

창립 40주년 기념 특집호

2000년 이후 내연기관 자동차 배출가스와 온실가스 저감 정책 및 기술 동향과 전망

Trend and Prospect on the Policies and Technologies for Reducing Emissions and Green House Gases from Vehicles Using Internal Combustion Engines since 2000

김홍석*, 정용일¹⁾

한국기계연구원 모빌리티동력연구실, ¹⁾녹색교통운동

Hongsuk Kim*, Youngil Jeong¹⁾

Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon, Republic of Korea

¹⁾Networks for Green Transport, Seoul, Republic of Korea

접수일 2023년 7월 20일

수정일 2023년 9월 7일

채택일 2023년 9월 12일

Received 20 July 2023

Revised 7 September 2023

Accepted 12 September 2023

*Corresponding author

Tel : +82-(0)42-868-7367

E-mail : hongasuk@kimm.re.kr

Abstract Since 2000, serious air pollution due to the rapid increase in the number of vehicles has required active efforts on the reduction of vehicle emissions in Korea. Additionally, another social measures have been needed to reduce green-house gases emitted from automobiles against the global warming issue. Korea's automobile environmental policies, which have been applied during past 20 years, can be divided into three major categories: 'strengthening regulatory standards', 'promotion of eco-friendly vehicles', and 'management of in-use vehicles'. These policies have been closely related with the progress of technologies. Therefore, this paper briefly summarizes the short term history of policies and technologies for reducing the exhaust emissions and greenhouse gases emitted from vehicles using internal combustion engines in Korea since 2000. Based on this study, the future prospect of internal combustion engine vehicles will be given.

Key words: Internal combustion engine vehicles, Exhaust emissions, GHG (Green House Gases), Environmental technology

1. 서론

우리나라 자동차 등록대수는 2001년에 1,291만 대에서 2022년에는 2,550만 대로 연평균 약 3%씩 증가(KMOLIT, 2023)하였다. 이러한 급속한 자동차 대수의 증가는 자동차 배출가스에 의한 대기질 악화라는 환경 문제를 야기하였다. 그리고 2000년 이후 온실가스에 의한 지구온난화와 기후변화가 국제적 사회 문제로 크게 대두됨에 따라 자동차에서 배출되는 온실가스에 대한 관리도 중요하게 되었다. 이에 따라 그동안 우리나라 자동차 환경정책은 자동차 배출가스와 온실가스를 두 축으로 하고, '제작자동차에 대한 기준 강

화, '친환경자동차 보급, '운행 자동차관리'라는 세 가지 방향으로 추진되어 왔다.

자동차 배출가스 문제를 해결하기 위해서 휘발유 자동차와 경유 자동차에서 배출되는 일산화탄소(CO)와 탄화수소(HC), 질소산화물(NO_x), 입자상물질(PM; Particulate Matters)을 주요 규제 대상 물질로 정하고, 이에 대한 제작차배출허용기준을 점차적으로 강화해 왔다. 이와 더불어 자동차에 배출가스 저감 기술이 사용될 수 있게 유도함은 물론, 2000년 초에는 휘발유와 경유보다 친환경적인 연료(CNG와 LPG 등)를 사용하는 자동차를 보급하고자 하였으며, 2010년 후반부터는 전기자동차와 연료전지자동차를 보급하고

있다. 동시에 미국과 유럽 등의 제도를 도입하며 운행차 배출가스 문제도 관리하였다.

그동안 이와 같은 다양한 노력의 결과로 우리나라 대기의 연평균 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도는 2015년 $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2021년에 $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 감소하였다. 그러나 이 수치는 우리나라 대기환경기준($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 여전히 초과하고, WHO (World Health Organization)의 $PM_{2.5}$ 권고기준($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에도 크게 못 미친다. 그리고 2020년 대기 중의 이산화질소(NO_2) 연평균 농도는 0.016 ppm으로 국내 대기환경기준(0.03 ppm)은 만족하지만 WHO 권고기준(0.005 ppm)을 크게 초과하고 있다(KMOE, 2022-1, 2022-2; Yeo *et al.*, 2019).

한편, 우리나라 2020년 대기오염물질 배출량 통계에 의하면 이동오염원의 $PM_{2.5}$ 와 NO_x 배출량이 국가 전체 $PM_{2.5}$ 와 NO_x 배출량의 32.9%와 65.1%를 각각 차지하고 있다(KNAIR, 2023). 이는 아직도 이동오염원이 우리나라 대기오염의 주요한 원인 중의 하나이며, 이동오염원의 배출가스 저감 대책이 여전히 중요함을 의미한다.

우리나라는 기후변화에 대응하는 글로벌 기술 동향에 빠르게 대처하고자 하였다. 2008년에 ‘기후변화대응 종합기본계획’을 수립하고, 2010년에 ‘저탄소 녹색성장 기본법’을 제정하였다. 모든 국가가 온실가스 감축 의무를 갖게 된 2015년 파리 기후협약 이후 우리나라는 2015년과 2021년에 온실가스의 자발적 감축 목표(NDC, Nationally Determined Contribution)를 국제사회에 제시하였으며, 수송 분야에서도 NDC에 제시한 온실가스 감축목표를 달성하기 위해 노력을 기울이고 있다.

자동차 배출가스와 온실가스 문제는 자동차 산업에 지대한 영향을 미칠 것으로 예상되며, 우리나라 자동차 산업의 국제 경쟁력 확보를 위해서는 자동차 환경 문제 해결을 위한 노력이 중요할 것으로 보인다. 본 고에서는 2000년 이후 내연기관을 사용하는 자동차의 배출가스와 온실가스 저감에 대한 정책과 기술의 발전 과정에 대해서 정리하고, 이를 토대로 내연기관을 사용하는 자동차의 미래 발전 방향에 대해서 기술하고자 한다.

2. 자동차 배출가스 저감 정책 및 기술의 발전

2.1 자동차 배출가스 배출량

그림 1은 최근 10년간 우리나라 도로이동오염원과 비도로이동오염원의 CO (일산화탄소), $PM_{2.5}$, NO_x 배출량의 변화 추이를 나타낸 것이다. 도로 이동오염원의 CO와 $PM_{2.5}$ 배출량은 지속적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 2000년 이후부터 배출허용기준의 지속적인 강화에 따라 자동차에 가솔린 삼원촉매(TWC; Three-Way Catalyst)와 디젤산화촉매(DOC; Diesel Oxidation Catalyst), 매연여과장치(DPF; Diesel Particulate Filter) 등의 후처리장치를 적용했기 때문이다.

그러나 이동오염원의 NO_x 배출량은 2016년을 기점으로 감소하고는 있으나 여전히 많은 양이 배출되고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 그동안 NO_x 배출허용기준을 지속적으로 강화하였음에도 불구하고, PM 기준만큼 강한 기준을 적용하지 못했고, 기술적 난이도가 높아 배출허용기준 강화 시점도 PM에 비해 상대적으로 늦었기 때문으로 보인다. 또한 2000년 초반부터 유럽을 중심으로 DPF를 부착한 디젤엔진을 클린디젤로 홍보하면서 온실가스 대책으로 클린디젤 보급을 장려하였는데 우리나라도 유럽의 클린디젤 정책을 따라가면서 NO_x 배출이 많은 경유차의 대수가 2000년 359만 대에서 2018년 993만 대로 3배 가까이 증가(KMOLIT, 2023)한 것도 큰 원인으로 보인다.

반면 비도로이동오염원의 CO, $PM_{2.5}$, NO_x 배출량은 지속적으로 증가하여 도로이동오염원의 배출량을 초과하고 있다. 비도로이동오염원은 이동오염원에 비해 배출허용기준이 완화되어 있고, 차량의 사용 수명도 자동차보다 훨씬 길기 때문인 것으로 분석된다. 이동오염원의 배출가스 관리뿐만 아니라 비도로이동오염원의 배출가스 관리 정책도 중요함을 알 수 있다.

