

Tandem 시스템의 NO_x 저감 효과에 관한 연구

남 정 길†

(원고접수일 : 2005년 3월 7일, 심사완료일 : 2005년 6월 11일)

A Study on the Effects of NO_x Reduction for the Tandem System

Jeong-Gil Nam†

Abstract : The effects of a WI(Water Injection) at the intake pipe and an urea injection at the exhaust pipe for a 4-cylinder DI(Direct Injection) diesel engine were investigated experimentally. The water quantity was controlled by temperature of intake manifold and MAF(Manifold Air Flow). In addition, the urea quantity was controlled by NO_x quantity and MAF. Effects of WI system, urea-SCR system and tandem system were investigated for with and without EGR(Exhaust Gas Recirculation). As the results, the SUF(Stoichiometric Urea Flow) and NO_x map were obtained. In addition, NO_x results can be visualized with engine speed and engine load. It was concluded, therefore, that the NO_x reduction effects of the tandem system without the EGR were more than those with the EGR base engine.

Key words : Water injection(물 분사), Manifold air flow(흡기관내의 공기 흐름량), Urea-SCR (요소 선택적 환원 촉매), Tandem(WI + urea-SCR), Stoichiometric urea flow (최적의 요소 분사량), NO_x map(질소산화물 지도)

1. 서 론

현재 상용화되어진 NO_x 저감기술로는 선박엔진이나 산업용엔진에는 Urea-SCR 시스템이 주로 사용되고 있고, 자동차엔진의 경우 EGR 시스템이 주로 사용되고 있다. 그러나 자동차엔진에 사용되고 있는 EGR 시스템은 NO_x 저감 효과가 적을 뿐만 아니라 NO_x 이외의 에미션(emission)이 악화되고, 또한 엔진 내구성 및 성능까지도 저하되

는 많은 단점을 가지고 있다^{[1], [2]}. 이러한 이유로 최근에는 유럽에 있는 Siemens 사, Bosch 사 및 Cummins 사를 중심으로 자동차엔진용 Urea-SCR 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다^{[3]-[7]}. 또한, 바닷물을 이용하여 NO_x를 저감시키는 기술인 HAM (humid air motor) 시스템이 최근에 일부 선박에 도입되어 선을 보이고 있으며, 자동차엔진용 물 분사 시스템에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다^{[8]-[10]}.

† 책임저자(목포해양대학교 기관시스템공학부), E-mail: jgnam@mmu.ac.kr, Tel: 061)240-7098

본 연구에서는 자동차엔진용으로 사용되고 있는 EGR 시스템의 단점을 극복하고, 더욱 엄격해지고 있는 NOx 규제를 만족시키기 위해서 탠덤(Tandem) 시스템을 구축하였다. 탠덤 시스템이라 함은 인터쿨러와 흡기 매니폴드 사이에 물을 분사하는 물 분사(WI: water injection) 시스템과 함께 배기 파이프에 요소(Urea)를 분사시키는 Urea-SCR 시스템을 구축하여 동시에 작동시키는 것을 말한다. 물 분사량은 흡기관내의 공기 흐름량 (MAF: manifold air flow) 및 흡기 온도(intake air temperature)를 고려해서 계산하였으며, 요소 분사량은 NOx 발생량 및 흡기관내의 공기 흐름량을 고려하여 암모니아(NH₃) 슬립(slip)이 영(zero)인 최적의 요소 분사량(SUF: stoichiometric urea flow)을 계산하였다. 실험엔진은 VM 2.5L 디젤 엔진으로써 EGR 시스템, 물 분사 시스템, Urea-SCR 시스템 및 탠덤 시스템에 의한 각각의 실험조건에 따라 NOx 저감 효과를 비교·분석하였다. 특히, EGR 시스템만 갖는 엔진과 EGR 없이 탠덤 시스템만 가지는 엔진에서의 NOx 저감 효과를 NOx 맵(map) 및 그래프를 이용하여 도식화 하였다.

