디젤엔진에서 2차 분사조건에 따른 HC-LNT 시스템의 NO_x 변환 특성

박진규·오정모·이기형*

한양대학교 기계공학과

NO_x Conversion Characteristics of HC-LNT System according to Secondary Injection Conditions in a Diesel Engine

Jinkyu Park • Jungmo Oh • Kihyung Lee*

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

(Received 26 January 2012 / Revised 28 March 2012 / Accepted 2 April 2012)

Abstract : Automotive engines need strategies to satisfy with the emission regulations in terms of PM and NO_x. HC-LNT (Hydrocarbon-Lean NO_x Trap) with secondary injection system is considered as more practical technology in order to cope with emission regulations. The HC-LNT system, which is using diesel fuel itself as a reducing agent, absorbs NO_x in lean exhaust gas condition and releases NO_x in rich exhaust gas conditions. In this system, inappropriate amounts of reducing agent will slip through the LNT without the profits of conversion and cause additional emission problems. Therefore, the suitable amount of reducing agent should be supplied into the catalytic converter. In this research, engine emission test was conducted to optimize injection quantity at the various engine test conditions. Different exhaust layouts and catalyst shapes have been studied and extension unit which makes better uniformity of exhaust gas was used for HC-LNT system. From this results, the effect of secondary injection conditions on NO_x conversion characteristics of HC-LNT was clarified.

Key words : HC-LNT(Hydrocarbon-lean NO_x Trap), Secondary injection system(2차분사계), NO_x(질소 산화물), E-unit(Extension unit), Diesel engine(디젤엔진)

1. 서론

자동차의 수가 증가함에 따라 배기 배출물에 의한 환경오염과 CO₂에 따른 지구 온난화 문제가 심각하게 야기되고 있다. 이에 따라 전 세계적으로 자동차에 대한 배기 규제가 강화되고 있으며, 이를 만족시키기 위하여 자동차의 배기 배출물 저감을 위한 기술이 절실하게 요구 되고 있다.

열효율이 높은 디젤 엔진이 CO₂저감의 해결책으로 최근 많은 보급이 이루어지고 있으나, 디젤의 경우 NO_x(질소 산화물)과 PM(Particulate Matter) 배출이 문제시 되고 있으므로 이러한 배기 배출물들에

관한 근본적인 해결 방안이 중요시 되고 있다. 이를 위하여 현재 커먼레일 고압연료분사, EGR(Exhaust Gas Recirculation), 터보차저와 인터쿨러 등과 같은 엔진기술과 DPF(Diesel Particle Filter), SCR(Selective Catalytic Reduction), LNT(Lean NO_x Trap)등과 같은¹⁻³⁾ 후처리 기술로 대응하고 있다. PM의 경우는 DPF를 통하여 대부분 저감하고 있으나, NO_x의 경우는 EURO-VI와 같이 강화되는 배기규제에 대응하기 위하여 2차 분사계를 적용하는 등 보다 높은 효율을 갖는 NO_x 저감 기술 개발의 개발이 활발히 진행되고 있다.

2차 분사계는 엔진의 배기관에 장착되어 배기각스의 정화를 위해 분위기 조건에 따라 환원제를 분

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

사해 주는 시스템으로서, 정화 효율을 높이기 위하여 배기가스 유동장과 상호작용을 고려한 분무패턴 형성 기술 및 적절한 분사위치 선정이 필요하다. 승용디젤 자동차의 경우, 이론적으로 가장 안정적으로 알려져 있고 다른 후처리 장치보다 체적이 작은 LNT⁴⁾와 2차 분사계를 결합하여 NOx의 정화효율을 높이려고 하는 연구가 주목을 받고 있다.

