

LPG 차량의 삼원촉매 노후화에 따른 연비 및 배출가스 특성

강민경* · 권석주* · 김기호** · 서영호*[†]

Fuel Efficiency and Emission Characteristics on Aged Three-way Catalyst of LPG Vehicle

Minkyung Kang, Seokjoo Kwon, Kiho Kim and Youngho Seo

Key Words: Aged three-way catalyst(노후화된 삼원촉매), Chassis dynamometer(차대동력계), Driving mode(주행모드), Fuel efficiency(연비), Exhaust emission(배출가스)

Abstract

The LPG vehicles are being operated by commercial purposes generally such as taxis. Most of taxis have a long-mileage and a harsh driving pattern. These properties may accelerate aging of the three-way catalysts much faster than the passenger vehicles. Because of this background, it was analyzed the test result of fuel efficiency and emissions on the LPG-fueled light duty vehicle. It was selected for a LPG vehicle of ULEV level to measure the fuel efficiency and emissions of the aged three-way catalysts. And the aged three-way catalysts which was driven about 300,000km and 550,000km replaced on the test vehicle in consecutive order. As a result, The aged three-way catalysts generally had no effect on fuel efficiency result, and harmful exhaust emissions had been shown to increase in most of the test mode, even though it satisfied the regulation value on most test modes.

1. 서 론

자동차를 운행하는 동안 배출되는 유해 배출가스는 대표적으로 HC(Hydrocarbon), CO(Carbon Monoxide), NOx(Nitrogen Oxide), PM(Particulate Matter) 등이 있으며, 이러한 유해 배출가스는 대기오염 및 지구 온난화를 야기하는 등 다양한 환경 문제의 원인이 되고 있다⁽¹⁾.

각 연료별 자동차의 유해배출가스 특성을 살펴볼 때 디젤 엔진을 사용하는 차량은 실도로 주행시 PM

과 NOx 배출량이 실차 시험(Dynamometer Test) 배출량 대비 크게 증가하는 특성을 가지고 있으며 이러한 특성은 차량이 대형화 및 노후화가 진행될수록 유해배출가스를 더 많이 배출하는 것으로 나타난다⁽²⁾.

한편 가솔린 및 LPG 엔진을 사용하는 차량은 연료를 연소하는 과정에서 삼원촉매의 효율을 고려하여 공기와 연료의 혼합비를 이론공연비에 가깝도록 분사하게 된다. 하지만 실제 연료의 특성상 충분히 균질한 혼합이 이루어지지 않아 이론적인 양보다 과잉 상태로 연료를 분사하게 됨으로써 불완전연소가 이루어지기 때문에 다른 유해배출가스에 대비하여 CO가 상대적으로 많이 배출되는 특성을 가지고 있다⁽³⁾.

국립환경과학원에서 2012년 집계한 자료에 의하면 국내에서 배출되는 대기오염물질 중 CO는 전체 배출량의 약 18.6%를 차지하고 있으며, 이 중 자동차에 의한 도로이동 오염원이 총 배출량의 63%로 가장 높

(Received: 18 July 2016, Received in revised form: 12 Sep 2016, Accepted: 19 Sep 2016)

*자동차부품연구원

**한국석유관리원

[†]책임저자, 회원, 자동차부품연구원

E-mail : yhseo@katech.re.kr

TEL : (041)559-3177 FAX : (041)559-3235

은 비율을 나타내고 있다. 유럽 또한 우리나라와 비슷한 상황이며, 2012년 기준으로 자동차에 의한 CO 배출량이 전체 CO 배출량에 비교하여 약 25%의 높은 비율을 차지한다⁽⁴⁾.

상대적으로 CO 배출가스를 많이 배출하는 도로이동 오염원인 가솔린 및 LPG 차량 중 국내에 보급된 LPG 차량은 가솔린 차량 대비 등록대수가 상대적으로 적지만 택시와 같은 영업용으로 운행되는 경우가 대부분이어서 개인 승용자동차 대비 약 4배 이상 운행거리가 길고⁽⁵⁾ 급가감속 등 주행패턴이 열악한 특성을 가지고 있다.

