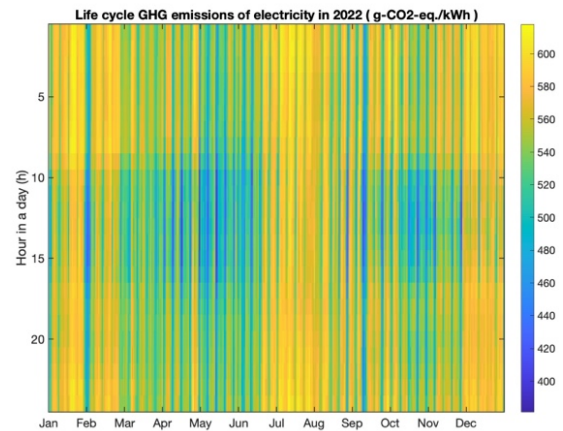


Fig. 5. Life cycle GHG emission of electricity in 2022

를철과 겨울철에는 전기의 전 과정적 온실가스 배출량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 하루를 기준으로 보면 신재생에너지의 비율이 증가하는 시간대에서의 전 과정적 온실가스 배출량은 감소하는 것을 확인하였다.

전기의 전 과정적 온실가스 배출량이 가장 많을 때는 2022년 9월 6일 오전 7시로 1 kWh당 618 g-CO<sub>2</sub>-eq이다. 해당 날짜 시각에 석탄 발전 44%, 천연가스 발전 25%로 상대적으로 화석 연료 발전의 비율이 높아 전기의 전 과정적 온실가스 배출량이 많다. 반면 전기의 전 과정적 온실가스 배출량이 가장 적을 때는 2022년 5월 1일 오후 12시로 1 kWh당 381 g-CO<sub>2</sub>-eq이다. 해당 날짜 시각에서 석탄 발전의 비율은 24%, 천연가스 발전의 비율은 19%로 상대적으로 화석 연료 발전의 비율이 낮으며 재생에너지 발전 비율이 10%로 재생에너지 발전이 다른 날짜 시각에 비하여 높은 것을 알 수 있다.

전기의 전 과정적 온실가스 배출량이 가장 많을 때와 가장 적을 때의 화석 연료 발전의 비율은 37% 차이가 나며 재생에너지 비율은 약 5배 차이가 난다. 이를 통해 1년 동안의 전력 발전 믹스의 변화가 크며 이에 따라 전 과정적 온실가스 배출량이 최대 38% 차이가 난다. 2022년 평균 전기의 전 과정적 온실가스 배출량은 538 g-CO<sub>2</sub>-eq/kWh이다.

### 3.2 전력 믹스 변화에 따른 전기차의 well-to-wheel 분석

3.1에서 분석한 시간별 전기의 전 과정적 온실가스 배출량을 이용하여 시간별 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량을 산정하였다. 3.1의 전기의 전 과정 분석을 이용하여 해당 날짜, 시간에서 충전한 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량을 산정하였다.

일별 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량을 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6의 결과를 보면 전반적으로 전기차를 1-2월에 발전한 전력을 충전하여 주행하면 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량이 높다. 반면 5-9월에 발전한

전력으로 충전한 전기차를 주행하면 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량이 낮다. 또한 일주일을 기준으로 보면 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량은 월요일에 점차 증가하며 주말에 점차 줄어들어 일요일에 최저점을 이룬다. 근로자의 날, 어린이날 등 휴일의 전기차 well-to-wheel 온실가스 역시 적다. 2022년 평균 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량의 값은 105 g-CO<sub>2</sub>-eq/km이다.

2022년 시간별 평균 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량의 변화는 Fig. 7과 같다.

Fig. 7에서 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량은 시간에 따라 크게 달라지는 것을 알 수 있다. 태

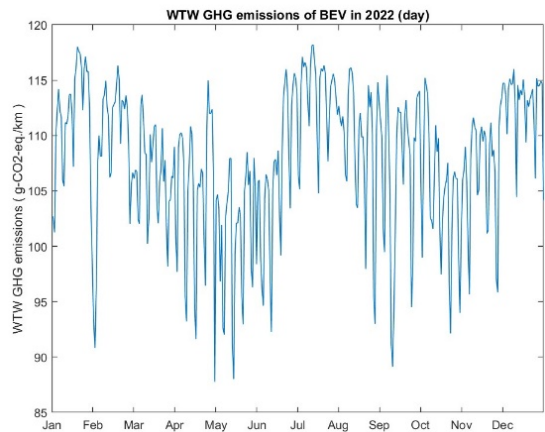


Fig. 6. WTW GHG emissions of electric vehicle in 2022 (day)

