

디젤 엔진 배기가스 실시간 현장 PM 모니터링 센서 최적화

한 정 윤¹⁾, 유 지 형^{**1)}

한양대학교 미래자동차공학과(미래자동차-Sw융합전공)

In-situ vehicular soot sensor optimization based on quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy

Jeong Woon Han¹⁾, Jihyung Yoo^{**1)}

Department of Automotive Engineering (Automotive-Computer Convergence), Hanyang University, 222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul, Republic of Korea

Key words : Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy (쿼츠-향상 광음향 분광법), Diesel emission sensing (디젤 배기 검출), Real-time diagnostics (실시간 진단), In-vehicle testing (차량 실험), Particulate matter(입자상 물질)

* 이 성과는 2021년도 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 (NRF-2021K1A3A9A05095928) 및 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원(P0017120, 2025년 산업혁신인재성장지원사업)의 지원을 받아 수행된 연구임

** 교신저자: 유지형, E-mail: jihyungyoo@hanyang.ac.kr

대기오염은 인류의 건강과 삶의 질에 중대한 악영향을 미치는 핵심 환경 문제다. 차량 배기가스에는 NO_x, SO_x, CO, CO₂, 입자상물질(PM) 등 다양한 성분이 포함되며, 특히 디젤 엔진 배출의 주요 PM인 그을음(soot)은 다양한 크기로 공기 중에 방출되어 흡입 시 폐암 등 질병을 유발하고 도시 스모그와 기계 장치의 노후화를 촉진한다. 이에 유럽(Euro), 미국(Tier) 등에서 엄격한 규제를 시행하고 있으며, 논의 중인 Euro 7은 비배기 PM까지 규제 범위를 넓히는 추세다. 이러한 상황에서 차량으로부터 배출되는 PM을 보다 정확하고 유연하게 측정할 수 있는 모니터링 시스템의 필요성이 커지고 있다. 본 논문은 배기가스 내 soot을 직접·실시간으로 측정하는 센서의 불확실성과 SNR을 개선하여 범용성과 정확도를 높이는 것을 목표로 한다.

soot 모니터링을 위해 중량법, 광흡수, 산란, 소광(소멸) 등 다양한 원리를 활용한 센서들이 개발·사용되어 왔다. 중량법은 사용이 단순하고 직관적이지만 포집 과정에서 손실이 발생할 수 있다. OPC, CPC 등 광학 기반 센서는 높은 정확도를 보이나 작동 범위가 제한적이고 가격·유지보수 측면의 부담이 있다. 소광 방법은 배기가스 중 특정 입자만을 선택적으로 구분하기 어렵거나 입자 크기 영향이 커 신뢰성 확보가 쉽지 않다.

본 연구의 센서는 광흡수 계열인 QEPAS(quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy) 원리에 기반한다. 빛이 입자에 흡수되어 들뜬 뒤 비방사성 이완을 거치는 과정에서, 광원을 음향 수신기의 공진 주파수로 변조하면 해당 주파수의 음파가 생성된다. 이때 음파 세기는 측정 물질의 농도와 광원 세기에 선형적으로 비례하므로 이를 이용해 농도를 정량한다. 이 원리를 통해 광원 세기와 광학 정렬을 조정함으로써 DPF 유무나 다양한 주행 사이클 등 사용자 요구에 맞는 작동 범위를 구현할 잠재력을 갖는다. 또한 물질별 고유 스펙트럼을 활용해 광원 파장을 선택적으로 설정함으로써 혼합 배기가스에서도 목표 물질만을 선택적으로 정량할 수 있다. 압전 효과를 이용하는 QTF는 저렴하고 크기가 작아 소형화 및 유지보수에 유리하다는 장점이 있다.

본 연구에 사용한 QEPAS 센서는 위 원리와 장점을 바탕으로 겨울철 울란바토르의 상용 디젤 차량 배기가스를 대상으로 직접·실시간 측정을 수행하였다. 이후 음향 공진기와 광학 정렬을 최적화해 센서 응답 특성을 개선하고 SNR을 향상시켰다. 더불어 오염 및 온도 변화로 인한 QTF 피로와 공진 주파수 이동을 보정하는 알고리즘을 도입하여 장시간 작동성과 강건성을 확보하였다. 추가적으로 다중 주파수 샘플링을 적용해 해당 알고리즘을 보완하고, 다양한 주행 사이클에 대응할 수 있도록 유동 제어 시스템을 도입하여 불확실성을 개선하였다.