2. 실험장치 및 방법

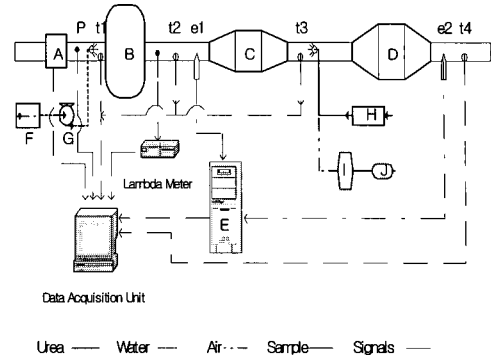
2.1 NOx 측정 시스템 구축

2.1.1 실험장치의 엔진사양 및 개략도

실험엔진은 소형 디젤엔진이며, 그 사양은 Table 1에 정리하였다. Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타내고 있다.

Table 1 Specifications of test engine

Item	Specification
Manufacturer	VM Motori
Block Configuration	2.5 Liter, in-line four cyl.
Fuel Injection System	Common rail, direct injection
Max. Power	103 kW@4000 rpm
Max. Torque	333 Nm@2000 rpm
Min. BSFC	195 g/kWh
Max. Speed	4800 rpm
Additional Features	Turbocharger, intercooler, cooled EGR, 16 valves, dual overhead cams, twin balance shafts.



- A. MAF Sensor, B. VM 2.5L CIDI
- C. Oxidation Catalyst D. Hydrolysis & SCR Catalyst
- E. Horiba MEXA-7500 (e1: NOx, THC, CO, CO₂, O₂ e2: NOx, THC)
- F. Water Tank G. Water Injection Pump
- H. Urea Syringe Pump I. Air Regulator
- J. Compressed Air Tank P. Pressure Sensor
- t1 - t4 : Temperature Sensors

Fig. 1 Schematic diagram of experimental measuring apparatus

2.1.2 실험장치의 사진

Fig. 2는 실험실 및 각종 실험장치의 사진을 보여주고 있다. 사진 (a)는 물 분사 및 Urea-SCR 시스템이 장착된 실험엔진을, 사진 (b)는 요소 분사량을 조절하기 위한 시린지(syringe) 펌프를 보여주고 있다. 또한, 사진 (c)는 산화 촉매(oxidation catalyst)와 가수분해 및 SCR 촉매(hydrolysis and SCR catalyst)를, 사진 (d)는 물 분사 시스템을 보여주고 있다.

2.2 실험방법

2.2.1 물 분사 방법

물 분사량은 흡기관내의 공기 흐름량(MAF) 및 흡기 온도를 고려해서 식 (1)과 같이 물 분사 펌프의 밸브 개도를 일정하게 유지해주는 듀티(duty) 사이클 제어를 하였다. 밸브 개도가 90% 이상인 경우에는 90%까지만 밸브를 열어서 흡기관내에 물을 분사시켰으며, 엔진의 정지(stall) 현상 때문에 저속·저부하에서는 물 분사를 할 수가 없었다.

- T_intake (흡기 온도, °C)①
- MAF_V (흡입 공기량, Volt)②

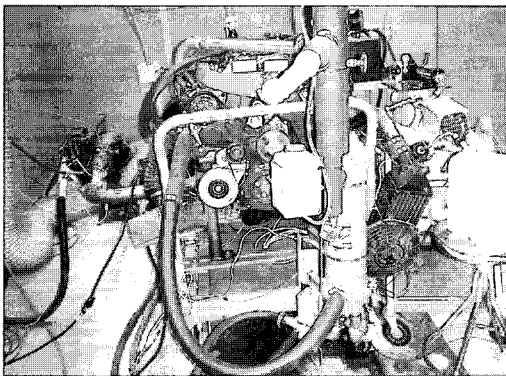
$$\begin{aligned} \text{MAF} &= 2.0143 * \textcircled{2}^{3.0771} \dots\dots\dots \textcircled{3} \\ \text{abs_humid} &= 3.7016 * e^{(0.0581 * \textcircled{3})} \dots\dots\dots \textcircled{4} \\ \text{V_dot_w} &= (\textcircled{4} * (\textcircled{3}/1000))/0.997 \dots\dots \textcircled{5} \\ \therefore \text{duty_cycle} &= (\textcircled{5}-0.6081)/0.0336 \quad (1) \end{aligned}$$

