

승용디젤엔진의 연료분사 제어를 통한 LNT 촉매의 NOx 저감 특성에 관한 연구

황 승 권¹⁾ · 고 아 현¹⁾ · 윤 주 웅¹⁾ · 명 차 리²⁾ · 박 심 수^{*2)} · 김 은 석³⁾

고려대학교 대학원 기계공학부¹⁾ · 고려대학교 기계공학부²⁾ · 희성촉매 기술연구소³⁾

A Study on NOx Reduction Characteristics of LNT Catalyst with Fuel Injection Control in Light-duty Diesel Engine

Seung Kwon Hwang¹⁾ · Ahyun Ko¹⁾ · Joo Wung Yoon¹⁾ · Cha-Lee Myung²⁾ ·
Simsu Park^{*2)} · Eunseok Kim³⁾

¹⁾School of Mechanical Engineering, Graduate School of Korea University, Seoul 136-701, Korea

²⁾School of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

³⁾R&D Center, Heesung Catalysts Corp., 1251-6 Jungwang-dong, Shihung-si, Gyeonggi 429-450, Korea

(Received 14 December 2011 / Revised 28 December 2011 / Accepted 30 December 2011)

Abstract : Lean NOx Trap (LNT) catalysts are capable of reducing exhaust NOx emissions from diesel engines. LNT stores NOx in lean condition and exhausts N₂ by reducing NOx in rich condition. NOx reduction characteristic of LNT catalysts using throttle position sensor and fuel injection timing control for light-duty diesel engine was investigated. In contrast to SCR system, LNT catalyst uses diesel fuel in reductant. Also if the concentration of reductant is exceeded, excessive amount of reductant will slip throughout LNT and cause another emission problem. Thus LNT regeneration with precise engine control established that can make higher NOx conversion efficiency and lower fuel penalty, prevent another emission problem. NOx and reductant concentration were measured by the NOx sensor and Mexa7100D equipped inlet and outlet of catalyst. As a result of engine test, regeneration strategy has reached high of 77.8% NOx conversion efficiency according to engine operation condition. Moreover, we have proved that it is possible to use regeneration strategy of LNT within 5% fuel penalty.

Key words : LNT(흡장형 질소산화물 저감 촉매), NOx(질소산화물), Regeneration(재생), Lambda(공기과잉률), Reductant(환원제), Conversion efficiency(정화 효율)

1. 서 론

디젤 엔진은 가솔린 엔진보다 열효율이 높고 저속에서 높은 토크 및 출력을 발생시킬 수 있으며, CO₂ 배출량이 가솔린 엔진보다 매우 낮다는 장점을 가지고 있다. 하지만 가솔린 차량에 비해 디젤 차량에서 더 많이 배출되는 PM(Particulate Matters)과 NOx(Nitrogen Oxide)의 인체 유해성에 관한 연구결

과가 발표되면서 미국과 유럽, 일본 등 여러 나라에서 PM과 NOx를 제한하기 위한 규제를 더욱 강화하고 있는 추세이다. 이에 따라 우리나라는 승용 디젤 자동차의 경우 유럽의 배출가스 규제인 Euro-5를 적용하고 있고 신차인 경우에 이미 2011년 9월에 PM 규제 강화 및 입자개수 규제를 도입한 Euro-5+를 적용중이며, 더욱 강화된 Euro-6의 PM과 NOx 규제는 2014년 9월에 도입될 예정이다.¹⁾

