

## 비도로용 디젤엔진의 Urea SCR system 적용을 위한 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio 예측모델 개발에 관한 연구

강석호\*† · 김훈명\*\* · 강정호\*\* · 박은용\*\*\* · 권오현\*\*\*\* · 김대열\*\*\*\*\*

### Development of NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> Ratio Estimation Model for Urea-SCR System Application on Non-road Diesel Engine

Seokho Kang, Hoonmyung Kim, Jeongho Kang, Eunyong Park, Ohyun Kwon and Daeyeol Kim

**Key Words:** NO<sub>2</sub>(이산화질소), NO<sub>x</sub>(질소산화물), DOC(디젤산화촉매), DPF(디젤입자상물질필터), SCR(선택적 환원촉매), Estimation model(예측모델)

#### Abstract

The current emission regulations, US Tier-4 and EU Stage-V, are only able to satisfy the regulations when all currently mass-produced emission reduction technologies such as EGR, DOC, DPF, and SCR are applied. Therefore, in this study, for the application of the Urea-SCR system to non-road diesel engines, the database was established by measuring the NO, NO<sub>2</sub> concentration and calculating the NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio based on the catalyst temperature and exhaust mass flow rate. Also, based on the measured NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio data, a mathematical model was proposed to predict the NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio at SCR catalyst, and the suitability of the model was verified through steady-state and transient mode. As a result of comparing the NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio measured at the DOC outlet under the steady-state condition to two model values separately, the R<sup>2</sup> was 0.9811 for the 3D map model and 0.9303 for the mathematical model. And in the case of the NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio measured at the DPF outlet, the R<sup>2</sup> was 0.9797 for the 3D map model and 0.935 for the mathematical model. It was confirmed that the R<sup>2</sup> with the model value of the 3D Map of the mathematical model in the transient mode is 0.957, which shows high reliability.

#### 1. 서 론

비도로용차량 분야는 전통적으로 높은 토크와 낮은 연료소모율이라는 장점을 가지는 디젤엔진이 동력원으로 사용되어 왔으며, 차량의 운행특성 및 작업환경 등으

로 인해 도로용차량 분야와는 다르게 전동화 차량의 보급이 쉽지 않은 분야이다. 한편으로는 비도로용 디젤엔진에 적용되는 배기규제는 지속적으로 강화되고 있는 상황으로 미국과 유럽의 현행 배기규제인 US Tier-4 final과 EU Stage-V를 유럽의 도로용차량 배기규제인 Euro-6 규제를 비교 시 거의 동등한 수준에 도달하였다고 볼 수 있다<sup>(1)</sup>.

US Tier-4 final과 EU Stage-V의 경우에는 엔진의 출력별로 규제치를 다르게 설정하고 있으며, 56kW 이상의 디젤엔진에는 배기가스 재순환장치(Exhaust gas recirculation: EGR), 디젤산화촉매(Diesel oxidation catalyst: DOC) 디젤 입자상물질 필터(Diesel particulate filter: DPF), 선택적 환원촉매(Selective Catalyst reduction: SCR) 등 모든 배출가스 저감기술이 적용되어야만 규제

(Received: 27 Aug 2020, Received in revised form: 7 Oct 2020, Accepted: 7 Oct 2020)

\*건설기계부품연구원 친환경에너지연구실

\*\*한국자동차연구원 동력성능연구센터

\*\*\*테스크 기술연구소

\*\*\*\*대동공업 엔진개발팀

\*\*\*\*\*동양미래대학교 기계공학과

†책임저자, 회원, 건설기계부품연구원 친환경에너지연구실

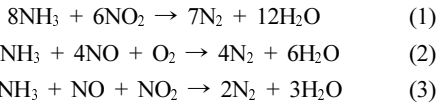
E-mail : shkang@koceti.re.kr

TEL : (063)447-2542 FAX : (063)467-0531

치를 만족시킬 수 있는 실정이다<sup>(2)</sup>.

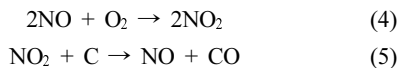
이러한 배출가스 저감기술 중 Urea-SCR은 요소수를 배기관에 공급하여 요소수에 포함되어 있는 NH<sub>3</sub>와 NO<sub>x</sub>를 반응시켜 N<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O로 환원시키는 기술로, 고부하 조건에서 급격한 부하변동이 빈번히 일어나는 비도로용차량의 질소산화물 저감을 위한 가장 적합한 기술로 인식되고 있다.

Urea-SCR은 최적의 환원제 분사전략을 통해 높은 NO<sub>x</sub> 저감효율과 NH<sub>3</sub> slip 최소화라는 두 가지 목표를 달성할 수 있으며, 환원제 분사량을 결정하는 주요인자로는 Engine-out NO<sub>x</sub> 농도, 배기유량, NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub> ratio, SCR 촉매의 NO<sub>x</sub> 저감효율, SCR 촉매 내 NH<sub>3</sub> 흡착량 등 많은 변수가 고려되어야 한다<sup>(3)</sup>.



식 (1)~(3)은 SCR 촉매의 NO<sub>x</sub> 환원 이론화학방정식을 나타내고 있으며, NO<sub>2</sub> ratio가 50% 이하의 조건에서는 NH<sub>3</sub>와 NO<sub>x</sub>가 1:1로 반응하며, NO<sub>2</sub> ratio가 100%인 경우 NH<sub>3</sub>와 NO<sub>x</sub>가 4:3으로 반응함을 확인할 수 있다<sup>(4)</sup>.

이에 따라 NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub> ratio의 설정을 위해서는 SCR 촉매 전단에서의 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio를 반드시 고려해야 하며, 특히 SCR 촉매 전단에 DOC와 DPF가 배치된 후처리장치의 경우 DOC 및 DPF에서의 NO 산화반응 및 DPF의 자연재생에 의한 NO<sub>2</sub>의 환원반응이 고려되어야 한다. 식 (4)~(5)는 이에 대한 이론화학방정식을 나타내었다.



