

# 소형 디젤엔진의 NOx 저감을 위한 Urea-SCR 시스템에 관한 연구

남 정 길\*

목포해양대학교 기관시스템공학부

## A Study on the Urea-SCR System for NOx Reduction of a Light-Duty Diesel Engine

Jeong-Gil Nam\*

Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, Jeonnam 530-729, Korea

(Received 1 March 2005 / Accepted 31 May 2005)

**Abstract :** The effects of an urea injection at the exhaust pipe for a 4-cylinder DI(Direct Injection) diesel engine were investigated with the parameters such as urea-SCR(Selective Catalytic Reduction) and EGR system. The urea quantity was controlled by NOx quantity and MAF(Manifold Air Flow). The urea injection quantity can be controlled with the urea syringe pump, precisely. The effects of NOx reduction for the urea-SCR system were investigated with and without EGR engine, respectively. It was concluded that the SUF(Stoichiometric Urea Flow) is calculated and the NOx results are visualized with engine speed and load. Furthermore, the NOx map is made from this experimental results. It was suggested, therefore, that NOx reduction effects of the urea-SCR system without the EGR engine were better than that with the EGR engine except of low load and low speed.

**Key words :** Urea-SCR(요소 선택적 환원촉매), NOx quantity(질소산화물 발생량), Manifold air flow(흡기관 공기 흐름량), Stoichiometric urea flow(최적의 요소 분사량), NOx map(질소산화물 지도)

### 1. 서론

전세계적으로 친환경 엔진이 요구되고 있는 오늘날에 있어서, 고성능 디젤엔진을 개발하는데 가장 큰 어려움이 NOx 규제를 만족시키는 일이다. 따라서 엔진 제조사, 연구소 및 학계에서는 NOx를 저감시키는 기술에 대해서 많은 연구가 진행되고 있으며, 특히 자동차엔진용 요소 선택적 환원촉매(Urea-SCR) 시스템에 관한 연구가 많이 보고되고 있다.<sup>1-10)</sup> 현재 상용화 되어 있는 NOx 저감기술로는 자동차엔진에는 EGR 시스템이 주로 사용되고 있

고,<sup>11-16)</sup> 선박엔진이나 산업용엔진에는 Urea-SCR 시스템이 주로 사용되고 있다. 그러나 현재 사용되고 있는 자동차엔진용 EGR 시스템은 NOx 저감 효과가 적을뿐만 아니라 NOx를 제외한 나머지 Emission이 악화되고, 또한 엔진 내구성 및 성능까지도 저하되는 많은 단점을 가지고 있다.

이러한 이유로 최근에는 유럽에 있는 Bosch사, Siemens사 및 Cummins 사를 중심으로 콤팩트(Compact)한 Urea-SCR 시스템을 개발하여 자동차엔진에 탑재하고 있으며, NOx 저감효과도 좋기 때문에 계속적으로 Urea-SCR 시스템의 자동차엔진 탑재가 증가할 추세에 있다. 그러나 Urea 취급시 문제점으로는 분사 노즐을 잘 막히게 하는 성질이 있

\*To whom correspondence should be addressed.  
jgnam@mmu.ac.kr

을뿐만 아니라, 분사량을 정확하게 조절하기가 어려우며, 과도한 Urea 분사시에는 인체에 유해한 암모니아( $\text{NH}_3$ ) 가스 Slip이 많아지고 비경제적이 된다.

따라서, 본 연구에서는 암모니아( $\text{NH}_3$ ) 가스 Slip이 영(Zero)이 될 수 있는 최적의 요소 분사량(SUF)을 계산하였다. Urea 분사량을 정확하게 조절하기 위하여 Syringe 펌프를 이용하였으며, Urea 분사 노즐의 막힘(Clogging)을 방지하기 위하여 압축공기를 사용하였다. 또한, Urea의 분사량을 증가시키면서  $\text{NO}_x$  저감량의 변화를 엔진부하 및 엔진속도별로 그래프를 이용하여 가시화 시켰으며, 현재 사용되고 있는 EGR 사용 엔진과 본 연구에서 구축한 EGR을 사용안한 엔진에 Urea를 분사시킨 Urea-SCR 시스템의  $\text{NO}_x$  저감 효과에 대해서 집중적으로 비교·분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