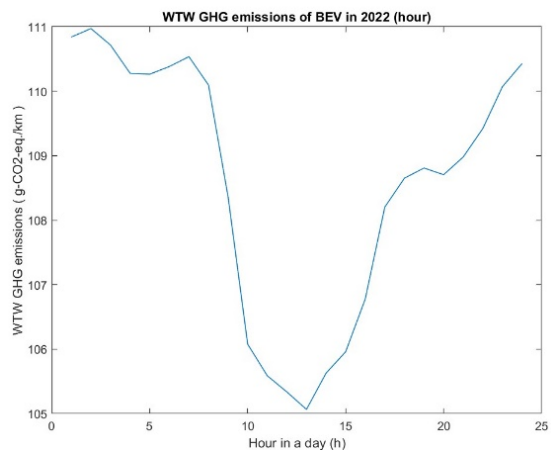


Fig. 7. WTW GHG emissions of electric vehicle in 2022 (hour)

양광 발전이 가능한 낮 시간대에는 재생에너지 발전의 비율이 높아 낮 시간대에 발전한 전력으로 충전한 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량이 가장 적으며 새벽 시간대에 발전한 전기를 충전한 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량이 상대적으로 많은 것을 알 수 있다.

2022년 한 해를 시간대별로 분석한 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량은 Fig. 8과 같다.

Fig. 8은 전기차가 1 km를 주행할 때의 전 과정적 온실가스 배출량을 g-CO<sub>2</sub>-eq 단위로 나타내었다. x축은 날짜, y축은 시간을 나타내며 해당 날짜, 시간에서의 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량을 컬러 바로 나타내었다.

2022년 1년 중 가장 높은 배출량을 가질 때는 전기의 전 과정적 온실가스 배출량이 높았던 9월 6일 오후 12시였으며 해당 날짜에 충전한 전기차를 주행할 시에는 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량이 122 g-CO<sub>2</sub>-eq/km이다. 이는 전력 믹스 변화를 고려하지 않고 2022년 평균 전기로 충전한다고 가정하였을 때 대비 16% 높은 배출량이다.

반면 1년 중 가장 적은 배출량을 가질 때는 5월 1일 오전 7시이며 해당 날짜에 충전한 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량은 75 g-CO<sub>2</sub>-eq/km이다. 이는 전력 믹스 변화를 고려하지 않았을 때 대비 28% 낮은 배출량이다. 따라서 충전 시점의 전력 믹스 변화

에 따른 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량 변화가 크다는 것을 알 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 전력 믹스 변화에 따른 전기차의 전 과정적 온실가스 배출량의 시간적 변동성을 분석하였다. 연구를 통해 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 2022년 한 해는 다른 해와 달리 전력 수요가 많은 시기에 석탄을 이용하여 load following을 하였다.

2) 하루 동안의 전력 믹스 변화를 보면 천연가스를 이용하여 load following을 한다.

3) 2022년 한 해 중 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량이 가장 많을 때는 9월 6일 오전 7시이며 이때의 배출량은 122 g-CO<sub>2</sub>-eq/km이다.

4) 온실가스 배출량이 가장 많을 때 전력 발전에 사용되는 화석 연료의 비율이 약 70%로 크다.

5) 2022년 한 해 중 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량이 가장 적을 때는 5월 1일 오후 12시이며 이때의 배출량은 75 g-CO<sub>2</sub>-eq/km이다.

6) 온실가스 배출량이 가장 적을 때 전력 발전에 사용되는 화석 연료의 비율은 44%로 상대적으로 낮으며 재생에너지 발전 비율은 10%로 상대적으로 높다.

7) 전력 믹스 변화를 고려하지 않은 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량은 105 g-CO<sub>2</sub>-eq/km이다.

8) 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량이 최대 일 때는 전력 믹스 변화를 고려하지 않았을 때 대비 16% 높은 배출량이다.

9) 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량이 최소 일 때는 전력 믹스를 고려하지 않은 배출량 대비 28% 낮은 배출량이다.

10) 충전 시점에 따른 전력 믹스 변화를 고려한 전기차의 well-to-wheel 온실가스 배출량 변화가 크다.