2.2.2 요소 분사 방법

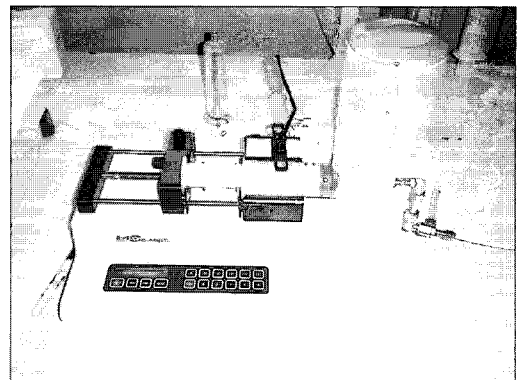
요소 분사량은 흡기관내의 공기 흐름량(MAF) 및 발생하는 NOx 량을 고려해서 식 (2)와 같이 암모니아(NH₃) 슬림이 영인 최적의 요소 분사량(SUF)을 계산하였다. 요소 분사량을 정확하게 조절하기 위하여 시린지 펌프를 이용하였으며, 노즐의 막힘(clogging) 현상을 방지하고 요소 분무를 위하여 요소 공급과 함께 연속적으로 압축 공기를

공급해 주었다.

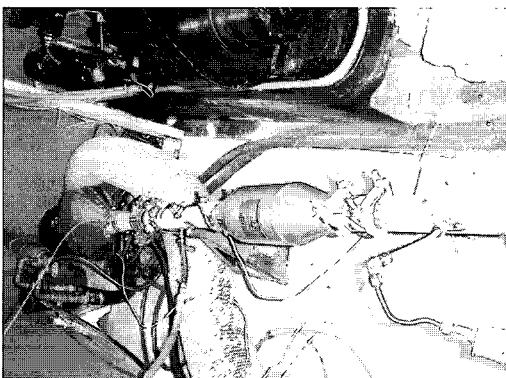
$$\begin{aligned} \text{eps(Ratio of H/C in fuel, \%)} &= 4/(4+1.8) \\ \text{psi(Constant for HC fuels, \%)} &= 3.773 \\ \text{phi(F/A equivalence ratio, \%)} &= 0.66 \\ \text{MAF_V(흡입공기량, Volt)} &\dots\dots\dots \textcircled{1} \\ \text{NOx_flow(ppm)} &\dots\dots\dots \textcircled{2} \\ \text{SCR_temp.(}^\circ\text{C)} &\dots\dots\dots \textcircled{3} \\ \text{mm_NO(NOx molar mass, \%)} &\dots\dots\dots \textcircled{4} \\ \text{mm_Ex(Exhaust molar mass, \%)} &\dots\dots \textcircled{5} \\ \text{Ex_flow(g/s)} &= 0.9369 * \textcircled{1}^4 - 4.7098 * \textcircled{1}^3 + \\ &14.385 * \textcircled{1}^2 - 6.8208 * \textcircled{1} - 3.6155 \dots\dots\dots \textcircled{6} \\ \text{Nb(Moles of unburned mixture, \%)} &= \\ (1-\text{eps})*\text{phi}+1+\text{psi} &\dots\dots\dots \textcircled{7} \end{aligned}$$



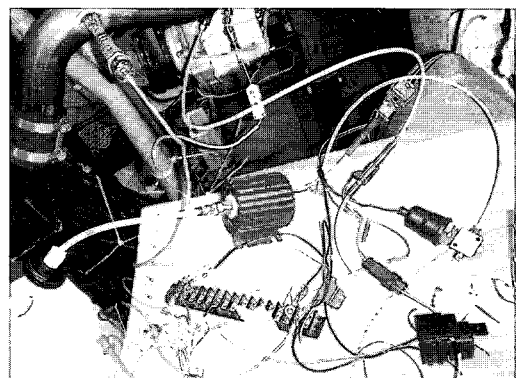
(a) View of engine equipped with water injector system and urea-SCR system



