



1.0 T-GDI 차량의 NMOG+NO_x 저감을 위한 촉매 변환기와 엔진 최적화에 따른 배출가스 특성연구

김 락 민¹⁾ · 류 경 진²⁾

한국자동차연구원 신뢰성·안전연구센터¹⁾ · 영남이공대학교 스마트 e-자동차과²⁾

A Study on Emission Characteristics of 1.0 L T-GDI Vehicle by Catalytic Converter and Engine Optimization for Reducing NMOG+NO_x

Rakmin Kim¹⁾ · Kyungjin Ryu²⁾

¹⁾Reliability·Safety R&D Center, Korea Automotive Technology Institute, 303 Pungse-ro, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 31214, Korea

²⁾Department of Smart E-automobile, Yeungnam University College, Daegu 42415, Korea

(Received 21 February 2022 / Revised 21 March 2022 / Accepted 10 May 2022)

Abstract : In cold start condition, the catalyst and engine control method of T-GDI engine vehicle have direct impact on NMOG(Non Methane Organic Gas) and NO_x emission. Results of testing three types of catalysts with similar material properties showed that the two-stage structure was more effective. However, NMOG and NO_x emission from the exhaust gas using existing catalyst more than doubled compared to the SULEV30 regulation. In order to reduce the NMOG and NO_x values, an improved specification catalyst with component adjustment was developed by which NO_x could be reduced by 20 % compared to the exhaust gas before the catalyst activation proceeded in the cold starting process. CH(Catalyst Heating) mode control and engine intake/exhaust cam were adjusted to optimize engine control at cold start condition. In the case of the CH mode, the operating time was optimized, and the engine cam was adjusted to increase the initial exhaust temperature. The improved catalyst and optimized engine start-up emission reduced NO_x by 48 % and HC by 65 %.

Key words : NMOG(비 메탄 온실가스), Catalytic converter(촉매 변환기), Emission(배출가스), Catalyst heating(촉매 예열), ECU optimization(ECU 최적화)

1. 서론

현재 대기 환경 문제로 인하여 세계적으로 환경 규제를 강화하고 있으며, 친환경 차량 개발 및 대체연료 보급을 활발히 진행 중이다. 그리고 법적인 규제를 통하여 친환경 차량에 대한 혜택을 꾸준히 진행해오고 있는 실정이다. 2007년 미국에서 개정된 에너지 독립 및 안보법(EISA)로부터 시작된 CAFE-credit은 완성차 회사의 전체 제작 차량의 평균 연비에 대한 제도이다. 최근 몇 년간 발생된 배출가스 관련 이슈로 친환경차의 개발은 선택 사항이 아닌 차량 제조업체의 의무가 되었다. 미국의 국내의 경우 2020년도부터 유로 6d가 시행되고 있으며, 특히 2012년 개정된 Low Emission Vehicle III(LEV III)의 경우 규제 중에서도 상당히 엄격한 배출가스 기준으로 배

출가스 저감에 상당히 높은 기술력이 필요한 사항이다.

2022년도에 Table 1의 기존 정책의 개정 및 적용 계획이 발표된 브라질의 신규 배기규제인 PROCONVE L7은 북미 기준으로 환산하였을 때, Table 2의 내용과 같이 미국 캘리포니아 주 적용 규제인 ULEV 125와 비슷한 정도로 상향되었으며, 2023년도 생산되는 승용차량의 경우 이러한 규제를 의무적으로 만족시켜야 하는 실정이다.

본 연구에서는 1.0리터 터보 직접 분사 차량에서의 촉매 변환기 사양과 엔진 최적화에 따른 엔진의 성능 및 배출가스 특성 변화를 평가하였다. 특히 저온 상태의 엔진 최적화에 따른 촉매 활성화 시간과 초기 배출가스에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다.