Lee 등<sup>(5)</sup>은 DOC에 의한 NO<sub>2</sub> 생성이 PM 산화 및 SCR의 저감효율에 미치는 영향을 분석하였으며, ESC mode 및 ETC mode에서 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio에 따라 SCR 촉매에 의한 NO<sub>x</sub> 저감율의 차이가 발생한다고 밝혔다.

Nova 등<sup>(6)</sup>은 SCR 촉매에 의한 NO<sub>x</sub> 저감효율을 높이기 위해 NO를 NO<sub>2</sub>로 변환시켜주는 DOC를 SCR 촉매 전단에 적용하는 것이 유리하다고 밝혔다.

Jung 등<sup>(7)</sup>은 Vanadium 계열 SCR 촉매에서 DOC에 의한 NO<sub>2</sub> 생성이 NO<sub>x</sub> 저감효율에 미치는 영향을 분석하였으며, 그 결과 DOC의 체적 증가에 따라 저온영역에서의 NO<sub>x</sub> 저감효율이 증가한다고 밝혔다.

이에 본 연구에서는 Urea SCR system의 환원제 분사 제어를 위해 DOC 전단(Engine-out), DOC 후단(DPF 전

단), DPF 후단(SCR 전단)에서 각각 NO와 NO<sub>2</sub>의 배출량을 측정하였으며, 이를 기반으로 SCR 전단에서의 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio를 예측할 수 있는 모델을 제시하였다. 또한 비도로용 디젤엔진의 인증시험모드인 NRTC 모드 시험을 통해 모델의 적용가능성을 평가하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

각 sample point 별 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio를 측정 및 분석하기 위해서 AVL社의 AC 350 kW급 엔진동력계와 Horiba社의 MEXA-9100DEGR 배출가스 분석기를 사용하였으며, NO<sub>x</sub> 분석은 화학발광법(Chemiluminescence detector: CLD)을 채택하고 있다. Sample port는 DOC 전단, DOC - DPF 사이, DPF 후단에 각각 설치되어 있으며, 전체 시험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

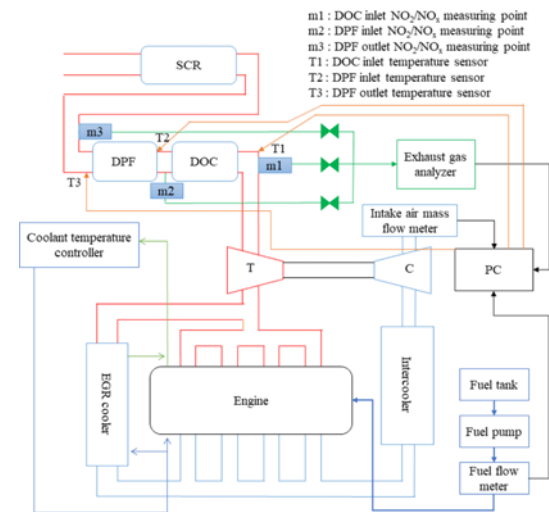


Fig. 1 Schematic diagram of the engine test bench

Table 1 Specifications of the test engine

Engine type	4-stroke CRDI Diesel
Number of cylinder	4
Bore × Stroke (mm)	103 × 115
Displacement volume (cc)	3,833
Compression ratio	17:1
Max. power (kW/rpm)	74.5/2,200
Max. torque (Nm/rpm)	442/1,400

2.1 대상엔진 및 후처리장치

본 연구에 사용된 엔진은 배기량 3.8리터의 74 kW급 디젤엔진이며, 커먼레일 방식의 연료분사 시스템이 적용되어 있다. Table 1은 대상엔진의 주요 제원을, Fig. 2에 대상엔진의 외형을 나타내었다.

대상엔진에 적용된 배기후처리장치는 DOC + DPF + SCR의 구성이며, 상세제원은 Table 2에, Fig. 3에 배기후처리장치의 외형을 나타내었다.

2.2 실험조건

각 측정부의 측정조건은 각 촉매의 전단온도와 배기유량을 기준으로 설정하였으며, 이를 Fig. 4에 나타내었



Fig. 2 Photograph of the test engine

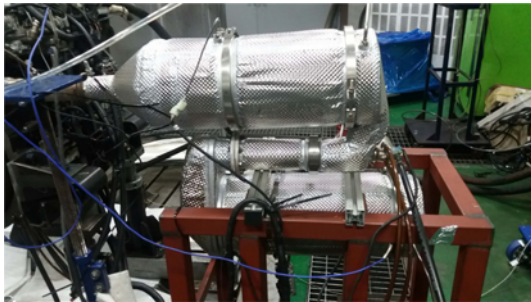


Fig. 3 Photograph of the After-treatment system

으며, 엔진운전영역을 Fig. 5에 나타내었다. 측정조건 및 검증조건은 각각 51개 point로 설정하였다.

설정된 배기유량조건에서 DOC 및 DPF 전단 온도가 기준에 도달한 이후 각 촉매온도의 변동이 없는 시점에서 각 sample point에서 NO 및 NO<sub>x</sub>의 농도를 측정하였