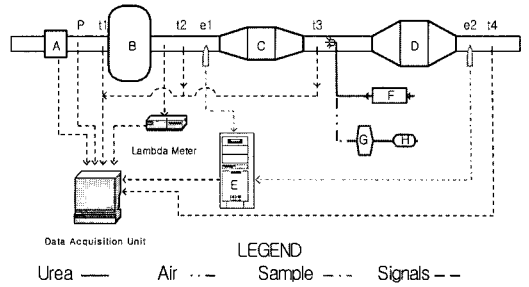
### 2.1 $\text{NO}_x$ 측정 시스템 구축

#### 2.1.1 실험장치의 엔진사양 및 개략도

실험엔진은 독일에서 생산된 직접분사식 소형 디젤엔진이며, 그 사양은 Table 1에서 보여주고 있다. Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타내고 있다.

#### 2.1.2 실험장치의 사진

Fig. 2는 실험실 및 각종 실험장치의 사진을 보여주고 있다.

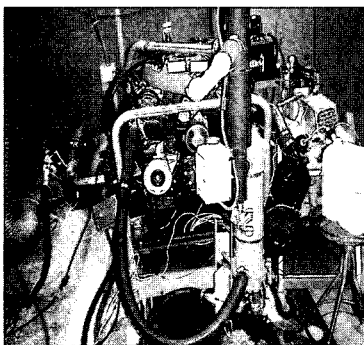


- A. MAF Sensor, B. VM 2.5L CID I Engine
- C. Oxidation Catalyst
- D. Hydrolysis & SCR Catalyst
- E. Horiba MEXA-7500
- (e1:  $\text{NO}_x$ , THC, CO,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ , e2:  $\text{NO}_x$ , THC)
- F. Urea Syringe Pump G. Air Regulator
- H. Compressed Air Tank P. Pressure Sensor
- t1 - t4 : Temp. Sensors

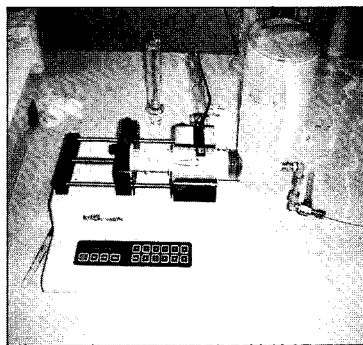
Fig. 1 Schematic diagram of experimental measuring apparatus

Table 1 Specifications of test engine

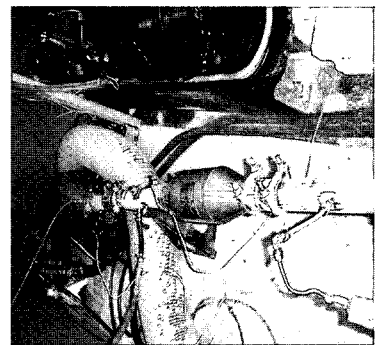
Items	Specifications
Manufacturer	VM Motori
Block configuration	2.5 Liter, in-line four
Fuel injection system	Common rail, direct injection
Max. power	103 kW@4000 rpm
Max. torque	333 N.m@2000 rpm
Min. BSFC	195 g/kWh
Max. speed	4800 rpm
Additional features	Turbocharged, intercooled, cooled EGR, 16 valves, dual overhead cams, twin balance shafts.



