

< 기술논문 >

4기통 디젤엔진에서의 Lean NOx Trap 촉매 정확 특성에 관한 연구

한 준 섭¹⁾ · 오 정 모¹⁾ · 이 기 형^{*2)} · 이 진 하³⁾

한양대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 한양대학교 기계공학과²⁾ · 현대자동차 배기개발팀³⁾

A Study on the Conversion Performance of Lean NOx Trap for a 4-stroke Diesel Engine

Joonsup Han¹⁾ · Jungmo Oh¹⁾ · Kihyung Lee^{*2)} · Jinha Lee³⁾

¹⁾Graduate School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 426-791, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 426-791, Korea

³⁾Exhaust Emission Engineering Team, Hyundai Motor Company, 772-1 Jangdeok-dong, Hwaseong-si, Gyeonggi 445-706, Korea

(Received 28 April 2010 / Accepted 27 June 2010)

Abstract : Diesel engine has many advantages such as high thermal efficiency, low fuel consumption and low emission of CO₂. However, the diesel engine faced with strengthened emission regulation about NOx and PM. To suppress NOx emission, after-treatment systems such as Lean NOx Trap (LNT), Selective Catalytic Reduction (SCR) are considered as a more practical strategy. This paper investigated the performance of Lean NOx trap of the 4 stroke diesel engine which had a LNT catalyst. Characteristic of exhaust emission at NEDC mode was analyzed. From this result, the effect of nozzle attaching degree, injection quantity and gas flow change on NOx conversion performance was clarified.

Key words : Diesel engine(디젤 엔진), Lean Nox Trap(LNT, 흡장형 De-NOx 촉매), External injection(후분사), Aftertreatment(후처리), Reductant(환원제)

1. 서론

석유자원의 고갈과 환경오염 문제가 세계적인 문제로 대두되면서 자동차의 배출가스 저감과 높은 연비의 차량에 대한 요구가 증대되고 있다. 이러한 관점에서 디젤엔진은 가솔린엔진보다 높은 압축비에서 운전이 가능하므로 높은 열효율과 낮은 연료 소비율을 갖고 있어 큰 매력을 가지고 있다. 또한 이산화탄소 배출량 규제에 대응할 수 있는 유력한 대안으로 평가되고 있다. 이러한 장점들을 갖고 있으나 디젤엔진의 연소특성인 국부적인 고온 반응 구간의 NOx와 확산연소시의 입자상물질(Particulate matter) 및 질소산화물(NOx) 등의 배기가스 증가가

환경 문제점으로 심각하게 대두되고 있다. 이에 따라 전 세계적으로 자국 내 디젤 배기가스에 대한 규제를 연차적으로 강화하고 있는 실정이며, 내연기관 연구자들에 의해 다양한 방법으로 배기가스를 저감하기 위해 노력하고 있다.^{1,2)}

선택적 촉매 저감 장치는 연소된 배출 가스 상류에 환원제를 분사시킴으로써 선택적으로 반응하여 NOx를 저감 시켜 주는 시스템이며, 최근에 HC를 환원제로 이용하는 DeNOx 촉매 시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.³⁻⁸⁾ 본 논문에서는 실 엔진의 배기관에 LNT 촉매를 장착하여 노즐의 부착 각도, 환원제 분사량, 가스 유량 변화에 따른 정확 특성을 파악하였다.

*Corresponding author, E-mail: hylee@hanyang.ac.kr

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

2.1.1 실험용 엔진 및 후처리 시스템

Fig. 1은 실제 엔진 배기관 내에서의 분사 시스템과 LNT 촉매의 성능을 평가하기 위하여 구성한 시스템의 개략도이다. 엔진은 1991cc이며 가변 용량 제어 터보차저(Variable geometric turbo)와 고압분사에 의하여 유럽의 배기규제인 EURO-IV 기준을 만족시키는 DOHC 4기통 커먼 레일 디젤 엔진을 사용하였다. 실험에 사용된 엔진의 제원을 Table 1에 나타내었다.

실험을 위하여 후처리 시스템은 터보 차저 후단에 DPF를 설치하였고, LNT 모듈 사이에 노즐을 설치하였다.