이와 같은 2차 분사계에 관한 연구들 중에서 별도의 환원제가 필요 없이 경유를 환원제로 사용하는 HC-LNT(Hydrocarbon-lean NOx Trap)의 경우 과도한 환원제 분사 시 차량의 연비를 저하시키며, THC 슬립을 일으켜 대기에 방출되면 환경오염을 유발시키는 문제점을 내포하고 있다. 따라서 최소의 환원제 양으로 최대의 정화효율을 갖는 환원제 분사 조건과 최적한 환원제 분포는 NOx 변환 효율을 높이는 데 중요한 요인이 되므로 이에 관한 연구가 매우 중요하다.^{5,6)}

따라서 본 연구에서는 디젤 엔진에 2차 분사 시스템이 적용된 HC-LNT를 장착하여 실제 엔진 운전 조건 하에서 2차 분사 인젝터의 장착 위치와 향상된 촉매의 사용에 따른 NOx 변환 효율을 측정하여 분석하였다. 또한 NOx 변환 효율 향상을 위하여 새로운 믹서형태의 E-unit(Extension unit)를 고안하여 실험에 적용하여 평가하였고, 환원제의 분사압력 등 분사조건에 따른 NOx 변환 효율을 측정하였다. 이와 같은 연구를 통하여 2차 분사계가 적용된 HC-LNT 적용시 요구되는 환원제 분사전략 수립에 필요한 인자에 대하여 파악하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험 장치

본 연구에 사용된 대상엔진은 2.2L급이며 VGT와 유럽의 배기규제인 EURO-V 기준을 만족시키는 4기통 커먼 레일 디젤 엔진이며, 구체적인 엔진 제원은 Table 1과 같다. Fig. 1은 실제 엔진 배기관 내에서의 2차 분사 시스템과 LNT 촉매의 성능을 평가하기 위하여 구성한 시스템의 개략도이고, Fig. 2는 실제 실험 장치를 구성한 모습사진이다.

환원제 분사용 인젝터를 장착한 두 종류의 배기관 Layout을 Fig. 3에 나타내었다. 첫 번째 배기관

Table 1 Specification of engine

Description	Specification
Engine type	4-stroke turbo-charged DI diesel engine
Number of cylinder	4
Bore × Stroke (mm)	87 × 92
Displacement volume (cc)	2187cc
Fuel injection system	Common rail (Piezo type)
Valve type	DOHC 4 valves per cylinder
Max. power (ps/rpm)	197 / 3,800
Max. torque (kg·m/rpm)	Max. torque (kg·m/rpm)

Fig. 1 Configuration of engine and after treatment system

Fig. 2 Photograph of the engine experiment system with dynamo and catalyst

Layout으로는 촉매가 DOC-DPF-DFC-LNT순으로 나열되어 있으며, 환원제 분사용 인젝터가 LNT와 DFC(Diesel Fuel cracking Catalyst) 전단에 부착되어 배기관의 단면 중심 위치에서 수평으로 분사하는 방식이다. 본 실험에 사용한 인젝터의 부착각도 선정은 이전의 연구에서 모사배기관 실험을 통하여 촉매의 NOx 변환 성능이 가장 우수한 것으로 판명

Fig. 3 Injector and catalysts positions in the exhaust pipe

Fig. 4 Extension unit and catalyst assembly

된 위치를 선정하게 되었다.⁷⁻⁹⁾

두 번째 배기관 layout은 촉매가 DOC-DPF-LNT 순으로 나열되어 있으며, DOC전단과 터보차저 후단에서 환원제를 분사하는 방식이다. 이 시스템의 특징은 터보차저에 의한 난류 유동장(turbulence)을 충분히 이용하여 배기관내 환원제의 분무 균일도를 좋게 할 수 있다는 점이다.

Layout 1과 2에 사용한 촉매 모두 fresh상태이고, Layout 1에 사용한 LNT 1은 First edition으로 2.0L급이며, Layout 2에 사용한 LNT 2는 Second edition으로 LNT 1 보다 성능이 향상된 2.75L급이다. 본 연구에 사용된 LNT 촉매는 400cpsi/4mil.이다. 촉매의 크기에서 알 수 있는 바와 같이 두 조건에서의 NOx 변환효율은 차이를 보일 것으로 예상 하였고, 이전의 연구 결과⁷⁻⁹⁾와 이를 보완하기 위하여 Fig. 4와 같은 형태의 믹서를 고안 하였으며, 이 장치를 E-unit (Extension unit)라고 명명하였다. 고안된 E-unit는 AVL사의 FIRE로 수치해석을 진행하였고, Layout 1

Table 2 Theoretical values and conditions for simulation

Run mode	signal pattern
Fluid	Air
Initial condition	100000pa, 25°C
	Potential flow
Turbulence model	k-epsilon
Mass flow	0.01kg/s

의 분무 균일도를 향상시키기 위해 촉매입구에 E-unit를 장착 후 엔진실험을 수행하여 그 특성을 파악하였다. Table 2에 수치해석 시 사용한 조건들과 이론 값들을 나타내었다.