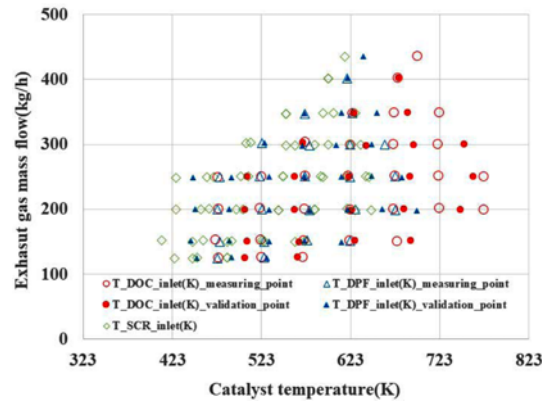


Fig. 4 Catalyst temperature & exhaust gas mass flow of engine dynamometer test

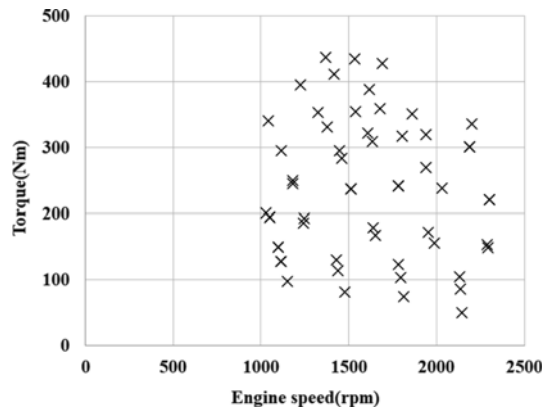


Fig. 5 Engine speed & torque of engine dynamometer test

Table 2 Specifications of the catalyst

	DOC	DPF	SCR
Material	Cordierite	SiC	Cordierite
Size (inch)	8 × 5.3	8 × 8	8 × 5.3
Volume (L)	3.29	7.6	4.37
Cell structure	400 cpsi/4 mil	300 cpsi/12 mil	400 cpsi/4 mil
PGM Loading	25g/ft <sup>3</sup>	5g/ft <sup>3</sup>	-
PGM ratio	Pt:Pd = 4:1	Pt Only	-

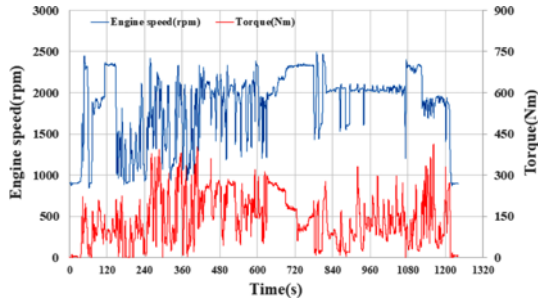


Fig. 6 Variation of engine speed & torque on the NRTC test cycle

으며, NO<sub>2</sub>는 NO<sub>x</sub>와 NO의 차로 계산하였다.

또한 모델의 검증을 위해 비도로용 디젤엔진의 인증 시험모드인 NRTC(Non-road transient cycle) 모드 시험을 수행하였으며, Fig. 6은 NRTC mode의 엔진회전속도 및 토크를 나타낸다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 DOC 전단 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio 측정결과

Fig. 7~9는 DOC 전단에서 측정된 NO<sub>x</sub>, NO, NO<sub>2</sub>의 농도를 DOC 전단온도 및 배기유량을 기준으로 나타내었다.

Fig. 7의 NO<sub>x</sub> 농도는 DOC 전단온도 증가에 따라 증

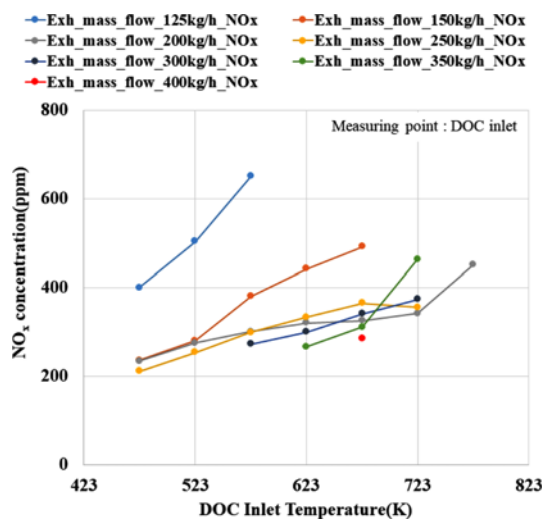


Fig. 7 NO<sub>x</sub> concentration according to the Exhaust gas temperature & mass flow rate at DOC inlet

가하는 경향을 나타내며, 배기유량 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. Fig. 8의 NO 농도 또한 NO<sub>x</sub> 농도와 동일한 경향을 보이는 것을 확인하였으며, 이는 DOC 전단온도는 기본적으로 연소온도에 비례하여 증가하며, NO<sub>x</sub>는 연소에 의한 고온과 고압에 의해서 질소분자와 산소분자 사이의 반응에 의해 생성되기 때문인 것으로 판단된다<sup>(8)</sup>.

Fig. 9의 NO<sub>2</sub> 농도는 DOC 전단온도 증가에 따라 감소하는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있으며, 이는 디

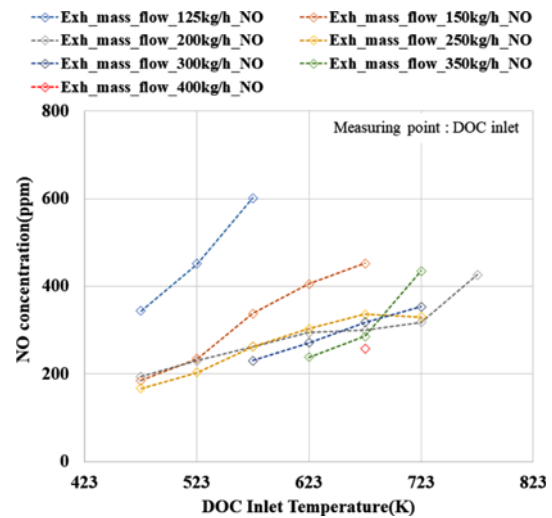


Fig. 8 NO concentration according to the Exhaust gas temperature & mass flow rate at DOC inlet

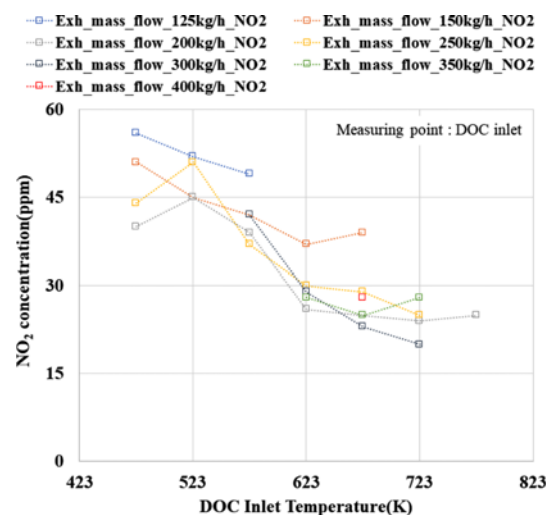


Fig. 9 NO<sub>2</sub> concentration according to the Exhaust gas temperature & mass flow rate at DOC inlet