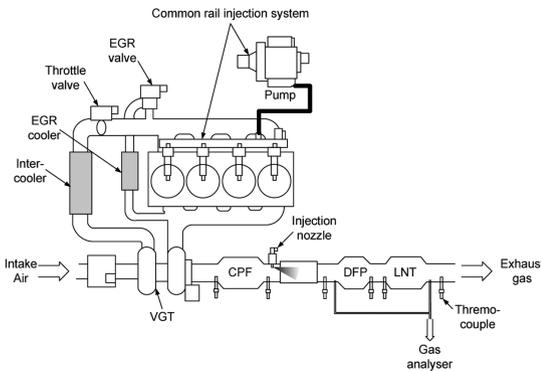


Fig. 1 Configuration of engine and after treatment system

Table 1 Specification of test engine

Description	Specification
Engine type	4-stroke turbo-charged DI diesel engine
Number of cylinder	4
Bore × Stroke (mm)	83 × 92
Displacement volume (cc)	1991cc
Fuel injection system	Common rail (1600bar)
Max. power (ps/rpm)	146 / 4000
Max. torque (kg·m/rpm)	32 / 1,800~2,500

2.1.2 동력계 시스템

엔진 동력계는 Fuchino사의 Eddy current 방식의 ESF-H-150 모델을 사용하여 시스템을 구축하였다. Table 2에 실험에 사용한 동력계의 제원을 나타내었다.

Table 2 Specification of engine dynamometer

Model	FUCHINO, ESF-H-150
Type	Eddy current, load cell type
Max. power (PS/KW)	150/110 at 2500rpm
Max. rpm	10,000

2.1.3. 배기 가스 분석 시스템

LNT의 성능을 분석하기 위하여 배기 가스 분석계(MEXA-DEGR7100, HORIBA)를 이용하여 배기 가스 성분을 분석하였다. 본 계측장비에서 측정 가능한 가스 성분은 HC, NO/NOx, CO/CO₂이며, HC는 수소염 이온화 검출기(flame ionization detector; FID), NO와 NOx는 화학 발광 분석계(chemiluminescent detector; CLD), CO/CO₂는 비분산형 적외선 분석계(non dispersive infrared; NDIR)를 이용하여 배기가스의 농도를 측정하게 된다. 자세한 제원은 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Specification of exhaust gas analyzer

Specification of exhaust gas analyzer model		HORIBA, MEXA-DEGR7100
NDIR	CO	0.5~12% vol. FID
	CO ₂	0.5~20%
CLD	NOx	10~10,000 ppm
FID	THC	10~20,000 ppmC
Sample	O ₂	1~25% vol.
	Flow	9~12 l/min
	Inlet pressure	0~30kPa

2.1.4 환원제 온도 및 압력 조절 장치

Fig. 2는 엔진 실험 시에 배기관 내로 분사되는 환원제의 온도와 압력을 제어하기 위하여 본 연구에서 제작한 온도 및 압력 조절 장치를 나타낸 실제 모습이다. 엔진 구동에 필요한 연료 구동 시스템과는 독립적으로 환원제로 분사되는 경유의 압력과 온도 제어를 위하여 제작하였다. 화재 위험 및 연료의 변질을 방지하기 위하여 중탕 방식을 사용하였으며, 밀봉된 전기 열선과 냉매를 이용한 냉각기를 설치하였다. RTD 센서로 온도를 측정하며 온도 제어 컨트롤러를 이용하여 전기 열선과 냉각기를 같이 PID 제어함으로써 온도 제어의 응답성과 유지 특성을 향상시켰다.

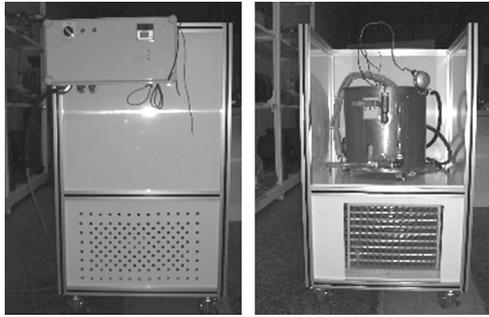


Fig. 2 Photography of reductant supply temperature and supply pressure controller

2.2 실험 방법

엔진 운전 조건에 따라 환원제 분사가 정화 특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Table 4와 같은 실험 조건에서 배기가스 분석 실험을 수행하였다. LNT 정화 효율에 큰 영향을 미치는 배기가스의 산소 농도는 throttling을 통하여 9%로 제어하였으며, 연료 분사 시스템은 4bar의 공급 압력으로 10ms씩 20Hz의 주기로 분사하였고 분사 회수로 환원제 분사량을 조절하였으며 1분당 한 번씩 간헐 분사를 하였다.

