Transactions of KSAE, Vol. 25, No. 6, pp.711-718 (2017)

Check for updates

Copyright © 2017 KSAE / 151-07
pISSN 1225-6382 / eISSN 2234-0149
DOI https://doi.org/10.7467/KSAE.2017.25.6.711

125cc 이륜자동차의 배출가스와 삼원촉매 특성에 관한 연구

이 상 호[*1)] · 이 용 규[1)] · 정 진 석[2)]

한국기계연구원 그린동력실[1)] · 대림자동차 이륜R&D센터[2)]

Study on Exhaust Gases and Three Way Catalyst of a 125cc Motorcycle

Sangho Lee[*1)] • Yonggyu Lee[1)] • Jin Seok Choung[2)]

[1)]Department of Engine Research, Korea Institute of Machinery & Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea
[2)]Motorcycle Research & Development Center, DAELIM MOTOR CO. LTD., 602 Gongdan-ro, Seongsan-gu, Changwon-si, Gyeongnam 51576, Korea
(Received 7 July 2017 / Revised 2 August 2017 / Accepted 5 September 2017)

Abstract : The current emission control system of a 125 cc motorcycle were investigated to find issues in the development of the three-way catalyst(TWC). Emissions and TWC performance of the 125 cc motorcycle were analyzed using world motorcycle test cycle(WMTC). In addition, the conversion efficiencies and light-off temperature(LOT) of the TWC were measured in a micro reactor. EURO-4 regulation was met by the 125 cc motorcycle. NOx and CO emissions, in particular, were lower than Euro-5 regulation. However, further reduction in total hydrocarbons(THC) emission was required to meet EURO-5 regulation considering deterioration factors. Accurate lambda control and TWC improvement are required to meet EURO-5 regulation. In WMTC mode, the 125 cc motorcycle was operated at a rich condition for 64 % of the operating time. Rich condition is adverse to THC conversion. C_3H_6, a representative of THC, showed low conversion and high LOT when operated at a rich condition. Therefore, Lambda control and TWC must be modified to improve THC conversion at a rich condition.

Key words : Three way catalyst(삼원촉매), Motorcycle(이륜차), Exhaust emissions(배출가스), Air to fuel ratio characteristic(공연비 특성), EURO-4(유로-4)

Nomenclature

EUDC	: european driving cycle
WMTC	: world motorcycle test cycle
THC	: total hydrocarbon
OSC	: oxygen storage capacity
λ	: lambda
GHSV	: gas hourly space velocity
LOT	: light-off temperature
PGM	: platinum group metal

*Corresponding author, E-mail: sangho86@kimm.re.kr

1. 서 론

이륜차는 승용차보다 차량수가 적지만 많은 오염물질을 배출하고 있다. 국내에 등록된 이륜차 수는 약 216만대로 등록된 자동차 대수의 10 %를 차지하고 있다. 반면, 이륜차에서 배출되는 오염물질은 수송부문 배출량의 25~35 %를 차지한다.[1)] 이는 승용차에 비해 이륜차가 5배 이상의 대기오염물질을 배출하는 것과 같다.

이륜차에서 배출되는 오염물질을 줄이기 위하여 배출규제가 강화되고 실도로 주행패턴을 반영한 주행모드가 도입되었다. Table 1은 이륜차동차의 배기

Table 1 Emission regulation

	NOx (g/km)	CO (g/km)	THC (g/km)
EURO-3	0.15	2.00	0.30
EURO-4	0.08	1.14	0.17
EURO-5	0.06	1.00	0.10

가스 배출허용 기준을 나타낸다. 2017년 1월 1일부터 국내 이륜차 배출 규제가 EURO-4로 강화되었으며, 2020년에는 EURO-5가 도입될 예정이다. 주행모드도 ECE40+EUDC(European Driving Cycle)모드에서 실도로 주행패턴을 반영한 WMTC(World Motorcycle Test Cycle)모드가 도입되었다. 배기규제 강화와 WMTC 모드의 도입으로 이륜차의 배기가스 저감기술의 향상이 필요하게 되었다.