(a) View of engine equipped with an urea-SCR system



(b) Syringe pump for urea injection



(c) Exhaust pipe with Oxidation Catalyst and hydrolysis SCR-catalyst

Fig. 2 Photographs of test equipments

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 최적의 Urea 분사량 계산식

식 (1)은 SUF((stoichiometric Urea Flow)의 유도식을 나타내고 있으며, Urea의 분사량은 실험 데이터를 근간으로 해서 여러가지 계산에 의하여 결정된다.

$$SUF = \frac{\dot{m}_{NO}}{FW_{NO}} \cdot FW_{NH_3} \cdot \frac{1}{(U: NH_3)} \cdot \frac{1}{[Urea]} \quad (1)$$

여기에서

$\dot{m}_{NO}$  = Mass flow rate of NO (g/s)

$FW_{NO}$  = Formula weight of NO (g/mole)

$FW_{NH_3}$  = Formula weight of NH<sub>3</sub> (g/mole)

$(U: NH_3)$  = Mass of NH<sub>3</sub> produced from each unit mass of urea

$[Urea]$  = Concentration of urea (32.5%)

식 (2)는 배기 흐름에 있어서 NO의 질량 흐름을 나타내고 있으며, MEXA 7500에 기록되는 체적 흐름률로부터 구해지고 있다. 또한, 다른 여러 실험 데이터들도 요구 된다.

$$\dot{m}_{NO} = \dot{m}_{Exhaust} \cdot \frac{[NO_x]}{10^6} \cdot \frac{[MM_{NO}]}{[MM_{Exhaust}]} \quad (2)$$

여기에서

$\dot{m}_{Exhaust}$  = Mass flow rate of exhaust (g/s)

$[NO_x]$  = Concentration of NO<sub>x</sub> (ppm)

$MM_{NO}$  = Molar mass of NO (g/mole)

$MM_{Exhaust}$  = Molar mass of exhaust (g/mole)

식 (3)은 배기흐름에 있어서 몰 당 질량을 나타내고 있다.

$$MM_{Exhaust} = \frac{m_{RP}}{n_b} \quad (3)$$

식 (4)와 (5)는 Heywood<sup>17)</sup>에 의해서 제안된 방정식이며, 디젤연료유 연소비의 일정함을 이용한 것이다. 식 (4)는 연소된 혼합물의 몰 값을 나타내고 있으며, 식 (5)는 몰 O<sub>2</sub> 당 혼합질량을 나타내고 있다. 또한, 균형비는 실험에 의해서 측정된 공연비로부터 계산될 수 있다.

$$n_b = (1 - \varepsilon)\Phi + 1 + \psi \quad (4)$$

$$m_{RP} = 32 + 4\Phi(1 + 2\varepsilon) + 28.16\psi \quad (5)$$

여기에서

$\varepsilon$  = 0.69

$\psi$  = 3.773

$\Phi$  = Fuel/air equivalence ratio

### 2.2.2 Urea 분사위치 및 시험방법

Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 Urea는 Oxydation catalyst(C)와 Hydrolysis & SCR catalyst(D) 사이에 분사하였으며, Urea nozzle의 막힘 현상을 방지하고, Urea의 분무를 돕기 위해서 Urea 분사와 함께 연속적으로 압축 공기를 공급해 주었다. 또한, Urea 분사량을 정확하게 조절하기 위하여 Syringe 펌프(F)을 이용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

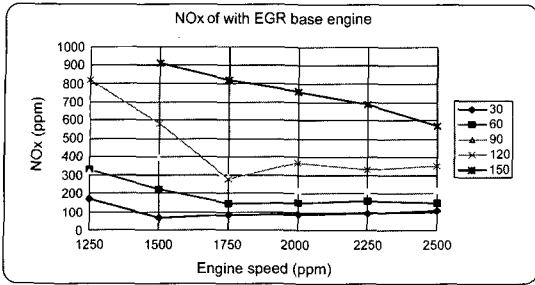
### 3.1 실험 영역의 결정

실험 영역의 결정은 미국 OSU(Ohio State University)의 Future Truck Team이 미 연방의 도시 주행을 통하여 얻어진 Data를 바탕으로 만들어진 시험모드인 FUDS(Federal Urban Driving Schedule) 모드의 운전빈도를 Matlab Simulink Simulator로 시뮬레이션한 결과를 이용하였다. 시뮬레이션 결과 엔진의 사용빈도가 높은 영역이 엔진속도 2,500 rpm 이하와 엔진부하 150 ft-lb 이하로 나타났다. 따라서, 실험조건으로는 엔진속도는 1,250 rpm에서부터 시작해서 250 rpm 씩 증가 하면서 2,500 rpm까지 수행하였으며, 엔진부하는 30 ft-lb에서부터 시작해서 30 ft-lb 씩 증가하면서 150 ft-lb까지 수행하였다.