디젤 엔진에서 배출되는 PM의 경우 이미 상용

*Corresponding author, E-mail: spark@korea.ac.kr

화되고 있는 DPF (Diesel Particulate Filter)를 이용하여 80% 이상 저감하는 것이 가능하지만 NOx의 경우 여러 가지 방법이 연구되고 있다. 먼저 EGR 과 HCCI와 같이 단열화염온도를 낮추어 NOx의 생성을 억제하는 방법이 있지만 PM과 NOx의 Trade-off 관계로 인하여 NOx 저감에는 많은 어려움이 있기 때문에 강화되는 NOx 규제치를 만족시키기 위해서는 반드시 후처리 장치가 필요하게 되었다.²⁾ 현재 디젤엔진의 NOx 저감을 위한 주요 후처리 기술은 LNT(Lean NOx Trap), urea-SCR(Selective Catalytic Reduction)등이 있다. 이 중 LNT는 urea-SCR과 달리 환원제로서 단지 경유만을 사용하기 때문에 환원제를 분사하기 위한 별도의 장치가 필요 없고 시스템이 단순하여 설치비용이 저렴한 편이며 NOx 흡장물질의 종류에 따라 넓은 작동 온도구간을 가진다는 장점이 있다. 따라서 승용 디젤 차량에서는 대형 디젤 차량보다 배기시스템에서의 공간적인 제약이 있기 때문에 별도의 분사 시스템이 필요한 SCR 보다는 LNT가 더욱 적합하다고 할 수 있다. 반면에 백금 (Pt)이 주류를 이루고 있어 촉매의 가격이 비싸다는 점과 저온에서 NOx 저감률이 낮은 점, 환원제로 연료를 쓰게 될 경우 연료에 포함된 황이 촉매를 피독 (Sulfur)시킴으로써 성능이 저하된다는 점, 그리고 연료소비율이 증가할 수 있다는 단점이 있다.^{3,4)}

최근 ULSD(Ultra Low Sulfur Diesel)의 보급 정책 등에 힘입어 그 활용성이 부각되고 있는 LNT 기술을 적용하기 위해서는 차량 운행 중 공연비에 따라 흡장(희박) 및 정화(농후)의 과정이 진행되기 때문에 높은 정밀도의 엔진제어 시스템이 필요하며 연료소비율의 악화를 최소화하는 방향의 연구가 필요하다. 따라서 이 연구에서는 승용디젤엔진의 운전 조건에 따른 연료분사 제어를 통해 NOx 정화효율 향상과 연료소비율 증가의 최소화, 그리고 환원제의 슬립량을 줄이는 것을 목표로 재생 전력을 수립하였다. 이를 통하여 각 운전조건별 LNT 촉매의 NOx 저감 특성과 배출가스 중 환원제로 사용되는 CO와 THC의 변화 특성, 그리고 희박 / 농후 사이클의 재생주기에 따른 NOx 저감 특성에 대해 연구하였다.^{5,6)}

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 LNT 촉매

이 연구에 사용된 엔진은 VGT가 장착된 현대자동차의 U2 1.6 L 디젤 엔진으로써 Euro-4 사양이며 CC 타입으로 CPF (Catalyzed Particulate Filter)가 장착되어있다. 자세한 제원은 Table 1에 나타내었다. Fig. 1은 실험장치의 개략도이며 LNT 촉매 전·후단에서의 NOx 농도의 변화량을 실시간으로 측정하기 위해서 NGK 사의 NOx 센서와 Mobiltek 사의 NOx Logger를 사용하였다. 또한 실험 시 배출되는 여러 가지 배출가스를 측정하기 위하여 Horiba 사의 MEXA 7100D를 사용하였고 촉매 전단에서 람다 (Lambda, λ)센서를 이용하여 희박 조건과 농후 조건에 따른 람다 값의 변화를 측정하였다.

실험에서 사용한 LNT 촉매는 1.6 L 디젤 엔진에 적용하기 위하여 1.3 L 촉매를 사용하였으며 CPF 후단에 장착하였다. 자세한 촉매의 제원은 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Specification of test engine

Engine Segment	HMC U2-1.6
Engine Type	In-Line4, VGT
Bore (mm)×Stroke (mm)	77.2×84.5
Compression Ratio	17.3 : 1
Displacement (cc)	1,582
Emission regulation	Euro-4
Catalyst	CPF (CC type)

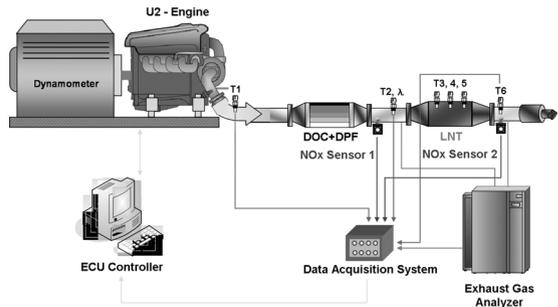


Fig. 1 Diagram of engine test system

Table 2 Specifications of LNT catalyst

Cell density	400 cell/in ²
Wall thickness	4 mil (0.1015 mm)
PGM	3.88 g/L
Pt / Pd / Rh	25.9 / 8.6 / 1
Size (Diameter×Length)	118.4 mm×121.0 mm