이륜차에는 발생하는 CO, NOx 및 THC(Total hydrocarbon)를 제거하기 위하여 삼원촉매(Three way catalyst)가 적용되어 있다. 삼원촉매는 귀금속인 Pt, Pd 및 Rh을 포함하고 있다. 또한, OSC(Oxygen storage capacity)를 가진 희토류 산화물인 CeO_2과 ZrO_2를 사용한다.[2] OSC물질은 CO, THC와 NOx를 동시에 효과적으로 저감하기 위하여 사용한다. $\lambda > 1$인 산소 과잉 조건에서는 산화에 의해 CO와 THC의 저감이 효과적으로 이루어진다. 그러나, $\lambda < 1$인 산소 희박 조건에서는 CO와 THC의 산화가 잘 이루어지지 않는다. 반면, NOx는 산소 희박조건에서 CO 및 THC에 의해 환원된다. OSC 물질은 $\lambda > 1$인 조건에서 산소를 저장하여 $\lambda < 1$조건에서 CO와 THC의 산화를 돕는다. 따라서 엔진에서는 CO, THC와 NOx가 동시에 저감될 수 있도록 λ=1을 기준으로 λ를 섭동하면서 운전하게 된다.

강화된 배기규제를 만족하기 위하여 삼원촉매의 성능이 향상되어야 한다. 삼원촉매의 활성은 PGM (Platinum group metal), 조촉매 및 담체를 조정하여 향상이 가능하다. PGM 양이 증가하면 LOT(Light-off temperature)가 감소하고 전환율이 증가한다.[3] 하지만, PGM은 삼원촉매의 가격의 대부분을 차지하여 가격을 고려하여 조성과 양이 선정되어야 한다. 이에 PGM 사용량을 감소하는 방안으로 Zone coating도 활용되고 있다. Zone coating은 삼원촉매 입구단의 PGM 밀도를 증가시켜 LOT의 감소가 가능하다.[4,5] 조촉매는 La, Y, Ba 및 Nd 등을 삼원촉매에 적용하여 LOT를 저감한 연구결과가 있다. Rh/ZrO_2에 Y와 La이 첨가된 촉매는 수증기 개질반응을 통한 C_3H_6전환에 우수하였다.[6,7] 또한, CeO_2-ZrO_2에 Y와 La를 동시에 첨가한 촉매가 La과 Zr만을 첨가한 촉매보다 낮은 LOT를 보였다.[8] Ba의 도핑은 CeO_2-ZrO_2의 균일성과 산소의 이동성을 향상시켜 촉매의 활성과 Thermal aging에 내성이 증가하였다.[9-12] Nd의 도핑은 OSC를 증가시키고 LOT를 감소시켰다.[13] 또한, 담체의 형상 및 크기를 조정하여서도 삼원촉매의 성능향상이 가능하다. 담체의 셀 밀도나 크기를 증가시키면 반응물과 촉매의 접촉이 증가해 전환율이 향상된다. Metal mesh와 Metal foam 형태의 담체를 사용하면 물질전달특성이 향상된다. 하지만, 조촉매는 엔진의 λ제어에 영향을 받으며, 담체는 차압 증가와 출력 감소를 고려하여 선정하여야 한다. 따라서, 배기특성을 고려하여 이륜차에 적합한 삼원촉매의 개선방안이 필요하다.

본 논문에서는 125 cc 이륜자동차의 배기특성을 파악하기 위해 λ제어, 배기가스 조성 및 유량을 분석하였다. 또한, 125 cc 이륜차에 적용된 삼원촉매의 LOT와 전환율을 파악하였으며, 최종적으로 WHTC 모드에서 배출량을 바탕으로 향후 이륜차용 삼원촉매의 개발방향에 대해서 논의하고자 한다.

2. 실험 방법

Fig. 1은 삼원촉매 평가장치 개요도를 나타낸다. 배출가스 성분을 모사하기 위한 CO, C_3H_6, NO, N_2, CO_2, O_2 가스가 구비되어 있으며, Mass flow controller를 이용하여 이들 가스의 유량을 제어하였다. λ 섭동을 모사하기 위해서 Lean 조건과 Rich 조건의 가스를 공압 밸브를 이용하여 일정간격으로 반응기로 공급하였다. Lean 조건과 Rich 조건의 가스조성은 Table 2에 나타내었다. 물은 정량 펌프를 통해 공급되었고 증발기를 거쳐 수증기로 반응기에 공급되었다. 수증기가 반응기로 공급되는 경로에는 응축을 방지하기 위해 전기히터로 가열하였다. 반응기에는 125 cc 이륜차에 사용되는 200 CPI(Cell per inch) 메탈 허니컴 삼원촉매를 Φ 25.4 mm × 20.0 mm 크기로 가공하여 탑재하였다. 반응기는 설치된 전기로를 이용하여 온도를 약 600 °C까지 높일 수 있