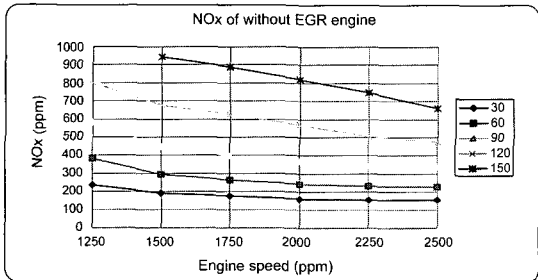
### 3.2 기본 엔진의 NOx 발생량 비교

Fig. 3은 실험조건에 따른 NOx 발생량의 변화를 엔진속도 및 엔진부하별로 보여주고 있다. EGR 사용 엔진의 NOx 농도 변화량을 나타내고 있는 그래프 (a)는 EGR을 사용한 엔진인 그래프 (b)에 비해서 전 영역에 걸쳐서 NOx 농도 값이 낮음을 알 수 있다.

### 3.3 Urea-SCR 시스템을 구축한 엔진의 NOx 발생량 비교



(a) NOx of with EGR engine



(b) NOx of without EGR engine

Fig. 3 Comparison of NOx for each test conditions

3.3.1 EGR 사용 엔진의 NOx량 비교

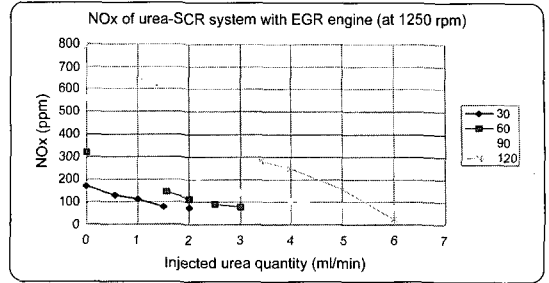
Fig. 4는 EGR 사용 엔진에 Urea-SCR 시스템을 구축했을때, Urea 분사량에 따른 NOx 농도값의 변화를 한눈에 볼 수 있게 나타내고 있다. 그래프 (a), (b) 및 (c)는 각각 엔진속도 1,250 rpm, 2,000 rpm 및 2,500 rpm에서의 부하변화에 따른 NOx 농도값의 변화를 나타내고 있다. 특히, 저속·고부하 영역에서 NOx 농도가 높음을 알 수 있다.

3.3.2 EGR를 사용안한 엔진의 NOx량 비교

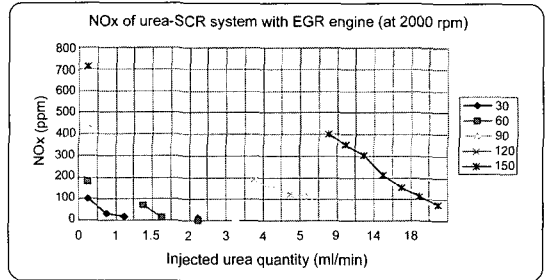
Fig. 5는 EGR를 사용안한 엔진에 Urea-SCR 시스템을 구축했을때, Urea 분사량에 따른 NOx 농도값의 변화를 한눈에 볼 수 있게 나타내고 있다. 그래프 (a), (b) 및 (c)는 각각 엔진속도 1,250 rpm, 2,000 rpm 및 2,500 rpm에서의 부하변화에 따른 NOx 농도의 변화를 나타내고 있다. Fig. 4와 마찬가지로 저속·고부하 영역에서 NOx 농도가 높음을 알 수 있으나, 저속(1,250 rpm)·저부하(30 ft-lb) 영역에서는 Urea 분사만으로는 NOx 농도 저감에 한계가 있음을 알 수 있다.