2.2 실험방법 및 조건

디젤 엔진의 운전은 기본적으로 희박 연소이므로 LNT 촉매 내에 흡장된 NOx를 N₂로 정화시키기 위해서는 일시적으로 공연비를 농후 조건으로 엔진을 운전해야 한다. 엔진 운전조건을 농후하게 하기 위해서는 흡기 매니폴드를 통해 실린더 내로 유입되는 공기의 양을 줄여야 하고 또한 보통의 희박 조건보다 많은 연료가 분사되어야 한다. 이에 따라 농후 조건에서는 배출가스의 온도가 증가하고 LNT 촉매에서 환원제로 사용되는 CO와 THC 배출농도가 증가하며 연소실 내 산소량 감소로 인해 NOx 배출농도가 감소한다.⁷⁾

이 실험에서는 INCA 프로그램을 통해 ECU의 제어변수들을 조작하여 연구를 진행하였다. 일시적으로 공기량을 감소시켜 공연비를 농후하게 했을 때와 공기량 감소와 함께 인젝션 타이밍을 지각했을 때의 NOx 저감 특성 및 촉매 전·후단의 배출가스 변화 특성을 비교하여 LNT 촉매의 재생전략 수립하였다. 또한 재생주기에 따른 희박/농후 사이클의 NOx 저감 특성을 알아보고 재생으로 인해 추가로 사용된 연료소비율을 계산하여 재생주기와 연료소비율와의 상관관계를 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 LNT 촉매의 재생전략 수립

엔진 운전조건 1500 rpm, BEMP 4.0 bar에서 실험하였으며, 보통의 희박 조건에서 LNT 후단에서 배출되는 NOx 농도가 일정하게 유지되어 촉매 내에 NOx가 충분히 흡장된 상태일 때 스톱틀 포지션 센서(TPS)를 제어하여 공기량을 서서히 감소시킨 결과 람다 1 이하로 떨어질 때의 스톱틀 포지션 값은 12.25%로 측정되었다. Fig. 2는 스톱틀 포지션 값을 한번에 12.25%로 공기량을 감소시켜 30초간 유지시킨 다음 다시 복귀시켰을 때의 결과 그래프이다. 그 결과 공기량이 급격히 감소함에 따라 연료분사량은 서서히 증가하는 경향을 나타냈으며, 공기량은 실린더 당 평균 483 mg에서 244 mg로 약 49% 감소하였고 연료분사량은 실린더 당 평균 9.5 mg에서 14.4 mg로 약 51% 증가하였다. 재생 후 충분히 흡장된 시간인 540초 동안 희박 조건을 유지했을 때 NOx 센

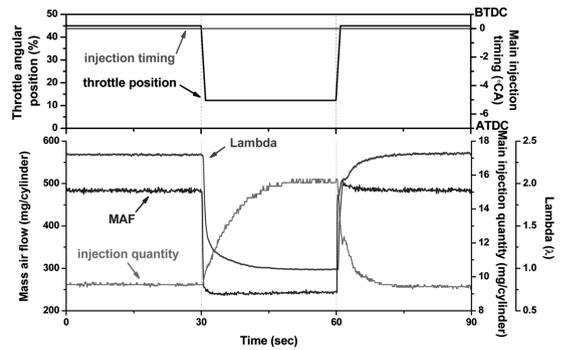


Fig. 2 Effect of throttle position control regeneration

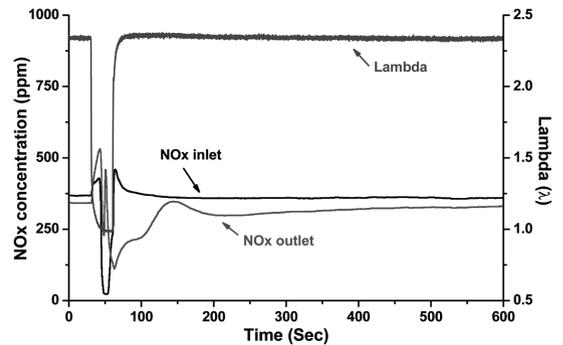


Fig. 3 NOx concentration change during throttle position control regeneration

서로 측정된 LNT 전·후단의 NOx 배출농도의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 이때의 람다 값은 최저 0.98로 측정되었으며 재생 후 60초 동안 약 45.6%의 NOx 저감률을 보였다.