내연기관 자동차에 대한 배출허용기준이 지속적으로 강화되고, 내연기관 자동차가 전기자동차 등 친환경 자동차로 대체되면서 자동차 배출가스 문제는 점차 개선될 것으로 전망된다. 그러나 우리나라 대기 중 미

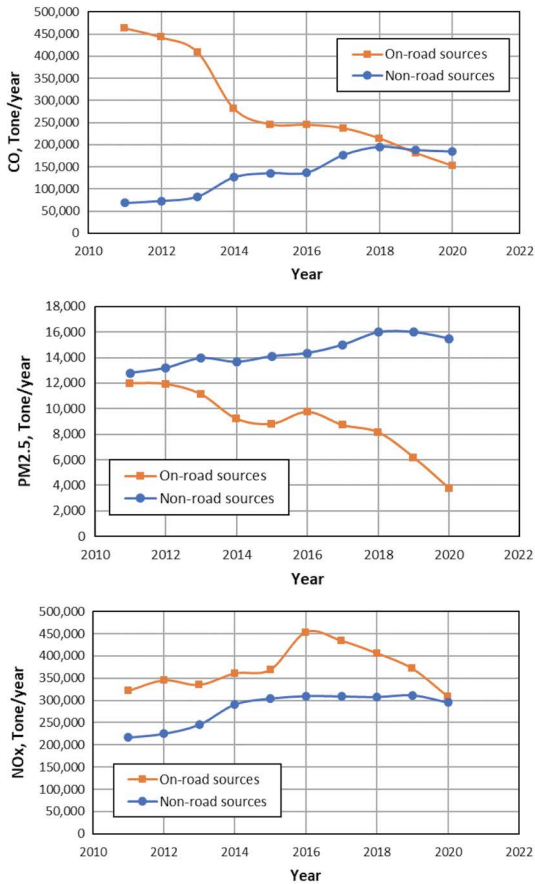


Fig. 1. Trend of CO, PM_{2.5}, and NO_x emissions from on-road vehicle during recent 10 years in Korea (KNAIR, 2023).

세먼지 농도는 WHO 권고 수준을 크게 상회하고 있으며, 전기차 등의 친환경자동차 전환이 빠르게 이루어지는 것이 아니기 때문에 상당 기간은 내연기관 자동차 배출가스에 대한 지속적인 대책과 정책이 필요해 보인다.

2.2 제작자동차 배출허용기준 동향

세계의 자동차 배출허용기준은 유럽과 미국 주도로 강화되어 왔으며, 우리나라는 휘발유자동차의 경우 미국의 배출허용기준을 준용하고, 경유자동차는 유럽의 기준을 준용하여 왔다. 2000년 초까지는 우리나라 자동차 환경 기술이 선진국 기술을 따라가는 시기였

기 때문에 선진국과 2~3년의 시간 차이를 두고 배출허용기준을 적용해 왔다. 그러나 2010년을 전후하여 국내기업들이 외국기업들과 동등한 기술 경쟁을 통해 수출을 촉진하고, 기술 수준이 낮고 저렴한 해외 상품에 대한 국내 산업의 보호를 위해 선진국과 동일한 시기에 세계에서 가장 높은 수준의 배출허용기준을 적용하기 시작했다.

자동차 배출허용기준은 저배기 기술 개발과 보조를 맞추면서 강화되어 왔다. 1970년대 삼원촉매(TWC) 기술개발에 힘입어서 휘발유자동차의 CO, HC, NO_x 배출허용기준이 크게 강화되면서 자동차 배출가스 관리가 본격적으로 시작되었다. 2000년대 이후에는 매연여과장치와 NO_x 흡착촉매(LNT; Lean NO_x Trap), 선택적산화촉매(SCR; Selective Catalytic Reaction) 기술이 개발되면서 경유자동차의 PM과 NO_x 배출허용기준이 강화되었고, 클린디젤 시대를 열었다. 이후 건설기계와 농기계 등 비도로이동오염원의 배출허용기준도 강화되었다.

대도시 매연과 미세먼지 원인으로 지목되어 오던 경유승용차는 2006년 EURO-4 기준(PM: 0.025 g/km, NO_x: 0.025 g/km)을 거쳐, 2009년 9월 EURO-5 기준(PM: 0.005 g/km, NO_x: 0.18 g/km)으로 강화되었으며, 2011년 9월부터는 입자상물질 개수(PN; Particle Number) 기준이 도입되었다. 2014년 1월부터 적용된 EURO-6 기준(PM: 0.005 g/km, NO_x: 0.08 g/km)에서는 NO_x 기준이 크게 강화되었고, NO_x 후처리기술(LNT 또는 SCR)이 사용되었다(Lee et al., 2014).

한편, 대형 경유자동차는 2009년의 EURO-5 (PM: 0.02 g/kWh, NO_x: 2.0 g/kWh) 기준과 2014년의 EURO-6 기준(PM: 0.01 g/kWh, PN: 8×10^{11} #/kWh, NO_x: 0.46 g/kWh)이 적용되어 모든 경유자동차에 DPF와 SCR이 필수적으로 사용되기에 이르렀다. PM은 DPF 기술로 대폭 저감할 수 있어서 PM 배출허용기준은 한번에 대폭적으로 강화되었지만 NO_x 저감 기술로 SCR 기술과 LNT, EGR, 연소 기술 등이 경쟁적으로 발전되면서 적용되는 상황이었기 때문에 NO_x 배출허용기준은 몇 차례에 걸쳐 단계적으로 강화되었다.

자동차 배출가스는 데이터의 신뢰성을 위해 실험실에서 엔진 동력계 또는 차대동력계를 이용하여 측정해 왔으나 실제 도로에서 배출되는 양과 같지 않다는 한계가 있었다. 특히 2015년에 미국에서 폭스바겐스캔들(디젤게이트)이 있었고, 이 영향으로 유럽에서는 2017년 9월에 경유자동차 배출가스 인증모드를 실제 도로주행 데이터를 반영한 WLTC (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle)로 변경하였으며, 이동식배출가스 측정장치(PEMS; Portable Emission Measurement Systems)를 시험차량에 탑재하여 실도로주행 중에 발생하는 배출가스(RDE; Real Driving Emissions)를 측정하는 인증 제도를 도입하였다(Chon and Cha, 2017).

현재 유럽에서는 차기 배출규제인 EURO-7 도입을 준비하고 있다(Joshi, 2023). EURO-7 배기규제에서는 차량이 실제 운전하는 모든 영역에 대해서 RDE 방법으로 배출가스를 평가하고, 관리하겠다는 방침이다. 승용차에 대한 EURO-7 규제는 2025년 7월에 시작될 예정으로서 가솔린 승용차의 배출허용기준치의 변화는 없지만, 디젤 승용차의 NO_x 기준은 약 25% 강화될 예정이다. 그러나 가솔린 차량의 경우에도 RDE 측정 외부 온도 범위가 -10~45°C로 확대되고, 그동안 사용되어 왔던 RDE 측정값에 대한 보정계수(CF; Conformity Factor)를 없애고, 특정한 시험조건 대신 모든 시험조건에서 기준치를 만족해야 하므로 보다 엄격하게 배출허용기준을 관리한다는 의미가 있다. 또한 PN 기준은 현재의 입경 25 nm 이상 입자에 대한 측정에서 10 nm 이상 입자로 강화되며, 암모니아(NH₃) 배출허용기준과 타이어와 브레이크에서 발생하는 비배기 미세먼지에 대한 규제도 추가된다. 대형 차량의 EURO-7 기준은 2027년 7월에 시작될 예정이고, NO_x 기준이 크게 강화될 예정이다. WHTC cold NO_x 0.35 g/kWh, hot NO_x 0.09 g/kWh 기준과 5분 운전의 아이들(idle)에서 NO_x 5 g/hr 기준을 만족해야 하며, 아산화질소(N₂O) 규제도 도입된다.

미국 환경청(EPA; Environment Protection Agency)에서는 2027년 이후 대형 엔진의 배출허용기준 강화

를 검토하고 있다. NO_x를 현재보다 82.5% 낮은 수준(35 mg/hp-hr)으로 강화하고, HC와 PM 기준도 강화된다. 이는 현재 시행되고 있는 캘리포니아 환경국(CARB; California Air resource Board)의 “Heavy-Duty Low NO_x 규제”와 비슷한 수준의 “Near zero-emission 규제”가 미국 전 지역으로 확대되는 것을 의미한다(US EPA, 2023).