이러한 특성으로 인하여 개인 승용차량에 비하여 삼원촉매의 노후화가 빠르게 진행될 수 있으며, 내구보증기간을 초과하여 열화된 상태로 주행하는 경우가 많을 것으로 예상된다.

현재 운행하는 노후 LPG 차량의 삼원촉매가 열화된 경우 배압이 높아져 배출가스 증가 및 연비 저하의 결과를 초래할 수 있으며, 이러한 특성으로 신차상태 삼원촉매의 배출가스 수준 대비 배출가스 보증기간이 지난 노후화된 촉매 2종의 노후화에 따른 성능 저하 또는 대기에 미치는 영향 등을 배출가스 성능 특성 시험을 통하여 분석하고자 하였다.

2. 연구 및 방법

2.1 시험 장치 및 방법

본 연구의 실차 시험은 실내에서 실외와 같은 도로 조건을 모사하여 차량의 연비 및 배출가스 특성에 대한 평가를 실시하기 위하여 자동차부품연구원에서 보유중인 차대동력계(AVL 社, 48inch Single roll, 4WD)와 배기측정시스템(HORIBA 社, MEXA-7400LE)을

Table 1 Specifications of Chassis Dynamometer

Max. Generation power	Permanent : 153 kW from 92 km/h to 200 km/h ×2SET
	10S : 258 kW from 92 km/h to 146 km/h
Inertia Range	2WD : 400~3,500 kg
	4WD : 800~5,400 kg
Max. Speed	200 km/h Max.
Accuracy	Speed : 0.01% FS
	Torque : 0.1% FS
	Repeatability : 0.02 @ FS
Cooling Fan	Variable Speed

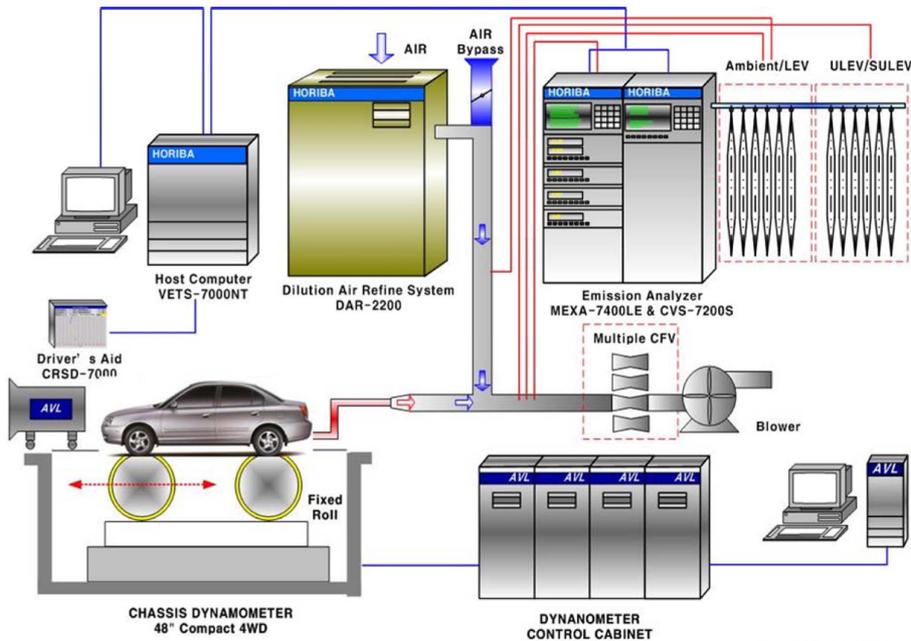


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

사용하였다.

차대동력계의 제원은 Table 1과 같으며, 실차시험을 위한 장비는 차대동력계, 정용량 시료채취 장치(CVS, Constant Volume Sampler), 임계유량 벤츄리(CFV, Critical Flow Venturi), 배기측정 시스템 등으로 Fig. 1과 같이 구성된다.

실차 시험은 차량의 시험 중량 및 도로 부하 값을 차대동력계에 입력한 뒤 차대동력계 위에 시험 차량을 설치하여 차량의 주행속도를 제어하며 주행시험 모드를 수행한다.

