



국내 자동차 연료별 온실가스 배출량 전과정 분석

Well-to-Wheel Analysis of Greenhouse Gas Emissions of Transportation Fuels in Korea



송한호
서울대학교
Han Ho Song
Seoul National University

산업혁명 이후 비약적으로 증가되어 온 인류의 에너지 사용으로 인해 현재 전세계는 가용에너지원의 고갈과 자연계에 일으키고 있는 새로운 불평형점으로서의 이동에 대해 고민하고 이를 해결하기 위해 다양한 노력을 시작하고 있다. 인류가 가장 많이 쓰고 있는 에너지원은 원자력 발전을 제외하고는 대부분 화석연료인 석탄, 석유, 천연가스이며, 화석연료의 사용은 주로 대기 상에 존재하는 산소와의 결합 혹은 연소 화학 반응을 통해 이루어지고 있다. 이러한 연소 화학 반응은 우리 주변에서 흔히 볼 수 있는 자동차 엔진 안에서, 난방에 쓰이는 가스 보일러 안에서, 전기를 발전하는 터빈 안에서 이루어지고 있다. 최근 많이 회자가 되고 있는 온실가스(Greenhouse gas), 입자상물질(Particulate matter), 질소산화물(Nitrogen oxides) 등은 대부분 이러한 연소 화학 반응의 (부)산물이다. 특히, 온실가스는 대기 중에서 온실효과를 일으킬 수 있는 가스들의 통칭으로, 인류의 생존을 위협하는 요인으로 지목되는 지구 온난화의 주범이다. 다양한 온실가스 중에서도 가장 잘 알려져 있는 성분은 이산화탄소(CO_2)이다. 이산화탄소는 화석연료의 주성분 중의 하나인 탄소(C)가 공기 중의 산소(O_2)와 결합하여 연소 화학 반응을 일으킬 때 나오는 생성물이다. 다시 말해, 이산화탄소는 탄소를 잘 태웠을 때 나오는 생성물로서 앞서 언급한 입자상물질이나 질소산화물 등의 오염물과는 달리 인류가 화석연료를 사용하는 한 발생시킬 수 밖에 없는 물질이다.①

본 고에서는 국내에서 운행되고 있는 자동차에서의 온실가스 배출과 관련된 논의를 설명하고자 한다.

주변에서 볼 수 있는 자동차의 연료 중 가장 많은 부분을 차지하는 것은 휘발유와 경유이다. 그리고 택시의 경우에는 주로 LPG(Liquefied Petroleum Gas)를 연료로 사용하고 있으며, 시내버스들을 보면 압축천연가스(Compressed Natural Gas, CNG) 마크를 달고 있는 경우가 있는데 이는 연료로서 고압의 천연가스를 사용하고 있음을 나타낸다. 결국 휘발유, 경유, LPG, 천연가스가 가장 주요한 자동차의 연료로 사용되고 있으며 이들은 모두 화석연료에 해당한다. 따라서 앞서 언급했듯이, 이러한 연료를 사용하는 자동차들은 엔진 내부에서 연소 화학 반응을 통해 동력을 얻어내고 최종적으로 어쩔 수 없이 이산화탄소를 배출한다.

결국 지구 온난화를 최소화하기 위해서는 자동차에서 발생하는 온실가스②를 줄여야 할 것임은 명백하다. 이를 위해 기술, 정책, 산업 등 다양한 측면에서 논의들이 이뤄지고 있는데 이를 크게 세 가지 범주로 정리할 수 있다.

- ① 기존 화석연료를 사용하는 자동차의 연비를 향상시키는 방법 - 연비를 향상시키는 것은 그만큼 같은 주행거리를 운행하면서도 적은 양의 연료를 연소시키는 것이고, 이를 통해 온실가스 배출량을 줄일 수 있다.
- ② 기존 화석연료가 아닌 새로운 연료를 도입하여 온실가스 배출량을 줄이는 방법 - 탄소가 포함되어 있지 않은 연료를 자동차에서 사용함으로써 온실가스 발생 자체를 원천적으로 차단한다. 최근 가장 이슈가 되고 있는 전기 자동차나 수소 연료전지 자동차 등을 예로 들 수 있다.
- ③ 자동차를 이용하는 생활 습관의 변화를 통해 자동차 사용량을 줄이거나 효율적으로 사용하는 방법 - 실제로 연비를 향상시킬 수 있는 운전 방법 교육, 대중교통 이용 혹은 카셰어링 등을 통한 자동차의 사용량 감소를 통해 온실가스 배출량을 저감할 수 있다.