우리나라는 건설기계·농기계를 대상으로 '15년부터 미국의 Tier-4 기준을 적용하고, '21년부터는 미국의 Tier-4 기준에 PN 기준이 추가된 유럽의 Stage-5 기준으로 강화하였다. 미국 CARB는 비도로용 엔진에 대한 Tier-5 기준을 2027년경 적용할 예정이며, Tier-4 NO_x 및 PM 배출허용기준 대비 50~90% 강화되는 수치이다. 그리고 Tier-5 기준에서는 새로운 저부하 인증 시험방법이 도입되고, 배출가스 저감장치 내구기간이 연장된다.

자동차업계에서는 배출허용기준이 강화되면 더 복잡한 후처리장치를 사용해야 하고 차량가격도 상승하기 때문에 미래에 내연기관 자동차 퇴출을 가속화하는 요인으로 작용하게 될 것이라는 우려를 하고 있다. 또한 차기 배출허용기준이 엄격할수록 이에 대한 대응 기술은 더 어렵고 도전적인 반면 환경적 이득은 그렇게 크지 않을 수 있다는 주장도 제기되고 있다(CLEPA, 2020).

2.3 자동차 배출가스 저감 기술 동향

2000년에 들어서면서 디젤엔진에 대한 다양한 기술이 개발되면서 배출가스가 크게 감소하였다. 전자식 고압연료분사(Commonrail)와 흡입공기 과급기술(Turbocharger), cooled EGR (Exhaust Gas Recirculation) 기술을 적용한 엔진연소 개선과 함께 DPF와 LNT 및 SCR을 포함하는 배출가스 후처리 기술이 크게 발전하였다.

2000년에 프랑스의 PSA 그룹은 DPF를 장착한 경유승용차(Peugeot 607, 407)를 세계 최초로 판매하였다. 당시 자동차회사들은 DPF 적용에 대해서는 부정적이었으나 엔진 전자제어와 연료고압분사 기술의 발

전으로 엔진 매연 배출량이 크게 감소하고, 초저유황 경유 사용을 의무화하여 촉매의 황피독 문제가 개선되고, 세라믹 필터 제조 기술의 발전에 힘입어 DPF는 상용화될 수 있었다.

SCR 기술은 NOx 저감을 위해 1970~80년대에 일본과 유럽의 산업시설에 사용되고 있었으며, 1990년대에 들어서서 자동차 적용에 대한 검토가 시작되었다. 차량에 장착할 수 있도록 소형화되고, 요소수(urea) 공급 인프라가 준비되면서 2003년에 대형차에 처음 상용화되었다. 이후 약 10년간은 대형차 중심으로 사용되면서 SCR 기술의 완성도가 매우 높아졌고, 배출 허용기준이 계속 강화됨에 따라 소형 자동차에도 도입되기 시작하였다.

SCR 기술은 바나듐계 열의 촉매로부터 시작하여 고온 내구성이 우수하고, 저온 활성이 우수한 구리이온 교환 세공(small size pore) 제올라이트 촉매로 기술이 발전하였다. 그 외에도 요소수 공급장치, 요소수-배출가스 혼합(mixing) 기술, NOx 센서를 이용한 시스템 제어 기술, 암모니아 산화촉매 기술 등에서 발전이 있었고, 매연여과장치와 SCR 장치를 일체화시킨 SDPF(SCR on DPF) 시스템으로도 발전되었다.

승용 디젤 차량의 EURO-5 대책으로 SCR과 LNT 기술이 경쟁하였다. 요소수를 공급해야 하는 SCR 시스템은 NOx 저감효율은 우수하지만 고가여서 배출 허용기준이 엄격하지 않은 시기에는 저가이면서 시스템이 간단한 LNT를 사용하였다. 그러나 NOx 배출 허용기준이 강화되면서 소형 디젤 자동차에서도 SCR 기술을 사용하고 있다.

운전자가 요소수 구입 비용을 부담해야 하기 때문에 운전자가 비정상인 요소수를 사용하거나 제때에 보충하지 않는 임의조작(tampering)을 방지하기 위해서 요소수 농도를 모니터링하고, 요소수를 주입하지 않을 경우 차속이나 토크를 제한하도록 하였다. 우리나라는 자동차용 요소수를 중국에서 대부분 수입하였고, 2021년 말에 중국의 수출 중단으로 인하여 요소수 공급 대란이 발생한 적이 있다. 현재는 자동차용 요소수를 전락물자로 관리하고 있다.

N₂O는 지구 온난화물질로 CO₂에 비해 지구온난화 지수(GWP; Global Warming Potential)가 265배나 높다. 유럽에서 N₂O 기준이 차기 EURO-7 규제에 도입될 예정이다. N₂O는 디젤 자동차의 urea SCR 촉매나 AOC(암모니아 산화촉매)에서 NOx 발생량 대비 약 5~10% 정도 발생하고 있어서 향후 디젤엔진은 N₂O 발생이 적은 촉매를 사용하거나, N₂O를 분해하는 촉매를 추가적으로 설치하는 방향으로 기술개발이 진행될 것으로 예상된다(Kim *et al.*, 2022).

향후 내연기관 자동차에 대한 배출허용기준은 “near zero-emissions” 수준으로 강화될 것이며, 특히 냉시동 시 발생하는 배출가스를 줄이기 위해 다양한 기술들이 검토될 것으로 보인다. 가솔린엔진은 시동 초반 엔진의 배출가스 온도를 빠르게 올리는 기술뿐만 아니라 EHC(Electric Heated Catalyst)와 2차 보조 공기 공급기술(2nd air injection) 등이 추가적으로 사용될 것으로 예상된다. 디젤엔진은 SCR 촉매를 엔진 배기매니폴드 근처에 하나 더 설치하고, 요소수를 2점 분사하는 기술을 사용할 것으로 보인다. 가솔린엔진과 마찬가지로 디젤엔진에서도 배출가스 온도를 빠르게 높일 수 있는 EHC와 같은 기술이 적용될 것이다. 그리고, 디젤엔진의 SCR 장치는 배출가스 온도 200°C 미만에서는 분사된 요소수가 열분해되지 않고, 고체 염을 형성하여 배기관에 쌓이기 때문에 요소수를 사용할 수 없기 때문에 향후에는 배출가스 온도와 무관하게 요소수를 암모니아로 빠르게 전환하여 공급하는 기술이 적용될 것이다.

계속 엄격해지고 있는 배출가스 기준을 만족하기 위해서는 배출가스 후처리장치가 매우 복잡해지고 있어서, 배출가스 후처리 시스템은 기능을 통합하고 단순화하는 기술로 발전할 것이다. 그림 2는 가까운 미래의 “near zero-emissions”을 위한 배출가스 후처리 기술의 예시를 나타낸다.

2.4 운행차 배출가스 관리

2002년 서울의 대기질은 미세먼지(PM₁₀) 농도가 연평균 76 µg/m³으로 선진국 주요 대도시들과 비교하

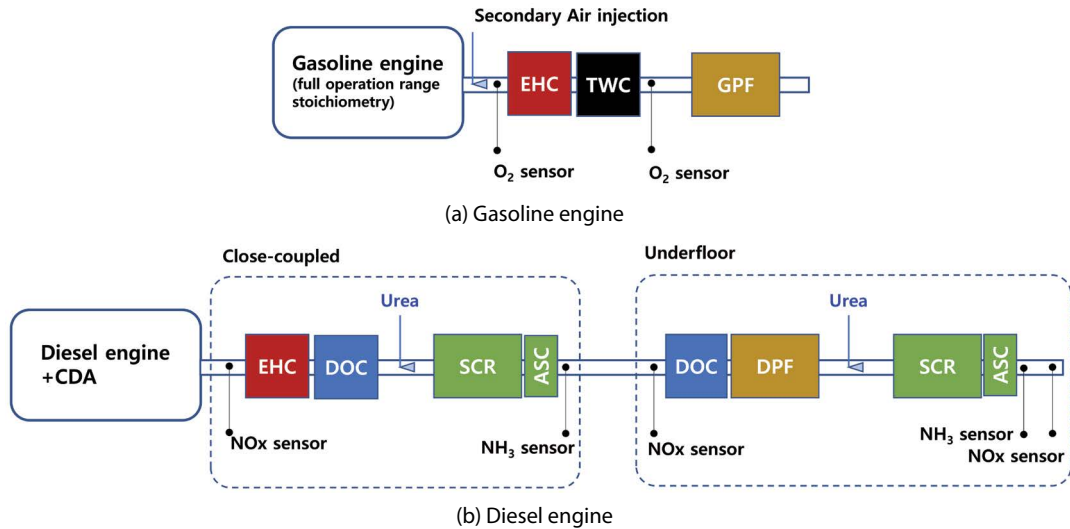


Fig. 2. Emission after-treatment technology for future “near zero-emissions” standard. Abbreviation: EHC (Electric Heated Catalyst), TWC (Three-way Catalyst), GPF (Gasoline Particulate Filter), CDA (Cylinder Deactivation), ASC (Ammonia Slip Catalyst), DOC (Diesel Oxidation Catalyst), DPF (Diesel Particulate Filter), SCR (Selective Catalytic Reaction).

