Urea-SCR 분사시스템의 DeNO_x 저감 성능 향상과 NH₃ 슬립 저감을 위한 모델 기반 제어알고리즘 개발 및 구현

정 수 진^{*1)} · 김 우 승²⁾ · 박 정 권¹⁾ · 이 호 길¹⁾ · 오 세 두¹⁾

자동차부품연구원 그린동력시스템연구센터¹⁾ · 한양대학교 기계공학과²⁾

The Development and Implementation of Model-based Control Algorithm of Urea-SCR Dosing System for Improving De-NO_x Performance and Reducing NH₃-slip

Soo-Jin Jeong^{*1)} · Woo-Seung Kim²⁾ · Jung-Kwon Park¹⁾ · Ho-Kil Lee¹⁾ · Se-Doo Oh¹⁾

¹⁾Green Powertrain System R&D Center, Korea Automotive Technology Institute, 74 Yongjung-ri, Pungse-myeon,
Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea

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

(Received 4 March 2010 / Revised 16 July 2011 / Accepted 18 July 2011)

Abstract : The selective catalytic reduction (SCR) system is a highly-effective aftertreatment device for NO_x reduction of diesel engines. Generally, the ammonia (NH₃) was generated from reaction mechanism of SCR in the SCR system using the liquid urea as the reluctant. Therefore, the precise urea dosing control is a very important key for NO_x and NH₃ slip reduction in the SCR system. This paper investigated NO_x and NH₃ emission characteristics of urea-SCR dosing system based on model-based control algorithm in order to reduce NO_x. In the map-based control algorithm, target amount of urea solution was determined by mass flow rate of exhaust gas obtained from engine rpm, torque and O₂ for feed-back control NO_x concentration should be measured by NO_x sensor. Moreover, this algorithm can not estimate NH₃ absorbed on the catalyst. Hence, the urea injection can be too rich or too lean. In this study, the model-based control algorithm was developed and evaluated on the numerical model describing physical and chemical phenomena in SCR system. One channel thermo-fluid model coupled with finely tuned chemical reaction model was applied to this control algorithm. The vehicle test was carried out by using map-based and model-based control algorithms in the NEDC mode in order to evaluate the performance of the model based control algorithm.

Key words : SCR(Selective Catalytic Reduction, 선택적환원촉매), Urea(요소), NH₃(암모니아), NO_x(질소산화물), NEDC(New European Driving Cycle, 유럽배기규제시험모드)

1. 서 론

디젤 엔진에서 발생하는 주요 배출 물질 중 하나인 PM은 최근 들어 DPF(Diesel Particulate Filter)의 기술 발달로 약 80%가 넘는 저감수준까지 도달하였다.^{1,2)} 그러나 PM과 trade-off 관계에 있는 NO_x는 기존 승용디젤차량의 Euro-IV(0.25g/km) 규제 대비

Euro-V(0.18g/km)에서는 28%, 2014년 도입 예정인 Euro-VI(0.08g/km)규제에서는 Euro-V 대비 56%의 더욱 강화된 NO_x저감을 목표로 하고 있다.³⁾ 디젤 차량에서 발생하는 질소산화물의 저감방법에는 LNT(Lean NO_x Traps) 또는 LNC(Lean NO_x Catalysts)의 NO_x 흡장형 촉매장치와 선택적 환원 촉매장치인 SCR(Selective Catalytic Reduction)이 제시되고 있다.^{4,5)} 이러한 방법 중 SCR은 NO_x 정화 효율이