*Corresponding author, E-mail: angelus999@ync.ac.kr

[†]This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

Table 1 PROCONVE L6 (Brazil emission regulation)

Tier	Date	Idle CO	CO	THC	NMHC	NOx	HCO	PM
		%Vol						
Proconve L4	JAN. 2007	0.50	2.0	0.30	0.16	0.25	0.03	0.05
Proconve L5	JAN. 2009	0.50	2.0	0.30	0.05	0.25	0.02	0.05
Proconve L6	JAN. 2013	0.20	1.3	0.30	0.05	0.05	0.02	0.025

Table 2 LEVⅢ emission standards and PROCONVE L7

Emission category	NMOG + NOx	CO	HCHO	PM
	g/mi			
ULEV 125	0.125	2.1	4	0.01
Proconve L6	0.12	1.6	24 (SI only)	0.01
ULEV 70	0.070	1.7	4	0.01
ULEV 50	0.050	1.7	4	0.01
SULEV 30	0.030	1.0	4	0.01
SULEV 20	0.020	1.0	4	0.01

2. 시험사양 및 촉매 변환기 사양

본 연구는 브라질에서 현재 양산중인 HB20 차량을 기반으로 한 1.0리터 터보 GDI 차량을 시험을 진행하였고 Fig. 1과 같이 차량 동력계에서 시험을 진행하였다. 차량의 데이터 취득과 제어 변수 최적화를 위하여 OBD 기반의 CAN 제어인 INCA 7.2 시스템을 사용하였다. 그리고 배기가스 분석을 위해 배기관에 측정 라인을 설치하였으며, 시험 연료로는 국내에서 판매되고 있는 가솔린 연료(E0)를 사용하였다. 시험은 Fig. 2와 같은 공인연비 측정 모드인 FTP-75에서의 배출가스 특성을 평가하였다. 차량 제어 및 데이터 저장은 Fig. 3과 같은 구조로 진행되었다.



Fig. 1 Chassis dynamometer test

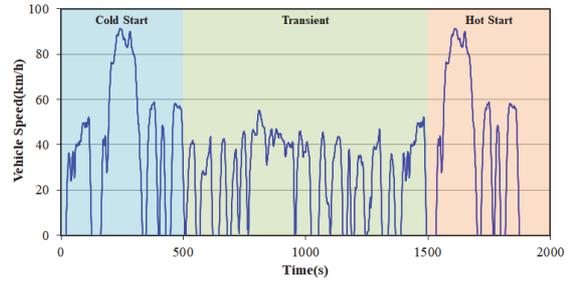


Fig. 2 FTP-75 Cycle (Emission certification)

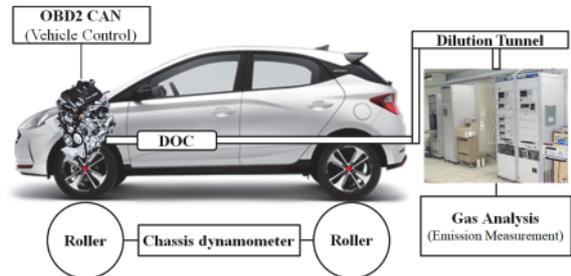


Fig. 3 Chassis dynamometer and emission measurement system configuration

2.1 촉매 변환기 성분 비교

본 연구의 촉매 변환기 사양은 기본적으로 브라질 현지 규제 대응을 기반으로 Table 1의 PROCONVE L6를 기반으로 개발된 사양을 기반으로 여러 사양의 촉매를 비교하여 최적의 형상을 선정하기 위한 연구를 진행하였다.

2.1.1 촉매 변환기 사양별 성분비교

기본적인 촉매 변환기의 형상적인 사양은 PROCONVE L6 규제를 위해 설계된 사양(Model 1)과 브라질 현지에 판매되고 있는 2가지(Model 2, 3)를 기반으로 Table 3과 같이 비교하였다. 기존 사양은 2단 구조로 되어 있고, 다른 두 가지는 단일 구조로 이루어져 있다. 그리고 단일 구조에서도 직경·길이에 비율에 따른 모델에 대하여 비교하였다. Fig. 5와 같이 SEM(Scanning Electron Microscope)으로 촉매의 담체부를 EDS(Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy) 측정을 통하여 성분을 비교하였다.