여 1.7~3.5배나 나쁜 상황이었다(KNIER, 2002). 이에 따라 우리 정부는 2005년에 『수도권대기질개선에 관한 특별법』을 제정하고 본격적인 대기질 관리를 시작하였다. 『제1차 수도권대기환경관리 기본계획(2005~2014)』에서는 노후 운행경유자동차에 대한 DPF 보급사업 및 저공해 조치를 역점사업으로 실시하였다. 이 사업에서 2005년부터 2022년까지 총 5조 3,129억 원의 예산을 투입하여 총 246만 대의 자동차와 건설기계를 저공해 조치하였다. 이런 대책을 통하여 수도권 지역에서 매연을 배출하는 경유 자동차는 대부분 사라지고, 스모그 현상도 크게 개선되었다. 제1차 대책기간이 끝나는 2014년에 서울시의 미세먼지 농도를 연평균 $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 저감되었다. 계속해서 2015년에 『제2차 수도권 대기환경관리 기본계획 수정계획(2015~2024)』을 수립하여 2024년까지 2차 수도권 대책이 진행되고 있다. 이와 같은 조치로 2021년 서울시 미세먼지 농도는 $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 저감되었다(KMOE, 2023).

2018년 4월 환경부는 ‘자동차 배출가스 등급 산정 방법에 관한 규정’을 고시하고, 국내 모든 차량을 대기오염물질 배출량에 따라 5개 등급으로 분류하였다.

경유 차량 중에서 “2006년 이전 배출허용기준”이 적용된 차량은 5등급으로 분류되었으며, 1987년 이전에 생산된 삼원촉매장치가 부착된 가솔린 및 가스자동차도 5등급에 포함되었다. 고농도 미세먼지 비상저감조치가 발령되는 경우와 계절관리제 적용 시에 5등급 차량의 운행이 제한되었으며, 공해차량운행제한지역(LEZ; Low Emission Zone)에서 5등급 차량 운행을 제한함으로써 고농도 미세먼지지역을 선별적으로 관리하고자 하였다. 자동차 등급제는 국민에게 자동차 배출가스 관리의 중요성을 인식시키고, 상당한 수의 차량이 폐차되도록 유도하였다.

5등급 차량의 대수는 2018년 258만 대에서 2021년에 131만 대로 감소하였다. 특히, 수도권의 저공해 미 조치 5등급 차량은 2021년 말 기준 21만 대로 크게 감소하였다. 현재는 수도권 이외 지역의 5등급 차량과 수도권의 4등급 자동차에 대한 대책이 필요한 상황이다. 참고로 대기오염에 어느 정도 영향을 여전히 미치는 전국의 4등급 자동차의 대수는 2021년 말 기준 156만 대로 집계되고 있다.

자동차 배출물질 중에서 PM의 인체유해성이 가장 크기 때문에 이에 대한 대책은 매우 중요하다. 경유차

의 매연여과장치(DPF)와 휘발유자동차의 GPF(Gasoline Particulate Filter)는 조그마한 손상이 발생하여도 나노미세입자의 배출이 줄어들지 않기 때문에 운행차 PN(PM Number) 검사에 대한 필요성이 제기되어 왔다. 유럽의 운행차 정기검사(PTI; Periodic Technical Inspection)에서는 매연(Smoke Opacity)만 검사하기 때문에 DPF의 파손 여부를 확인하기가 어려운 문제가 있어서 2017년에 DPF를 장착한 운행 경유자동차에 대한 새로운 PN 측정방법(NPTI-PN, New PTI-PN)과 기준이 제안되었다(Kadijk *et al.*, 2017). 네델란드에서 2022년 7월에 운행차 PN 기준을 세계 최초로 도입하였으며, 독일과 벨기에, 일본, 칠레, 멕시코, 콜롬비아, 페루, 스위스 등의 나라에서도 NPTI-PN 기준 도입을 검토하고 있다. 우리나라도 운행차 PN 검사제도 도입을 검토하고 있다.

그동안 제작차 결함확인검사 등 다양한 제도로 배출가스 규제를 만족하지 못하는 제작차를 선별하여 조치할 수 있었다. 그러나 현재 운행차 배출허용기준은 상당히 완화되어 있어, 운행차 배출가스를 효과적으로 관리하지 못하고 있는 실정이다. 또한, 운행차 DPF와 SCR의 정상 작동을 확인하기 위한 검사제도 도입도 필요하다. 그리고 사회적 비용과 행정력을 최소화하여 자동차 배출가스를 관리할 수 있는 방안에 대한 고민이 필요하다.

3. 자동차 온실가스 저감 대책 및 기술 동향

3.1 온실가스 배출량 현황 및 감축목표

그림 3은 1990년부터 2020년까지의 수송 부문과 도로의 온실가스 배출량 추이를 나타낸 것이다. 이 그래프에 의하면 수송 부문과 도로의 온실가스 배출량은 2016년까지 연평균 약 2.2%씩 꾸준히 증가하다가 2016년 이후부터 증가세가 약간 완화하고 있다.

2020년에 우리나라 온실가스 총 배출량은 656백만 톤이며 그중 수송 부문 배출량은 96백만 톤으로 국가 총 배출량의 약 14.7%에 해당한다(KGIR, 2023). 수송

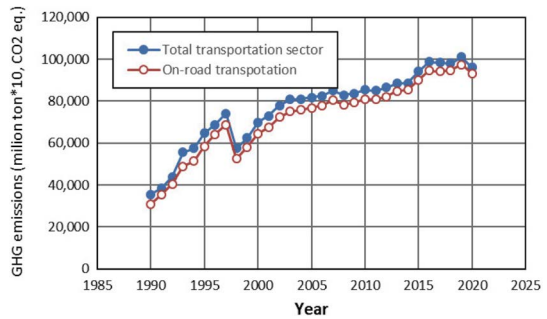


Fig. 3. Emitted emission of green-house gas of on-road vehicle and total transportation sector in Korea (KGIR, 2023).

부문의 온실가스는 도로에서 약 97%가 배출되어 절대적인 비중을 차지한다. 2020년 연료별 배출량은 휘발유 27백만 톤, 경유 56백만 톤, LPG 8백만 톤(CO_{2eq.})이다(KOTEMS, 2023).

우리 정부는 2009년에 ‘2020년 온실가스 배출전망(BAU, Business As Usual) 대비 30% 감축’이라는 목표를 제시하고, 2011년 저탄소녹색성장기본법을 제정하여 목표 이행을 위해 법적 기반을 마련하였다. 이후 2014년 수송 부문의 온실가스 배출량을 교통수요관리, 자동차 연비 개선, 친환경자동차 보급 등의 방법으로 2020년에 65.4백만 톤으로 감축하겠다는 로드맵을 제시하였다. 하지만 실제 2020년에 수송 분야에서 배출된 온실가스는 96백만 톤으로 2014년에 설정한 목표보다 47%를 초과하였다. 목표 달성을 위한 세부계획이 현실적이지 못했고, 정부의 추진 의지도 부족했던 것이 목표 달성 실패의 원인으로 사료된다.