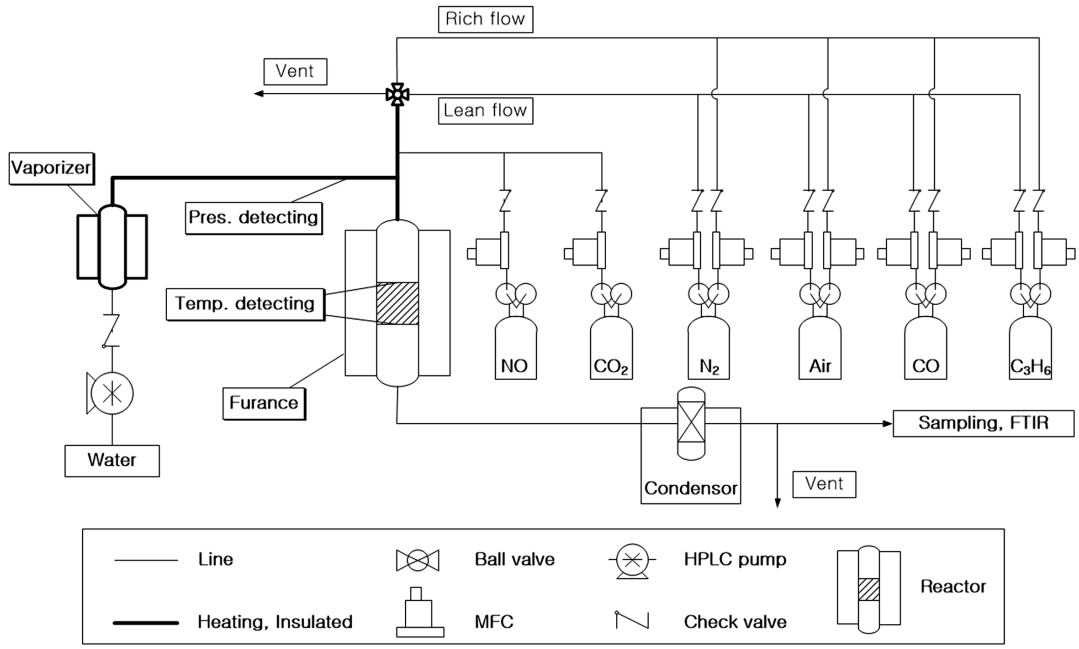


Fig. 1 Schematics of micro-reactor for three way catalyst

Table 2 Gas compositions of lean and rich conditions for micro-reactor test

	O_2 (%)	CO_2 (%)	H_2O (%)	NO (ppm)	CO (ppm)	C_3H_6 (ppm)
Lean	0.21	5	10	300	2,000	1,000
Rich	1.30					

도록 설계되었다. 전기로의 온도는 촉매 상하단에 설치된 열전대를 이용하여 제어하였다. 반응기를 통과한 가스는 H_2O trap에서 수분을 응축시킨 후 FTIR(Fourier transform infrared spectroscopy, MKS Instruments Inc.)에서 샘플링 및 분석되도록 구성하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 이륜자동차의 λ제어 및 배기가스 특성

Table 3은 125 cc 이륜차의 WMTC모드 운전 중 λ 영역별 운전시간의 분포, 가스 조성 및 삼원촉매에서의 공간속도이다. 배기가스 조성은 스트로크 당 연료 분사량과 λ값을 바탕으로 CO_2, H_2O 및 O_2 농도를 계산하였다. CO, NOx 및 THC는 수백~수천 ppm 수준으로 발생하여 계산에서 제외하였다. 또한, 연

Table 3 λ distribution and exhaust compositions of 125 cc motorcycle during the WMTC mode

	Percent (%)	CO_2 (%)	H_2O (%)	O_2 (%)	GHSV (h^{-1})
λ<0.85	0.57	15.04	15.51	0	29,000
0.85≤λ<0.95	10.41	15.15	15.58	0	25,000
0.95≤λ<0.992	53.11	15.22	15.62	0	57,000
0.992≤λ<1.05	23.82	15.04	15.43	0.32	49,000
1.05≤λ<1.75	2.10	12.74	13.06	4.10	15,000
λ≥1.75	9.99	8.88	9.11	10.43	10,000

소에 참여하지 않은 산소가 있어 실제 산소농도는 계산 값보다 높을 것이다. 125 cc 이륜차는 λ가 1±0.05인 영역에서 80 %이상 운전되었다. 반면, λ< 0.992인 조건이 64.09 %를 차지해 Rich한 영역의 비중이 높았다. 실험에 사용된 125 cc 이륜차에는 Φ45 mm × 70 mm인 삼원촉매 2개가 적용되어있다. 삼원촉매에서의 공간속도(Gas hourly space velocity, GHSV)를 배기유량과 촉매 부피를 바탕으로 계산하였다. 125 cc 이륜차의 삼원촉매는 GHSV는 10,000h^{-1}에서 57,000h^{-1}사이에서 운전되었다. 주로 운전된 λ가 1±0.05인 영역에서는 GHSV가 49,000h^{-1}에서 57,000h^{-1}사이 값을 갖는 것을 확인하였다.