Table 3 Catalytic converter geometrical characteristics

	Model 1	Model 2	Model 3
Type	2-brick	1-brick	1-brick
Size (D × L, mm)	φ92×59, 87	φ118×109	φ105×115
Volume (cc)	970.6	1192.0	995.8

SEM/EDS에서 측정된 성분 비율은 Table 4에 명시되어 있는데 기본적으로 담체의 베이스가 되는 물질들을 제외하면 백금(Pt)과 팔라듐(Pd) 위주로 구성되어 있고, Model 3은 팔라듐은 존재하지 않는 것으로 확인되었다.



Fig. 4 Catalytic converter sample (Model 2, Model 3)

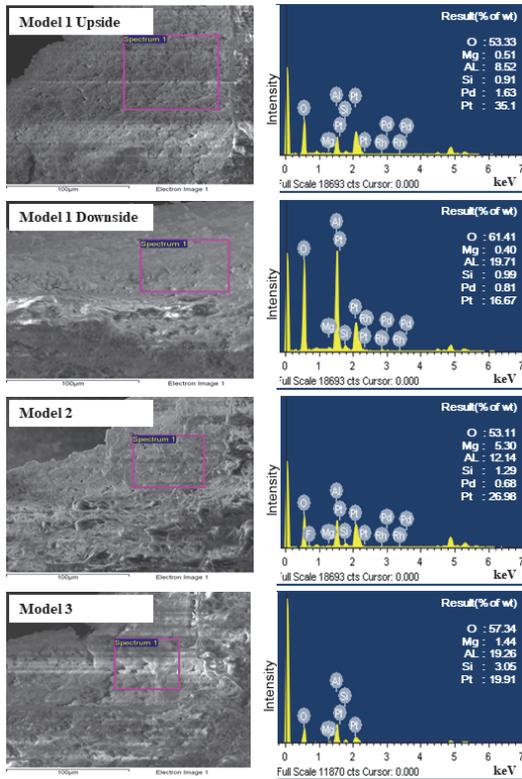


Fig. 5 SEM measurement results of Model 1-3

Table 4 Composition table

Contents	Model 1		Model 2	Model 3
	Upside	Downside		
O	53.33	61.41	53.11	57.34
Mg	0.51	0.40	5.30	1.44
Al	8.52	19.71	12.14	19.26
Si	0.91	0.99	1.29	3.05
Rh	0.00	0.00	0.00	0.00
Pd	1.63	0.81	0.68	0.00
Pt	35.1	16.67	26.98	19.91

특별히 로듐(Rh)은 공통적으로 발견되지 않아 물성적인 특징은 거의 비슷할 것으로 판단하고 Chen²⁾과 Wu 등⁴⁾의 논문을 참고하여 개선점을 선정하였다.

3. 시험결과

3.1 초기사양의 배출가스 경향

각 사양별 촉매 변환기의 배출가스 측정을 위하여 FTP-75모드에서 시험을 진행하였고 결과는 Fig. 8에서 확인할 수 있다. SULEV30 규제에 비하여 CO와 PM의 배출 수치는 규제치에 만족하는 것을 확인할 수 있으나, NMOG+NOx는 규제치에 2배 이상이 배출됨을 확인할 수 있으며, European Commission Joint Research Centre에서 발표된 리포트⁵⁾와 유사한 경향을 보였다. 초기 시험의 결과에서는, SULEV30 배출가스 규제의 만족을 위해서 NMOG(Non-Methane Organic Gas)와 NOx 량을 절반 이하로 줄이는 것을 목표로 하고 Heck 등¹⁾과 Sterva 등³⁾의 논문을 참고하여 개선점을 선정하였다. Fig. 6의 FTP-75모드에서의 배출가스 분포를 확인하였을 때, 대부분의 배출가스 주요 물질은 차량 초기 가동 300초 이내에 배출되는 것을 확인하였다. NMOG와 NOx의 저감을 위해서는 촉매 변환기의 개선과 활성화 시기를 앞당기는 방향으로 차량제어 개선을 진행해야 될 것으로 판단된다. Fig. 7에서의 결과를 토대로 NMOG와 NOx의 배출 수준이 낮고 비교적 체적이 작아 촉매 변환기 활성화