시험을 수행하는 동안 정용량 시료채취장치(CVS)는 블로워를 이용하여 자동차 배출가스를 외부 공기와 희석하여 임계유량 벤츄리(CFV)를 통과시킨다. 임계유량 벤츄리를 통과하는 배출가스는 특정 속도에 도달하면 유량이 더 이상 증가하지 않으며 일정한 유량이 흐르게 되고 이때 희석 배출가스를 샘플링하여 Bag에 저장 후 배기가스 분석계에서 농도를 측정하게 되며 CVS 터널의 유량과 희석비를 이용하여 중량 단위로 배출가스 결과를 산출하였다. 또한 Carbon Balance 법을 이용하여 각 시험모드의 연비를 산출하였다.

2.2 시험 차량 및 삼원촉매

노후화 된 삼원촉매의 연비 및 배출가스를 측정하고 분석하기 위하여 Fig. 2와 같이 국내에서 생산 및 판매되고 있는 신차 상태의 촉매를 장착한 ULEV(Ultra-low emission vehicle) 수준의 2L급 LPG 차량을 선정하였다. 시험 차량은 약 5만km를 주행하였으며, 보증기간 내에 충분한 길들이기가 이루어져 배출가스 배출량 및 연비가 안정화된 차량(신품 촉매)이다.



Fig. 2 Photograph of test vehicle on the chassis dynamometer

Table 2 Specification of Test Vehicle

Fuel Type	LPG
Engine Type	L4NA
Engine Displacement	1,999cc
Model Year	2013
Odometer	53,164 km
Curb Weight	1,465 kg
MAX. Rated Power	151 ps@6200 rpm
MAX. Torque	19.8 kg·m@4200 rpm



Fig. 3 Photographs of aged catalyts

실차 시험을 수행하는 동안 시험 차량은 Fig. 2와 같이 고정되어 있으며, 차량의 자세한 제원은 Table 2에 나타냈다.

노후화된 촉매는 선정된 시험 차량과 호환이 가능한 동일 모델의 촉매로써 주행거리가 배출가스 보증기간인 16만km를 충분히 넘은 약 30만km 및 약 55만km를 주행한 삼원촉매 2종을 수배하였다. 약 55만km를 주행한 노후 삼원촉매의 MCC(Manifold Catalytic Converter), UCC (Underbody Catalytic Converter) 실물사진을 각각 Fig. 3에 나타내었다.

2.3 주행시험모드

본 연구에서는 LPG 차량의 노후화에 따른 연비 및 배출가스 특성을 분석하기 위하여, 5만km를 주행한 신차 상태인 LPG 승용차량의 실차시험을 수행하여 연비 및 CO₂ 그리고 유해배출가스인 HC, CO, NO_x 배출가스 결과를 분석하였다.