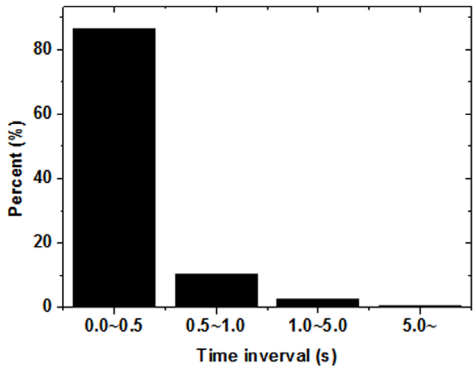


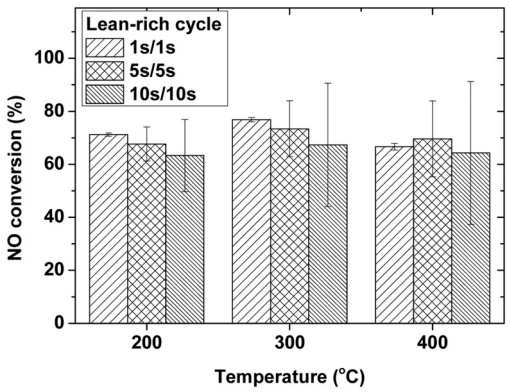
Fig. 2 λ change interval distribution of 125 cc motorcycle during the WMTC mode

Fig. 2는 125 cc 이륜차의 WMTC모드에서의 λ가 섭동하는 시간 간격의 분포를 나타낸다. 엔진에서는 삼원촉매의 성능향상을 위해서 λ=1을 기준으로 Lean-rich 조건을 주기적으로 섭동한다. 125 cc 이륜차는 주로 Lean-rich 조건이 0.5초 이하에서 섭동하는 것을 확인하였다. 그러나, 감속구간에서는 연료공급이 중단되고 1초 이상 Lean조건(λ≥1)을 유지하는 것을 확인하였다. 이와 같은 배기가스의 조성, 유량 및 섭동은 삼원촉매의 성능에 영향을 미친다. 따라서 삼원촉매의 설계 및 평가에 배기가스의 조성, 공간속도, 섭동이 고려되어야 한다.

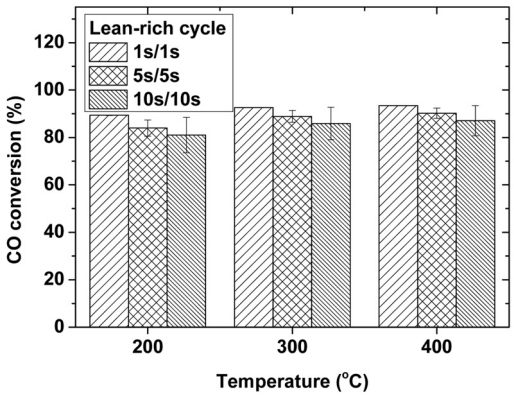
3.2 이륜자동차의 삼원촉매 특성

Fig. 3은 Lean-rich 조건에서 Lean과 Rich 조건의 섭동 간격에 따른 NO 전환율의 평균과 변동 폭을 나타냈다. Lean-rich 섭동을 1초, 5초, 10초 간격으로 변화하였다. NO의 전환율은 Lean-rich 조건의 변화에 따라 사인파형태로 나타났다. 또한, 반응온도가 증가할수록 변동 폭도 커지는 경향을 보였다. 이는 낮은 온도에서는 NO 흡장량이 높아 Lean-rich 섭동 간격이 길어도 Lean 조건에서 환원되지 않은 NO가 흡장되었다가 Rich 조건에서 환원된 결과로 보인다.

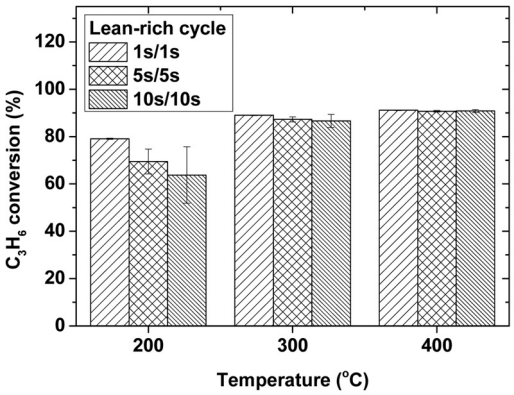
CO와 C_3H_6 전환도 Lean-rich 섭동 간격이 짧을수록 유리하였다. 변동 폭은 NO와 비교하였을 때 CO와 C_3H_6는 섭동 간격의 영향이 적었다. 이는 삼원촉매의 OSC 물질이 갖는 특성에 의한 것이다. OSC물질은 Lean 조건에서 산소 이온을 저장하고 Rich 조건에서 CO와 THC의 산화반응에 공급한다. 특히, OSC