DPF 전단의 배기가스 특성을 관측하기 위해 NEDC 모드로 운전을 하였으며 DPF 전단의 온도와 배기 질량 유량 분포를 구해 아래 실험들을 하기 위한 기초 데이터로 활용하였다. 실험으로부터 취득된 DPF 전단의 온도와 배기 질량 유량 분포를 통해 실험 구간을 정하였다. 노즐 부착 각도에 따른 NOx 정화 특성을 보기 위해 엔진은 1850rpm 조건에서 연료를 1분 단위로 20Hz, 10ms씩 60회(3초간 분사, 57초 환원) 분사하여 분사량 3.25g/min으로 분사 하였다. 유동 방향과 평행한 노즐의 부착각도 0°를 기준으로 5°와 10°에 대한 정화 효율 특성을 비교 하였다. 자세한 노즐 부착 각도는 Fig. 3에 나타내었다. 또한 동일한 1850rpm에서 분사는 1분 단위로 20Hz, 10ms씩 40회(2초간 분사, 58초 환원)에서 60회(3초간 분사, 57초 환원)로 환원제 분사량을 증가 시키기에 따른 정화 특성을 파악 하였다. 마지막으로 엔진 운전 조건은 엔진 rpm의 변화에 따라 배기가스의 물성치 자체가 변하기 때문에 상대적인 비교가 어려워, 산소 농도 조건을 9%로 일정하게 유지하여 가스 유량 변화에 따른 정화 특성을 파악 하였다.

Table 4 Experimental engine conditions

RPM	O ₂	Exhaust (ppm)	
		NOx	HC
1850	9% by throttling	44.6	53.5
2100		51.8	53.8
2300		43.5	55.9

RPM	Fuel (g/min)	Reductant (g/min)	Penalty (%)		
			2.17	3.25	4.33
1850	59.2	2.17	3.67	5.49	7.31
2100	67.2	3.25	3.23	4.84	6.44
2300	73.6	4.33	2.94	4.41	5.88

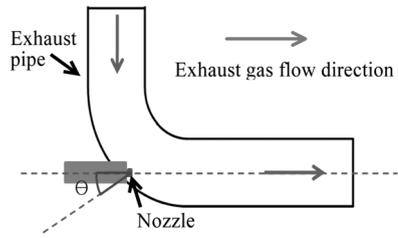


Fig. 3 Configuration of attached nozzle angle

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 NEDC 모드에서의 배기가스 특성

Fig. 4는 실험 대상 엔진을 동력계에서 NEDC 모드로 운전하였을 때, DPF 전단의 배기특성을 관측한 결과이다. 질량 유량은 각 측정점에서 흡기 유량 센서로 유입되는 공기 유량과 연료 분사량을 더하여 합산하였다.

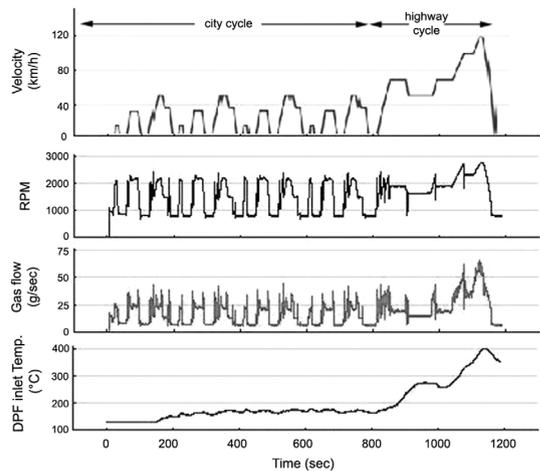


Fig. 4 Gas flow and temperature with time in NEDC mode

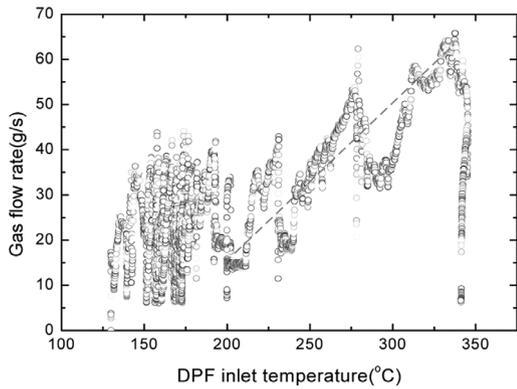


Fig. 5 Relation between DPF inlet temperatures and gas flow rate in NEDC mode

City cycle 구간에서는 배기 질량 유량이 10~45 g/sec 범위를 갖고 200°C 이하의 온도 분포를 보였으며, high way 구간에서는 배기 질량 유량이 10~70 g/sec 범위를 갖고 200°C 이상의 온도 분포를 보였다.