2차 분사계의 환원제 분사량은 PWM신호(Pulse Width Management)를 통해서 조절하였고, Fig. 5에 PWM 신호패턴을 나타내었다. 펄스 폭은 단일 분무 특성을 결정하고, 분사 주기는 분무의 농도를 결정하며, 펄스의 횟수는 총 분무량을 결정한다. 이러한 PWM신호는 National Instruments사의 LabVIEW와 TTL high speed digital out put 모듈을 이용하여 발생시켰고, 발생한 신호는 인젝터 드라이버에 인가되어 인젝터를 작동시킨다. 이러한 인젝터 제어 장치는 Fig. 6과 같다.

Fig. 5 signal pattern of PWM

Fig. 6 Injector control setting

Table 3 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
	O ₂	1 ~ 25% vol.
Sample	Flow	9 ~ 12 l/min
	Inlet pressure	0 ~ 30kPa

배기가스 측정은 DFC 전단과 LNT 촉매 후단에 가스 분석기 Probe를 장착하여 NOx, THC, CO, O₂ 농도를 측정하였고, 가스분석기는 HORIBA사의 MEXA-7200을 사용하였다. 상세한 제원은 Table 3과 같고, 배기 가스 분석과 동시에 LNT 촉매 전·후단에 열전대(Thermocouple)를 장착하여 배기온도를 측정하였다.

2.2 실험방법

LNT 성능 평가 실험에 앞서 이전 연구의 결과⁷⁻⁹⁾를 바탕으로 엔진 실험 조건을 선정하였다. LNT는 배기가스의 산소농도가 높은 lean한 조건에서 NOx를 흡장하며, 7%이하인 rich한 조건에서 환원반응이 일어나므로 산소농도가 7%이하인 구간을 기준으로 하였고, 또한 DPF 재생모드인 실린더 내 후분사가 일어나는 조건을 파악하여 제외하였다.⁵⁾ 이 두 조건을 만족하고, 실제 운전 시 사용빈도가 많은 중속 및 중, 저부하 조건을 선정 하였다. 이에 따라 선정된 엔진 실험 조건은 Table 4와 같다.

환원제 분사 조건은 Table 5와 같다. 분사 주기는 30Hz로 고정하였고, 분사 압력을 4 ~ 6bar로 하여 분사 압력에 따른 변환효율 특성을 알아보았으며, 분사량을 기준으로 3.0 ~ 4.5g/min 사이에서 효율적인 분사조건을 파악하였다.

한 사이클을 30초로하여 사이클 당 3초씩 분사하였으며 분사 전 엔진을 충분히 운전하여 NOx의 농

Table 4 Engine test condition for LNT system

RPM	1,800	1,900	2,000
bmep	7.5bar	7.5bar	7.5bar
O ₂ LNT in	5.0%	5.2%	5.5%
NOx LNT in	165ppm	160ppm	155ppm
Temp. LNT in	386°C	384°C	380°C

Table 5 Injection strategy

Frequency	30Hz
pressure	4, 5, 6bar
Duty	55% ~ 75%
Quantity	3.0 ~ 4.5g/min
Time interval	30s
Number of injection	90

도가 일정해진 상태에서 10분간 분사하여 효율을 알아보았다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 7은 배기관 layout 1에서 1,900rpm, bmep 7.5bar의 조건 하에 환원제 분사량에 따른 NOx 변환효율과 THC slip양을 측정한 그래프이다. 분사되는 환원제의 양이 증가 할수록 THC slip양과 NOx 변환효율이 증가 되었으나 3.8g/min부터 급격하게 THC가 증가되었다. 따라서 높은 NOx 변환 효율과 THC Slip양이 급격하게 증가하는 것을 고려하면 환원제 분사량이 3.8~4.1g/min가 효율적인 분사구간이라 판단되며 그 구간사이에서 THC에 대한 촉매의 임계값⁵⁾이 존재할 것으로 예상된다.