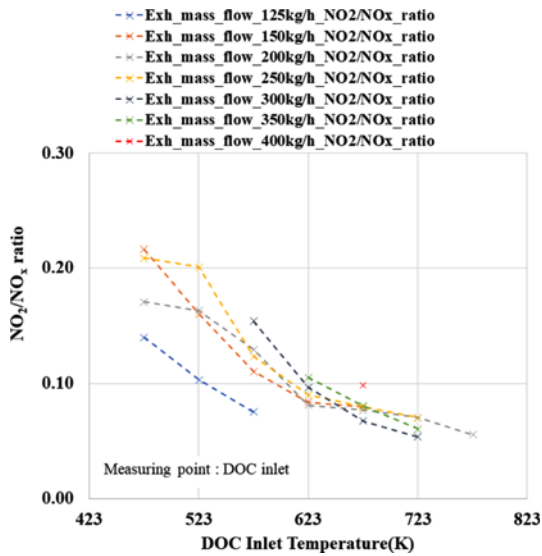


Fig. 10 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio according to the Exhaust gas temperature & mass flow rate at DOC inlet

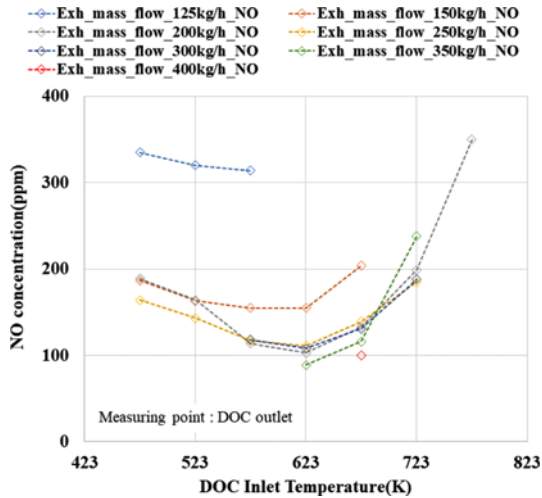


Fig. 11 NO concentration according to the Exhaust gas temperature & mass flow rate at DOC outlet

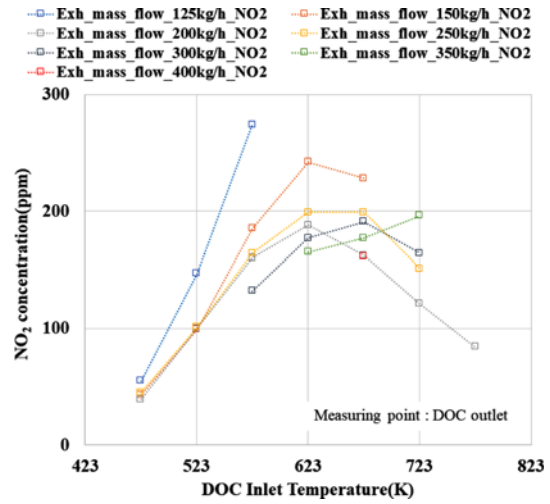


Fig. 12 NO<sub>2</sub> concentration according to the Exhaust gas temperature & mass flow rate at DOC outlet

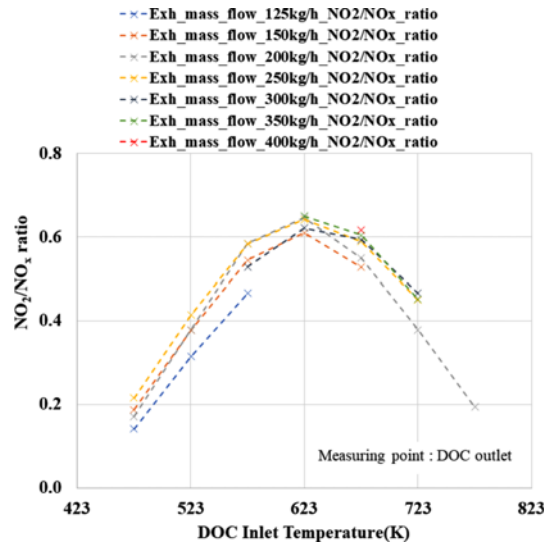


Fig. 13 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio according to the Exhaust gas temperature & mass flow rate at DOC outlet

젤연소과정 중 생성되는 NO<sub>2</sub>는 냉각기에 의해 화염이 소실되는 과정 중 발생되기 때문에, 상대적으로 연소온도가 낮은 저부하 영역에서 다량 발생되는 것으로 판단된다<sup>(8)</sup>.

Fig. 10의 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio는 DOC 전단 온도가 낮은 구간에서 높게 나타나며, DOC 전단온도 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며, 특히 배기유량 증가에 따라 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

### 3.2 DOC 후단 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio 측정결과

Fig. 11, 12는 DOC 후단에서 측정된 NO, NO<sub>2</sub>의 농도를 DOC 전단온도 및 배기유량을 기준으로 나타내었다.

Fig. 11의 NO 농도는 DOC 전단 온도 증가에 따라 점진적으로 감소하다가 623K 부근에서부터 증가하는 경향을 나타내며, Fig. 12의 NO<sub>2</sub> 농도는 NO와 반대의 경향을 나타낸다. 이는 DOC 촉매의 산화반응에 의한 것으로 DOC 전단의 NO 및 NO<sub>2</sub> 농도와 비교 시 NO 농

도는 감소하고 NO<sub>2</sub> 농도는 증가한 것으로 볼 수 있다.

Fig. 13의 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio는 DOC 전단 온도 증가에 따라 623K까지는 상승하다가 그 이후 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 앞서 언급한 DOC 촉매의 산화특성에 따른 것으로 판단된다.