온도구배를 통해 배기가스의 온도와 배기가스 유량의 상관관계를 쉽게 파악하기 위해 Fig. 4의 데이터를 이용 NEDC 모드에서의 DPF 전단의 온도와 배기 질량 유량 분포를 Fig. 5로 나타내었다. LNT의 정화 활성화 온도는 DPF 전단의 온도가 200°C 이상일 때 이므로, 이때의 가스 질량 유량은 10~60 g/sec 범위를 가진다는 사실을 알 수 있다.

3.2 노즐 부착 각도에 따른 NOx 정화 특성

Fig. 6은 정화되기 전 LNT 입구단과 부착 각도에 따라 환원제 분사 시 LNT 출구에서의 평균 NOx량과 정화 효율을 나타낸 그래프이다. 0°에서는 엔진 자체 NOx 생성량이 다소 높았으나, 다른 조건에서는 거의 동일한 조건을 나타내었다. 부착 각도가 커질수록 LNT 후단의 NOx 배출량은 증가하는 경향을 나타내었다. 정화 효율을 비교해보면, 0°에서 49%, 10°에서 39%로 10%의 차이를 보였다. 이러한 정화 효율의 차이는 유동 방향에 대한 분사 각도가 벽류 형성에 큰 영향을 미치기 때문이라고 판단된다. 이 결과로부터 노즐 분사 각도의 최적화를 통하여 촉매의 NOx 정화 효율을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

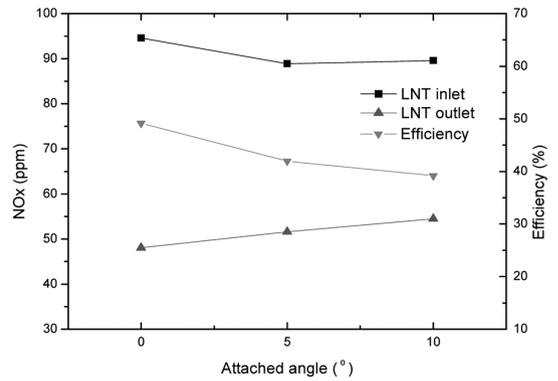
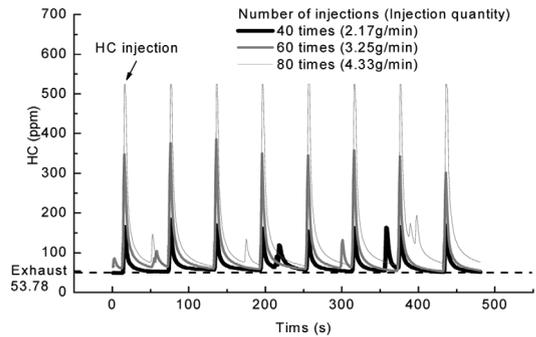


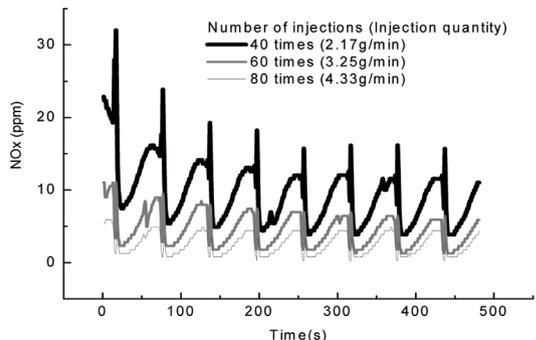
Fig. 6 Comparison of mean NOx with attached nozzle angle

3.3 동일 운전 조건에서 환원제 분사량에 따른 정화 특성

Fig. 7(a)는 동일 엔진 운전 조건에서의 분사량을 달리하였을 때의 LNT 촉매 후단에서의 HC 배출 특성을 비교한 그래프이다. 환원제 분사량이 40회에 80회로 증가하면서, 분사 시 LNT 후단에서의 HC