*Corresponding author, E-mail: sjjeong@katech.re.kr

가장 우수하고, 이미 공장이나 대형 경유 트럭에 적용되어 그 성능을 검증받았으며, 최근 대두되고 있는 이산화탄소 배출량 저감에도 유리하다는 측면⁵⁾에서 NOx 규제치에 대응하기 위한 가장 우수한 촉매 장치로 주목받고 있다. 최근 선진국의 자동차 제작사는 강화된 NOx 배출규제에 대응하기 위해 승용디젤 차량에까지 SCR 시스템을 장착하기 위한 적극적인 연구와 개발을 추진하고 있다. Mercedes-Benz는 Bluetec[®]이라는 시스템⁶⁾을 통하여 상용차에서 점차 승용 디젤차량까지 Urea-SCR시스템을 적용하기 위한 연구 개발을 진행하고 있다. 또한 Audi는 최신 기술이 적용된 차세대 3.0 Liter V6 디젤엔진에 Urea-SCR시스템을 적용하여 Euro-VI 및 Tier-2 Bin 5 규제에 대응하기 위한 디젤 차량을 개발하였고⁷⁾ 미국의 포드 역시 2.7 Liter 승용 디젤트럭에 Urea-SCR시스템을 적용, Tier-2 Bin 5 규제에 대응할 수 있는 디젤 차량을 개발하였다.⁸⁾ 그러나 배기량이 작은 승용 디젤 엔진의 경우 배기량이 큰 엔진에 비해 차량 하부의 공간 협소 및 후처리 장치 적용에 따른 추가적인 부담으로 세심하고 효과적인 NOx 저감 전략이 필요하다.⁹⁾ 또한 urea수용액의 분사량은 차량의 운전 조건에 따라 가변적이므로 SCR 촉매는 차량의 운전 조건 변화에 따른 최적의 urea의 분사량을 결정하여 부족한 NH₃로 인한 NOx 전환율의 감소와 과다 분무로 인한 SCR 촉매내에서의 NH₃ slip 방지를 동시에 고려할 수 있도록 설계되어야 한다.^{10,11)} 더욱이 최신 SCR 촉매는 많은 양의 NH₃를 저장할 수 있으며, 저장되는 양은 촉매의 온도와 가스상에 존재하는 NH₃ 농도에 따라 결정된다. 따라서 SCR 촉매의 NH₃ 저장 효과는 요소수용액 분사량 제어의 정확도에 있어서 중요한 제어 인자이다.⁸⁾ 이러한 측면에서 본 연구는 2.0 Liter 승용 디젤을 기반으로 하는 SCR 촉매에서의 NOx 변환효율과 촉매 후단에서 발생하는 NH₃ slip을 예측할 수 있는 SCR 해석 모델을 개발하여 urea 분사량의 보정이 가능한 모델 기반 제어로직을 개발하였다.

이러한 모델 기반 제어로직의 성능 최적화 여부를 판단하고 실차적용 가능성에 대한 타당성을 검증하기 위해 엔진동력계 실험을 통해 작성된 엔진 맵 기반 제어로직의 NOx 저감 효율과 비교, 평가하

여 urea 최적 분사를 위한 SCR 해석 모델의 신뢰성을 확보하였다. 또한 동일 엔진이 탑재된 차량을 대상으로 두 제어 로직의 정량적 평가를 위해 NEDC 모드를 통한 실제 운전 구간에서의 NOx 저감 효율 및 NH₃ 슬립 특성을 비교, 분석하였다. 본 연구는 이러한 실험 과정 및 분석을 통해 2.0 Liter 승용 디젤차량에서 NOx 저감을 위한 모델 기반 제어로직을 개발하였으며, 엔진 및 차량성능 평가를 통하여 deNOx 성능 평가를 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구는 2.0 Liter 승용 디젤차량의 NOx 저감을 위한 모델 기반 제어로직의 설계 및 검증을 위한 연구로서 아래와 같은 실험 장치와 방법을 통해 본 연구를 수행하였다.

2.1 주요 실험 장치

Table 1은 엔진 맵(Map)설계 및 모델 기반 제어 로직의 검증을 위해 본 연구에 적용된 엔진의 제원을 나타내고 있다. 또한 주요 실험 장치로는 DCU (Dosing Controller Unit)와 Dosing unit 그리고 2개의 NOx 센서, 3개의 온도 측정 장치와 urea-Tank 및 urea 공급 압력을 조정하고 유지하기 위한 2개의 레귤레이터로 구성되어 있다.

Table 1 Specifications of test engine

Items	Specifications
Bore × Stroke	83 mm × 92 mm
Compression ratio	17.3 : 1
Idle speed	790 ± 100 rpm
Intake timing	BTDC 7° / ABDC 43°
Exhaust timing	BBDC 52° / ATDC 6°
Valve system	SOHC
Cylinder numbers	4 Cylinder
Injection type	CRDI
Aspiration	Variable geometry turbocharger after-cooled
Displacement volume	1991cc

2.1.1 DCU(Dosing Controller Unit)

Table 2는 urea 최적 분사를 위해 개발한 DCU의 내부와 주요 제원을 나타내고 있다.