3.3.3 실험조건에 따른 NOx map의 비교

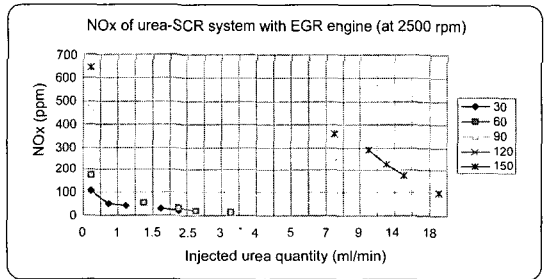
Fig. 6은 동일 엔진에 대해서 실험조건에 따른



(a) NOx of with EGR engine (at 1250 rpm)



(b) NOx of with EGR engine (at 2000 rpm)



(c) NOx of with EGR engine (at 2500 rpm)

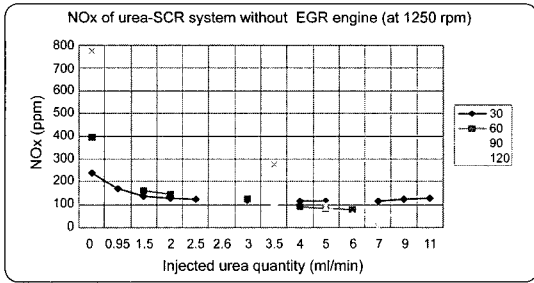
Fig. 4 Comparison of NOx for urea-SCR system with EGR engine

NOx map을 보여주고 있다. Map (a)는 EGR 사용 엔진의 NOx Map을 보여주고 있으며, Map (b)는 EGR를 사용안한 엔진에 최적의 Urea를 분사한 경우의 NOx Map을 보여주고 있다. Map (b)는 Map (a)에 비해서 저속·저부하 영역을 제외한 전 영역에 걸쳐서 NOx 저감 효과가 좋음을 알 수 있으며, 본 NOx map을 통하여 엔진속도 및 엔진부하별 NOx 량의 변화를 한눈에 비교 할 수 있다.

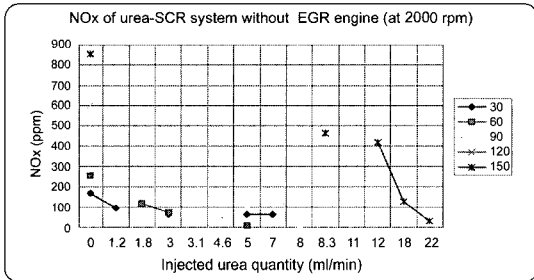
3.4 EGR를 사용안한 엔진의 최적 Urea 분사량 및 NOx 저감량의 비교

3.4.1 엔진속도 및 부하별 NOx 변화량

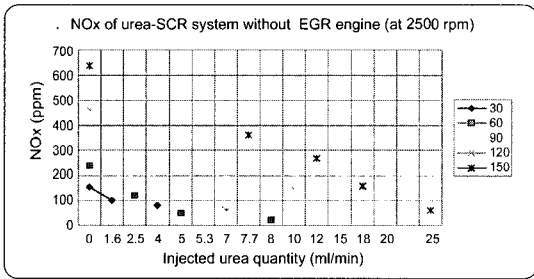
Fig. 7은 EGR를 사용안한 엔진의 경우에 배출되



(a) NOx of without EGR engine (at 1250 rpm)



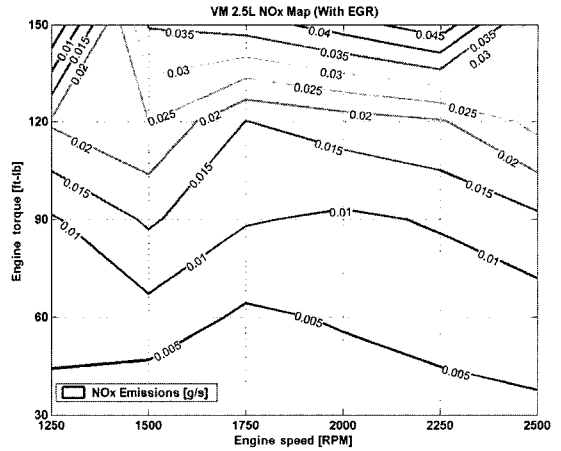
(b) NOx of without EGR engine (at 2000 rpm)