(b) Syringe pump for urea injection



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



(d) Water injection system

Fig. 2 Photographs of test equipments

$$\begin{aligned} \text{Mrp(Mass of mixture, \%)} &= 32 + 4 * \phi * (1 + 2 * \epsilon) + 28.16 * \psi \dots\dots\dots \textcircled{8} \\ \text{Mb_Ex(Molecular weight of burned mixture, \%)} &= \textcircled{8} / \textcircled{7} \dots\dots\dots \textcircled{9} \\ \text{NO_flow(NO flow, \%)} &= \textcircled{6} * (\textcircled{2} / 10^6) * (\textcircled{4} / \textcircled{9}) \dots\dots\dots \textcircled{10} \\ \therefore \text{Stoichiometric urea flow(ml/min.)} &= \textcircled{10} / 30 * (17 / 0.567) * (100 / 32.5) * (1 / 1085) * 60 * 1000 \quad (2) \end{aligned}$$

2.2.3 탠덤 시스템 실험방법

일정 엔진속도 및 일정 엔진부하 상태에서 먼저 듀티 사이클 제어로 물을 공급하였으며, 그 상태에서 발생하는 NOx 생성량과 흡기관내의 공기 흐름량을 기초로 해서 최적의 요소 분사량을 계산하였다. 계산된 최적의 요소 분사량에서부터 요소 분사량을 점점 증가시키면서 엔진속도 및 엔진부하별로 NOx의 저감효과를 비교·검토하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험 영역 결정

실험 영역의 결정은 미국 OSU(ohio state university)의 퓨처 트럭팀(future truck team)이 미 연방의 도시 주행을 통하여 얻어진 데이터를 바탕으로 만들어진 시험모드인 FUDS (federal urban driving schedule) 모드의 운전빈도를 Matlab simulink simulator로 시뮬레이션한 결과를 이용하였다. 시뮬레이션 결과 엔진의 사용빈도가 높은 영역이 엔진속도 2500 rpm 이하와 엔진부하 150 ft-lb 이하로 나타났다. 따라서, 실험조건으로는 엔진속도는 1250 rpm 에서부터 시작해서 250 rpm 씩 증가하면서 2500 rpm 까지 수행하였으며, 엔진부하는 30 ft-lb 에서부터 시작해서 30 ft-lb 씩 증가하면서 150 ft-lb 까지 수행하였다.

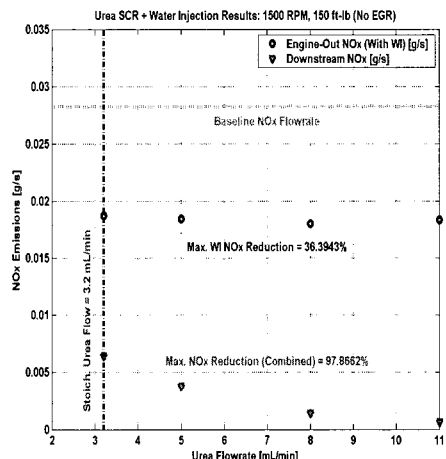
3.2 EGR을 사용안한 엔진에 탠덤 시스템 적용시 NOx 발생량 비교

Fig. 3은 각 엔진속도 및 엔진부하에서 최적의

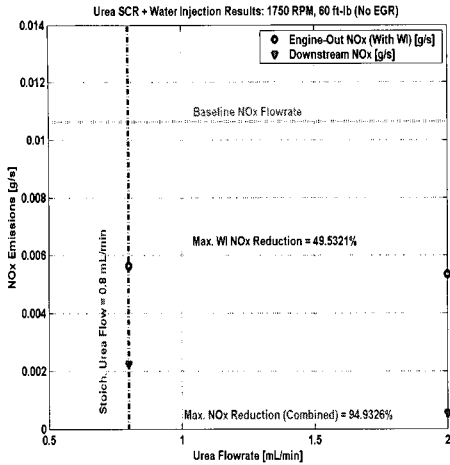
요소 분사량(SUF)의 계산값과 물 분사로 인한 NOx 저감률 및 최적의 요소 분사량보다 요소의 분사를 증가시켰을 때의 최대 NOx 저감률을 나타내고 있다. Fig. 3 (a) 는 1500 rpm 및 150 ft-lb에서 실험한 결과로써 EGR 시스템만 갖는 엔진의 NOx 발생량(0.028 g/s)과 물 분사를 했을 때 NOx 저감(0.019 g/s)률은 36.4%이며, 최적의 요소 분사량(3.2 ml/min) 및 그때의 NOx 발생량(0.006 g/s) 그리고 요소 분사량을 계속해서 증가시키면 최대 NOx 저감률이 97.9% 임을 알 수 있다. Fig. 3 (a)에서 부터 (e)까지에 대한 설명은 Table 2에 정리하였다. Table 3은 지금까지 실험한 전 영역의 엔진속도 및 엔진부하별 최적의 요소 분사량, 물 분사에 의한 NOx 저감률 및 지속적인 요소 분사에 의한 최대 NOx 저감률을 보여주고 있다. 엔진부하가 클수록 최적의 요소 분사량이 많아짐을 알 수 있다.