이 후 동일한 차량에 노후 삼원촉매 2종을 순차적

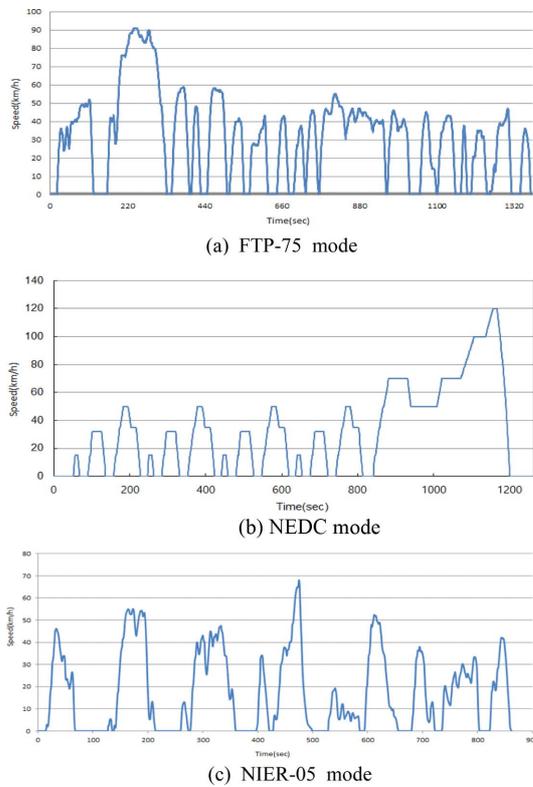


Fig. 4 Descriptions of vehicle driving test modes

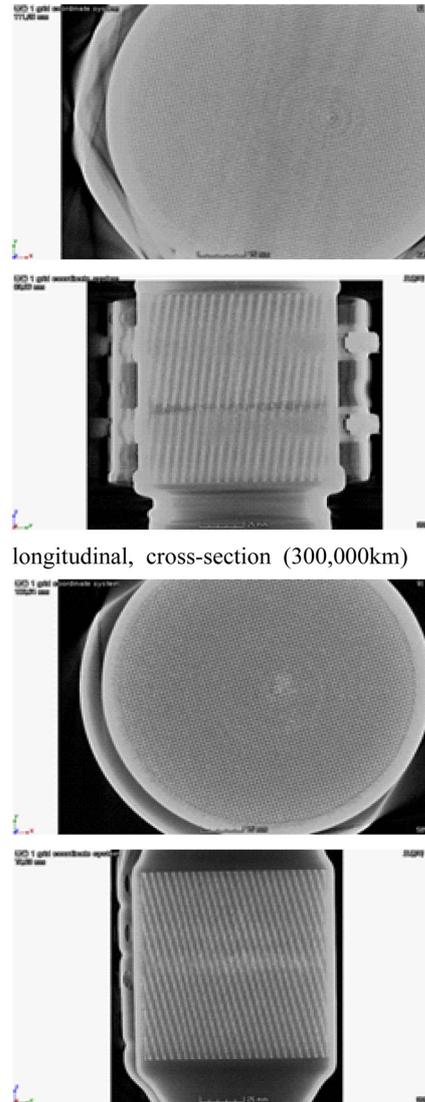
으로 장착하여 동일한 조건의 연비 및 유해배출가스 실차 시험을 수행하였으며 신차 상태의 삼원촉매 배출가스 성능 결과와 비교분석하였다.

이 때 배출가스 분석을 위하여 미국 시가지 주행 특성을 모사하였으며 가솔린 및 LPG 차량의 배출가스 규제모드인 FTP-75 모드, 유럽의 시가지 주행 특성 및 고속주행특성을 모사하였으며 디젤 차량의 배출가스 규제모드인 NEDC 모드, 국립환경과학원에서 도심권의 주행상태를 고려해 만든 NIER-05 모드⁽⁶⁾ 총 3가지 시험모드를 수행하였다. 본 연구에서 수행한 3가지 주행시험모드의 속도 프로파일은 Fig. 4와 같다.

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 노후 삼원촉매의 상태 분석

본 연구를 위하여 선정된 노후 삼원촉매 2종의 크랙 유무 등을 확인하기 위하여 CT 단층 촬영을 수행



(a) longitudinal, cross-section (300,000km)

(b) longitudinal, cross-section (550,000km)

Fig. 5 CT results of aged catalysts

하였으며, 각각의 CT 단층 촬영 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

그 결과 주행거리와 관계없이 비교적 균일한 담체 형상을 유지하였으며, 크랙 등의 균열은 없는 것으로 확인되었다.