Fig. 8과 Fig. 9는 효율적인 분사량을 3.8g/min으로 선정하고 환원제의 분사압력과 엔진의 RPM(배기유량)에 따른 NOx 변환효율 특성을 나타낸 그래프이다. 분사압력이 증가하면 분사량이 많아지기 때문에 분사압력에 따라 분사기간(Duration)을 조절하여 분사량을 일정하게 하였다. 결과는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 분사압력의 증가는 더 높은 NOx 변환효율을 나타내며, 더 많은 THC slip도 발생 한다. 이

Fig. 7 NOx conversion rate and average THC slip for each injection quantity (1,900rpm, bmep 7.5bar, layout 1)

Fig. 8 NOx conversion rate and average THC slip for different injection pressure (1,900rpm, bmep 7.5bar, layout 1)

Fig. 10 NOx conversion rate and average THC slip for each injection quantity (1,900rpm, bmep 7.5bar, layout 2)

Fig. 9 NOx conversion rate and average THC slip for different engine speed (bmep 7.5bar, layout 1)

는 인젝터의 분사압력이 커질수록 분사된 환원제의 입자가 더욱 미립화^{7,8,12)}되어 동일 분사량에서 환원제 전체의 표면적이 증가하기 때문에 보다 높은 NOx 변환효율이 나타난 것으로 판단된다.

RPM 변화의 경우를 보면 낮은 RPM 조건에서 NOx 변환효율이 높게 나타났다. RPM이 증가할수록, 즉 배기유량이 증가할수록 NOx 변환효율은 저하되었고, THC slip은 1,900 RPM 이상에서 저하폭의 변화가 적게 나타났다. 이는 RPM이 증가하면 배기유량이 증가하기 때문에 NOx 변환에 필요한 환원제의 양이 적다는 것을 의미한다. 따라서 LNT시스템에서 RPM(배기유량) 또한 NOx 변환효율에 미치는 영향이 크고 환원제 분사 방법(Injection strategy) 결정에 매우 중요한 인자임을 알 수 있다.

Fig. 10은 배기관 layout 2에서 1,900rpm, bmep 7.5bar의 조건에서 환원제 분사량에 따른 NOx 변환효율과 THC slip을 나타낸 결과이다. 환원제 분사량

이 4.1~4.5g/min에서 60%이상으로 높은 NOx 변환효율을 보였다.

Fig. 11과 Fig. 12는 배기관 layout 2에서 효율적인 환원제 분사량을 4.1g/min으로 선정하고 환원제의 분사압력과 엔진의 RPM(배기유량)에 따른 NOx 변환효율 특성을 실험한 결과이다. layout 2에서 실험한 결과도 Layout 1의 결과와 마찬가지로 분사압력이 증가 할수록 NOx 변환효율이 향상 되었고, 낮은 RPM 조건에서 NOx 변환효율이 높게 나타났다. Fig. 12의 엔진 회전수에 따른 결과로부터 2,000RPM에서 NOx 변환 효율은 급격히 저하 되었다. 이는 Layout 1의 결과와 같이 RPM(배기유량) 조건에 따라 환원제의 분사 조건 설정이 필요하다는 것을 재확인 하였다.

이러한 결과로부터 Layout 2의 NOx 변환효율은 향상된 촉매의 성능으로 인해 Layout 1의 NOx 변환효율보다 더 높았다. THC slip양도 확연히 줄어들었고, NOx 변환효율이 80%에 달했지만 적은 환원제 분사량에서는 NOx 변환이 거의 일어나지 않았다. 따라서 촉매의 활성화에 필요한 HC의 양(농도)에 대한 임계값⁵⁾이 존재함을 확인 하였고, LNT 2는 임계값이 높다는 사실을 알 수 있었다.