### 3.3 DPF 후단 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio 측정결과

Fig. 14는 DOC 전단온도를 기준으로 DPF 후단에서 측정된 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio를 나타내었다. Fig. 13의 DOC 후단의 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio와 비교 시 523K까지의 값에는 큰

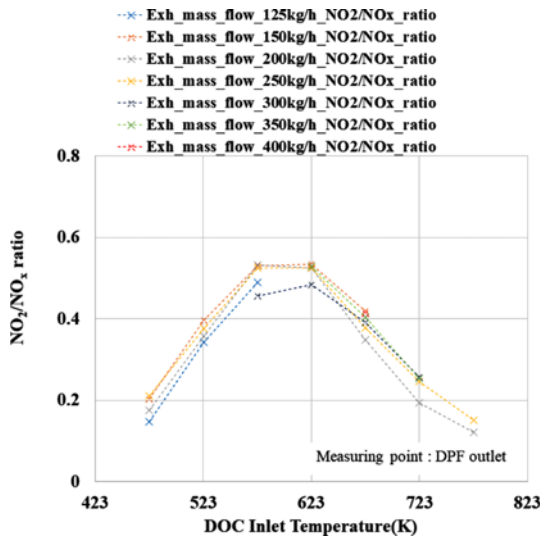


Fig. 14 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio according to the Exhaust gas temperature & mass flow rate at DPF outlet

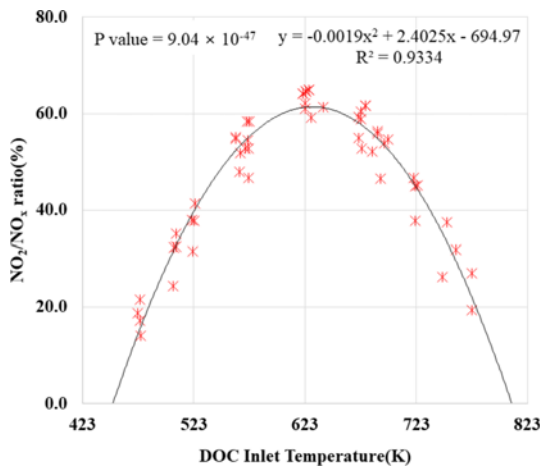


Fig. 15 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio trend line & regression equation according to the DOC inlet temperature

차이가 없으나, 그 이후 구간에서는 전반적으로 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 DPF에 포집된 PM이 NO<sub>2</sub>에 의해 자연재생이 일어나며, 이에 따른 NO<sub>2</sub> 환원반응이 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.4 3D Map 기반 예측모델

본 연구에서는 DOC에서의 Fig. 15의 DOC 후단에서의 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio와 Fig. 16의 DPF에서의 NO-NO<sub>2</sub> conversion ratio를 기반으로 각각의 3D Map을 활용하여 DPF 후단에서의 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio를 예측할 수 있는 3D Map 기반 예측모델을 제시하였다. DOC 후단에서의 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio Map은 DOC 전단온도와 배기유량의 두 축을 가지며, DPF에서의 NO-NO<sub>2</sub> conversion ratio Map은 DPF 전단온도와 배기유량의 두 축을 가진다. 각 Map의 온도축은 473.15~773.15K의 범위 내에서 50K 기준으로 나누어져 있으며, 배기유량은 125 kg/h~400 kg/h 범위 내에서 125~150 kg/h 구간을 제외하고는 50 kg/h 기준으로 나누어져 있다. 각 Map의 중간값은 선형보간법을 통해 계산된다. 최종적인 DPF 후단에서의 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio는 식 (9)를 통해 계산된다.

### 3.5 데이터 기반 수식모델

본 절에서는 3.1~3.3절의 실험결과를 기반으로 회귀방정식 형태의 수식모델을 제시하였으며, 그 결과를 Fig. 15, 16에 나타내었다. Fig. 15는 DOC 전단온도에 따른 DOC 후단에서의 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio의 회귀방정식을

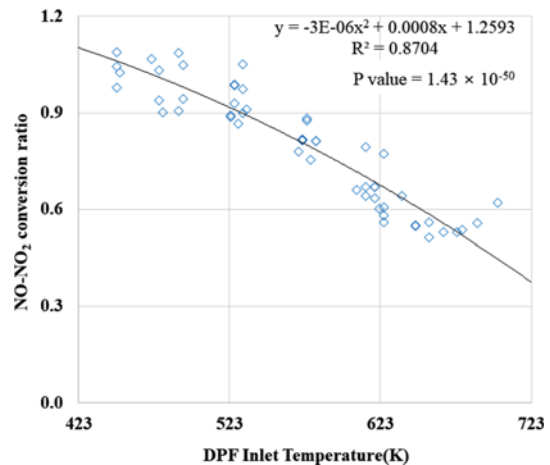


Fig. 16 NO-NO<sub>2</sub> conversion ratio trend line & regression equation according to the DPF inlet temperature

Table 3 Parameters for model calibration

$a_{DOC}$	$-19 \times 10^{-4}$	$a_{DPF}$	$-3 \times 10^{-6}$
$b_{DOC}$	2.4025	$b_{DPF}$	$8 \times 10^{-4}$
$c_{DOC}$	-694.97	$c_{DPF}$	1.2593

나타내고 있으며, Fig. 16은 DPF 전·후단의 NO 및 NO<sub>2</sub> 농도를 측정하여 계산한 NO-NO<sub>2</sub> 전환율과 이에 따른 회귀방정식을 나타내고 있다.

기본적으로 DPF는 DOC 대비 비열이 높아 배기온도 상승에 따른 촉매온도 변화의 속도가 느리기 때문에 DOC 입구온도만으로 모델을 구성할 경우 각 촉매온도의 변화폭이 크게 나타나는 과도구간에서의 예측 정확도가 낮아질 수 있기 때문에 본 연구에서는 DPF에서의 NO-NO<sub>2</sub> 전환효율 예측모델을 추가하였다. DPF에서의 NO-NO<sub>2</sub> 전환효율은 식 (6)과 같이 정의한다.