Table 2 Specifications of DCU

DCU interior
Power (V)	12 or 24
Width (mm)	135 × 185
Input signal	Engine rpm Temperature - 3EA NOx(ppm) concentration - 2EA O ₂ (%) concentration - 2EA
Output signal	Dosing unit control

DCU 내부에는 최적 urea 분사량을 계산 할 수 있는 프로그램이 내장되어 있으며, 이를 위하여 본 연구에서는 SCR 촉매에서 일어나는 주요 화학 반응 및 열 유동 현상을 모사할 수 있는 SCR 해석 프로그램을 Fortran으로 작성하였다.^{12,13)} 작성된 해석 프로그램은 Urea-SCR 분사 제어장치와의 통신을 위해 C++코드로 변환하여 최적의 urea 분사가 가능토록 설계하였다.

2.1.2 Dosing unit

아래의 Fig. 1은 본 연구에서 적용한 urea 인젝터를 포함하는 urea Dosing Unit이며, 분사 노즐, 에어 챔버, 그리고 DCU와 통신을 통한 urea 분사량 제어를 위한 솔레노이드로 구성되어 있다. 이러한 Dosing unit은 Frequency를 10(Hz)로 고정하고 Duty ratio(%)를 DCU가 제어함으로서 엔진 부하 변화에 따라 urea 분사량이 변화되도록 설계하였다. 주요 제원은 Table 3를 통해 나타내었다.

Fig. 1 Configuration of Dosing unit

Table 3 Specifications of Dosing unit

Operation voltage	Urea injection pressure	Air assist	Injection direction	Duty ratio (%)	
				Min	Max
24 Volt	2 bar	1.8 bar	Opposite direction injection of exhaust gas	1.5	30

2.1.3 온도 측정 장치

SCR 촉매의 deNOx 성능은 온도에 매우 민감하다. 따라서 urea 분사량 역시 배기 온도 변화에 따라 매우 정밀하게 제어되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 최적의 urea 분사를 위한 온도 측정을 위해 DOC전단, SCR전단, 그리고 SCR후단에 k-type 열전대 3개를 설치하여 각 지점에서의 온도를 측정하였다.

2.1.4 NOx(ppm), O₂(%) 농도 측정 장치

본 연구에서는 DOC전단에 NOx 센서를 장착하여 엔진에서 배출되는 NOx(ppm)농도와 O₂(%)농도를 측정하였다. 또한 SCR 후단에 NOx 센서를 추가적으로 장착하여 SCR 후단에서 배출되는 NOx량을 측정하였다. 이를 토대로 NOx 저감 효율을 고려하고 NH₃ 슬립 예측을 통한 최적 urea분사량을 보정 및 결정하였다. Table 4는 이러한 NOx 센서의 제원을 나타내고 있다.

Table 4 Specifications of NOx-sensor

NOx-sensor
Supply voltage	24V	
NOx concentration (ppm)	Max	Min
	1500	0
Straight cable length (mm)	608 ± 8	
Communication method	CAN	

2.1.5 후처리 시스템

Table 5는 본 연구에 사용된 후처리시스템의 촉매 제원을 나타낸 것이다.

Table 5 Specifications of DOC, DPF and SCR

	Material / PM	Length (mm)	Volume (L)	Cell density (CPSI)
DOC	Cordierite / Pt	78.0	1.2	400
CPF	SiC / Pt	254.0	3.9	180
SCR	Vanadium / V2O5	152.4	2.4	400

2.2 제어로직의 설계

2.2.1 엔진 실험

엔진 맵 기반 제어 로직의 설계를 위한 엔진 실험 장치는 Fig. 2와 같이 구성하였으며, 엔진부하에 따른 배출가스 특성 및 배기유량(kg/h)을 측정하기 위해 HORIBA사의 MEXA-7100DEGR 이용하였다. 또한 Urea분사 후 SCR 후단에서의 NO_x 배출량 및 NH₃ 슬립량을 측정하기 위해 전자분광 분석 장비인 AVL사의 FTIR(Fourier Transform Infrared Spectroscopy)를 사용하였다.

Fig. 3은 엔진 맵 설계를 위해 본 연구에서 적용된 2.0 Liter 승용 디젤차량을 유럽 배출가스 시험모드인 NEDC시험모드를 실제 주행하여 해당 차량의 운전영역을 나타내고 있는 그래프이다. 본 결과를 통해 연구 대상 차량의 운전영역이 1,000rpm에서 2,000rpm의 영역에 집중되어 있음을 확인할 수 있다. 따라서 해당 영역에 대한 배기 개선이 타당하다고 판단되었으며, 그에 따른 엔진 시험조건을 1,000rpm

에서 2,000rpm까지, 부하조건을 20%에서 100%까지 변화시켜가며 시험을 수행하였다.