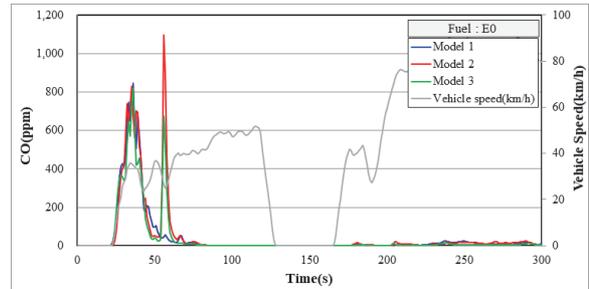


Fig. 6 CO Emission trend on FTP-75 cycle (Model 1-3)

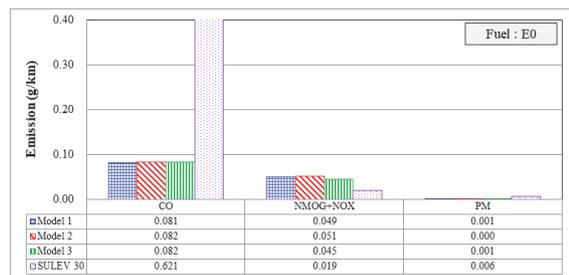


Fig. 7 Emission result comparison with SULEV30 (by catalytic converter model)

를 위한 예열을 빠르게 할 수 있는 Mode 1을 기반으로 개선 사양의 형상을 확정하였다.

3.2 개선사양의 배출가스 경향

앞선 3.1절에서의 시험 결과를 바탕으로 NMOG의 저감 능력 향상을 위한 개선 사양 촉매 변환기를 제작하였다. Fig. 6의 FTP-75모드에서의 배출가스 분포를 확인하였을 때, 대부분의 배출가스 주요 물질은 차량 초기가동 300초 이내에 배출되는 것을 확인하는 것을 중점에 두고 촉매 변환기의 설계를 변경하였다.

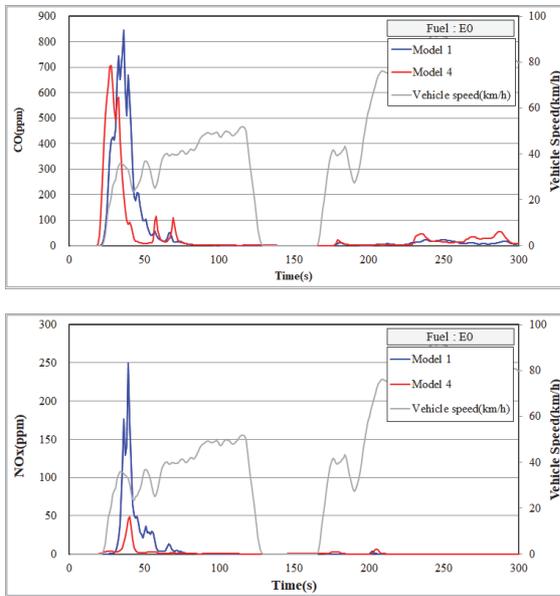


Fig. 8 CO, NOx Emission trend (0-300 sec, FTP-75)

NMOG와 NOx의 저감을 위해서는 촉매 변환기의 개선과 촉매 변환기 활성화 시기를 앞당기는 방향으로 차량 제어 개선을 진행해야 될 것으로 판단된다. Fig. 8에서의 결과를 토대로 NMOG와 NOx의 배출 수준이 낮고 비교적 체적이 작아 촉매 활성화를 위한 예열을 빠르게 할 수 있는 Model 1을 기반으로 개선 사양의 형상을 확정하였다.