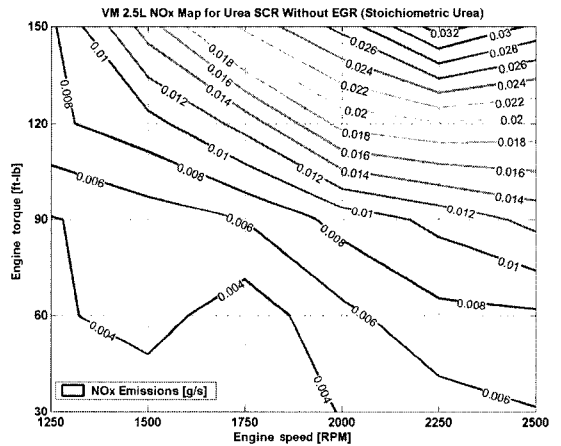
(c) NOx of without EGR engine (at 2500 rpm)

Fig. 5 Comparison of NOx for urea-SCR system without EGR engine

는 NOx 량과 최적의 Urea를 분사했을때 배출되는 NOx 량의 변화를 나타내고 있다. 또한, Urea 분사량을 계속 증가하면서 분사했을때 배출되는 NOx 저감률의 변화도 함께 나타내고 있다. 그래프 (a)와 (b)는 저속(1,250 rpm)에서 각각의 엔진부하가 30 및 60 ft-lb 시에 NOx 저감량을 보여주고 있다. 또한, 그래프 (c)와 (d)는 각각 중속(2,000 rpm) 및 고속(2,500 rpm)에서 엔진부하가 각각 90 및 150 ft-lb 시에 NOx 저감량을 보여주고 있으며, 각 실험조건에 대한 최적의 Urea 분사량 및 최대 NOx 저감률은 Table 2에 잘 나타나 있다. 또한, 본 Table 2를 통하여 동일 엔진속도에서 엔진부하가 점점 커질수록 SUF 량이 점점 더 많아짐을 알 수 있다.



(a) NOx map for with EGR engine



(b) NOx map for urea-SCR without EGR engine (Stoichiometric urea)

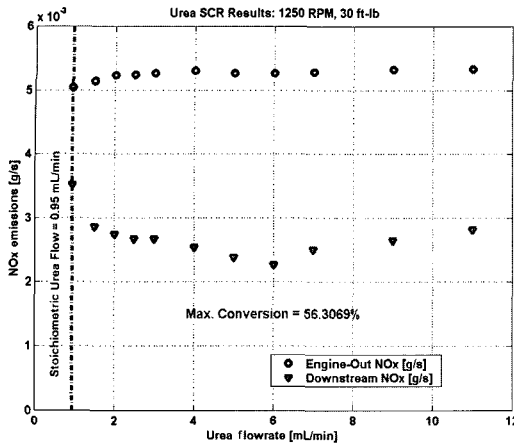
Fig. 6 Comparison of NOx maps for each test conditions

Table 2 Engine load, SUF and Max. conversion rate at each rpm

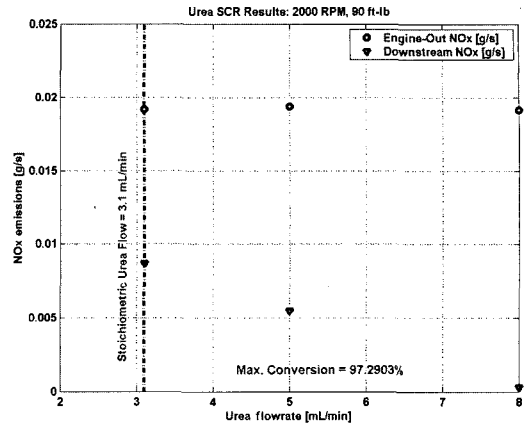
	엔진부하/속도 (ft-lb/rpm)	SUF (mL/min)	최대 NOx 저감률(%)
그래프(a)	30/1,250	0.95	56.3
그래프(b)	60/1,250	1.5	77.9
그래프(c)	90/2,000	3.1	97.3
그래프(d)	150/2,500	7.7	90.7