(a)



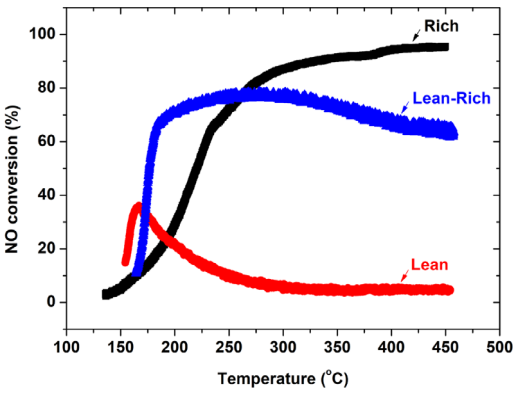
(b)



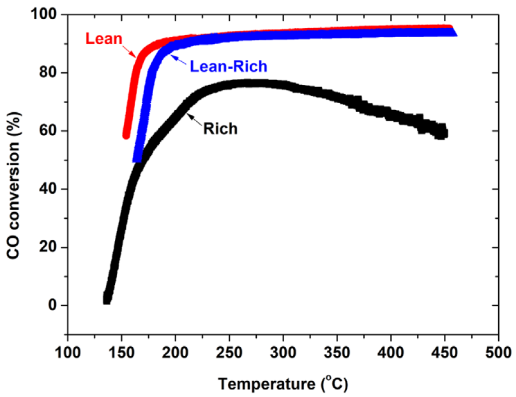
(c)

Fig. 3 NO conversions with various lean-rich time intervals (a) NO conversion (b) CO conversion (c) C_3H_6 conversion

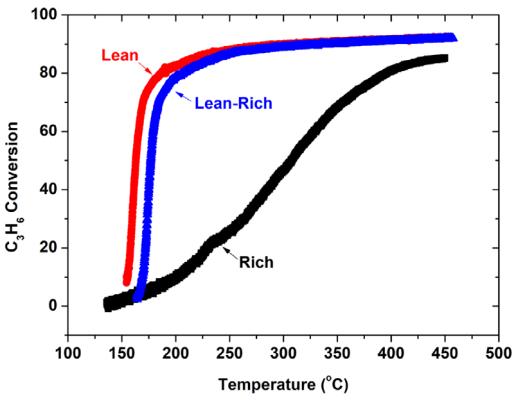
특성을 활용한 섭동을 통해 200 °C의 저온에서 CO와 C_3H_6를 효과적으로 제거가 가능하였다. 3.1절에서 보였듯이 실제 이륜차의 λ 섭동은 0.5초 이내로



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 NO, CO and C_3H_6 conversions at lean, rich and lean-rich conditions (a) NO conversion (b) CO conversion (c) C_3H_6 conversion

제어되고 있다. 촉매평가에서도 섭동 간격이 작을수록 전환율의 변동이 적었다. 따라서, 삼원촉매의 평가를 위해서는 섭동 간격을 최소화되어야 하며,

Table 4 Light-off temperature of NO, CO and C_3H_6 over commercial three way catalyst of motorcycle

		NO	CO	C_3H_6
LOT50 (°C)	Lean	-	<154	163
	Rich	220	169	307
	Lean-rich	176	<164	177
LOT90 (°C)	Lean	-	184	304
	Rich	328	-	-
	Lean-rich	-	210	334

본 연구에서는 Lean-rich 섭동 간격을 1초로 설정하여 삼원촉매의 전환율과 LOT를 측정하였다.