Table 2 SUF, NOx reduction rate by WI and Max. conversion rate by urea

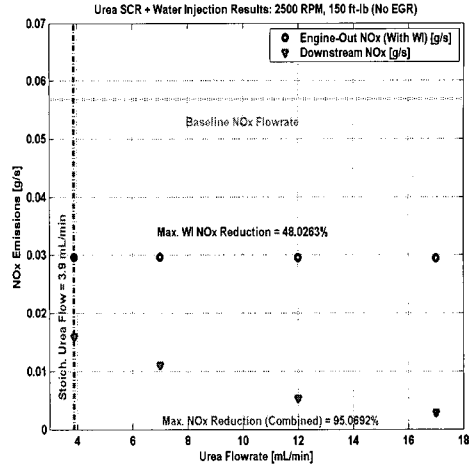
Fig.	rpm/ft-lb	SUF (ml/min)	WI NOx reduction rate (%)	Max. NOx reduction rate (%)
(a)	1500/150	3.2	36.4	97.9
(b)	1750/ 60	0.8	49.5	94.9
(c)	2000/ 90	1.2	66.1	97.0
(d)	2250/120	2.0	55.6	94.9
(e)	2500/150	3.9	48.0	95.1



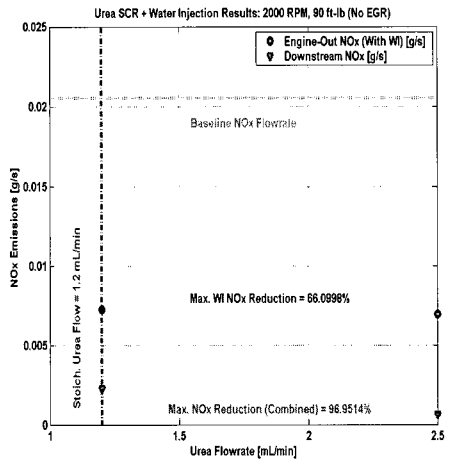
(a) NOx emissions at 1500 rpm and 150 ft-lb



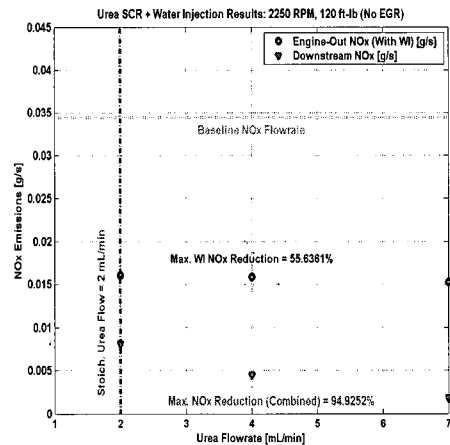
(b) NOx emissions at 1750 rpm and 60 ft-lb



(e) NOx emissions at 2500 rpm and 150 ft-lb



(c) NOx emissions at 2000 rpm and 90 ft-lb



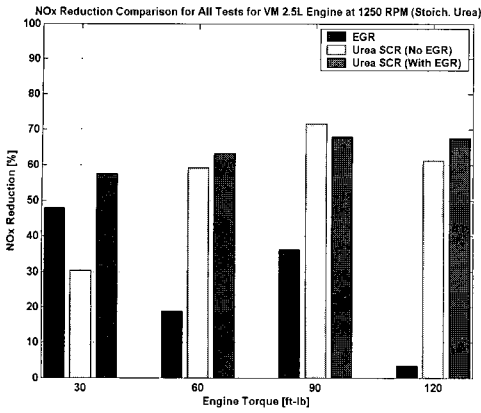
(d) NOx emissions at 2250 rpm and 120 ft-lb