## 후 기

본 연구는 국토교통부 과제(Grant RS-2023-00243220)의 일환으로 수행되었습니다.

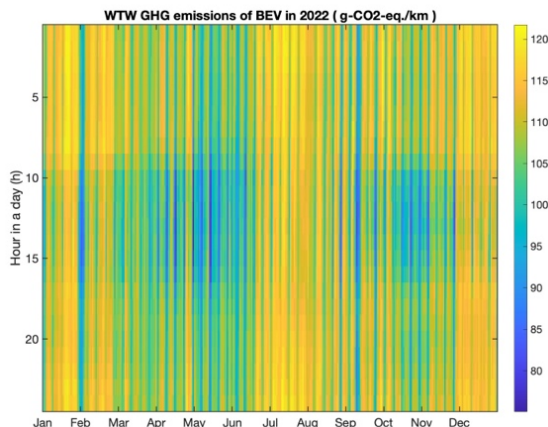


Fig. 8. WTW GHG emissions of electric vehicle in 2022

## References

1. J. Lim and O. T. Lim, "Review of electric vehicle to grid system", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 31, No. 6, 2020, pp. 499-508, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.6.499>.
2. M. Messagie, F. S. Boureima, T. Coosemans, C. Macharis, and J. Van Mierlo, "A range-based vehicle life cycle assessment incorporating variability in the environmental assessment of different vehicle technologies and fuels", *Energies*, Vol. 7, No. 3, 2014, pp. 1467-1482, doi: <https://doi.org/10.3390/en7031467>.
3. International Energy Agency (IEA), "World - world energy balances: overview", IEA, 2020. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview/world>.
4. W. Choi and H. H. Song, "Well-to-wheel greenhouse gas emissions of battery electric vehicles in countries dependent on the import of fuels through maritime transportation: a South Korean case study", *Applied Energy*, Vol. 230, 2018, pp. 135-147, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.092>.
5. F. Del Pero, M. Delogu, and M. Pierini, "Life Cycle assessment in the automotive sector: a comparative case study of Internal Combustion Engine (ICE) and electric car", *Procedia Structural Integrity*, Vol. 12, 2018, pp. 521-537, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.066>.
6. Y. Bicer and I. Dincer, "Life cycle environmental impact assessments and comparisons of alternative fuels for clean vehicles", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 132, 2018, pp. 141-157, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.036>.
7. D. Burchart-Korol, S. Jursova, P. Fołęga, J. Korol, P. Pustejovska, and A. Blaut, "Environmental life cycle assessment of electric vehicles in Poland and the Czech Republic", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 202, 2018, pp. 476-487, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.145>.
8. M. Messagie, J. Mertens, L. Oliveira, S. Rangaraju, J. Sanfelix, T. Coosemans, J. Van Mierlo, and C. Macharis, "The hourly life cycle carbon footprint of electricity generation in Belgium, bringing a temporal resolution in life cycle assessment", *Applied Energy*, Vol. 134, 2014, pp. 469-476, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.071>.
9. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), "Sixth assessment report", IPCC, 2023. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>.
10. W. Choi, E. Yoo, E. Seol, M. Kim, and H. H. Song, "Green house gas emissions of conventional and alternative vehicles: predictions based on energy policy analysis in South Korea", *Applied Energy*, Vol. 265, 2020, pp. 114754, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114754>.
11. Korea Electric Power Exchange (KEPCO), "Power generation amount by source", KEPCO, 2023. Retrieved from <https://www.data.go.kr/data/15081098/fileData.do?recommendDataYn=Y>.
12. Hyundai Motors, "IONIQ 5N", Hyundai Motors, 2022. Retrieved from <https://www.hyundai.com/kr/ko/e/vehicles/the-new-ioniq5/intro>.
13. H. Kim, "Analysis of the global power market in 2023 and forecast to 2024", *World Energy Market Insight*, Vol. 23, No. 18, 2023, pp. 1-11. Retrieved from [https://www.keei.re.kr/board.es?mid=a10103020000&bid=0014&tag=&act=view&list\\_no=88449](https://www.keei.re.kr/board.es?mid=a10103020000&bid=0014&tag=&act=view&list_no=88449).
14. J. Ahn, "Korea's power generation in 2022 by korea electric power corporation statistics", KERI Techpolicy Platform, 2023. Retrieved from <https://www.kier.re.kr/tpp/tppBoard/view/25?menuId=MENU00962>.