최종 시제품인 Model 4는 NMOG+NOx의 저감을 위하여 기존 Model 1의 형상에서 귀금속 양의 재조정된 모델로 동일한 차량 제어상태에서 Fig. 8과 같이 FTP-75모드 초기 배출가스는 기존에 비하여 CO는 약간 감소한 반면 NOx의 배출의 총량은 20%가량 감소하였다.

3.3 배출가스 저감을 위한 엔진 제어 최적화

초기 배출가스의 경우 촉매 변환기의 사양 변화로 인한 주요 배출가스 저감으로는 한계가 존재하며 앞서 언급한 SULEV30 규제 미만으로 저감하기는 어려움을 확

인하였다. NMOG와 NOx의 초기 저감을 촉매 활성화 시간을 단축하기 위한 엔진제어 최적화를 진행하였다. Srinivasan과 Saravanan⁶⁾과 Gingrich 등⁷⁾의 논문을 참조한 결과 촉매의 활성화 온도 도달시간을 앞당기는 방법으로 최적화 전략을 수립하였다. 최적화는 CH(Catalyst Heating) mode 제어와 분사 시기, 초기 저온에서 연소실 온도와 배출가스의 온도상승을 위한 흡·배기 캠에 대한 재조정을 통한 초기 정훈 등⁸⁾과 이호택 등⁹⁾의 논문을 참고하여 진행하였으며 Fig. 10과 같이 실시하였다. 그리고 CH 모드제어 최적화를 위한 시험한 결과, 작동시간이



Fig. 9 Prototype catalytic converter for SULEV30 (Model 4)

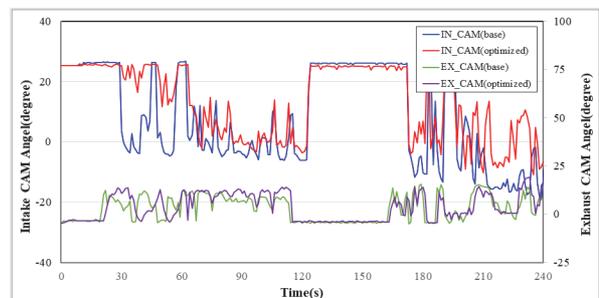


Fig. 10 Engine cam-sweep example on FTP-75 cycle (model 4)

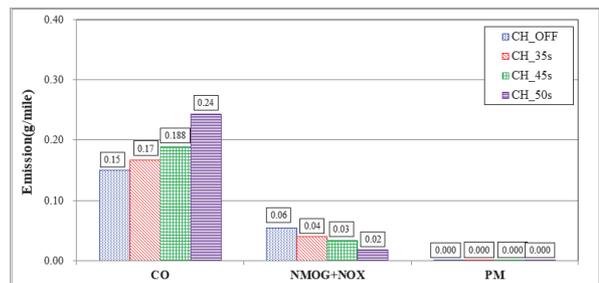


Fig. 11 Emission comparison by CH activate time

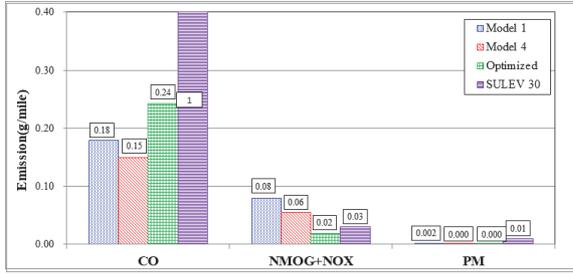


Fig. 12 Emission comparison with SULEV30 (by engine optimization)