Fig. 3 Comparison of the SUF and NOx emissions from each test conditions

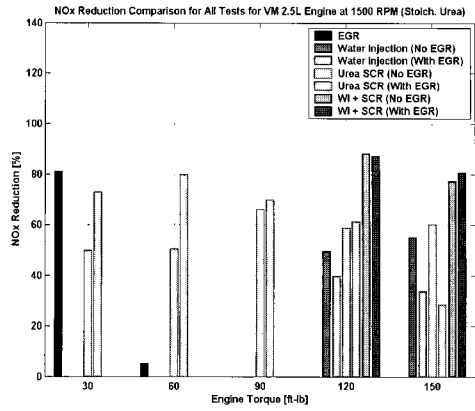
3.3 실험조건에 따른 NOx 저감률 비교

3.3.1 최적의 요소 분사량(SUF) 분사시 NOx 저감률 비교

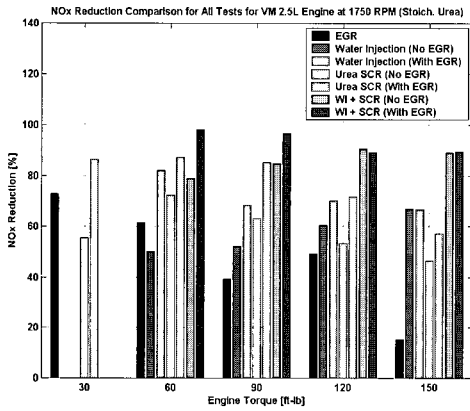
Fig. 4는 각각의 실험조건에 따른 엔진속도 및 엔진부하별 NOx 저감률의 변화를 보여주고 있으며, 위에서 아래로 설명되어 있는 막대 그래프는 왼쪽에서부터 오른쪽 순으로 설명되어 있다. Fig. 4 (a)는 1250 rpm에서 실험한 결과로써 저속이기 때문에 물을 분사할 수 없었으므로 EGR 및 Urea-SCR 시스템에 의한 NOx 저감효과를 나타내고 있다. Fig. 4 (b)는 1500 rpm에서 실험한 결과로써 고부하 영역에서만 물 분사를 할 수 있었으므로 고부하 영역에 대한 탠덤 시스템의 NOx 저감효과를 알 수 있다. 또한, Fig. 4 (c)는 1750 rpm에서 실험한 결과로써 저부하(30 ft-lb) 이외의 모든 영역에서 물 분사를 할 수 있었으며, Fig. 4 (d)와 (e)는 각각 2000 및 2500 rpm에서 실험한 결과를 나타내고 있다. 현재 사용되고 있는 EGR 시스템만 갖는 엔진에 비해서 EGR 없이 탠덤 시스템만 가지는 엔진의 NOx 저감효과가 저속-저부하 이외의 전 영역에서 좋음을 알 수 있다. 또한, EGR 시스템만 갖는 엔진의