같은 엔진 운전조건에서 공기량을 전 실험과 동일하게 감소시키면서 인젝션 타이밍을 지각한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 스톱틀 포지션 값을 12.25%로 감소시키고 10초 후에 인젝션 타이밍을 TDC 기준 0°CA에서 ATDC 5°CA로 지각하여 10초 동안 유지시킨 후 다시 0°CA으로 복귀시키고 10초 후에 스톱틀 포지션 값 또한 복귀시켰다. 그 결과 Fig. 5에서 보이는 바와 같이 공기량은 전 실험과 동일하게 약 49% 감소하였고 연료분사량은 약 57% 증가하여 스톱틀 포지션만을 제어한 결과보다 연료분사량이 약 6%로 더 증가하였다. 이때의 람다 값은 0.94, 재생 후 60초 동안의 NOx 저감률은 약 54.8%로 측정되었으며 스톱틀 포지션만을 제어한 결과보다 약 9.2%로 증가한 결과를 나타내었다. 따라서 스톱틀 포지

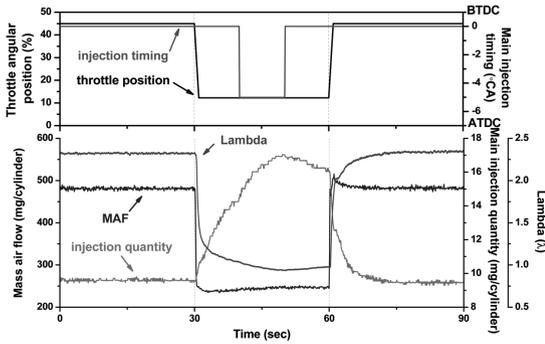


Fig. 4 Effect of throttle position & injection timing control regeneration

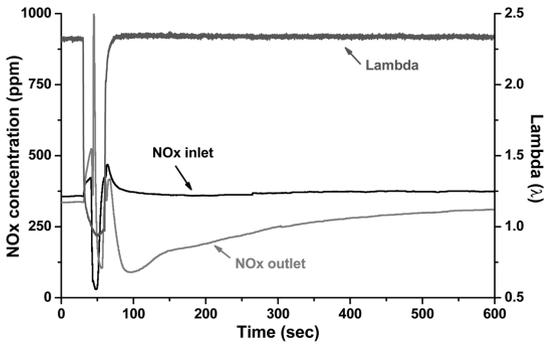


Fig. 5 NOx concentration change during throttle position & injection timing control regeneration

션만을 제어했을 때보다 스로틀 포지션과 인젝션 타이밍을 동시에 제어하였을 때가 추가로 분사된 연료대비 NOx 저감률이 더 높기 때문에 이 연구에서는 스로틀 포지션과 인젝션 타이밍을 동시에 제어하는 재생전략을 사용하였다.

Fig. 6, 7은 스로틀 포지션 센서와 인젝션 타이밍을 동시에 제어한 재생전략을 사용했을 때의 Horiba MEXA 7100D로 측정된 LNT 전·후단에서의 배출 가스 변화 특성이다. 전단 그래프에서 보이는 바와 같이 재생에 의해 LNT 전단에서 CO 5870.2 ppm, THC 235.5 ppm의 평균농도 값을 보였으나 후단에서는 CO 24.0 ppm, THC 156.7 ppm으로 평균농도 값이 크게 감소한 것으로 보아 CO와 THC가 NOx 저감을 위한 환원제로 사용되었다는 것을 알 수 있었다. 이때의 CO와 THC의 저감률은 각각 99.6%, 33.5%로 THC보다 CO가 LNT 촉매의 NOx 저감에 더욱 효과적인 환원제로 사용된다고 판단된다. 만약 촉매 내