2.2.2 엔진 맵(Map) 작성 방법

엔진동력계 실험을 통해 측정한 엔진 rpm과 DOC 전단에서 측정된 O₂(%)농도를 이용, rpm과 O₂에 대한 엔진 토크맵을 작성하고 이를 토대로 rpm과 토크에 대한 배기유량 맵을 작성하였다. 배기 유량 맵을 작성함에 있어 엔진 동력계 실험 특성상 저 rpm 대비 엔진 토크를 구현 할 수 없는 구간에서의 배기유량은 해당 rpm에서 구현 가능한 최대 배기유량으로 맵을 구성하였다.

2.2.3 맵 기반 제어로직의 Urea 분사량 산출

최적의 urea 분사량을 결정하기 위해서는 배출 가스 내 NO와 NO₂의 정확한 농도 값이 필요하지만, NO_x 센서를 통해 이들을 측정하는 것은 불가능하다. 따라서 엔진동력계 시험을 통해 얻은 DOC 후단에서의 NO₂/NO_x 비를 이용하여 배출가스 온도에 대한 보간 다항식을 Fig. 4와 같이 구하고, 이를 통해 온도에 따른 배출가스 내 NO와 NO₂의 농도(ppm)를 식 (1)과 (2)를 통해 계산하였다. 여기서 C 는 농도를 의미한다.

$$C_{NO_2} = C_{NO_x} \times \xi \quad (1)$$

$$C_{NO} = C_{NO_x} - C_{NO_2} \quad (2)$$

Fig. 2 Test device composition

Fig. 3 Distribution of operating range of 2.0 Liter passenger diesel engines driven in NEDC mode

Fig. 4 Characteristics of NO₂/NO_x at DOC outlet

또한 urea 분사량은 배출가스의 질량유량과 온도, 배출가스 내 NO, NO₂ 및 O₂의 농도, 그리고 실험을 통해 구한 목표 NO_x 전환효율맵을 사용한 관계식 (3)을 통해 계산하였다.

$$\dot{m}_{urea} = \frac{\dot{N}_{NOx}}{N_{NH_3}} \eta_{NOx} \quad (3)$$

여기서, $\dot{m}_{urea}$: urea injection rate, kg/h

$\dot{N}_{NOx}$: molar flow rate of NO_x, kmol/h

η_{NOx} : target NO_x conversion efficiency

N_{NH_3} : mole number of NH₃ and H₂O

바나뎀 계열의 SCR 촉매는 일반적으로 활성온도 창에서 90% 이상의 우수한 NO_x 변환성능을 지니고 있으나, 고온이나 저온 영역에서 NO_x 변환효율은 크게 저하되며, 특히 저온 영역에서 변환효율은 촉매의 미활성화로 인하여 급격히 감소된다. 따라서

Fig. 5 Flow chart of map-based open control strategy

변환효율이 낮은 저온영역에서 배출가스 내 NO_x를 100% 저감시키기 위해 urea를 분사할 경우 SCR 촉매 후단에서 미반응 NH₃가 배출된다. 따라서 저온영역에서는 SCR의 NO_x 변환효율을 고려해 urea의 분사량이 결정되어야 한다. 이를 위해 SCR 전단의 배출가스 온도를 측정하고, 그에 따른 NO_x 전환율 맵을 이용하여 목표 NO_x 전환율을 결정하였다.

마지막으로 본 논문에서는 fast SCR 반응에서 NO와 NO₂는 1:1로 반응하고 fast SCR 반응에 사용되지는 NO를 제외한 나머지는 standard SCR 반응에 사용되었다고 가정하였다. Fig. 5는 이러한 단계별 과정을 토대로 urea분사량을 산출하여 분사되기까지의 과정을 나타내고 있는 흐름도이다.