### 3.4.2 최적의 Urea 분사량 및 최대 NOx 저감률

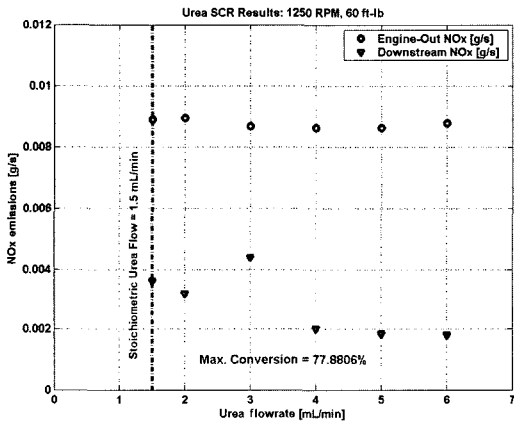
Table 3은 지금까지 실험한 전구간의 엔진속도 및 엔진부하별 최적 Urea 분사량과 최대 NOx 저감률을 나타내고 있다. 엔진부하가 클수록 최적의 Urea 분사량이 많아짐을 알 수 있으며, 엔진속도가 커져도 대체적으로 최적의 Urea 분사량이 많아짐을 알 수 있다.



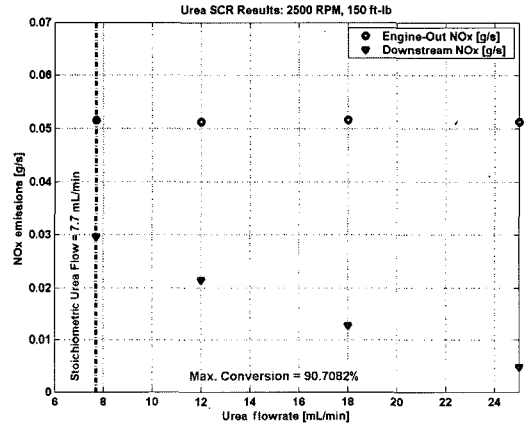
(a) NOx emissions at 30 ft-lb (1,250 rpm)



(c) NOx emissions at 90 ft-lb (2,000 rpm)



(b) NOx emissions at 60 ft-lb (1,250 rpm)



(d) NOx emissions at 150 ft-lb (2,500 rpm)

Fig. 7 Comparison of NOx emissions from each loads and each rpm

Table 3 Stoichiometric urea flow and Max. conversion rate

	Stoichiometric urea flow(mL/min) / Max. conversion(%)				
	30	60	90	120	150
1,250	0.95/56.3	1.5/77.9	2.6/90.5	3.5/97.3	-
1,500	1.0/90.0	1.3/86.6	2.3/99.9	4.0/98.7	6.4/98.2
1,750	1.2/69.8	1.9/86.1	2.9/99.3	4.5/95.3	7.5/91.0
2,000	1.2/62.4	1.8/94.9	3.1/97.3	4.6/92.4	8.3/91.2
2,250	1.3/47.8	1.9/94.0	3.3/97.8	5.1/93.4	8.2/93.3
2,500	1.6/53.0	2.5/90.4	4.0/94.4	5.3/94.1	7.7/90.7

#### 4. 결론

본 연구에서 수행한 Urea-SCR 시스템의 연구 결과 최적의 Urea 분사량을 계산할 수 있었으며, NOx map을 만들 수 있었다. 또한, Urea의 분사량에 따른

NOx 농도 값의 변화를 엔진속도 및 엔진부하별로 그래프를 이용하여 가시화 할 수 있었다. 그 결과로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 최적의 Urea 분사량(SUF)을 계산할 수 있었으며, NOx 맵을 이용하여 Urea-SCR 시스템의 엔진 사용에 따른 NOx 발생량을 예측할 수 있었다.