3.2 노후 삼원촉매의 연비 및 배출가스

신품상태의 삼원촉매 대비 노후 삼원촉매의 연비 및 배출가스 분석을 위하여 신차 상태의 동일한 시

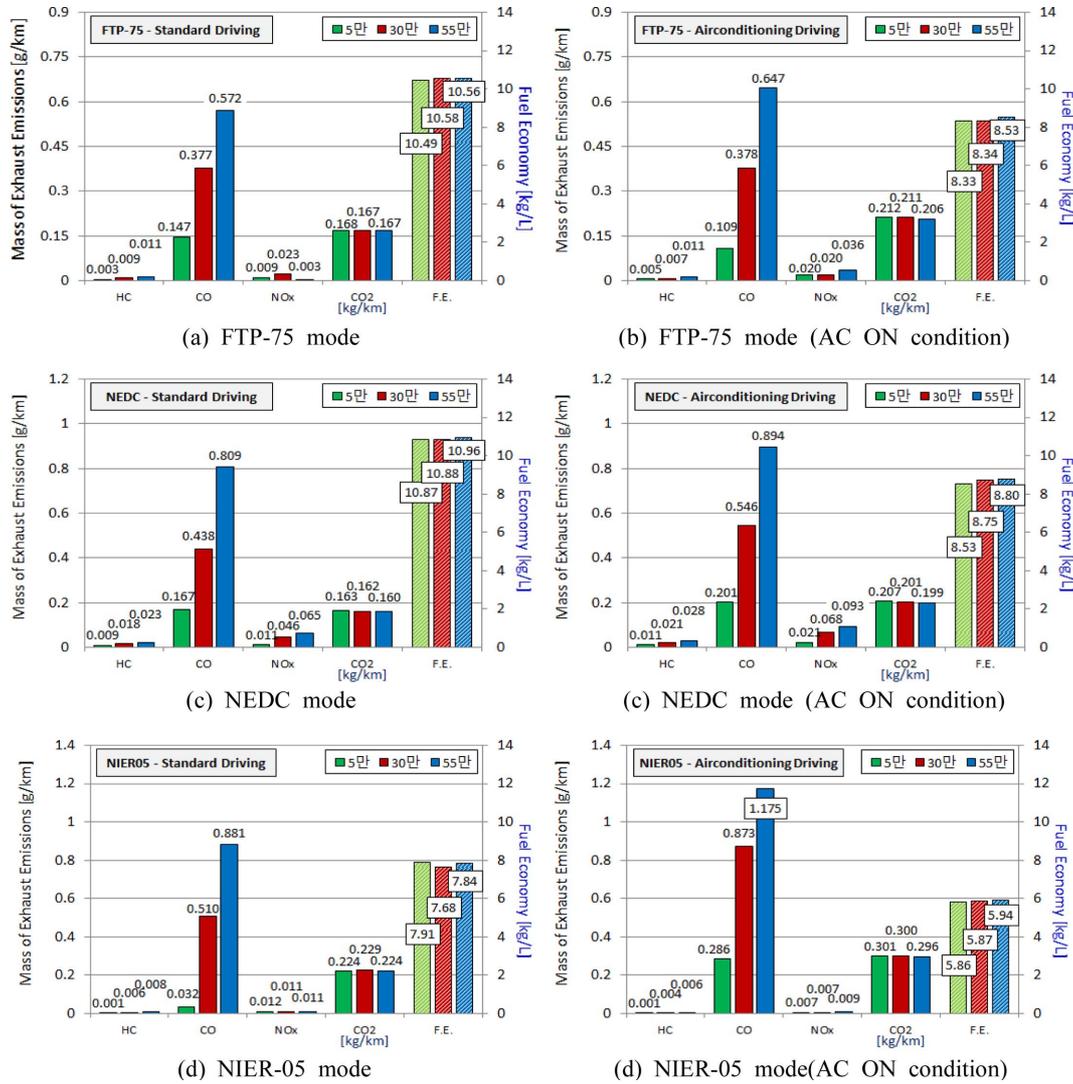


Fig. 6 F.E. and exhaust emissions of test modes

험 차량에 촉매를 순차적으로 교체하여 FTP-75, NEDC, NIER-05 등의 모드시험을 에어컨을 켜지 않은 기본조건(STD, Standard Driving)으로 수행하였다. 추가적으로 여름철 운행 패턴을 모사하기 위하여 시험 모드를 주행하는 동안 에어컨을 작동하여 시험을 수행하는 AC ON(Air Conditioning On) 조건을 수행하였으며, 각 주행모드 및 조건별 시험결과는 Fig. 6에 나타냈다.