우리나라는 2015년 6월에 ‘2030년의 온실가스 배출전망(BAU) 대비 37% 감축’을 자발적 감축목표(NDC; Nationally Determined Contribution)로 제시하였다. 그 후 2018년 7월에는 ‘2030 국가 온실가스 감축 기본로드맵 수정안’을 마련하였으며, 이때 수송 부문 온실가스 배출량을 2030년에 70.6백만 톤으로 감축하는 목표가 제시되었다(Korea Government, 2018). 그리고, 2021년 10월에 국가온실가스 감축목표(NDC)를 상향 제시하면서(Korea Government, 2021-1) 수송 부문의 2030년 온실가스 배출량은 61.0백만 톤으로 수

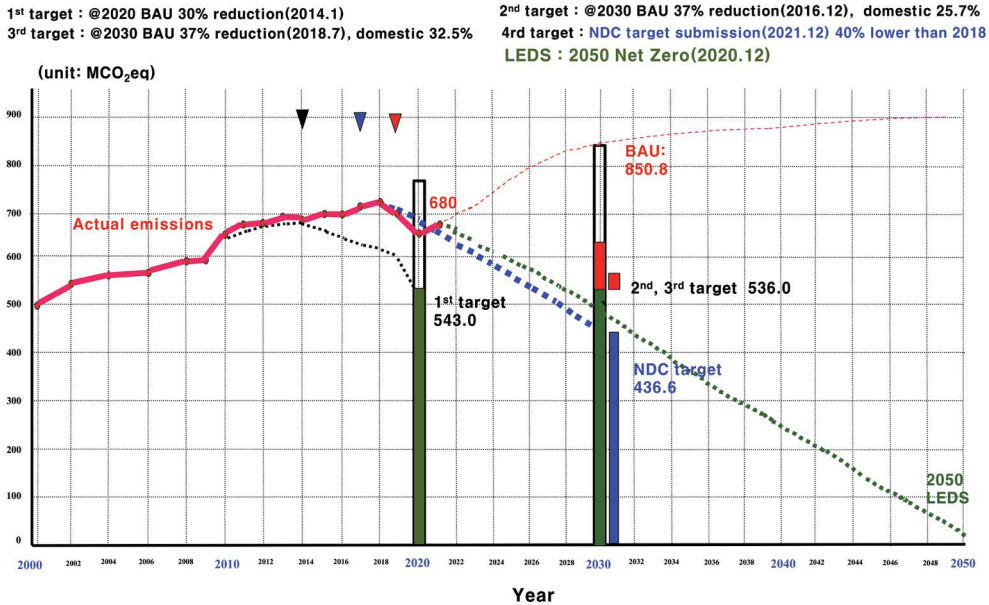


Fig. 4. Change of GHG reduction goal for transportation sector in the policy of Korea government.

정하였다. 주요 대책으로 정부는 수소/전기차 450만 대 보급, 내연기관차 온실가스·연비 기준 강화, 경유차 바이오디젤 혼합률 향상(3 → 8%), 자동차 주행거리 2018년 대비 2030년 4.5% 감축을 위한 수요관리 등을 제시하였다.

또한 2021년 정부에서는 2050 탄소중립(2050 Net Zero) 달성을 위해 국내 순배출량을 '0'으로 하는 2개 시나리오를 제시하였다(Korea Government, 2021-2). 화력발전 전면 중단으로 배출 자체를 최대한 줄이는 A안과 일부 화력발전이 잔존하는 대신 탄소포집기술을 적극 활용하는 B안으로 구성되어 있다. 수송 부문 목표 배출량은 A안의 경우 2.8백만 톤이며, B안은 9.2백만 톤이다. 도로 수송 부문의 탄소중립 시나리오의 주 대책은 전기/수소차로의 전면 전환이다. 하지만 B안은 A안 대비 일부 내연기관자동차에 탄소중립연료(e-fuel)를 사용한다는 가정을 하고 있는 것이 특징이다.

그림 4에는 그동안 교통 분야의 온실가스 감축정책 변동 상황을 요약하였다. 2030년과 2050년의 국가 목표를 달성하기 위해서는 매년 23백만 톤(3.4%) 이상

을 줄여야 하는 엄청난 노력이 필요함을 알 수 있다. 탄소중립 목표와 함께 수송 부문의 온실가스 저감 목표를 달성할 수 있는지에 대한 면밀한 검토가 필요해 보인다.

3.2 자동차 온실가스/연비 규제

우리나라의 자동차 온실가스 배출허용기준은 2012년에 시작하였다. 미국의 복합모드(combined mode, FTP-75 + HWFET 모드)로 측정하였고, 자동차회사가 연비와 온실가스 기준 중에서 유리한 기준을 선택할 수 있도록 하였다. 반면 미국은 온실가스와 연비 기준을 동시에 만족하도록 하면서 우리나라보다 엄격한 제도를 시행하고 있다.

2012년에 승용차 온실가스 140 g/km CO₂eq. (연비 17 km/L) 기준을 시작으로 2020년에 평균 CO₂ 97 g/km (연비 24.1 km/L) 기준을 적용하였으며, 2030년에 70 g/km로 강화하였다. 2030년 우리나라 목표는 미국과 유럽연합(EU)의 중간 수준으로 내연기관차와 하이브리드, 전기차 등을 동일한 비중으로 판매할 때 달성 가능한 수치로 평가된다. 그러나 이 수준의 온실가스

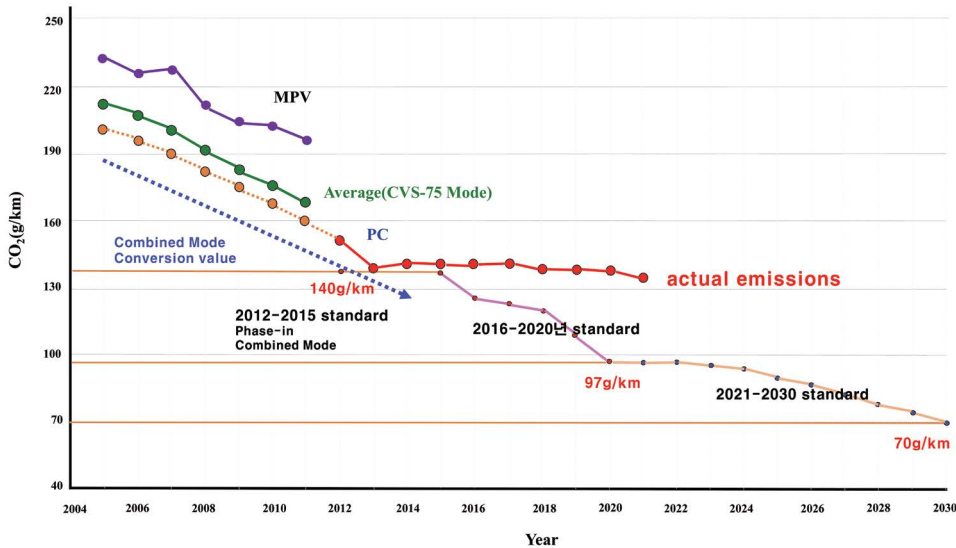


Fig. 5. Change of averaged CO₂ standard and real emitted value of averaged CO₂ from PC (Passenger Car) and MPV (Multi-Purpose Vehicle) in Korea (KMOE, 2022-3; KEA, 2022).

기준으로는 2030년 수송 부문 NDC를 만족하기에는 부족한 것으로 평가되고 있어서 추가적인 저감 대책이 필요하다.

그림 5는 우리 정부에서 발표한 자료(KMOE, 2022-3)를 근거로 자동차 온실가스 기준과 실제 배출되는 평균온실가스 수준을 정리한 것이다. 전체 자동차 제작사의 실제 온실가스 평균 배출량은 2016년 142.8 g/km에서 2020년 141.3 g/km로 개선되지 않고 있는 것을 알 수 있다. Super-credit과 에코이노베이션 기술 적용에 따른 인센티브를 고려하게 되면 온실가스 평균 배출량은 2016년 139.7 g/km에서 2020년 125.2 g/km로 약간 감소한 것으로 집계된다.

그림 6은 ICCT에서 발표한 자료(ICCT, 2022)에 근거하여 우리나라와 EU의 승용차 온실가스 배출 동향을 비교한 것이다. 유럽의 여러 나라에 비해 우리나라의 승용차 온실가스 배출량의 감소 추세가 크지 않음을 알 수 있다. 또한, 자동차 제작사별로 분석하면, 2018년까지는 대부분의 제작업체가 온실가스 배출량 기준을 만족했으나 2019년에는 전체 19개 업체 중 7개 업체가 기준을 달성하지 못했고, 2020년에는 13개

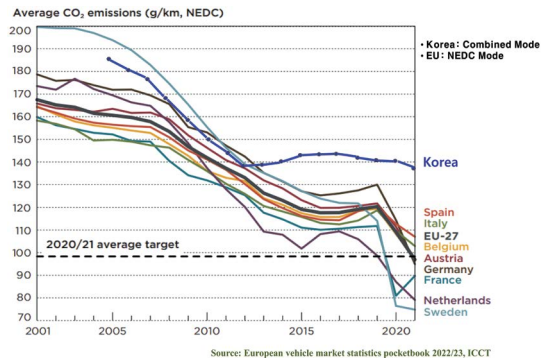


Fig. 6. Comparison of averaged CO₂ emitted from passenger car in Korea and Europe (ICCT, 2022).