2.2.4 모델 기반 제어로직의 개발

맵 기반 제어로직은 배출가스의 온도 및 공간속도(space velocity)에 따른 촉매 내 흡장되어 있는 NH₃ 양을 예측할 수 없기 때문에 목표 NO_x 전환율 대비 urea의 분사량이 과대 또는 과소평가되어질 수 있는 단점을 지니고 있다. 이러한 제어로직의 단점을 보완하기 위해 SCR 촉매의 해석모델을 이용한 모델 기반 제어로직을 설계하였다. 모델 기반 제어로직은 urea 분사량, NO, NO₂ 및 O₂의 농도, 그리고 배출가스의 질량유량과 온도를 이용하여 SCR 촉매의 NO_x 변환효율과 촉매 후단에서 발생하는 NH₃ slip을 해석모델을 통해 예측할 수 있다. 해석모델에

는 식 (4)~(9)의 반응식과 같이 NOx의 standard-SCR과 fast-SCR 반응, NH₃의 흡·탈착 및 산화반응이 고려되었으며, 본 연구에 사용된 해석모델의 상세 내용은 참고문헌을 통해 제시하였다.¹²⁻¹⁴⁾ 본 연구에서는 각각의 화학반응에 대한 반응속도식에 포함되어 있는 활성화 에너지(activation energy)와 빈도인자(pre-exponential factor)는 모사배기가스와 촉매 샘플을 이용한 test-rig 실험을 통해 보정하였다.

또한, 해석모델을 통해 계산된 NOx의 변환효율이 목표 값에 비해 작을 경우 해석모델에서 얻은 NH₃ 슬립량을 고려하여 필요 Urea 분사량을 증가 보정한다. 이와 반대로 예측된 NOx의 변환효율이 목표 값보다 높을 경우 변환효율의 차이만큼 urea 분사량을 감소 보정하고, 보정된 Urea 분사량을 사용하여 특정 주파수(10Hz)에서 정해진 urea 분사량과 duty ratio간의 선형보간 식을 통해 duty ratio를 계산하도록 작성하였다. Fig. 6은 이와 같은 모델 기반 제어로직의 단계별 과정을 토대로 urea 분사량을 산출하여 분사되기까지의 과정을 나타내고 있다.

2.3 차량을 통한 NOx 저감 효율 평가 방법

모델 기반 제어로직의 개발에 따른 최적화와 실증적 평가를 위하여 엔진 연구에서 적용된 엔진과 동일 엔진이 탑재된 차량을 대상으로 현재 유럽의 배출가스 시험 지정모드인 NEDC 모드를 이용하여 실험 및 평가를 수행하였다. 실제 실험 차량의 후처리 시스템은 엔진 실험과 동일한 레이아웃으로 구성하였다. 또한 본 연구에 사용된 NEDC 모드는 Phase

Fig. 6 Flow chart of model-based open control strategy

1의 도시주행모드인 ECE-15모드와 Phase 2의 고속 주행모드인 EUDC로 분류되어 있으며, 총 주행시간은 1,180초이다. 차량의 평균속도는 Phase 1과 Phase 2가 각각 18.7km/h, 62.6km/h이다. 차량의 도로부하 조건을 모사하기 위해 사용된 차대동력계는 BEP사의 48인치 싱글롤 타입이며 실시간 배출가스 및 NOx 발생량을 측정하고자 HORIBA사의 MEXA-7400의 배출가스 분석계를 사용하였다. 또한 Urea 분사에 따른 NH₃ slip량을 파악하기 위하여 AVL사의 전자분광분석기인 FTIR을 이용하여 실시간으로 NH₃ 농도를 측정하였으며 이러한 실험 개략도는 Fig. 7을 통해 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

모델 기반 제어로직의 성능 최적화 여부를 판단하고 실차적용 가능성에 대한 타당성을 검증하기 위해 엔진동력계 실험을 통해 작성된 엔진 맵 기반 제어로직의 NOx 저감 효율과 비교, 평가하여 urea

Fig. 7 Schematic of experimental device for vehicle emission test

최적 분사를 위한 SCR 해석 모델의 신뢰성을 확보하고자 한다.

3.1 엔진실험 결과 및 모델 기반 제어 로직의 검증

아래의 Fig. 8과 Fig. 9의 시험결과에서 알 수 있듯이 NO_x의 정화효율은 부하변화에 따른 SCR 입구온도에 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있다. SCR 입구온도가 210°C부근에서는 NO_x의 정화효율이 20% 내외의 미미한 변환효율을 나타내지만, 250°C이상의 입구온도 조건에서는 45%이상의 변환효율을 나타내고 있다. 또한 상대적으로 엔진 회전수가 높은 1920rpm에서도 유사한 경향을 나타내고 있으며,

Fig. 8 NO_x conversion efficiency of map-based control logic for various inlet gas temperature at 1,600rpm

Fig. 9 NO_x conversion efficiency of map-based control logic for various inlet gas temperature at 1,920rpm

SCR 입구온도가 350°C부근에서는 80%에 가까운 변환효율을 나타내었다.