식 (7)~(9)은 이에 대한 수식모델이며, 식 (9)에 의해 DPF 후단에서의 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio를 계산할 수 있다. 식 (7)을 통해 DOC 후단에서의 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio를 계산할 수 있으며, 식 (8)을 통해 DPF에서의 NO-NO<sub>2</sub> 전환효율을 계산할 수 있다. 또한 각 수식에 포함된 상수는 Table 3에 표기하였다.

$$rNO_2conv@DPF_{out} = \frac{rNO_2@DPF_{out}}{rNO_2@DOC_{out}} \quad (6)$$

$$rNO_2@DOC_{out} = \frac{a_{DOC} \times (T_{DOC})^2 + (b_{DOC} \times T_{DOC}) + c_{DOC}}{100} \quad (7)$$

$$rNO_2conv@DPF_{out} = a_{DPF} \times (T_{DPF})^2 + (b_{DPF} \times T_{DPF}) + c_{DPF} \quad (8)$$

$$rNO_2@DPF_{out} = rNO_2@DOC_{out} \times rNO_2conv@DPF_{out} \quad (9)$$

#### 4. 모델의 검증

##### 4.1 Steady-state에서의 모델비교

Fig. 17, 18은 DOC 후단에서 측정된 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio와 모델값을 비교한 결과이다. 3D Map model의 경우 0.9811, 수식모델의 경우 0.9303의 적합계수를 나타내어 3D Map 모델의 적합도가 높은 것을 확인할 수 있다.

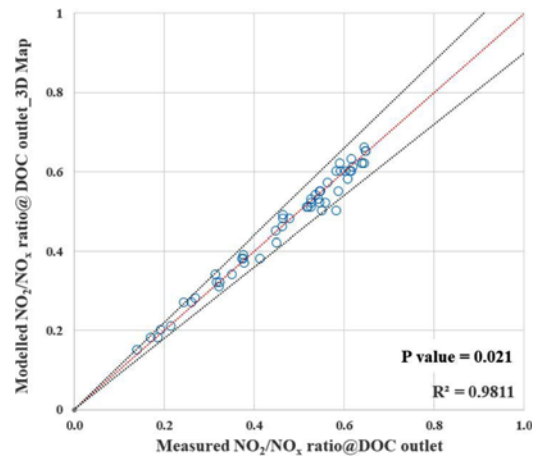


Fig. 17 Results of the 3D map model value comparison on NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio at DOC outlet on Steady-state conditions

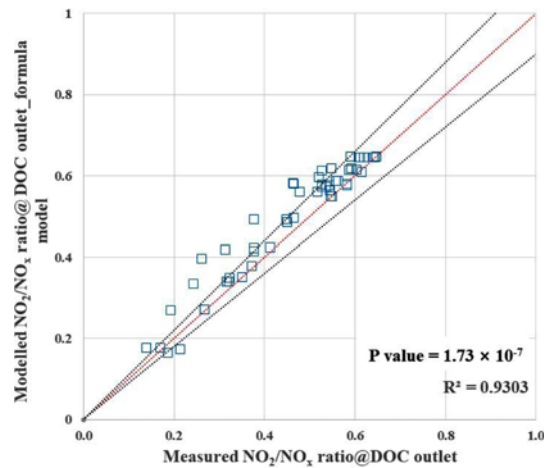


Fig. 18 Results of the formula model value comparison on NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio at DOC outlet on Steady-state conditions

Fig. 19, 20은 DPF 후단에서 측정된 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio와 모델값을 비교한 결과이다. 3D Map model의 경우 0.9797, 수식모델의 경우 0.935의 적합계수를 나타냄을 확인할 수 있으며, 두 모델 모두 DCU에 적용하여 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio 예측에 활용하는데에 무리가 없을 것으로 판단된다.

##### 4.2 Transient mode에서의 모델비교

본 절에서는 비도로용 디젤엔진의 인증시험모드인 NRTC(Non-road transient cycle) 시험을 통해 3.1~3.3절

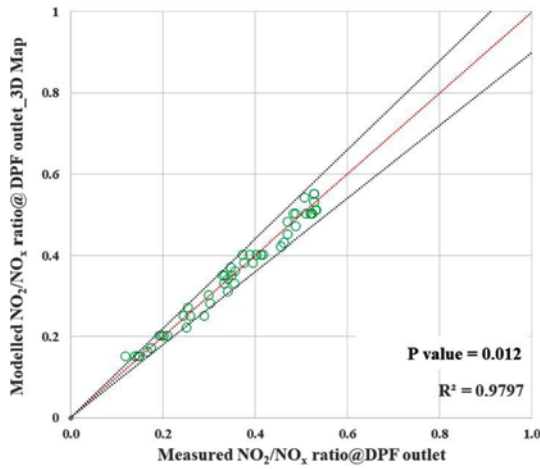


Fig. 19 Results of the 3D map model value comparison on NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio at DPF outlet on Steady-state conditions

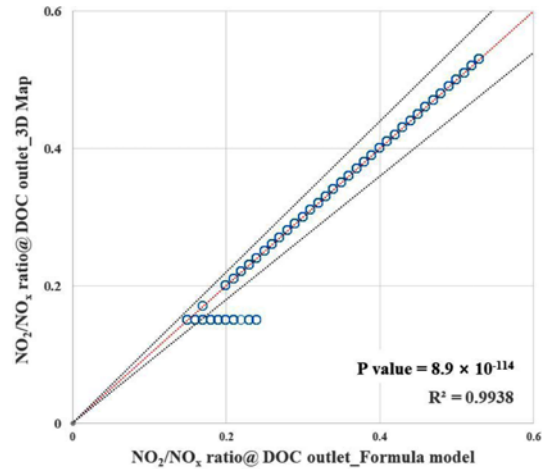


Fig. 22 Results of the model value regression analysis on NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio at DOC outlet on the NRTC cycle