의 업체가 만족하지 못했다.

우리나라의 온실가스 기준은 유럽과 동일한 방식의 평균공차증량을 고려한 기준체계이다. 공차증량이 높아지면 허용기준 값도 높아지면서 완화되기 때문에 온실가스 배출이 적은 소형차를 유도해야 하는 정책과 배치된다는 비판이 있다. 특히 최근에 전 세계적으로 증량이 무거워서 온실가스 배출이 많은 SUV 차량 대수가 크게 증가하고 있어서 우려가 제기되고 있다.

승합차를 포함한 중·대형차의 온실가스 배출량은 수송 부문의 약 50%에 달한다. 중·대형차의 대수는 적지만 승용차에 비해 연비가 나쁘고, 일평균 주행거리가 상대적으로 길기 때문이다. 이와 같은 문제에도 불구하고 중·대형차는 전기차로의 전환이 쉽지 않은 상황이다. 유럽은 2019년에 중·대형차 온실가스 기준을 도입하여 현재 모니터링 단계에 있으며, 2025년부터 본격적으로 규제를 시작한다. 2025년까지 중·대형 상용차에 대한 CO₂ 배출량을 2019년 대비 15%를 줄이고, 2030년까지 30%를 줄이는 목표를 갖고 있다.

우리나라는 중·대형차량에 대해서 2022년에 평균연비 기준을 도입하고, 2025년까지는 모니터링을 실시하며, 2025년 이후에는 패널티를 부과하여 규제할 계획이다. 대형자동차 온실가스 배출량은 EU의 VECTO (Vehicle Energy Consumption Tool) 프로그램을 우리나라 환경에 맞게 개선한 HES (Heavy-duty vehicle Emission Simulator) 프로그램을 사용하여 측정한다 (Park *et al.*, 2019). 미국과 유럽은 넓은 국토와 도로로 인하여 장거리 물류시스템이 발달하였으며 트랙터-트레일러가 감축의 주 대상이 되는 반면 우리나라는 일반트럭과 버스가 주류이기 때문에 기준 적용 대상 차종에 차이가 있다.

3.3 내연기관 자동차의 온실가스 저감 기술 동향

2000년 전후의 엔진 기술의 개발은 동력성과 배출가스 개선에 초점이 맞추어져 있었다. 이에 따라 가솔린엔진의 경우 1985년부터 2010년까지 연평균 약 1.5%의 비출력 향상이 지속되었고(KSAE, 2010), 배출가스 수준은 배출허용기준의 점차적 강화에 따라 크게 감소하였다. 그러나 2010년을 전후하여 연비향상과 온실가스 저감이 중요한 이슈로 등장하였다. 2000년대 초 미국-이라크 전쟁 등으로 인하여 유가가 상승하고, 지구 온난화 문제로 유럽에서 2012년부터 승용차 및 소형 트럭에 대해서 CO₂ 규제를 도입하였기 때문이다. 이에 따라 적은 비용으로 연비를 얼마나 향상시킬 수 있는지에 대해서 다양한 기술이 검토되었다. 가솔린엔진의 경우 하이브리드 기술, 다운사이징,

turbo-GDI 기술, ISG (idle stop & go), 밀러사이클 기술 등이 순차적으로 적용되었다.

2012년 처음 도입된 승용차 연비 기준에서는 연평균 5%씩의 연비 향상을 요구하였고, 내연기관 기술로 2020년 연비 기준(CO₂ 95 g/km)과 2025년 연비 기준(CO₂ 75 g/km) 달성 여부는 자동차 업계의 최대 관심사였다. 주요 자동차회사는 가솔린엔진 열효율 50%, 디젤엔진 열효율 55% 달성을 목표로 정하고 기술 개발에 주력하였다. 당시 승용차용 가솔린엔진의 최고 엔진효율은 40% 수준이었다.

우리나라와 유럽 자동차회사들은 직접분사방식과 터보차저 사용 다운사이징 기술을 통해 고연비 및 고출력을 지향하였으며, 일본은 자연급기식 포트분사 방식에 고압축비(13~14:1)와 EGR 기술을 적용하여 엔진의 열효율을 향상하는 방식을 선택하였다(Lee, 2018). 높은 압축비 운전이 가능한 가변압축비 엔진과 5~7% 연비 향상 효과가 있는 것으로 알려진 연소실 비활성화(cylinder deactivation) 기술을 연구하기도 하였다.

2010년 전후 엔진 연소 기술 개선을 위한 다양한 시도도 있었다. 가솔린엔진에 디젤엔진의 압축착화연소 원리를 적용하고자 하였다. 가솔린 예혼합압축착화연소 기술은 희박연소가 가능하고, 펌핑 손실 등 가솔린엔진의 단점을 극복하여 디젤엔진 수준의 열효율을 얻을 수 있기 때문이다. 이 외에 가솔린 초희박 기술, 디젤예혼합연소 기술, RCCI (Reactivity Controlled Compression Ignition) 연소 기술 등을 연구하였으나 연소 제어가 어려워 전체 운전 영역에서 적용하기가 어렵고, 고가의 부품을 추가적으로 사용해야 하는 단점이 있어서 보편적 엔진 기술로 사용되지는 못했다.

그러나 일본 마쯔다는 2018년에 가솔린엔진에 압축착화 기술을 적용한 SKYACTIV-X 엔진을 출시하였으며, 일반 가솔린엔진에 비해 압축비를 높이고, 공연비 30:1의 희박혼합기를 사용하는 등의 기술을 적용하여 종전 모델인 SKYACTIV-G에 비해 연비를 20~30% 향상시켰다(Nakai *et al.*, 2019).

내연기관은 약 30%의 에너지가 배출가스로 배출됨

에 따라 엔진 열효율 개선을 위해 폐열회수 기술이 연구되었다(Kim, 2018). 자동차용 열전소자의 개발, 랭킨 사이클 적용 폐열회수 기술 등 다양한 기술 개발이 계속 시도되었으나 현재까지 자동차에 보편적으로 적용되지는 못하고 있다.

경유 승용차는 가솔린 승용차에 비해 연비가 우수하여 2010년 초까지는 가솔린 승용차 대신 경유승용차 판매대수를 늘이는 '경유차 mix' 전략으로 CO₂ 기준에 대응하고자 하였다. 그러나 2015년 폭스바겐사에서 실험실 인증조건과 다르게 실도로상에서 배출가스 저감장치가 제대로 작동하지 않아 사회적 문제가 된 디젤 게이트와 승용차와 소형 트럭에 대한 연비 규제 강화로 인해 경유승용차 시장점유율이 전 세계적으로 감소하는 추세를 보이고 있다.

2020년의 국내 자동차의 온실가스 배출에 관한 전과정분석(LCA; Life Cycle Assessment) 연구 결과(Song, 2021)에 의하면, 동급 차종에서 온실가스 배출 순위는 BEV(순수전기차) < HEV(하이브리드차) < ICE Diesel(디젤내연기관차) < ICE Gasoline(가솔린내연기관차)으로 나타났으며, 우리나라의 전력 구성상 HEV와 BEV의 LCA 분석 결과 차이는 크지가 않았다. 전기차는 전기 발전원 구성에 따른 단위 전력당 탄소배출계수(CI; Carbon Intensity)와 전기차 전비(Wh/km)가 중요하다. 예를 들면 전기차 전비 6 km/kWh(소형 전기차 수준)의 경우 우리나라 발전 CI 값인 470 g/kWh(2020년)를 적용하면 전기차의 CO₂ 배출은 약 78 g/km 배출되며 이는 HEV와 유사한 수준이다.