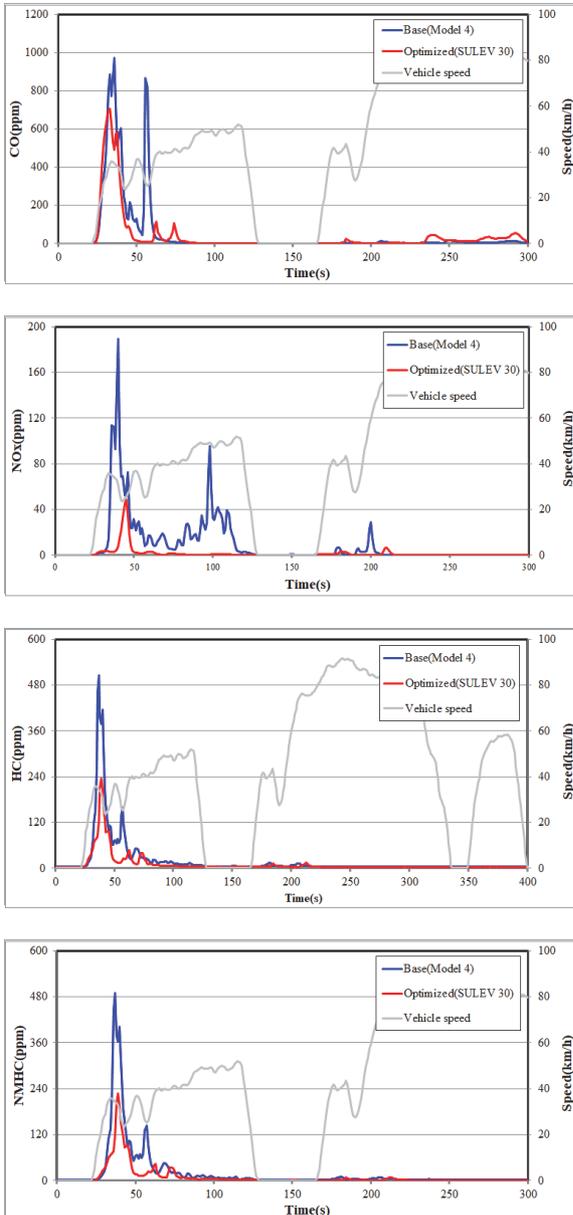


Fig. 13 CO, NOx, HC, NMHC emission trend on FTP-75 cycle (Optimized)

너무 길어지면 연료 분사량 과다에 따른 CO가 증가하는 현상은 Fig. 11에서 확인할 수 있다.

엔진 최적화로 인한 배출가스의 추가적인 저감효과는 촉매 사양과 더하여 Fig. 12와 같이 NMOG+NOx의 배출을 SULEV30기준인 0.03 g/mile 이하로 줄일 수 있었다.

배출가스의 주요 물질에 대하여 FTP-75모드 초기 경향을 살펴본 결과 Fig. 13과 같이 초기 연소실 및 배출가스 온도를 높일 수 있는 CH모드를 적용한 엔진 최적화로 인한 촉매 활성화 시간 단축 효과가 발생하여 초기 NOx는 65%와 HC는 48%의 감소하였다. 특히 초기 흡기캠 각도를 앞당기는 동시에 CH 모드를 작동한 효과로 대표적으로는 FTP-75모드 50~150초 사이의 저속구간에서 발생하는 CO와 NOx의 재증가 현상을 억제한 것을 확인할 수 있다. 앞서 CH 모드 작동시간에 대하여 시험을 진행한 결과인 그림 Fig. 13과 같이 CH 모드를 50초 이상 사용하게 되면 촉매의 활성화가 즉시 진행됨을 확인하였다. 추가적으로 50초 이상으로 적용하게 될 경우, CH 모드의 특성인 연료분사량 증가와 흡기 캠 조절로 인한 연비에 저하를 우려하여 최종 활성화 시간은 50초로 확정하였다.