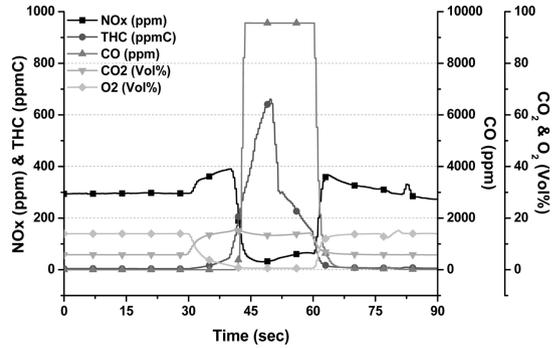


Fig. 6 Exhaust gas concentration change at LNT inlet

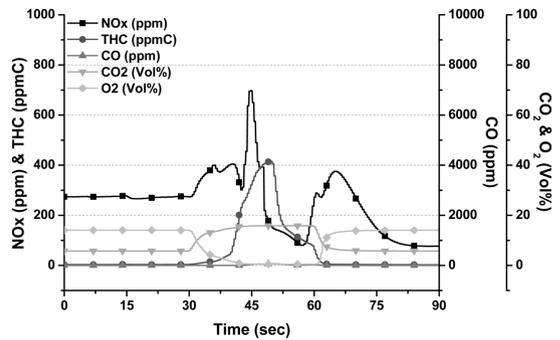


Fig. 7 Exhaust gas concentration change at LNT outlet

로 유입되는 환원제의 양이 LNT 촉매 내의 흡착되어 있던 NOx를 N₂로 정화시키기 부족하다면 NOx가 N₂로 정화되지 않고 그대로 배출될 것이며, 환원제의 양이 많다면 정화에 사용되지 않은 환원제가 대기 중으로 배출되어 또 다른 배출가스 오염 문제가 발생할 것이다. 따라서 각 엔진운전조건에 따라 적절한 환원제의 양이 LNT 촉매 내로 유입되도록 앞서 선택한 재생전략을 사용하여 정밀하게 질량공기유량과 연료분사량을 제어하였다.

3.2 엔진 운전조건에 따른 NOx 저감 특성

Fig. 8은 엔진 운전조건별 재생전략에 따른 희박 조건과 농후 조건의 증가율을 나타낸 그래프이며, 엔진 운전조건별 NOx 정화효율과 촉매온도와와의 상관관계를 나타낸 그래프는 Fig. 9에 나타내었다. 각각의 엔진 운전조건에서 재생전략을 사용한 결과 재생 시 약 26.1%~57.3%의 연료분사량 증가율을 나타내었다. 또한 전 실험조건에서 촉매온도 170.0°C~449.6°C일 때 NOx 정화효율 38%~77.8%를 나타냈

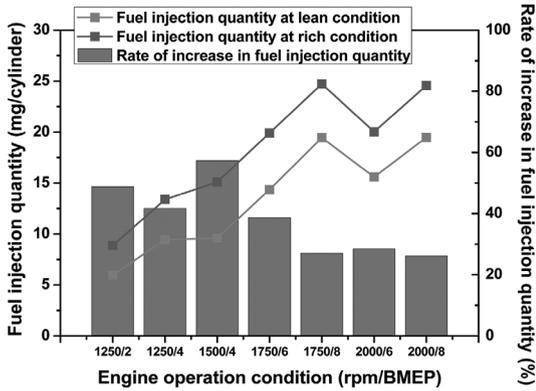


Fig. 8 Rate of increase in fuel injection quantity

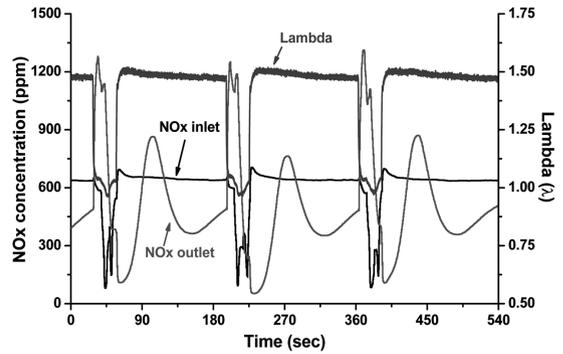


Fig. 10 NOx concentration change during lean / rich cycle, NOx (out) : NOx (in) = 0.25