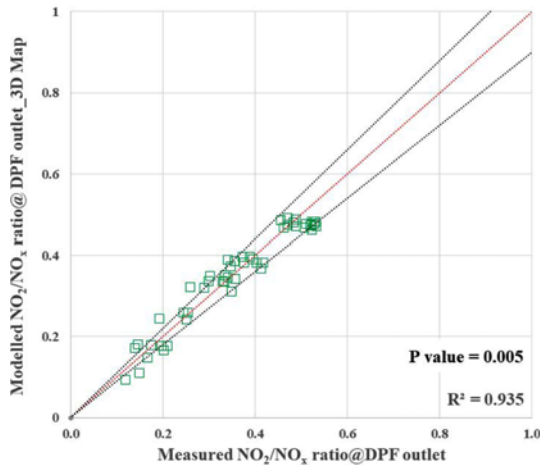


Fig. 20 Results of the formula model value comparison on NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio at DPF outlet on Steady-state conditions

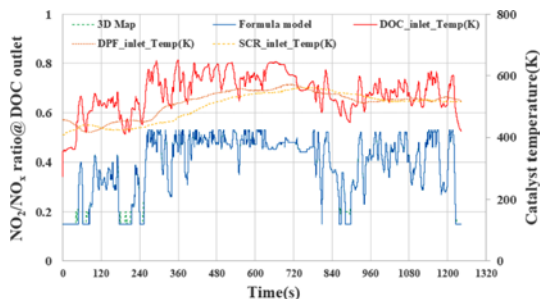


Fig. 21 Results of the model value comparison on NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio at DOC outlet on the NRTC cycle

의 실험결과를 바탕으로 한 3D MAP model과 3.5절에서 제시한 데이터 기반 수식모델의 비교를 수행하였다.

Fig. 21, 22는 DOC 후단에서의 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio 예측모델을 비교한 결과로 적합계수는 0.9938로 나타났다. 이는 수식모델에서 입력변수로 DOC 입구 온도만을 설정했음에도 불구하고, 3D Map model과 수식모델의 오차가 거의 발생하지 않는 것으로 볼 수 있으며, 온도에 대한 민감도가 매우 높고 배기유량에 대한 민감도는 상대적으로 낮은 것으로 판단된다.

NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio 0.2 미만 구간에서 오차가 발생함을 확인할 수 있으며, DOC 전단온도가 낮은 구간에서는 상대적으로 배기유량에 대한 민감도가 높게 나타나기 때문인 것으로 판단된다. 다만 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio 0.5 이하 구간의 경우 NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub>의 몰비가 1:1이기 때문에 Urea 분사량이라는 측면에서 볼 때 제어 정확도에 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

Fig. 23, 24는 DPF 후단에서의 NO-NO<sub>2</sub> 전환률 예측모델을 비교한 결과로 적합계수는 0.636으로 나타났다. DPF 전단온도 기준 450K 이전 구간에서 주로 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 3D Map 상에 450K 이전 구간에 대한 데이터가 존재하지 않으며, 3D Map 모델 특성 상 DPF 전단온도 기준 450K 미만 구간에서의 NO-NO<sub>2</sub> 전환률은 450K의 값과 동일하게 적용되기 때문인 것으로 판단된다. 다만 오차의 범위가 10% 내외이며, DOC에 의한 NO의 산화반응에 비해 DPF에서의 NO 산화반응 및 NO<sub>2</sub> 환원반응은 DPF 후단에서



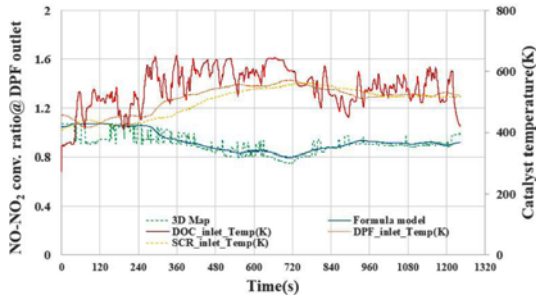


Fig. 23 Results of the model value comparison on NO-NO<sub>2</sub> conversion ratio at DPF outlet on the NRTC cycle

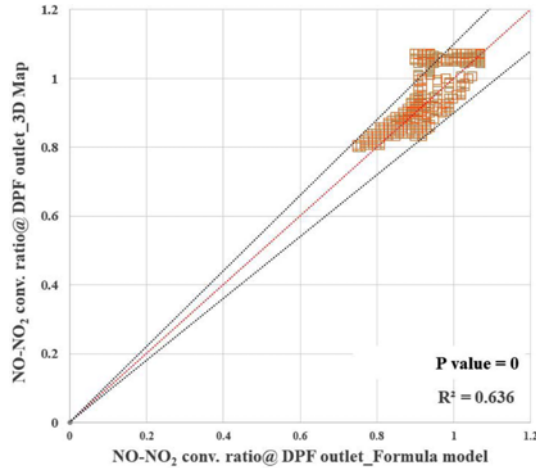


Fig. 24 Results of the model value regression analysis on NO-NO<sub>2</sub> conversion ratio at DPF outlet on the NRTC cycle

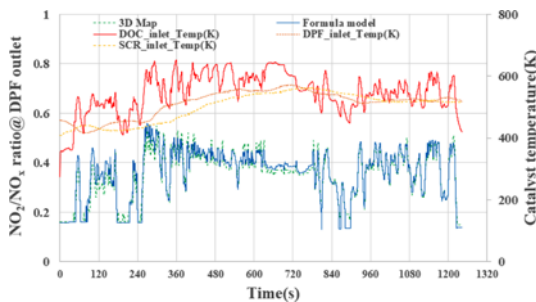


Fig. 25 Results of the model value comparison on NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio at DPF outlet on the NRTC cycle

의 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio에 미치는 영향도가 낮기 때문에 제어 정확도에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

Fig. 25, 26은 DPF 후단에서의 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio 예측모