(a) Effect of injection quantities on HC emissions



(b) Effect of injection quantities on NOx emissions

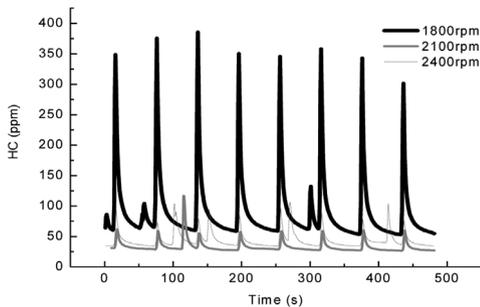
Fig. 7 Effect of injection quantities on emission characteristics under same driving condition

의 배출량은 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 이후 다음 분사 시까지 서서히 HC 성분이 감소하는 경향을 나타내며 감소 구간에서도 간간히 작은 피크의 HC 농도 증가 구간이 존재한다. 이러한 농도 감소 구간은 배기관 내부에 벽류로 형성되었던 연료가 기화됨으로써 나타나는 현상이라고 판단된다.

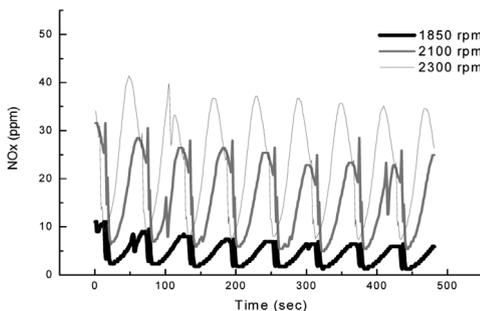
Fig. 7(b)는 동일 엔진 운전 조건에서의 분사량에 따른 NOx 특성을 나타낸 결과이다. 환원제 분사시마다 NOx가 환원되어 저감되고 이후 LNT에 흡착되면서 배출량이 서서히 증가하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 40회 분사의 경우, NOx가 충분한 환원분위기 형성이 되지 못하여, NOx가 슬립되어 환원제 분사 시 일시적으로 배출량이 증가하는 경향을 보인다. 동일 회전수에서 환원제 분사량이 증가하면 NOx 저감은 향상되지만, 저감을 자체는 분사량 증가에 비해 작다는 사실을 알 수 있다.

3.4 가스 유량 변화에 따른 정화 특성

Fig. 8(a)에서 보듯이 엔진 회전수 증가에 따라 가



(a) Effect of gas flow rates on HC emissions



(b) Effect of gas flow rates on HC emissions

Fig. 8 Effect of gas flow rates on emission characteristics (reductant quantity is 3.25g/min)

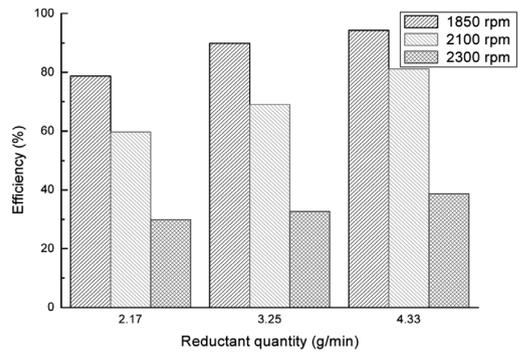
스 유량이 증가하므로 환원제 분사량이 동일할 경우에는 회전수 증가에 따라 HC 슬립 양이 현저히 줄어드는 경향을 보인다.

Fig. 8 (b)는 엔진 회전수에 따른 NOx 배출 특성을 나타낸 그래프이다. 엔진 회전수가 증가할수록 NOx 배출 범위 구간은 상대적으로 넓어지는 특성을 보이는 것을 알 수 있었다.

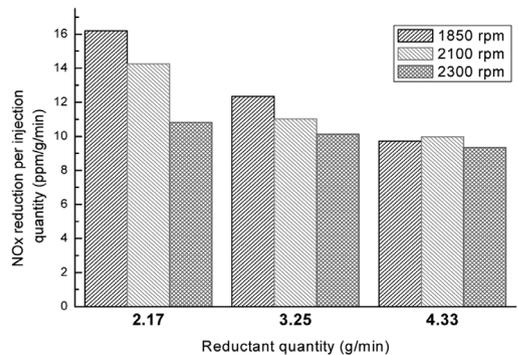
3.5 환원제 분사량과 정화 특성과의 관계

Fig. 9(a)는 환원제 분사량과 엔진 회전수에 따른 NOx 정화 효율을 비교한 그래프이다. 환원제 분사량이 증가할수록 정화효율은 향상되지만, 60회 분사 시(4.33g/min) 정화 효율 향상은 다른 두 조건 보다 향상 정도가 적음을 알 수 있다.