둘째, 엔진부하가 클수록 최적의 Urea 분사량이 많아짐을 알 수 있었으며, Urea 분사량을 점점 증가시키면서 엔진속도 및 엔진부하의 변화에 따른 NOx 저감률의 변화형태를 알 수 있었다.

셋째, EGR을 사용안한 엔진은 저속(1,250 rpm) · 저부하(30 ft-lb) 영역에서는 Urea 분사만으로는 NOx 농도 저감에 한계가 있음을 알 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 21세기 한국연구재단의 지원에 의하여 연구되었습니다.

## References

- 1) J. Gieshoff, A. Schafer-Sindlinger, P. C. Spurk, J. A. A. Van den Tillaart and G. Garr, "Improved SCR Systems for Heavy-Duty Applications," SAE 2000-01-0189, 2000.
- 2) W. R. Miller, J. T. Klein, R. Mueller, W. Doelling and J. Zuerbig, "The Development of Urea-SCR Technology for US Heavy Duty Trucks," SAE 2000-01-0190, 2000.
- 3) M. Farshchi, C. J. Brodick and H. A. Dwyer, "Dynamometer Testing of a Heavy-Duty Engine Equipped with a urea-SCR System," SAE 2001-01-0516, 2001.
- 4) B. Amon and G. Keefe, "On-Road Demonstration of NOx Emission Control for Heavy-Duty Diesel Trucks using SINOx™ Urea SCR technology Long-term Experience and Measurement Results," SAE 2001-01-1931, 2001.
- 5) J. O. Chae, J. W. Hwang, J. Y. Jung, J. H. Han, H. J. Hwang, S. Kim and E. Mikholap, "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) R. van Helden, M. van Genderen, M. van Aken, R. Verbeek, J. A. Patchett, J. Kruithof, T. Straten and C. Gntet de Saluneaux, "Engine Dynamometer and Vehicle Performance of Urea SCR-System for Heavy-Duty Truck Engines," SAE 2002-01-0286, 2002.
- 7) B. Scarnegie, W. R. Miller, B. Ballment, W. Doelling and S. Fischer, "Recent DPF/SCR Results Targeting US2007 and Euro 4/5 HD Emissions," SAE 2003-01-0774, 2003.
- 8) S. Saito, R. Shinozaki, A. Suzuki, H. Jyoutaki and Y. Takeda, "Development of urea-SCR System for Commercial Vehicle," SAE 2003-01-3248, 2003.
- 9) D. Upadhyay and M. V. Nieuwstadt, "NOx Prediction in Diesel Engines for Aftertreatment Control," ASME International, IMECE 2003-41196, 2003.
- 10) 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.
- 11) J. G. Hawley, F. J. Wallace, A. Cox, R. W. Horrocks and G. L. Bird, "Reduction of Steady State NOx Levels from an Automotive Diesel Engine Using Optimized VGT/EGR Schedules," SAE 1999-01-0835, 1999.
- 12) R. S. G. Baert, D. E. Beckman and A. Veen, "Efficient EGR Technology for Future HD Diesel Engine Emission Targets," SAE 1999-01-0837, 1999.
- 13) A. J. Dennis, C. P. Garner and D. H. C. Taylor, "The Effect of EGR on Diesel Engine Wear," SAE 1999-01-0839, 1999.
- 14) R. Egnell, "The Influence of EGR on Heat Release Rate and NO Formation in a DI Diesel Engines," SAE 2000-01-1807, 2000.
- 15) J. G. Nam, "A Study on the Residual Gas Fraction in Cylinder by the Adjustment of Variable Valve Timing with Volumetric Efficiency," Transactions of KSAE, Vol.9, No.5, pp.82-88, 2001.
- 16) Y. C. Han, Y. S. Oh and S. K. Oh, "A Simulation on the Stream and NOx Characteristics by EGR Rate Control," Transactions of KSAE, Vol.10, No.1, pp.93-98, 2002.
- 17) J. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, Inc., New York, 1988.