Fig. 4와 Table 4에는 Lean, Rich, Lean-rich조건에서 삼원촉매의 NO, CO 및 C_3H_6의 전환율과 LOT를 각각 나타내었다. NO 전환율은 170 °C 이하에서는 Lean 조건이 다른 조건보다 높았다. Lean 조건에서의 NO 전환율은 약 170 °C에서 최고값을 갖는 피크 형태를 보였다. Lean 조건에서 최고 NO 전환율은 36 %였다. Lean 조건에서 NO의 전환은 흡장에 의한 것으로 보인다. 하지만, 온도가 증가할수록 NO 흡장량이 감소한다.[14] 또한, 환원제인 CO와 C_3H_6는 산소와 반응하여 급격히 감소한다. 이러한 Lean 조건에서 NO 전환특성으로부터 NO의 흡착이 저온에서 NO 전환의 주요 반응경로임을 알 수 있다. 170 °C ~ 250 °C 영역에서는 Lean-rich 조건이 다른 조건보다 높은 NO 전환율을 보였다. Lean-rich 조건은 176 °C에서 50 %의 NO가 전환되었다. 이 영역에서는 Lean 조건에서 흡장된 NO가 Rich 조건에서 공급되는 환원제와 반응하여 Lean-rich 조건의 높은 전환율로 이어진 것으로 보인다. 250 °C 이상에서는 Rich 조건이 다른 조건보다 높은 NO 전환율을 보였다. Rich 조건에서는 328 °C에서 90 %의 NO 전환율을 보였다. 이 영역에서는 NO의 흡장보다는 CO와 C_3H_6와의 반응에 의해 빠르게 NO의 전환이 이루어지는 것을 알 수 있다.

Fig. 4(b)와 (c)와 같이 CO와 C_3H_6은 산소 공급량이 많은 Lean, Lean-rich, Rich 순으로 높은 전환율을 보였다. Lean 조건과 Lean-rich 조건은180 °C 이하에서 CO와 C_3H_6의 LOT50에 도달하였다. 하지만, 산소가 부족한 Rich 조건에서는 450 °C까지 CO와 C_3H_6의 전환율이 90 %에 도달하지 못하였다. 또한, Rich 조건에서는 CO가 C_3H_6보다 낮은 온도에서 전환되

었다. 이는 CO가 C_3H_6보다 저온에서 귀금속에 쉽게 흡착되어 산화반응이 이루어진 결과이다. CO의 전환율은 300 °C 이상에서는 감소하였다. 반면, C_3H_6는 산소가 모두 소모된 이후에도 온도 증가와 함께 지속적으로 전환율이 증가하였다.

3.3 WMTC모드에서의 삼원촉매 운전특성

Fig. 5는 125 cc 이륜차의 WMTC 모드에서 NOx, CO 및 THC의 배출농도를 나타낸다. 초기 80초까지는 NOx, CO 및 THC가 촉매 유무와 상관없이 동일한 농도로 배출된다. 이로 삼원촉매가 LOT에 도달하기 위에서는 약 80초 정도가 소요됨을 나타낸다. 80초 이후에는 NOx, CO 및 THC가 삼원촉매에서 저감되는 것을 알 수 있다. 하지만, 80초 이후에도 200초, 620초, 840초 및 950초에서 NOx, CO 및 THC의 배출량이 크게 증가하였다. 해당 영역는 WMTC 모드에서 40 km/h ~ 60 km/h로 고속 운전되는 영역이다. 촉매가 없는 결과에서 볼 수 있듯이 고속운전에서는 엔진에서 배출되는 NOx, CO 및 THC의 농도가 증가한다. 또한, 배기유량도 증가해 촉매에서 공간속도가 증가한다. 높은 NOx, CO 및 THC의 농도와 공간속도는 삼원촉매에서의 전환율을 감소시킨다.

Fig. 6은 125 cc 이륜차의 WMTC 모드에서 촉매 전후단의 온도를 나타낸다. 전단 온도는 배기가스 온도로 엔진의 작동조건에 의해 변동이 크다. 반면, 후단 온도는 촉매의 열용량에 의해 천천히 승온되고 변동이 적다. 60초~70초에서 전단온도는 252 °C에서 378 °C로 급격히 증가한다. 이때 삼원촉매가 LOT에 도달하면서 활성을 나타낸다. 200초 이후에는 촉매 후단의 온도가 320 °C 이상으로 유지된다. 약 800초 이후에 고속영역에서는 후단 온도가 500 °C 이상이었으나 삼원촉매가 충분한 전환율을 보이지 못한 것을 알 수 있다.

Table 5는 WMTC모드에서 125 cc 이륜차의 배출량 결과이다. 실험한 125 cc 이륜차는 EURO-4규제치를 만족하였다. 하지만, 70 %의 열화계수를 고려한 EURO-5를 만족하기 위해서는 THC 배출량의 저감이 필요하다. 특히, 앞서 본 것과 같이 시동초기와 고속운전영역에서 발생하는 THC가 저감되어야 한다. 이에 공연비 제어와 삼원촉매의 개선이 필요하다.