Fig. 9(b)는 환원제의 단위 질량당 실제 저감되는 NOx 농도 감소량을 비교한 그래프이다. 분당 2.17g



(a) Comparison of NOx reduction efficiency between reductant quantity and rpm



(b) Comparisons of NOx reduction per reductant quantity

Fig. 9 Relation between reductant quantity and NOx conversion rate

의 환원제 분사의 경우가 모든 rpm에서 가장 저감량이 많았고, 4.33g의 경우에는 저감 정도가 비슷함을 알 수 있다.

이와 같은 결과를 종합해 볼 때, NOx 저감율 측면에서는 환원제 분사량의 증가가 NOx 저감율은 향상되지만, 연비 악화의 최소화를 위해서는 엔진 운전 조건에 따라 적절한 환원제 분사량 제어가 필요하다고 판단된다.

4. 결론

LNT를 4기통 디젤엔진에 설치하여 촉매 정화 특성을 파악하였다. 이러한 실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) NEDC 모드에서의 DPF 전단의 배기 온도는 대부분이 125~300°C 범위를 가지고 있으며, 그에 따른 가스 질량 유량은 10~60 g/sec 범위를 가진다는 사실을 알 수 있다.
- 2) 노즐 부착 각도에 따른 정화 특징을 보면, 부착 각도가 커질수록 LNT 후단의 NOx 배출량은 증가하는 경향을 나타내었다.
- 3) 환원제 분사량이 많은 경우 HC 슬립이 발생되었으며, 이는 연비 악화를 야기 시킨다.
- 4) 환원제 분사량이 동일할 경우 회전수 증가에 따라 HC 슬립 양이 현저히 줄어드는 경향을 보인다. 반면, NOx의 경우 엔진 회전수가 증가할수록 NOx 배출 범위 구간은 상대적으로 넓어지는 특성을 보이는 것을 알 수 있었다.
- 5) 환원제 분사량의 증가는 NOx 저감율은 향상시키지만, 연비 악화의 최소화를 위해서는 엔진 운전 조건에 따라 적절한 환원제 분사량 제어가 필요하다라고 판단된다.

후 기

이 연구는 지식경제부 지원의 “미래형 자동차 배기가스 제로화 기술개발”과제의 일부로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- 1) J. M. Oh, K. H. Lee and J. H. Lee, “Spray Behavior and NOx Reduction Characteristics of External Injection for HC-LNT Catalyst System,” Proceedings of KSAE 2007 Fall Conference, KSAE 07-F0036, Vol.1, pp.221-226, 2007.
- 2) J. M. Oh, K. H. Lee and H. Y. Jeong, “Study on the Spray Behavior and Diesel Fuel Distribution Characteristics of a Secondary Injection for a Lean NOx Trap Catalyst,” Energy & Fuel, 2008.
- 3) P. Eastwood, Critical Topics in Exhaust Gas Aftertreatment, Research Studies Press Ltd., 2000.
- 4) M. Ueda, A. Asamo, T. Kondo, Y. Watanabe, T. Fukuma and Y. Harada, “A New Optimizing Technique of a Diesel Engine Aftertreatment System Using HC DeNOx Catalyst,” JSAE 20034007, 2003.
- 5) J. O. Chae, J. W. Hwang, J. Y. Jung, J. H. Han, H. J. Hwang, S. Kim and E. Mikhlap, “An Experimental Study on the Reduction of Nitric Oxides from the Diesel Engine Exhaust Gas with Metal Supported Oxides Catalysts,” Transactions of KSAE, Vol.9, No.3, pp.68-75, 2001.
- 6) D. Upadhyay and M. V. Nieuwstadt, “NOx Prediction in Diesel Engines for Aftertreatment Control,” ASME International, IMECE 2003-41196, 2003.
- 7) P. G. Blakeman, G. R. Chandler, G. A. John and A. J. J. Wilkins, “Investigations into NOx Aftertreatment with Urea-SCR for Light-Duty Diesel Vehicles,” SAE 2004-01-3624, 2004.
- 8) R. Egnell, “The Influence of EGR on Heat Release Rate and NO Formation in a DI Diesel Engines,” SAE 2000-01-1807, 2000.