이러한 논의들 중에서 기술적으로 접근이 가능한 부분은 주로 항목 1과 2에 집중되어 있다. 하지만 여기에 포함된 부분들만 해도 워낙 방대하기 때문에 다음과 같이 주제를 한정하고 명확히하여 논의를 진행하려고 한다.

- ① 기존 화석연료 자동차 대비, 전기 자동차의 온실가스

저감 잠재성을 어떻게 이해할 것인가?

- ② 자동차 온실가스 저감을 위한 정책 수립 등에 근간이 될 수 있는 자동차들의 미래 온실가스 배출량은 어떻게 예측하고 이해할 것인가?

우선 첫번째 질문에 대한 대답은 겉보기에는 명확하다. 전기 자동차에서는 온실가스는 물론 배기가스가 전혀 없다. 하지만 조금만 더 생각하면 이러한 전기가 어디서 왔는지 고민해 볼 수 있다. 전기는 발전소에서 생산이 되고, 이러한 발전소를 운영하는 데에는 다양한 연료들이 사용될 수 있다. 특히, 2015년 기준 국내 발전량 비율을 보면 석탄과 천연가스를 이용한 화력 발전이 60% 이상을 차지하고 있다. 결국 전기를 생산하기 위해서 화석연료의 사용 비율이 크고, 화력 발전소에서는 이러한 연료들의 연소 화학 반응에 의해 온실가스가 발생한다. 그렇다면 이렇게 발전소에서 발생한 온실가스를 전기 자동차에서 발생하는 온실가스로 표기하는 것이 맞는가에 대한 대답은 아직은 애매하다. 예를 들어, 화석연료 자동차의 경우에는 자동차 자체에서 나오는 온실가스를만 얘기할 뿐, 휘발유나 경유를 만들기 위해서 정유소에서 발생하는 온실가스를 같이 고민하지는 않아 왔기 때문이다. 실제로 많은 연구자들이 이러한 고민을 해결하기 위해 다음과 같은 논의의 과정을 진행하고 있다.

〈그림 1〉에는 화석연료 자동차와 전기 자동차의 전과정(Life-cycle)을 표시하였다. 여기서 전과정이라는 것은, 휘발유 연료를 예로 들면, 휘발유의 원료가 되는 원유를 산지에서 추출하고, 유조선을 통해 국내로 운반 하고, 정유 공장에서 휘발유를 만들고, 유조차를 통해 전국의 주유소로 분배 후 주유기를 통해 차량에 주유를 하는 Well-to-tank(WTT) 과정과, 차량이 운행되면서 온실가스가 발생하는 Tank-to-wheel(TTW) 과정이 합쳐진 Well-to-wheel(WTW) 과정을 의미한다.③

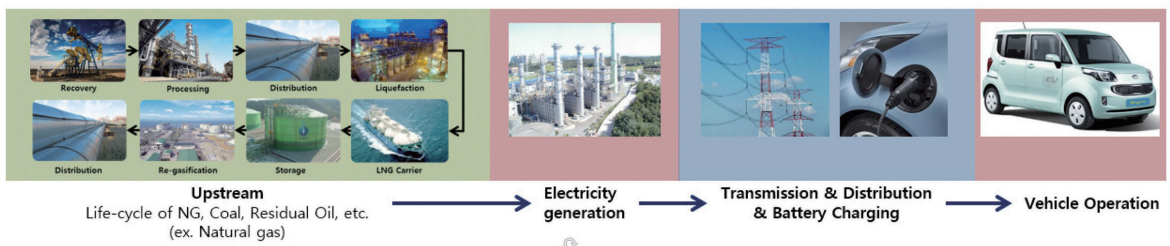
전기차의 경우에는 다양한 발전 형태가 있기 때문에 각각에 해당하는 우라늄, 석탄, 천연가스 등의 원료를 산지에서 서부터 추출, 가공 및 운반 절차를 통해 발전소까지 들여오고, 전기를 생산하고 송배전을 거쳐 차량에 충전될 때까지의

그림 1. 전과정 분석의 개념 및 효용성 - 원유기반 연료 자동차(상)와 전기 자동차(하)의 예시

● 화석연료 자동차의 전과정 (휘발유, 경유 자동차)



● 전기자동차의 전과정



WTT 과정과, 차량이 운행되는 TTW 과정으로 분류한다. 결국 전기 자동차는 TTW 과정에서는 온실가스가 배출되지 않지만 WTT 과정에서는 온실가스 발생이 있고, 이와 공정한 비교를 위해서는 기존 화석연료 자동차의 경우에도 WTW 측면에서 발생한 전과정 온실가스 배출량을 계산해야 한다.