Fig. 10은 모델 기반 제어로직의 성능 최적화 여부를 판단하고 실차적용 가능성에 대한 타당성을 검증하기 위해 엔진 맵 기반 제어로직의 NO_x 저감 효율과 비교, 평가한 그래프이다.

위의 시험결과에서 알 수 있듯이 SCR 입구온도가 250°C이상 ~ 350°C내에서는 엔진 맵 기반 제어로직 대비 모델 기반 제어로직의 NO_x 변환효율이 조금 우수한 형태를 보이고 있으나, SCR 입구온도가 350°C이상 지점에서는 모델 기반 제어로직이 맵 기반 제어로직보다 매우 높은 NO_x 변환 효율을 나타내고 있음을 확인 할 수 있다.

Fig. 10 NO_x conversion efficiency of map-based and model-based control logic for various inlet gas temperature at 1,920rpm

3.2 엔진 실험 결과와 SCR 촉매 해석 결과와의 비교 검증

Fig. 11은 SCR 촉매 해석 모델의 입구 경계 조건 인자인 배기유량 및 SCR 촉매 전단의 배기가스 온도를 엔진 동력계를 통한 엔진 실험에서 배기분석계와 FTIR를 이용하여 측정된 데이터이며 Fig. 12는 Fig. 11의 조건에서 SCR 촉매 후단에서 배기가스 분석계를 이용하여 측정된 NO_x 발생량과 SCR 촉매의 Test-rig 및 엔진 동력계를 이용한 엔진 실험 결과를 기반으로 SCR 촉매의 반응 상수를 보정하여 해석을 수행한 결과를 비교한 그래프이다.

위의 그래프를 통해 SCR 촉매 후단에서의 NO_x 발생량은 엔진 실험 결과와 SCR 해석 결과가 매우 일치함을 확인 할 수 있다. 이러한 결과를 비추어 보았을 때 본 연구를 통해 개발된 모델 기반 제어로직이 SCR 촉매의 NO_x 변환효율과 촉매 후단에서 발생하는 NH₃ slip을 예측하고 이에 따른 Urea 분사 보

Fig. 11 Temporal profiles of SCR inlet gas temperature and mass flow rate

Fig. 12 Comparison of measured and predicted NO_x concentration

정을 통한 최적 제어가 가능할 것으로 판단된다.

3.3 NEDC 모드 평가를 통한 NOx 저감 효율 평가 및 분석

맵 기반 제어 로직과 모델 기반 제어 로직의 적용에 따른 실제 운전 시 성능을 비교 분석하기 위해 NEDC 시험모드를 통한 연구를 수행하였다. Fig. 13(a)는 NEDC 시험 모드 기간 동안 차량 속도와 DOC 및 SCR 전단 입구에서의 배기가스 온도를 나타내었으며, Fig. 13(b)는 NEDC 모드 중 ECE 구간에서 맵 기반 제어 로직과 모델 기반 제어모델의 deNO_x 성능을 나타내었다. ECE 구간에서 주목해야 할 사실은 이 구간에서 배기가스 온도는 200°C 이하이며, 따라서 SCR 촉매가 완전히 활성화되지 않는다는 것이다. 이러한 결과로 저속구간인 ECE 구간에서 두 가지 제어 방식 모두 DOC만 장착된 base차량 대비 23~30% 정도의 낮은 NO_x 저감효율이 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 이러한 낮은 배기가스 온도는 SCR 촉매 내부에 NH₃의 흡착을 촉진하므로 다음 운전 구간인 EUDC 구간의 SCR 촉매의 성능 향상에 크게 도움을 주게 된다.