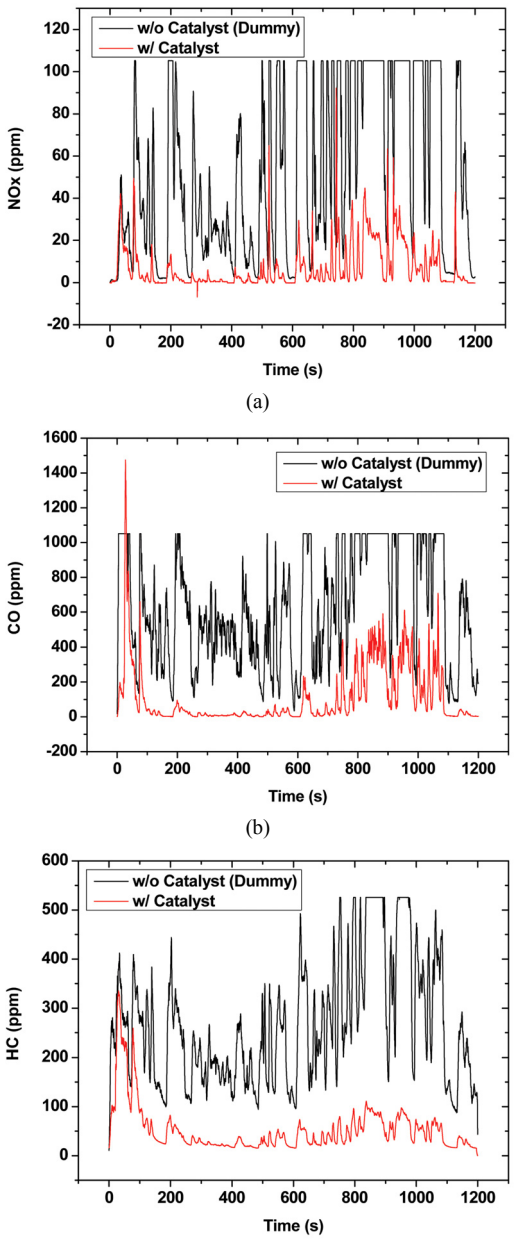


Fig. 5 Emissions of 125 cc motorcycle during the WMTC mode (a) NOx (b) CO (c) THC

엔진에서는 Lean한 운전영역을 증가시키거나 OSC 물질의 특성을 고려한 λ 섭동에 대한 최적화가 필요하다. 삼원촉매에서는 LOT를 저감하고 수증기 개질 특성을 개선하여야 한다. 특히, Rich 조건에서는 수증기 개질 반응이 THC 전환에 중요한 역할을 한다.

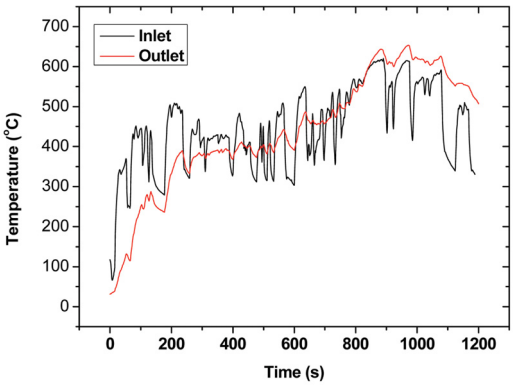


Fig. 6 Catalyst temperature of 125 cc motorcycle during the WMTC mode

Table 5 Emission result of 125 cc motorcycle

	NOx (g/km)	CO (g/km)	THC (g/km)
w/o catalyst	0.546	2.778	0.481
w/ catalyst	0.043	0.424	0.083

이에 PGM 및 OSC 물질의 개선, 담체의 셀 밀도 및 사이즈 증가가 삼원촉매의 개선 방안으로 고려될 수 있다. 이와 동시에 촉매조성과 담체변화에 따른 가격, 차압 및 출력의 변화도 고려하여 이륜차용 삼원촉매를 개발하여야 한다.

4. 결 론

본 논문에서는 이륜차용 삼원촉매의 개발방향 설정을 위하여 125 cc 이륜차의 λ제어와 삼원촉매를 분석하였다. WMTC 모드에서 Rich한 영역이 운전시간의 64.09 %를 차지하며 비중이 높았다. 반면, λ 섭동은 0.5초 이내로 제어되고 있다. 125 cc 이륜차의 배기가스를 모사하여 상용 삼원촉매를 평가한 결과, C_3H_6의 전환율은 Lean, Lean-rich, Rich 조건 순으로 산소 공급량이 줄어들수록 감소하였다. 특히, Rich 조건에서는 307 °C에서 THC 전환율이 50 %에 도달하였다. 실험한 125 cc 이륜차는 EURO-4 규제치를 만족하였다. 그러나, 70 %의 열화계수를 고려한 EURO-5 규제치를 만족하기 위해서는 THC 배출량 저감이 필요하다. THC 배출량을 저감하기 위해서는 공연비 제어와 삼원촉매의 개선이 필요하다. 엔진제어에서는 Lean한 운전영역을 증가시키거나 λ 섭동에 대한 최적화가 필요하다. 삼원촉매 개발에서는 LOT 저감과 수증기 개질 특성의 개선이 필요하다. 향후에는 삼원촉매의 PGM, OSC 물질 및 담체를 개선하여 EURO-5 배기규제를 만족시켜야 한다.