3.2.1 노후 삼원촉매의 연비

Figure 6에서 노후 삼원촉매의 연비 수준을 나타낸

바와 같이 삼원촉매의 노후화에 따른 연비 차이는 크게 나타나지 않는 것으로 보인다. 신차 상태의 삼원촉매 대비 노후 삼원촉매 2종의 연비 수준은 시험모드별로 약 3% 미만의 차이를 보이며 거의 비슷한 수준으로 나타났다. 또한 삼원촉매별로 에어컨을 켜지 않은 기본 조건과 AC ON 조건의 연비 수준을 비교한 결과 FTP-75 모드 및 NEDC 모드는 에어컨의 부하로 약 20% 수준 저하되는 것으로 나타났으며, NIER-05 모드는 약 25% 수준 저하되는 것으로 나타났다. 이때 신차와 노후 삼원촉매의 연비 저하 수준도 거의 비슷하게 나타났다. 이는 선행 연구결과에서

도 나타낸 바와 같이 삼원촉매의 노후화는 연비에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다⁽⁷⁾.

3.2.2 노후 삼원촉매의 배출가스

촉매별로 주행시험모드를 수행하여 배출된 유해배출가스의 배출량을 비교한 결과 LPG 차량의 특성상 삼원촉매를 거치면서 대부분의 모드에서 HC 배출량은 거의 미미한 수준으로 배출되었다.

FTP-75 모드 기준으로 NOx 배출 규제치는 0.044 g/km이지만 NEDC 모드에서 55만km 이상 노후 삼원촉매의 NOx 배출량이 0.065 g/km로 규제치를 미미하게 초과하는 것으로 나타났다. 이는 미국의 시가지 주행특성을 반영한 FTP-75 모드와 달리 NEDC 모드는 후반부 고속 영역 특성 구간이 포함되기 때문에 NOx 배출량이 증가하는 것으로 추정된다.

주행모드를 수행하기 전 20~30°C 조건에서 12시간 이상 상온주차를 시킨 뒤 시험을 수행하는 FTP-75 및 NEDC 모드는 저온 시동시 농후한 연료공급으로 인하여 신품 삼원촉매의 CO 배출량이 많은 비중을 차지하는 것으로 나타난다. 그로인해 30만km, 55만km 삼원촉매의 CO 배출량이 각각 1.6배, 4배 수준으로 수치상으로 크게 증가하지 않는 것으로 나타난다.

참고로 기 수행된 연구 중 삼원촉매의 기술적 기능을 검토하기 위하여 노후된 LPG 차량에 촉매를 제거한 상태로 차량의 배출가스를 측정할 때 있으며, 선행 연구 결과에 따라 삼원촉매가 열화 되어 기능을 상실했을 때 최대 엔진 배출가스는 HC와 CO는 평균 약 1.3배 NOx는 약 5.3배로 배출가스 규제치를 월등히 초과하는 것으로 나타났다⁽⁸⁾.

한편 NIER-05 모드는 열간 시험모드로 냉각수, 엔진오일, 삼원촉매 등 부속기기가 이미 활성화 되어있는 상태에서 시험을 진행하여 신품 삼원촉매의 CO 배출량이 극히 미미한 수준으로 나타나지만⁽⁹⁾ 노후 삼원촉매는 열화로 인한 배출가스 정화효율이 낮은 상태에서 NIER-05 모드의 급가감속 및 열악한 주행 패턴으로 30만km, 55만km 삼원촉매의 CO 배출량은 약 15배, 26.5배 수준까지 증가한다.

이는 시험 모드의 가혹도와 가감속 특성에 따라 노후화된 촉매의 경우 유해 배출가스 농도가 급격하게 변할 수 있다는 점을 의미한다. 하지만 3가지 시험모드 및 조건에 대하여 삼원촉매의 노후화에 관계없

이 FTP-75 모드 기준의 CO 배출량 규제치인 1.31 g/km을 넘지 않는 것으로 나타났다. 시험용으로 선정한 노후 삼원촉매 2종은 배출가스 보증기간이 지났지만 열화 및 손상이 없는 것으로 판단되며, 촉매의 노후화에 따라 배출가스는 증가하지만 인증 규제치는 충분히 만족하는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 삼원촉매의 노후화에 따른 연비 및 배출가스가 대기환경에 미칠 수 있는 영향도를 분석하고자 노후화에 따른 삼원촉매를 시험모드 및 조건별로 분석하였다.