향후 탄소중립이라는 시대적 요구에 대응하여 어떤 기술이 얼마나 친환경적인지와 에너지를 효율적으로 사용하는 것인지에 대한 보다 정밀한 평가를 위한 노력이 지속될 것으로 보인다. 사회가 환경을 위해서 얼마만큼의 비용을 지불할 수 있을지에 대한 논의도 활발해질 것으로 보인다.

플러그인-하이브리드(PHEV)는 일본의 하이브리드 자동차 기술에 대항하고, 전기자동차에 가까운 개념으로 미국의 자동차회사를 중심으로 개발되었다.

2010년 출시된 GM의 PHEV인 Volt 승용차는 16 kWh의 리튬이온 배터리를 장착하여 배터리의 힘만으로 64 km 주행이 가능하였다. PHEV는 유럽을 중심으로 시장이 점차 확대되어 2019년에는 유럽 신차 판매의 3.3%가 PHEV였다. 그러나 실도로조건에서 CO₂ 배출량이 크게 줄지 않는다는 효율성 문제가 제기되기도 한다(Plötz *et al.*, 2020).

2012년 시작된 승용차 연비 규제가 내연기관의 연비 개선 기술 속도를 증가하는 수준으로 지속적으로 강화되고, 전기차와 연료전기 자동차에 super credit과 보조금 지급 등 각종 혜택이 부여됨에 따라 자동차 제작사는 승용차 및 소형화물 부문에서 전기자동차와 연료전기자동차에 대한 기술개발과 판매에 더 관심을 갖게 되었다.

2018년정부부터 독일, 영국, 프랑스, 네덜란드, 노르웨이 등에서 2030년 이후 내연기관 자동차 판매를 금지해야 한다는 주장이 제기되었다. 그 후 2021년 7월 EU 집행위원회에서 탄소배출 저감을 위한 포괄안이 발표되었는데 그중에 '신차의 CO₂ 배출을 2035년까지 제로로 만든다'는 내용이 삽입되었다. 이는 화석연료를 사용하는 내연기관 자동차를 2035년부터 판매 금지한다는 의미이며 여기에는 하이브리드자동차도 포함되었다. 우리 정부도 내연기관 자동차 판매금지를 심도 있게 검토하고 있다.

내연기관 자동차 판매금지는 탄소중립사회 실현을 위한 중요한 의미를 갖을 뿐만 아니라 국민의 생활 방식과 자동차 산업 구조 변화에 지대한 영향을 미치게 될 것이다. 내연기관 판매금지가 되는 시점을 결정함에 있어서 정부는 재생에너지로 생산된 전기를 충분히 공급할 수 있는지, 전기차의 가격과 안전성에 문제 없이 대중적으로 전기차를 사용할 수 있을 것인지 등에 대한 합리적인 검토가 필요하다.

독일과 EU는 2023년 3월에 2035년부터 탄소중립연료 사용 내연기관차만 신규등록할 수 있도록 하는 내용의 내연기관차 단계적 퇴출 관련 법안에 합의하였다. 당초 EU의 법안은 모든 내연기관차를 금지하는 것이었으나, 독일의 요구를 반영해서 탄소중립연료

(수소, e-fuel 등)를 사용하는 내연기관차는 예외로 인정하기로 했다. e-fuel 상용화를 위해서는 연료대기 중 이산화탄소 포집 기술과 전기에 의한 수소생산 기술과 접목되어야 하며, 낮은 e-fuel 생산효율과 높은 가격은 극복해야 할 과제이다.

대형화물차나 선박 등에 사용되고 있는 대형 내연기관을 전기동력으로 대체하기에는 상당한 기간이 필요하며, 과도기 내연기관 대책으로 수소와 바이오연료, 이퓨얼(e-fuel) 등의 탄소중립 또는 CO₂ 리사이클 연료들이 사용될 가능성이 높다. 신재생에너지에 의한 전기 생산량 확대가 부진해지면 e-fuel이 자동차 전동화에 대한 합리적인 보완 방안이 될 수도 있어 보인다.

암모니아는 수소를 이용하여 비교적 쉽게 합성할 수 있고, 저비용 수소 캐리어로 큰 장점이 있어서 대형 선박엔진, 발전소와 산업용의 보일러에 사용하려는 시도가 있다(Lee et al., 2021). 그러나 암모니아는 인체에 치명적인 독성이 있는 물질이기 때문에 누출 시 큰 문제를 일으키며, 발열량이 적고, 연소속도도 느려 자동차용 엔진 연료로 사용될 전망은 확실하지 않다. 그리고 암모니아를 사용하는 엔진은 연료 특성상 연소과정에서 NO_x 및 N₂O가 발생할 수 있다. 암모니아엔진으로 실질적 온실가스 저감 효과를 얻기 위해서는 N₂O에 대한 평가도 함께 되어야 할 것으로 보인다.

수소 내연기관은 수소연료전지 대비 열효율과 가격을 두고 경쟁할 것으로 보인다. 수소엔진의 상용화를 위해서는 수소 공급가격과 수소 공급인프라 구축이 가장 큰 문제로 보인다. 수소엔진 기술의 핵심은 디젤 엔진과 마찬가지로 직접분사식 인젝터를 사용하는 연료공급장치와 흡입공기과급장치, 전자제어 등이다. 또한 수소엔진의 연소과정에서 NO_x가 배출되는 문제가 있으나 지금까지 내연기관엔진에서 축적된 NO_x 저감 기술을 적용하면 해결될 수 있을 것으로 보인다. 현재 많은 엔진 제작사에서 전소 및 혼소 수소엔진을 개발하고 있어서 조만간 시장에서 확인될 것으로 보인다(Kovacs et al., 2022; Onorati and Zhao, 2022).

4. 결 론

배출가스 저감과 온실가스 저감이라는 키워드는 2000년 이후 자동차 환경 기술을 주도하여 왔으며, 앞으로 상당 기간 계속될 것으로 보인다. 향후 전기차 등의 친환경자동차가 보급됨에 따라 자동차 배출가스 문제와 온실가스 문제는 점차 개선될 것이다. 그러나 태양광 및 풍력 등 재생에너지 보급과 친환경자동차의 보급 속도를 고려하고, 중대형차에 대한 전동화가 쉽지 않은 점을 고려했을 때 우리 사회는 앞으로도 상당 기간 내연기관 자동차와 공존할 것이다. 따라서 내연기관을 사용하는 자동차, 건설기계, 농기계의 배출가스와 온실가스의 지속적인 관리가 필요하다.

내연기관 자동차 배출허용기준은 가까운 미래에 “near zero-emissions” 수준으로 강화될 것이며, 실제로 배출가스 측정과 냉시동 시 배출되는 배출가스에 초점이 맞추어질 것이다. 자동차 온실가스 기준도 2050년에 교통 부문 탄소중립이라는 목표를 달성할 수 있도록 지속적으로 강화될 것이다. 한편 이와 같은 자동차에 대한 배출허용기준 강화와 온실가스 규제에 따라 자동차 산업에 있어서 내연기관이 차지하는 비중은 점차 감소할 것이고, 산업의 재편은 불가피해 보인다. 경쟁력 있는 비용으로 시대가 요구하는 고성능 내연기관 기술을 개발하고, 시장을 통합적으로 대응하는 노력이 필요해 보인다.

현재 수송 부문의 온실가스 저감 대책의 핵심은 친환경차 보급에 있다. '21년까지 전기자동차를 30만 대 누적 보급하여 친환경자동차 초기 시장을 형성한 점은 성공적으로 평가되지만, 2030년 수송 부문 국가 온실가스 감축목표를 현재의 정책으로 달성하기는 어려워 보인다. 소형차에 대한 친환경차 보급율을 더 높이고, 대형차 대책을 더 구체화하는 등 추가적인 노력이 필요해 보인다. 대형차량용 내연기관에 탄소중립연료가 사용될 가능성이 있어 이를 연료로 사용하는 내연기관 개발도 중요하다.