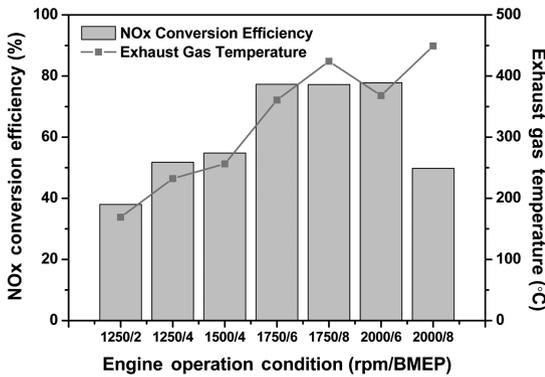


Fig. 9 Correlation of NOx conversion efficiency and exhaust gas temperature

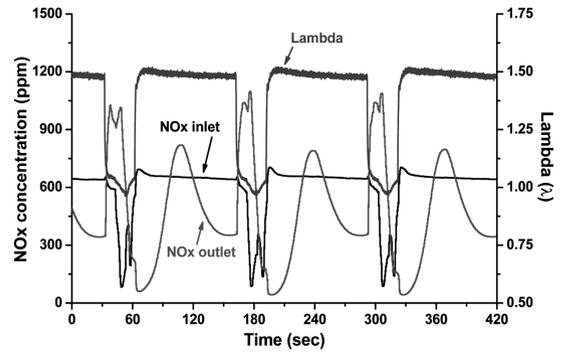


Fig. 11 NOx concentration change during lean / rich cycle, NOx (out) : NOx (in) = 0.5

으며, 촉매온도 350°C~430°C 구간에서의 엔진 운전 조건에서 가장 높은 77.8%의 NOx 정화효율을 나타내었다. 따라서 LNT 촉매의 최적의 작동온도구간은 약 350°C~430°C라고 판단된다.

3.3 재생주기에 따른 NOx 저감 특성

엔진 운전조건 2000 rpm, BMEP 8.0 bar에서 LNT 촉매의 후단과 전단의 NOx 농도비가 0.25일 때의 재생주기로 제어하는 재생전략에 따른 NOx 저감 특성을 Fig. 10에 나타내었다. 후단과 전단의 NOx 농도비를 모니터링 하면서 순간적으로 0.25 값을 나타낼 때 기존 실험과 동일한 재생전략으로 재생을 진행하였으며 총 3번의 사이클을 실험하였다. 그 결과 람다 값은 0.98, 재생주기는 약 130초, 전체 NOx 저감률은 29.4%로 측정되었다. LNT 후단에서 배출되는 NOx 농도가 전단 NOx 농도보다 높게 측정된

부분은 환원제의 양이 약간 부족하여 NOx가 N₂로 정화되지 못하고 그대로 배출되었기 때문이다. 또한 이 실험의 엔진 운전조건은 고온에 따른 NO₃ 열적 안정성 문제로 정화효율 감소가 나타나는 온도 구간이므로 전체 NOx 저감률도 다소 낮게 측정되었다. 이 실험에서 희박 조건과 농후 조건에서의 연료분사량을 토대로 같은 시간동안 LNT 촉매 없이 운전한 경우에 비해 LNT 촉매를 장착하여 주기적으로 재생한 경우 4.67%의 연비손실률이 예측되었다. 따라서 이 재생전략을 통해 5% 이내의 연비손실률로 NOx 저감이 가능하다는 것을 확인하였다.

Fig. 11은 동일한 엔진 운전조건에서 LNT 촉매의 후단과 전단 NOx 농도비가 0.5일 때의 재생주기로 제어하는 재생전략에 따른 NOx 저감 특성이다. 그 결과 람다 값은 0.98, 재생주기는 약 100초, 전체 NOx 저감률은 34.2%로 측정되었다. 또한 연비손실률은 5.69%로 후단과 전단의 NOx 농도비가 0.25일

때 재생한 결과보다 1.02% 연비손실률 증가가 예측되었다. 빈번한 재생은 연료소모량이 증가해서 연비가 떨어질 수 있으므로 배출가스 규제를 만족하는 선에서 적절한 재생주기로 높은 NOx 저감률을 유지함과 동시에 낮은 연료소모량으로 재생전략을 정밀하게 제어하는 것이 중요하다고 판단된다.