(1) 다양한 모드 및 조건에 대한 차량의 성능시험을 수행한 결과 배출가스 보증기간(16만km)을 충분히 지난 약 30만km, 55만km 수준의 노후화된 삼원촉매는 신품 삼원촉매 대비 연비의 차이가 거의 없었으며, 에어컨을 작동하지 않은 기본 조건 대비 AC ON 조건에서 에어컨 부하로 저감되는 연비의 차이도 비슷하게 나타났다. 삼원촉매의 노후화는 연비의 영향도에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.

(2) 노후 삼원촉매의 유해 배출가스는 FTP-75 모드에서 전반적으로 적게 배출되었다. NOx 배출량은 NEDC 모드에서 미미하게 초과하는 것으로 나타났으며, AC ON 조건에서는 55만km 촉매는 규제치 대비 약 2배 많이 배출하였다. 이는 LPG 차량의 배출가스 규제는 FTP-75 모드로 시가지 주행 특성을 반영한 FTP-75 모드특성과 달리 NEDC의 경우 후반부 고속 영역 특성 구간에서 고부하 영향으로 노후 삼원촉매의 NOx 배출량이 규제치를 미미하게 초과하는 것으로 추정된다. NIER-05 모드는 가감속이 심하고 저속 고부하의 열악한 특성을 가지고 있어 촉매가 노후됨에 따라 CO 배출량 증가가 두드러지는 특성을 나타낸다.

(3) LPG 차량의 연소 특성상 가장 큰 비중을 차지하는 CO 배출량은 삼원촉매의 노후화에 따라 신품 촉매 대비 증가하는 것으로 나타나, 대부분의 시험모드에서 규제치를 만족하는 것으로 나타났다.

(4) 본 연구에서 시험을 수행한 삼원촉매는 주행거리가 배출가스 보증기간을 약 2배 이상 초과한 것을

감안할 때 노후화에 따라 HC는 약간 증가하는 것으로 보이나 워낙 적은 양이라서 무시할 수준이다. CO 배출량은 신품축매 대비 약 2~4배 이상 증가하였지만 대부분의 모드에서 축매의 상태가 비교적 양호하여 배출가스 허용기준을 만족하는 것으로 나타났다.

참고문헌

- (1) EEA, "European Union Emission Inventory Report 1990~2012 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP)", EEA Technical Report No. 12/2014.
- (2) 서울연구원, "서울시 운행 경유차의 매연 배출평가와 관리 방안", 서울연구원 정책리포트215, 2016, pp. 10-11.
- (3) J. Jang, Y. Lee, O. Kwon, Y. Woo, C. Cho, G. Kim, Y. Pyo, M. Lee, "Exhaust Gas Emission and Particulate Matter (PM) from Gasoline, LPG and Diesel Vehicle Using Different Engine Oil" Transactions of KSAE, 2016.
- (4) 국립환경과학원, "대기오염물질 배출량 2010 보고서", NIER-GP2012-318, 2012 National Institute of Environmental Research, National Air Pollutants Emission 2010, NIER-GP 2012-318.
- (5) 교통안전공단 "2009년도 자동차 주행거리 실태조사", 정책연구 2010-07, pp. 65-68.
- (6) 이대엽, "택시 주행조건과 유사한 표준시험모드에서 유종간 연비 및 배출가스 특성 비교시험", 2011.
- (7) S. Kwon, S. Park, E. Kang, S. Park, Y. Seo, "LPG Vehicle's Exhaust Emission Characteristics according to Aged After-treatment system" Transactions of KSAE, 2015.
- (8) 환경부, "운행차 배출가스저감 시범사업 효과성 평가 연구", 2014, pp. 24-25.
- (9) J. Park, M. Eom, S. Kim, J. Kil, G. Kang, "Assessment of Emission Characteristics in Cold and Hot Driving Conditions" Transactions of ILASS-Korea 2014.