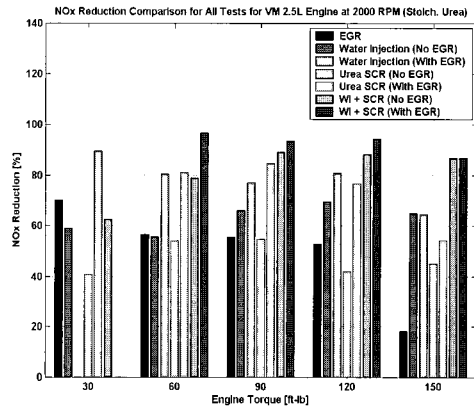
(a) NOx reductions at 1250 rpm



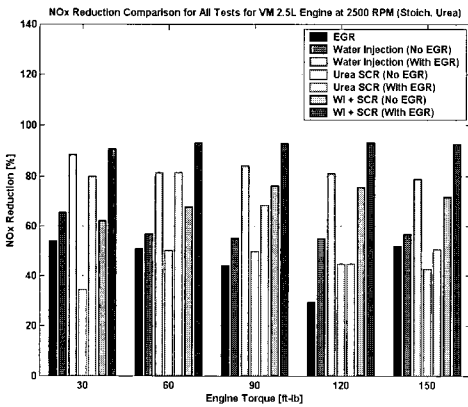
(b) NOx reductions at 1500 rpm



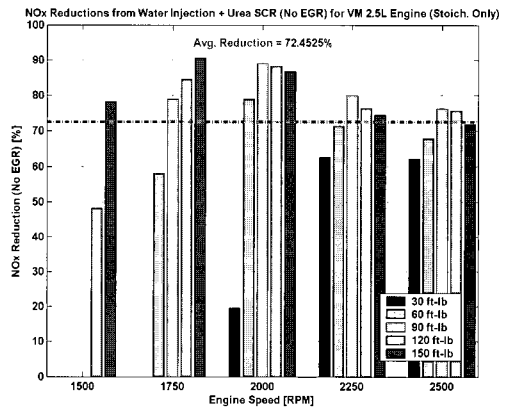
(c) NOx reductions at 1750 rpm



(d) NOx reductions at 2000 rpm



(e) NOx reductions at 2500 rpm



(f) NOx reductions from Tandem system by each rpm and loads

Fig. 4 Comparison of NOx reductions from each test conditions(Stoichiometric points)

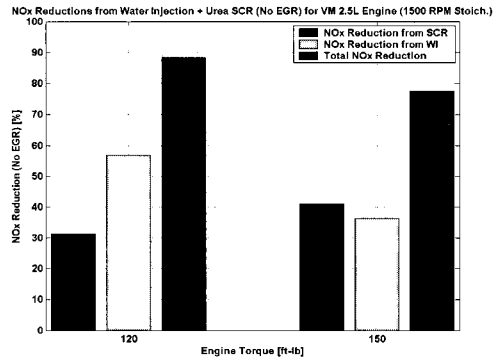
NOx 저감 효과는 저속·저부하쪽으로 갈수록 더 좋아짐을 알 수 있으며, EGR 없이 탠덤 시스템만 가지는 엔진의 NOx 저감효과는 고속·고부하로 갈수록 더 좋아짐을 그래프를 통하여 알 수 있다. Fig. 4 (f)는 EGR 없이 탠덤 시스템만 가지는 엔진에서의 엔진속도 및 엔진부하별 NOx 저감률이 평균 약 72.5%임을 나타내고 있다.

Table 3 SUF, NOx reduction rate by WI and Max. conversion rate by urea

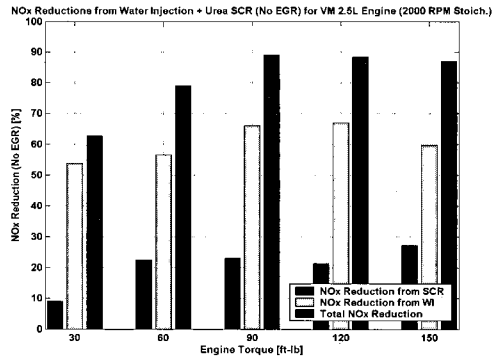
rpm	Load (ft-lb)	SUF (ml/min.)	WI NOx (%)	Max. NOx (%)
1500	30	-	-	-
	60	-	-	-
	90	-	-	-
	120	2.5	57.0	99.1
	150	3.2	36.4	97.9
1750	30	-	-	-
	60	0.8	49.5	94.9
	90	1.3	51.1	99.3
	120	2.0	64.0	98.3
	150	2.6	75.6	97.8
2000	30	0.5	53.8	64.7
	60	0.9	56.7	90.1
	90	1.2	66.1	97.0
	120	1.93	67.0	96.1
	150	4.6	59.7	95.7
2250	30	0.6	63.8	71.1
	60	0.73	60.9	83.1
	90	1.24	60.8	95.9
	120	2.0	55.6	94.9
	150	3.6	51.7	96.5
2500	30	0.5	61.6	68.1
	60	1.0	53.3	80.2
	90	1.7	51.7	93.0
	120	2.6	51.6	96.5
	150	3.9	48.0	95.1