Layout 2의 경우 환원제 분사조건에 따른 대부분의 결과가 layout 1과 비슷한 경향을 보였고 향상된 촉매의 적용으로 더 높은 NOx변환 효율을 보였다. 반면, THC Slip의 경우 전체적으로 layout 1의 THC 농도가 높으며, 분사량 증가에 따라 NOx변환율이 완만하게 증가하는 구간인 layout 1의 3.8~4.1g/min, layout 2의 4.1~4.5g/min에서 layout 2의 THC slip의

Fig. 11 NOx conversion rate and average THC slip for different injection pressure (1,900rpm, bmep 7.5bar, layout 2)

Fig. 12 NOx conversion rate and average THC slip for different engine speed (bmep 7.5bar, layout 2)

증가량은 99%이나 layout 1의 THC Slip 증가량은 165%로 급격해지는 경향을 나타내고 있다. 이러한 결과의 이유로는 layout 2가 터보차저에 의한 난류 유동장을 충분히 이용하여 분포균일도가 향상되어 더 높은 NOx 변환효율과 더 낮은 THC Slip량을 갖는 것으로 판단하였다. 이에 분사된 환원제의 분포도 NOx의 변환효율에 큰 영향을 미칠 것이라 사료되어 환원제의 분포 균일도를 향상시키기 위해 본 연구를 통해 고안된 E-unit를 Layout 1에 적용하여 실험을 진행하였다.

실험을 시작하기 전에 고안된 장치의 성능을 수치적으로 평가하기 위하여 AVL사의 Fire 해석코드를 이용하여 수치해석을 수행하였다. Fig. 13은 배기가스의 공간속도를 수치해석을 통하여 LNT 1 촉매 전단의 관 단면에 대한 배기가스의 분포 균일도를 E-unit의 유무에 따라 비교한 결과이다. 정량적인 배

(a) Without E-unit (b) With E-unit
Fig. 13 Result of simulation for extension unit

Fig. 14 NOx conversion rate and average THC slip for each injection quantity (1,900rpm, bmep 7.5bar, layout 1 with extension unit)

Fig. 15 Comparison of NOx conversion rate for extension unit

기가스 공간속도의 분포 균일도^{10,11)}를 계산한 결과는 E-unit이 없는 경우는 43.5%이고, E-unit을 설치한 경우는 65.8%이다. 이는 약 50%가 향상된 결과이다.

Fig. 14는 Layout 1에 E-unit을 설치하여 실험한 결과이다. E-unit 설치 전의 결과와 같이 환원제 분사량이 증가함에 따라 변환효율이 높아졌고, 3.8~4.1 g/min에서 효율적인 분사량을 도출할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 15는 E-unit의 유무에 대한 NOx 변

환효율의 비교 결과이다. 수치해석에서 배기가스의 분포 균일도는 약 50%정도 향상된 반면 이 결과 그 래프에서 알 수 있는 바와 같이 실제 NOx 변환효율은 전체적으로 약 10%정도 향상 되었다. 이는 E-unit를 사용함으로써 배기가스의 분포 균일도가 향상됨에 따라 분사된 환원제의 분무균일도¹¹⁾가 향상되었을 것으로 판단된다. 따라서 E-unit는 Layout 1과 같은 조건에서 유용하게 활용될 장치이다.