따라서 ECE 구간과 같이 낮은 배기가스 온도가 형성되는 구간동안 SCR 촉매 내에 흡착된 NH₃ 양을 정확하게 예측 제어할 필요가 있으며 본 연구에서는 이러한 NH₃ 흡장 효과를 해석적으로 모델링하여 요소 분사량을 제어하였다. Fig. 13(c)은 SCR 촉매의 유입가스 온도가 250°C가 넘는 운전기간인 EUDC에서의 deNO_x 성능을 나타내었다. EUDC 구간에서

(a) Temperature changes by catalyst location in 2.0 Liter diesel passenger vehicle tested in the NEDC mode

(b) Changes of SCR catalyst inlet temperature and NO_x reduction by control logic in ECE-15 mode

(c) Changes of SCR catalyst inlet temperature and NO_x reduction by control logic in EUDC mode

Fig. 13 Characteristics of NO_x emission & temperature in NEDC mode

는 두 가지 제어방식 모두 base 차량 대비 87% 이상의 높은 NO_x 전환효율을 보이고 있다. 특히 이 구간에서 주목해야 될 특징으로서는 배기가스의 온도가 급격한 영역에서 모델 기반 제어 로직의 경우가 보다 개선된 deNO_x 성능을 보인다는 것이다. 이는 배기가스 온도가 급격히 변하는 구간에서 NH₃ 흡탈착 효과가 두드러지게 나타나기 때문이다. 결국 이리

Fig. 14 NO_x reduction efficiency by control logic in ECE-15 mode and EUDC mode

Table 6 Exhaust gas test results according to the evaluation in NEDC mode

	NO _x (g/km)	NH ₃ (ppm)	PM (g/km)
Base	0.326	-	0.050
Map based	0.146	3 (peak)	0.001
Model based	0.127	3 (peak)	0.001

한 NH₃ 흡장 효과를 고려 할수 없는 맵 기반 제어 로직의 경우는 NH₃의 공급이 과소 또는 과대하게 공급되기 때문에 deNO_x 성능의 저하를 가져 올 수 밖에 없는 것이다.

Fig. 14는 NEDC 전 구간에 따른 NO_x 저감 효율을 나타내고 있으며, Table 6은 NO_x 저감 효율 및 PM의 배출량을 나타내고 있다. Fig. 13과 Table 6의 결과와 같이 NEDC 전 구간에서 맵 기반 제어 방식의 경우 Base 차량 대비 55%의 NO_x 저감 효과를 보였다. 또한 SCR 촉매의 해석 모델을 이용한 모델 기반 제어 방식의 경우 Base 차량 대비 60%이상의 NO_x 저감 효과를 나타내었다. 이는 Euro-V규제(0.18g/km)를 만족하는 것으로서, 특히 모델 기반 제어로직이 맵 기반 제어 방식보다 NO_x 저감에 있어 우수함을 확인할 수 있다. 또한 NH₃ 슬립량은 두 가지 제어 방식 모두 최대 3ppm이 발생되었다. 이러한 결과는 동일한 NO_x 배출 조건의 관점에서 볼 때 모델 기반 제어 로직이 SCR 촉매에서 일어나는 NH₃ 흡장 효과를 포함한 다양한 물리적 특성을 잘 표현할 수 있기 때문이다. 따라서 모델 기반 제어로직이 NO_x 변환효율과 촉매 후단에서 발생하는 NH₃ 슬립을 예측하고, 그에 따라 urea 분사량을 정확히 보정한 결과라고

판단된다. PM의 경우 DPF 장착으로 인하여 Base 차량 대비 98%의 정화효율을 달성하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 Urea-SCR 시스템의 최적화 설계에 따른 개발을 위하여 SCR 촉매의 해석 모델을 이용하여 SCR 촉매내의 NOx 변환효율 및 NH₃ slip을 예측하여 urea 분사량 보정이 가능한 모델 기반 제어 로직을 설계하였다. 이를 통해 최적화된 urea 분사 제어가 가능한 통합 Urea- SCR 시스템을 개발하여 실제 차량에 적용, NEDC모드를 이용한 실제 운전 구간에서의 두 제어로직에 대한 NOx 및 NH₃ slip 특성을 평가하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 모델 기반 제어 로직의 경우 NEDC 전 구간에서 Base 차량 대비 60% 이상의 NOx 저감 효과를 달성할 수 있었고, 이는 엔진 맵 기반 제어로직에 비하여 5%이상 우수함을 확인 할 수 있었다.
- 2) 특히, 상대적으로 배기 가스온도가 높고 배기유량이 많은 EUDC구간의 경우 Base 차량 대비 87%의 NOx 저감 효과를 나타내었다. 또한 SCR 촉매의 해석 모델을 이용한 모델 기반 제어 로직의 경우 엔진 맵 기반 제어로직에 비하여 6%이상 NOx 저감 효과가 우수함을 확인 할 수 있었다. 이러한 결과는 Euro-V 규제를 충분히 만족하고 있음을 알 수 있다.
- 3) 두 가지 제어로직에 대한 실험 및 검증을 통하여 NOx 저감 측면에서 모델기반 제어로직이 우수함을 확인 할 수 있다. 이는 동일한 NOx 배출 조건의 관점에서 볼 때 모델 기반 제어로직이 SCR 촉매에서 일어나는 NH₃ 흡장 효과를 포함한 다양한 물리적 특성을 잘 표현할 수 있기 때문이다. 따라서 NOx 변환효율과 촉매 후단에서 발생하는 NH₃ 슬립을 예측하고, 그에 따라 urea 분사량을 정확히 보정한 결과라고 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 주관 “산업원천기술개발사업(10033303)”의 일환으로 수행되었으며, 관계기관의 협조에 감사드립니다.