이러한 분석을 Well-to-wheel 혹은 전과정 분석이라고 하고, 상이한 전과정을 가지고 있는 연료들 간에 객관적인 비교가 가능하기 때문에 미국, 유럽, 일본에서는 이러한 분석 결과를 적극적으로 활용하여 온실가스 저감 정책을 입안하고 지속적인 데이터베이스 구축을 진행하고 있다. 국내에서도 일부 연구 기관들에서 분석을 진행한 바가 있으며, 본 고에서는 저자가 속한 연구 그룹에서 환경부의 지원을 받아 진행한 연구 결과를 바탕으로 논의를 진행하도록 한다.

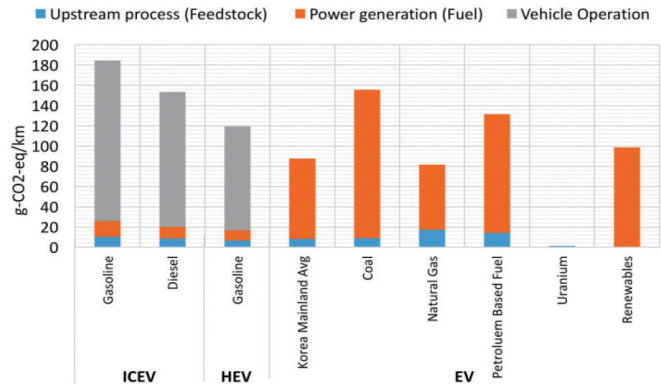
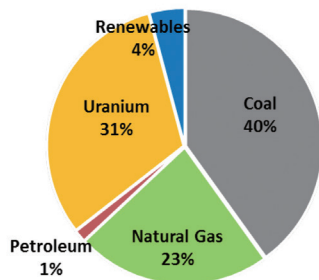
신뢰성 있는 WTW 분석을 위해서는 <그림 1>의 모든 과정에서 발생하는 온실가스를 산정하기 위해 국내 상황을 대변할 수 있는 방대한 양의 자료들과 이에 대한 분석들이 필요하다. 아래에서는 전기 자동차의 전과정 온실가스 발생량에 가장 직접적으로 영향을 주는 전기 발전 믹스에 대해 논의를 한정 짓도록 한다.

<그림 2>에는 전기 자동차와 관련해서 2015년도 발전량 기준의 국내 발전 믹스와, 이를 이용해 분석한 전기 자동차(EV)의 WTW 온실가스 배출량 결과를 화석연료 기반 내연기관(혹은 엔진) 자동차(CEV)와 하이브리드 자동차(HEV)의 결과와 비교하였다.

국내에서는 원자력 발전이 31% 정도 차지하고 있으며 나머지는 대부분 화석연료인 석탄과 천연가스를 이용하고 있다. 신재생에너지로 분류되는 4%에는 일부 태양광과 풍력 발전이 포함되어 있으나, 대부분 수력 발전과 제철소에서 나오는 부생가스 연소를 통한 발전이 주를 이루고 있다. 우측 그래프의 세로축은 차량이 1km를 주행할 때 WTW 과정에서 발생하는 온실가스를 GWP를 이용해 이산화탄소로 환산한 값이다. **이러한 WTW 결과를 접할 때 반드시 주의해야 하는 점은, WTW 분석에 있어서 특정 차량의 연비가 사용되는데, 이 때 선택한 연비에 따라서 결과값이 매우 달라질 수 있다는 것이다.** <그림 2>에 나타난 값들은 2015년 기준 한국에서 판매되는 준중형 승용차량 중에 각 연료별로 가장 연비가 좋은 차량들을 이용해서 도출한 결과이다.