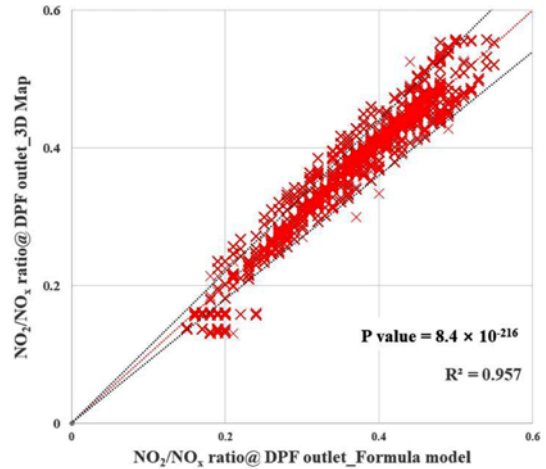


Fig. 26 Results of the model value regression analysis on NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio at DPF outlet on the NRTC cycle

델을 비교한 결과로 적합계수는 0.957로 확인되었으며, 전반적으로 높은 정확도를 나타내는 것으로 판단된다. DOC 후단 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio 예측결과와 마찬가지로 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio 0.2 미만 구간에서 오차가 발생함을 확인할 수 있었으나, 앞서 언급한 바와 같이 NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub>의 몰비가 1:1에 해당되는 구간으로 Urea 분사량에 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 비도로용 디젤엔진에 Urea-SCR system 적용을 위해 촉매 전단온도 및 배기유량을 기준으로 각 촉매 전단에서의 NO, NO<sub>2</sub> 농도를 측정하고 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio를 계산하여 데이터베이스를 구축하였고, 이를 기반으로 한 수식모델을 제시하였다. 또한 비도로용 디젤엔진의 과도상태 시험모드인 NRTC cycle에서 모델값을 비교, 분석하였으며 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) DOC 전단에서의 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio는 DOC 전단 온도가 낮은 구간에서 높게 나타나며, DOC 전단온도 증가에 따라 감소함을 확인하였으며, 이는 디젤연소과정 중 생성되는 NO<sub>2</sub>는 냉각기에 의해 화염이 소실되는 과정 중 발생되기 때문에, 상대적으로 연소온도가 낮은 저부하 영역에서 다량 발생하는 것으로 판단된다.
- (2) DOC 후단에서의 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio는 DOC 전단 온도가 증가에 따라 623K까지는 상승하다가 그 이후 감소

하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 DOC 촉매의 산화특성에 따른 것으로 판단된다.

(3) DPF 후단에서의  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  ratio는 523K 이후 구간에서 DPF 전단에서의 측정값과 비교 시 낮아지는 것을 확인할 수 있으며, 이는 DPF에 포집된 PM이  $\text{NO}_2$ 에 의해 자연재생이 일어나며, 이에 따른  $\text{NO}_2$  환원반응이 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

(4) DOC 및 DPF의 전단온도에 따른 각 촉매 전단에서의  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  농도 측정결과를 기반으로 구성된 수식 모델은 DOC 후단  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  ratio 예측모델, DPF 후단에서의  $\text{NO}-\text{NO}_2$  전환률 예측모델로 구성된다. 각 모델은 DOC 및 DPF 전단온도만을 변수로 하는 2차방정식 형태의 간단한 형태를 지니고 있으며 이 두 값의 곱을 통해 SCR 촉매 전단에서의  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  ratio를 예측할 수 있다.

(5) Steady-state 조건에서의 DOC 후단에서 측정된  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  ratio와 모델값의 비교 결과 3D map 모델의 경우 0.9811, 수식모델의 경우 0.9303의 적합계수를 나타냈으며, DPF 후단에서 측정된  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  ratio와 모델값의 비교 결과 3D map 모델의 경우 0.9797, 수식모델의 경우 0.935의 적합계수를 나타냄으로써 본 연구에서 제시된 예측모델을 DCU에 적용 가능할 것으로 판단된다.

(6) 최종결과인 SCR 촉매 전단에서의  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  ratio의 수식모델값은 3D Map 모델값과의 적합계수가 0.957로 높은 신뢰성을 가지는 것으로 판단되며, 차후 각기 다른 PGM 값을 갖는 촉매를 대상으로 한 추가연구를 통해 범용성을 갖는 수식모델의 제시가 가능할 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 산업기술혁신

사업의 지원을 받아 수행된 연구임(10077690, Post Tier-4 대응 100마력급 비도로용 디젤엔진 질소산화물 저감용 우레아 공급 시스템 개발).

## 참고문헌

- (1) D. S. Kim and D. I. Lee, "Emission regulation and technology trends on Off-highway vehicles/equipments", *Auto journal*, Vol. 36, No. 5, 2014, pp. 16~21.
- (2) D. S. Kim and T. J. Wang, "Diesel engine technologies for next-generation stage V emission regulation", *Auto journal*, Vol. 39, No. 10, 2017, pp. 25~30.
- (3) S. H. Kang, "A study on prediction model development of nitrogen oxide for passenger diesel engine", Ph. D. Dissertation, Kookmin University, Seoul, 2016, pp. 28.
- (4) S. Stadlbauer, H. Waschl, A. Schilling and L. Re, "DOC temperature control for low temperature operating ranges with post and main injection actuation", SAE technical paper 2013-01-1580, 2013.
- (5) K. B. Lee, K. C. Oh, G. D. Kim, N. R. Lee and Y. M. Woo, "Experimental study on  $\text{NO}_x$  emission characteristics of PM/ $\text{NO}_x$  removal system using Urea-SCR with DOC and DPF", KSAE spring conference proceedings, 2018, pp. 246~248.
- (6) I. Nova, C. Ciardelli, E. Tronconi, D. Chatterjee and M. Weibel, "NH<sub>3</sub>-NO/ $\text{NO}_2$  SCR for diesel exhausts after treatment: mechanism and modelling of a catalytic converter", *Topics in catalysis*, Vol. 42, 2007, pp. 43~46.
- (7) S. C. Jung and W. S. Yoon, "The effect of an oxidation precatalyst on the  $\text{NO}_x$  reduction by NH-SCR process in diesel exhaust", *Transaction of the KSAE*, Vol. 16, No. 5, 2008, pp. 68~76.
- (8) J. B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-hill, 1988, pp. 577~578.