2000년 이후 자동차 환경 기술이 발전해 온 역사를 돌아보면 짧게는 3년, 길게는 5~10년을 주기로 기술

적 이슈가 크게 바뀌어 왔다. 내연기관 자동차의 고압 연료분사 기술, 하이브리드 자동차 기술, DPF와 SCR 기술은 상용화되었으나 가솔린 압축착화 등 신연소 기술, 열전소자를 이용한 폐열회수 기술 등은 상용화되지 못했다. 전기자동차는 정책적 지원을 받아 2018년 이후 시장에 정착되고 있으나, 2000년대부터 연구 개발을 지속해온 수소 연료전지 자동차는 가격과 내구 성능 등 여러 면에서 개선점이 남아 있어 시장에 성공적으로 정착하지 못하고 있다. 이와 같은 경험으로 유추했을 때 미래 기술을 예측하는 것은 신중해야 하며, 여러 기술의 발전 상황에 따라 유연하게 받아들이고 정착할 수 있는 시스템이 필요하다. 미래 친환경자동차의 동력원은 환경성, 가격, 성능의 경쟁력에 따라서 결정될 것으로 보인다.

감사의 글

이 연구는 2023년 한국기계연구원 기본사업 “미세먼지 (PM_{2.5}) 및 온실가스 대응 미래발전/동력시스템 초초정 기계기술 개발 (NK243A)” 과제로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Chon, M.-S., Cha, J. (2017) The Trends of Regulations for Real Driving Emissions - Light Duty Vehicles (RDE-LDV), *Auto Journal*, 39(4), 27-32.
- European Association of Automotive Suppliers (CLEPA) (2020) Position Paper Euro 7/VII. <https://clepa.eu/wp-content/uploads/2020/03/CLEPA-Position-Paper-Euro-7.pdf> (accessed on Jul. 21, 2023).
- International Council on Clean Transportation (ICCT) (2022) European vehicle market statistics 2022/23. https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/01/ICCT-European-Vehicle-Market-Statistics-Pocketbook_2022_23.pdf (accessed on Jul. 21, 2023).
- Joshi, A. (2023) Year in Review: Progress towards Decarbonizing Transport and Near-Zero Emissions, SAE paper 2023-01-0396. <https://doi.org/10.4271/2023-01-0396>
- Kadijk, G., Elstgeest, M., Ligterink, N.E., van der Mark, P.J. (2017) Investigation into a periodic technical inspection (PTI) test method to check for presence and proper functioning of diesel particulate filters in light-duty diesel vehicles, TNO. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:1f0bc66f-6e40-441e-8793-eb3c20b1f63b> (accessed on Jul. 21, 2023).
- Kim, H., Jeong, Y. (2022) Issues on Automobile Emissions in 2022, *Auto Journal*, 44(5), 71-78.
- Kim, Y. (2018) Optimization of Organic Rankine Cycle used for Waste Heat Recovery of Construction Equipment, *Auto Journal*, 40(4), 26-29.
- Korea Energy Agency (KEA) (2022) Vehicle Fuel Economy and CO₂ Emissions. https://bpms.kemco.or.kr:444/transport_2012/pds/month_pds.aspx (accessed on Oct. 9, 2023).
- Korea Government (2018) 2030 Basic Roadmap Amendment to Achieve National Greenhouse Gas Reduction Target. https://www.gihoo.or.kr/portal/kr/images/download/2030gas_loadmap.pdf (accessed on Jul. 21, 2023).
- Korea Government (2021-1) 2030 National Greenhouse Gas Reduction Target (NDC). <https://www.opm.go.kr/flexer/view.do?ftype=pdf&attachNo=110541> (accessed on Jul. 21, 2023).
- Korea Government (2021-2) 2050 Carbon Neutral Scenario. https://www.mofa.go.kr/www/brd/m_4080/download.do?brd_id=235&seq=371662&data_tp=A&file_seq=4 (accessed on Jul. 21, 2023).
- Korea Greenhouse Gas Inventory & Research Center (KGIR) (2023) <http://www.gir.go.kr/home/index.do?menuId=36> (accessed on Jul. 21, 2023).
- Korea Minister of Environment (KMOE) (2022-1) The 3rd (2023-2032) Atmospheric Environment Improvement Comprehensive Plan. http://me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=92&orgCd=&condition.deleteYn=N&seq=8025 (accessed on Jul. 21, 2023).
- Korea Minister of Environment (KMOE) (2022-2) Environmental statistics yearbook of 2021. <https://stat.me.go.kr/portal/compose/surveyBulletinPage.do> (accessed on Jul. 21, 2023).
- Korea Minister of Environment (KMOE) (2022-3) Disclosure of vehicle greenhouse gas management system implementation results of 2016-2020. <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?boardMasterId=1&boardId=1561160&menuId=10525> (accessed on Jul. 21, 2023).
- Korea Minister of Environment (KMOE) (2023) Environmental sta-

- tistics yearbook of 2022. <https://stat.me.go.kr/portal/compose/surveyBulletinPage.do> (accessed on Jul. 21, 2023).
- Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport (KMOLIT) (2023) Vehicle registration number. <http://stat.molit.go.kr/portal/cate/statFileView.do?hRslId=58&hForMld=5> (accessed on Jul. 21, 2023).
- Korea National Air Emission Inventory and Research Center (KNAIR) (2023) <https://www.air.go.kr/capss/emission/sector.do?menuId=30> (accessed on Jul. 21, 2023).
- Korea National Institute of Environmental Research (KNIER) (2002) 2002 Annual Report of Air Quality in Korea. https://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125 (accessed on Oct. 9, 2023).
- Korea Society of Automotive Engineers (KSAE) (2010) Automotive Technology and Outlook, 82pp.
- Korea Transport Emission Management System (KOTEMS) (2023) <https://kotems.or.kr> (accessed on Jul. 21, 2023).
- Kovacs, D., Rezaei, R., Englert, F., Hayduk, C. (2022) High Efficiency HD Hydrogen Combustion Engines: Improvement Potentials for Future Regulations, SAE Technical Paper 2022-01-0477, 2022. <https://doi.org/10.4271/2022-01-0477>
- Lee, H., Woo, Y., Lee, M.J. (2021) The Needs for R&D of Ammonia Combustion Technology for Carbon Neutrality- Part I Background and Economic Feasibility of Expanding the Supply of Fuel Ammonia, Journal of The Korean Society of Combustion, 26(1) 59-83. <https://doi.org/10.15231/jksc.2021.26.1.059>
- Lee, K.-H. (2018) The Recent and Future Trend of an Internal Combustion Engine, Auto Journal, 40(3), 44-47.
- Lee, T., Park, H., Park, J., Jeon, S., Kim, J., Choi, K. (2014) Control Measures for Air Pollutant Emissions from In-use light-Duty Diesel Vehicles Regarding their Emission Control Technologies, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 30(4), 327-338. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2014.30.4.327> (accessed on Sep. 7, 2023).
- Nakai, E., Goto, T., Ezumi, K., Tsumura, Y., Endou, K., Kanda, Y., Uru-shihara, T., Sueoka, M., Hitomi, M. (2019) MAZDA SKY-ACTIV-X 2.0L Gasoline Engine, 28th Aachen Colloquium. <https://www.aachener-kolloquium.de/en/conference-documents/delayed-manuscripts/2019.html> (accessed on Jul. 21, 2023).
- Onorati, R., Zhao, H. (2022) The role of hydrogen for future internal combustion engines, International Journal of Engine Research, 23(4). <https://doi.org/10.1177/146808742210819>
- Park, S. (2019) Global trend of Greenhouse Gas Regulation of Heavy-duty Vehicles, Auto Journal, 41(6), 58-61.
- Plötz, P., Moil, C., Bieker, G., Mock, P., Li, Y. (2020) Real-world usage of plug-in hybrid electric vehicles, fuel consumption, electric driving, and CO₂ emissions, White paper, ICCT. <https://theicct.org/publication/real-world-phev-use-jun22/> (accessed on Jul. 21, 2023).
- Song, H.-H. (2021) Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions for Light-duty Vehicles in South Korea, Auto Journal 43(5), 17-22.
- Yeo, M.J., Kim, Y.P. (2019) Trends of the PM₁₀ Concentrations and High PM₁₀ Concentration Cases in Korea, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 35(2), 249-264. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.2.249> (accessed on Sep. 7, 2023).
- US Environmental Protection Agency (US EPA) (2023) <https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/final-rule-and-related-materials-control-air-pollution> (accessed on Jul. 21, 2023).

Authors Information

- 김홍석 (한국기계연구원 모빌리티동력연구실 책임연구원)
(hongsuk@kimm.re.kr)
- 정용일 (녹색교통운동 이사장)
(yjeong-kimm@hanmail.net)