후 기

본 연구는 환경부 Global-Top Project 친환경자동차기술개발사업단의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

1) Ministry of Environment, Strengthen Management of Air Pollutants from Business Sites, Motorcycles, etc., http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?boardMasterId=1&boardId=540280&menuId=286, 2017.
2) B. C. Choi, J. W. Jeong, G. S. Son and M. G. Jung, “Characteristics of Rh-Pd-Pt Three-Way Catalysts with Double-Layer Washcoat on the Hydrothermal Aging,” Transactions of KSAE, Vol.14, No.1, pp.8-16, 2006.
3) J. Cooper and J. Beecham, “A Study of Platinum Group Metals in Three-Way Autocatalysts,” Platinum Metals Review, Vol.57, No.4, pp.281-288, 2013.
4) B. Sathiamoorthy, A. Graper, A. McIntosh and W. Kaminski, “The Benefits and Challenges Faced by Aftermarket Catalyst Manufacturers in Implementing Advanced Coating Techniques in TWC (Gasoline Applications),” SAE 2017-01-0921 , 2017.
5) M. Miura, Y. Aoki, N. Kabashima, T. Fujiwara, T. Tanabe, A. Morikawa, H. Ori, H. Nihashi and S. Matsui, “Development of Advanced Three-Way Catalyst with Improved NOx Conversion,” SAE 2015-01-1005, 2015.
6) H. Kawabata, Y. Koda, H. Sumida, M. Shigetsu, A. Takami and K. Inumaru, “Self-regeneration of Three-way Catalyst Rhodium Supported on La-containing ZrO_2 in an Oxidative Atmosphere,” Catalysis Science & Technology, Issue 3, pp.697-707, 2014.
7) H. Kawabata, Y. Koda, H. Sumida, M. Shigetsu, A. Takami and K. Inumaru, “High Three-way

Catalytic Activity of Rhodium Particles on a Y-stabilized La-containing ZrO_2 Support: the Effect of Y on the Enhanced Reducibility of Rhodium and Self-regeneration," Catalysis Science & Technology, Issue 1, pp.584-594, 2015.

8) J. Guo, Z. Shi, D. Wu, H. Yin, M. Gong and Y. Chen, "Study of Pt-Rh/CeO_2-ZrO_2-M_xO_y (M = Y, La)/Al_2O_3 Three-way Catalysts," Applied Surface Science, Vol.273, pp.527-535, 2013.
9) L. Lan, S. Chen, Y. Cao, S. Wang, Q. Wu, Y. Zhou, M. Huang, M. Gong and Y. Chen, "Promotion of CeO_2-ZrO_2-Al_2O_3 Composite by Selective Doping with Barium and its Supported Pd-only Three-way Catalyst," Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, Vol.410, pp.100-109, 2015.
10) L. Yang, S. Lin, X. Yang, W. Fang and R. Zhou, "Promoting Effect of Alkaline Earth Metal Doping on Catalytic Activity of HC and NOx Conversion Over Pd-only Three-way Catalyst," Journal of Hazardous Materials, Vol.279, pp.226-235, 2014.
11) L. Yang, X. Yang, S. Lin and R. Zhou, "DRIFTS Study of the Role of Alkaline Earths in Promoting the Catalytic Activity of HC and NOx Conversion Over Pd-only Three-way Catalysts," Catalysis Science & Technology, Issue 3, pp.1495-1503, 2015.
12) L. Yang, X. Yang, S. Lin and R. Zhou, "Insights into the Role of a Structural Promoter (Ba) in Three-way catalyst Pd/CeO_2-ZrO_2 using in Situ DRIFTS," Catalysis Science & Technology, Issue 5, pp.2688-2695, 2015.
13) J. Guo, Z. Shi, D. Wu, H. Yin, M. Gong and Y. Chen, "Effects of Nd on the Properties of CeO_2-ZrO_2 and Catalytic Activities of Three-way Catalysts with Low Pt and Rh," Journal of Alloys and Compounds, Vol.621, pp.104-115, 2015.
14) B. C. Choi, W. N. Juhng and C. H. Lee, "Comparison of NOx Reduction Characteristics of NOx Adsorption Catalyst with TWC for Lean-burn Natural Gas Vehicles," Transactions of KSAE, Vol.12, No.5, pp.79-84, 2004.