References

- 1) R. Snow, G. Cavatatio, D. Dobson, C. Montreuil and R. Hammerle, “Calibration of a LNT-SCR Diesel Aftertreatment System,” SAE 2007-01-124, 2007.
- 2) H. Kammerstetter, M. Werner, R. Doell and G. Kanter, “The Challenge of Precise Characterizing the Specific Large-span Flows in Urea Dosing System for NOx Reduction,” SAE 2008-01-1028, 2008.
- 3) <http://www.dieselnets.com>
- 4) K. Hong, I. G. Hwang, C. L. Myung, S. Park and H. Kim, “Experimental and Numerical Investigation on the Urea SCR Dosing System to Improve NOx Reduction Efficiency,” The 7th International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems (COMODIA 2008), pp.731-736, 2008.
- 5) A. Nishioka, Y. Sukegawa, T. Mukai, K. Katogi, H. Yokota, H. Mamada and T. Kowatari, “A Study of a New After-treatment System(2) : Control of Urea Solution Spray for Urea-SCR,” SAE 2006-01-0644, 2006.
- 6) C. Enderle, G. Vent and M. Paule, “BLUETEC Diesel Technology-clean, Efficient and Powerful,” SAE 2008-01-1182, 2008.
- 7) M. Gruber, W. Hatz, R. Bauder, Z. G. Pamio, T. Reuss, H. Lorch and A. Burkardt, “The New Audi 3.0L V6-TDI with Ultra Low Emission System,” 17th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2008.
- 8) G. Guo, J. Warner, G. Cavataio, D. Dobson, E. Badillo and C. Lambert, “The Development of Advanced Urea-SCR Systems for Tier 2 Bin 5 and Beyond Diesel Vehicle,” SAE 2010-01-1183, 2010.
- 9) Y. Chi, B. Shin, H. Lee, S. Kwak and K. Yoon, “New 1.6Liter Diesel Engine : Strong Entry for Hyundai/Kia Motors' C-segment,” Aachen Colloquium, 2007.
- 10) S.-J. Jeong, S. J. Lee, W.-S. Kim and C. B. Lee, “Numerical Study on the Injector Shape and Location of Urea-SCR System of Heavy Duty Diesel Engine for Preventing NH₃ Slip,”

- Transactions of KSAE, Vol.14, No.1, pp.68-78, 2006.
- 11) S.-J. Jeong and C.-H. Lee, "A Study on the Injection Characteristics of Urea Solution to Improve deNOx Performance of Urea-SCR Catalyst in a Heavy Duty Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.16, No.4, pp.165-172, 2008.
- 12) Y.-D. Kim, S.-M. Shim, S.-J. Jeong and W.-S. Kim, "Analysis of Steady and Unsteady Performance of SCR DeNOx Catalyst for Reducing NOx Emission in Diesel Engine," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.202-212, 2008.
- 13) Y.-D. Kim, W.-S. Kim and C.-H. Lee, "Modeling and Performance Analysis of SCR DeNOx Catalyst for Reducing NOx Emissions in Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.17, No.1, pp.137-145, 2009.
- 14) S.-M. Shim, H.-C. Jeong, Y.-D. Kim, S.-J. Jeong and W.-S. Kim, "Numerical Analysis on the DeNOx Characteristics of NH₃-SCR for Diesel Exhaust Aftertreatment," Annual Conference Proceedings, KSAE, pp.775-781, 2009.