전기 자동차(EV)의 결과에서 “Korea Mainland Avg”

그림 2. 전기 자동차의 전과정 분석을 위한 전기 발전 믹스(좌)와 발전원에 따른 WTW 온실가스 발생량(우)



는 좌측의 발전 믹스를 가중 평균하여 구한 값이고, 우측의 “Coal, Natural Gas, Petroleum Based Fuel, Uranium, Renewables”는 순수하게 각 발전 연료로만 발전을 한다고 생각했을 때의 WTW 결과이다. 2015년 기준으로 국내 발전 믹스에 의한 전기 자동차 운행은 내연기관 자동차나 하이브리드 자동차에 비해 WTW 온실가스 배출량이 적게 나타나는 것을 볼 수 있다. 다만 전기 자동차의 WTW 온실가스 배출량은 발전 연료에 따라 차이가 많이 남을 알 수 있다.

예를 들어, 원자력 발전(Uranium)에 의한 전기 자동차의 운행은 WTW 온실가스가 거의 배출되지 않고 반대로 석탄 화력 발전(Coal)에 의한 전기 자동차는 현행 경유 자동차의 WTW 온실가스 배출량에 상응하는 수준이다.

주목할 만한 부분은, 같은 석유 기반 연료를 사용할 경우 (Diesel ICEV vs. Petroleum Based Fuel EV)에는 현행 수준에서는 비슷하거나 혹은 전기 자동차가 약간 우세하다는 점이다. 이는 주로 대형 발전기의 발전 효율이 상대적으로 작은 사이즈의 자동차 엔진에 비해 좋음으로 인해 나타난 결과이다.

결론적으로, 2015년 현재 전기 자동차의 온실가스 저감 효과는 분명히 존재함을 알 수 있다. 다만 이러한 결론을 이끌어 낼 수 있는 건 온실가스가 거의 배출되지 않는 원자력 발전과 효율이 좋은 복합화력 사이클을 사용하는 천연가스

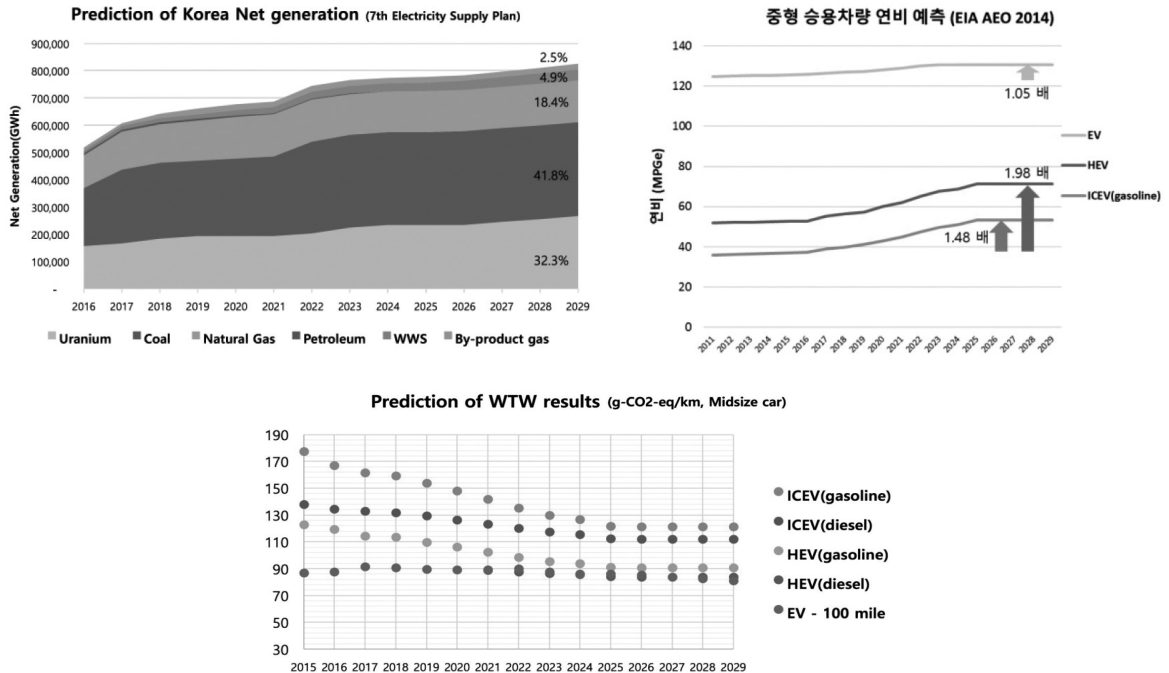
발전의 역할이 큰 상황에서, 앞으로 전기 자동차 보급이 지속적으로 늘어날 경우 필요한 추가적인 발전량을 어떤 방식의 믹스로 가져갈 수 있느냐가 실질적인 온실가스 저감 측면에서의 가장 큰 관건이다.