4. 결론

이 연구에서는 승용디젤엔진의 연료제어 변수를 조작하여 LNT 촉매의 NOx 저감을 위한 재생전략을 수립하고 이를 통하여 각 엔진 운전조건과 재생주기에 따라 NOx 저감 특성을 분석하였다.

- 1) LNT 촉매의 재생을 위하여 스로틀 포지션만을 제어한 경우보다 스로틀 포지션과 인젝션 타이밍을 동시에 제어한 경우가 NOx 저감에 더욱 효과적이라고 판단된다. 또한 환원제로 사용되는 CO와 THC 중 CO가 NOx 저감에 더욱 큰 영향을 미치며, 운전조건에 따라 NOx 정화에 필요한 최적의 환원제 양이 있기 때문에 환원제의 슬립량을 최소화하도록 재생전략을 정밀하게 제어하는 것이 필요하다.
- 2) 엔진 운전조건에 따른 NOx 저감 특성을 평가한 결과 각각의 엔진 운전조건에서 재생전략에 따라 재생 시 약 26.1%~57.3%의 연료분사량 증가율을 나타내었으며, 최고 77.8%의 높은 NOx 정화효율을 달성하였다. 또한 LNT 촉매의 최적의 작동온도구간은 약 350°C~430°C라고 판단된다. 따라서 촉매의 활성화 온도인 LOT(Light Off Temperature)를 위하여 촉매 위치에 따른 후처리 시스템 구성 방법에 대한 연구 또한 필요하다고 판단된다.
- 3) 재생주기에 따른 NOx 저감 특성을 평가한 결과 재생주기가 LNT 전·후단의 NOx 농도비 0.25인 경우 29.4%의 NOx 저감율과 4.67%의 연비손실률이 측정되었으며, 재생주기가 LNT 전·후단의 NOx 농도비 0.5인 경우 34.2%의 NOx 저감율과 5.69%의 연비손실률이 측정되었다. LNT 촉매는

환원제로 연료를 사용하기 때문에 높은 NOx 저감률과 최소한의 연료소비율로 운전하는 것이 가장 중요하다. 따라서 각 엔진 운전조건에서 NOx 배출량에 따른 정밀한 연료분사 제어로직을 구성하여 보다 짧은 시간동안의 농후한 재생과 적절한 재생주기를 통해 NOx 저감률 향상과 연비손실률 감소가 요구된다.

References

- 1) S. K. Hwang, A. Ko, J. Y. Yoon, C. L. Myung, S. Park and E. Kim, "A Study on NOx Reduction Characteristic of LNT Catalysts Using Operating Condition Control for Light-duty Diesel Engine," Annual Conference Proceedings, KSAE, pp.377-379, 2011.
- 2) J. W. Yoon, S. K. Hwang, I. G. Hwang, S. Park, J. H. Lee and G. K. Yeo, "Study of NO Storage and Reduction on LNT by Micro Bench-flow Reactor," Transactions of KSME, Vol.35, No.8, pp.789-798, 2011.
- 3) S. Hackenberg and M. Ranalli, "Ammonia on a LNT: Avoid the Formation or Take Advantage of It," SAE 2007-01-1239, 2007.
- 4) G. W. Nam, J. W. Park, J. H. Lee and G. K. Yeo, "The Effect of an External Fuel Injection on the Control of LNT System; the Diesel NOx Reduction System," SAE 2007-01-1241, 2007.
- 5) D. Di-Penta, K. Bencherif and P. Y. Le-Morvan, "System Approach for NOx Reduction: Double LNT Diesel After-Treatment Architecture," SAE 2011-01-0305, 2011.
- 6) J. R. Theis, M. Dearth and R. McCabe, "LNT+SCR Catalyst Systems Optimized for NOx Conversion on Diesel Applications," SAE 2011-01-0305, 2011.
- 7) J. Parks, B. West, M. Swartz and S. Huff, "Characterization of Lean NOx Trap Catalysts with In-Cylinder Regeneration Strategies," SAE 2008-01-0448, 2008.