4. 결 론

본 연구에서는 HC를 환원제로 하고 2차 분사제가 적용된 LNT 촉매 시스템에서 환원제의 효율적인 분사를 위한 배기관의 촉매와 인젝터의 배열에 따른 NOx 변환 특성과 사양이 다른 촉매에서 환원제의 분사량, 분사압력, 엔진 회전수에 따른 NOx 변환 효율을 파악하였고, 성능향상을 위해 고안한 장치의 성능도 파악하였다. 이러한 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Layout 1은 3.8~4.1g/min, Layout 2는 4.1~4.5g/min에서 효율적인 분사가 이루어지고, 환원제에 대한 촉매의 임계값이 존재하며 이를 초과할 경우 급격한 NOx 변환효율 저하와 THC slip을 초래한다.
- 2) 환원제의 분사압력이 증가하면 분무 미립화가 향상됨으로써 환원제의 표면적이 증가되기 때문에 NOx의 변환효율이 향상된다.
- 3) 엔진 RPM(배기유량)도 NOx 변환에 큰 영향을 미치기 때문에 RPM(배기유량) 조건에 따라 환원제의 분사 조건 설정이 필요하다.
- 4) Layout 2는 향상된 촉매의 적용과 터보차저의 난류 운동장에 의한 환원제의 고른 분포로 인하여 더 높은 NOx 변환 효율을 보였다.
- 5) Layout 1과 같은 배기계 Layout일 경우 E-unit를 사용함으로써 배기가스 분포 균일도는 약 50%, NOx 변환효율은 약 10%정도 향상시킬 수 있다.
- 6) 환원제의 분사량, 분사압력, 엔진 RPM(배기유량), 분무 균일도를 고려한 환원제의 분사 위치는 2차 분사제가 적용된 HC-LNT에서 환원제 분사방법 결정에 매우 중요한 인자임을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 산업기술평가원에서 지원하는 “Post EURO 6 배기규제 대응을 위한 승용 클린디젤엔진 핵심제어알고리즘 및 ECU 설계기술 개발(No.10039673)”과제의 일원으로 수행되었고 지원기관에 감사드립니다.

References

- 1) J. M. Storey, “Hydrocarbon Species in the Exhaust of Diesel Engines Equipped with Advanced Emissions Control Devices,” Coordinating Research Council, Inc. CRC Project No.AVFL-10b-2, 2005.
- 2) T. Morita, N. Suzuki, N. Satoh, K. Wada and H. Ohno, “Study on Low NOx Emission Control Using Newly Developed Lean NOx Catalyst for Diesel Engine,” SAE 2007-01-0239, 2007.
- 3) N. Kondo, Y. Takeda, Y. Tsutsui, K. Suzuki, Y. Takahashi and M. Murata, “Development of Lean NOx Trap System for Commercial Vehicle~ Application to Multi Cylinder Engine and Development,” SAE 2005-01-3875, 2005.
- 4) I. Hachisuka, T. Yoshida, H. Ueno, N. Takahashi, A. Suda and M. Sugiura, “Improvement of NOx Storage-reduction Catalyst,” SAE 2002-01-0732, 2002.
- 5) 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 2007-01-1242, 2007.
- 6) J. S. Park, S. M. Lee, H. K. Lee, J.-W. Park, J. Lee and H.-J. Kim, “Development of Control Logic and Optimization of Catalyst in DeNOx System with Secondary Injection for Euro 6,” SAE 2010-01-1067, 2010.
- 7) J. M. Oh, K. Y. Lee and J. H. Lee, “A Study on the Optimal Injection Conditions for an HC-LNT Catalyst System with a 12-hole Type Injector,” Journal of Thermal Science and Technology, Vol.3, No.2, pp.278- 291, 2008.
- 8) J. M. Oh, K. H. Lee and H. Y. Jeong, “Study on the Spray Behavior and Diesel Fuel Distribu-

- tion Characteristics of a Secondary Injector for a Lean NOx Trap Catalyst,” *Energy & Fuels*, Vol.22, pp.1527-1534, 2008.
- 9) J. M. Oh, W. K. Mun, K. B Kim, J. H. Lee and K. Y. Lee, “Study on the Optimal Injection Condition for HC-LNT Catalyst System for Diesel Engines with a Gasoline PFI Type Injector,” *Transactions of KSME(B)*, Vol.35, No.2, pp.121-127, 2011.
- 10) H. Weltens, “Optimisation of Catalytic Converter Gas Flow Distribution By CFD Prediction,” SAE 930780, 1993.
- 11) J. M. Oh, W. S. Cha, K. B Kim, J. H. Lee and K. Y. Lee, “A Study on the Characteristic and Droplet Uniformity of Spray Injection to Exhaust Gas Flow from Urea Solution Injector,” *Transactions of KSAE*, Vol.19, No.3, pp.83-89, 2011.
- 12) Y. R. Kim, M. S. Kim, H. Cho and K. D. Min, “A Study on the Characteristics of an Evaporating Diesel Spray Using Life Technique,” *Journal of ILASS-Korea*, Vol.7, No.3, pp.18-23, 2002.