엔진 최적화 파라미터 확정 후, FTP-75 모드에서의 최종적인 배출가스 측정을 진행한 결과, SULEV30 규격을 만족함을 확인하였다.

4. 결론

1.0리터 T-GDI 차량의 촉매 사양에 따른 배출가스 특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1.0리터 T-GDI 차량의 SULEV30 규제 만족을 위한 촉매의 형상에 따른 배출가스 경향을 확인한 결과 2단 촉매와 직경과 체적을 넓힌 촉매가 비교적 NMOG+NOx 배출 저감에 유리하였으나, 기존의 촉매 성분 구성 사양으로는 NMOG+NOx가 규제치에 2배 이상 초과함을 확인하였다.
- 시동 초기 배출가스 저감을 위한 촉매 활성화 시간 단축을 위하여 비교적 체적을 줄일 수 있는 2단 촉매를 기반으로 NMOG+NOx의 저감 효과를 증가시킬 수 있도록 성분 조정을 진행한 개선 모델을 제작하였으며, 기존 사양에 비하여 초기 NOx 저감에 크게 기여하였다.
- 개선 사양 촉매의 제작만으로는 SULEV30 규제를 만족할 수 없어 NMOG+NOx의 추가 저감을 위하여 촉매 활성화 시간 단축을 위한 연소실 및 배출가스 온도를 높일 수 있는 CH(Catalyst Heating)모드를 적용하여 엔진 최적화를 진행하였고 규제치를 만족할 수 있었다.

후 기

본 연구는 환경부에서 지원하는 글로벌탑환경기술개발사업(2016002070007)의 연구결과의 일부이며, 관계기관에 감사의 뜻을 전합니다.

References

- 1) R. M. Heck, R. J. Farrauto and S. T. Gulati, Catalytic Air Pollution Control: Commercial Technology, John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, 2009.
- 2) C. Chen, Structural Principle and Performance Evaluation of Three-way Catalyst, Journal of Sichuan University of Science and Technology, Chengdu, 2001.
- 3) E. R. Streva, L. Vinicius, M. Pereira, J. R. Sodre and V. M. D. Pasa, "Gasoline-Ethanol Blend Aging Effect on Engine Performance and Exhaust Emissions," SAE 2003-01-3184, 2003.
- 4) C. W. Wu, R. H. Chen, J. Y. Pu and T. H. Lin, "The Influence of Air-Fuel Ratio on Engine Performance and Pollutant Emission of an SI Engine Using Ethanol-Gasoline Blended Fuels," Atmospheric Environment, Vol.38, No.40, pp.7093-7100, 2004.
- 5) Regulated Emissions of a Euro 5 Passenger Car Measured over Different Driving Cycles, In Informal Working Group on Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure(WLTP), Sub-Group on the Development of the Harmonized Driving Cycle (DHC), European Commission Joint Research Centre, Geneva, Switzerland, 2010.
- 6) C. A. Srinivasan and C. G. Saravanan, "Emission Reduction in SI Engine Using Ethanol- gasoline Blends on Thermal Barrier Coated Piston," Energy and Environment, Vol.1, pp.715-726, 2010.
- 7) J. Gingrich, T. Alger and B. Sullivan, "Ethanol Flex-fuel Engine Improvement with Exhaust Gas Recirculation and Hydrogen Enrichment," SAE International, Vol.2, No.1, pp.58-65, 2009.
- 8) H. Jeong, T. S. Han and Y. J. Kim, "Itemized Effect Analysis of V6 SULEV System for Lambda Engine," KSAE08-S0014, pp.82-87, 2008.
- 9) H. T. Lee, W. B. Lee and G. K. Yeo, "Zeolite Based HC Adsorbing Catalyst for the Control of Cold Start Emission for the Gasoline Vehicle," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.48-53, 2006.