이러한 마지막 궁금증과 미래 자동차의 WTW 결과 예측에 대해 간단히 논의하며 이 글을 마무리 하려고 한다. 우선적으로 전기 자동차와 관련된 발전 믹스는 국가 전력수급계획을 참조하면 어느 정도 예측이 가능하다(그림 3(좌)). 그리고 세계 많은 기관들에서 자동차의 미래 연비를 예측하고 있으며, 여기서는 미국 EIA(Energy Information Administration)의 결과를 인용하였다(그림 3(우)).

이러한 데이터를 WTW 분석에 적용하여 내연기관 자동차, 하이브리드 자동차 그리고 전기 자동차에서 발생하는 WTW 온실가스 발생량을 예측, 비교하면 (그림 3)의 하단 그래프와 같은 결과가 도출된다. 국내의 발전 믹스는 2029년까지 원자력과 신재생에너지의 비율이 약간 상승하면서 전기 자동차에게 도움이 되는 방향으로 바뀌게 된다. 하지만 EIA의 연비 예측에 따르면 전기 자동차의 연비는 현행 각 부품별 효율이 충분히 성숙하여 앞으로 크게 상승하지 않는 반면, 엔진을 사용하는 내연기관 및 하이브리드 자동차의 경우에는 아직도 기술 발전 가능성을 크게 보고 있다.

이에 근거하여 WTW 결과를 예측하면, 하이브리드 자동

그림 3. 국내 발전량 믹스 예측(좌), 미래 연비 예측(우), 미래 WTW 온실가스 발생량 예측(하)



차는 전기 자동차 수준에 근접하게 되고, 내연기관 자동차와 전기 자동차의 WTW 온실가스 발생량의 차이도 많이 줄어들 것임을 알 수 있다. 물론 이러한 결과에는 앞서 얘기했듯이 연비 예측의 정확도가 상당히 큰 영향을 미치고, 좁은 지면에서 얘기하기에는 너무나 다양한 분석의 불확실성도 존재한다. 그렇다고 하더라도 국가적인 정책 수립에 있어서 이러한 “정보”의 중요성은 두말할 여지가 없다.

미래의 자동차가 가야할 방향과 관련해서 너무나 많은 전

문가들의 다양한 의견과 이해당사자들의 대립된 주장들이 존재한다. 일반인들도 다양한 목소리의 매체에 노출되어 무엇이 옳고 그른지에 대해 판단이 어려울 수 있다. 본 고를 통해 많은 연구자들이 객관적인 사실을 전달하고자 많은 노력을 경주하고 있다는 사실과, 동시에 특정 결과나 주장들에 대해 비판적으로 이해하고 받아들이 수 있는 틀이 조금이나마 전달이 되었기를 바란다.

송한호 교수 : hhsong@snu.ac.kr

참고

- ① 최근에는 CCS(carbon capture and storage) 기술들의 등장으로 이러한 이산화탄소를 대기 중으로 방출하지 않고 연소 화학 반응 후 포집하여 지층이나 해수층의 깊은 곳에 저장하려는 노력들도 있다. 그렇다고 하더라도 화석연료를 이용하는 과정 중에 이산화탄소가 생성되지 않는다는 뜻은 아니다.
- ② 자동차에서 발생하는 온실가스는 양적으로 봤을 때는 이산화탄소가 가장 많지만, 일반적으로 배기가스 중의 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O)를 포함하여 온실가스 발생량을 표시한다. 이때 이산화탄소 대비 온실효과를 가중치(단위 질량당 global warming potential, GWP)를 적용하여 CO_2 -equivalent 양으로 표시를 하며, 본 고에서 사용된 GWP는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 가이드라인에 따라 이산화탄소가 1일 때 메탄과 아산화질소는 각각 25배와 298배를 사용하였다.
- ③ 여기서의 well은 원유 유정을 빗대어 얘기하고, tank는 자동차의 연료탱크, wheel은 자동차의 바퀴 혹은 실제 운행을 상징한다.