3.3.2 탠덤 시스템의 물과 요소에 의한 NOx 저감률 기여도 비교

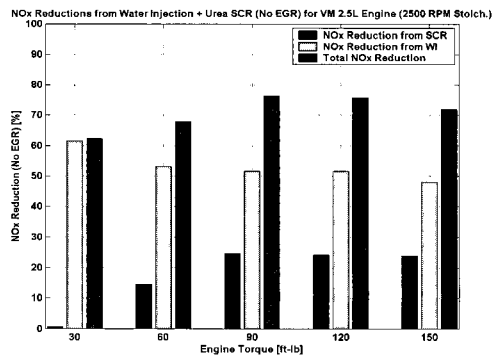
Fig. 5는 EGR 없이 탠덤 시스템만 갖는 엔진에서 물 분사에 의한 NOx 저감률 및 최적의 Urea 분사량(SUF)에 의한 NOx 저감률을 엔진속도 및 엔진부하별로 나타내고 있다.



(a) NOx reductions at 1500 rpm



(b) NOx reductions at 2000 rpm



(c) NOx reductions at 2500 rpm

Fig. 5 Comparison of NOx reductions by water injection and urea injection for tandem system

Fig. 5 (a)는 1500 rpm에서 실험한 결과로서 120 ft-lb에서는 물 분사에 의한 NO_x 저감효과가 최적의 요소 분사에 의한 NO_x 저감 효과보다 크지만, 150 ft-lb에서는 그 반대현상도 있음을 알 수 있다. 또한, Fig. 5 (b)와 (c)는 각각 2000 및 2500 rpm에서 실험한 결과로써 전 영역에 걸쳐서, 물 분사에 의한 NO_x 저감효과가 최적의 요소 분사에 의한 NO_x 저감효과 보다 좋은 것을 알 수 있다. 이유는 흡입 공기온도와 흡입 공기량(MAF)에 의해 계산된 물 분사로 인해서 충분히 저감된 NO_x 배출량과 흡입 공기량(MAF)에 의해서 최적의 요소 분사량(SUF)이 결정되기 때문이다. 따라서 물 분사로 저감된 NO_x 량은 값비싼 요소의 사용량을 줄일 수 있다는 것을 의미한다.

3.4 실험조건에 따른 NO_x 맵 비교

Fig. 6은 동일 엔진에 대해서 실험조건에 따른 NO_x 맵을 보여주고 있다. 맵 (a)는 EGR 시스템만 갖는 엔진의 NO_x 맵을 나타내고 있으며, 맵 (b)는 EGR 없이 탠덤 시스템만 갖는 엔진의 NO_x 맵을 나타내고 있다. 맵 (b)의 NO_x 발생량이 맵 (a)의 NO_x 발생량보다 거의 전 영역에 걸쳐서 훨씬 낮음을 알 수 있다.

4. 결 론

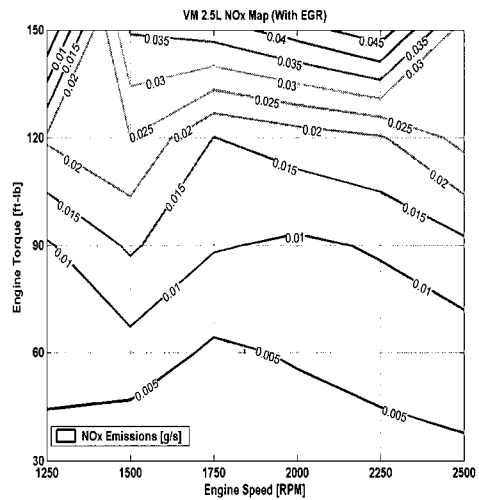
본 연구에서 수행한 탠덤 시스템의 연구를 통하여 자동차 엔진용으로 사용되고 있는 EGR 시스템 및 선박용으로 사용되고 있는 Urea-SCR 시스템 그리고 물 분사 시스템에 의한 NO_x 저감률을 엔진속도 및 부하변동에 따라서 평가하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 자동차에 사용되고 있는 EGR 엔진에 비해서 EGR 없이 탠덤 시스템만 갖는 엔진의 NO_x 저감률이 약 72.5%로 저속·저부하 이외의 전 영역에 걸쳐서 NO_x 저감 효과가 우수하게 나타났다.

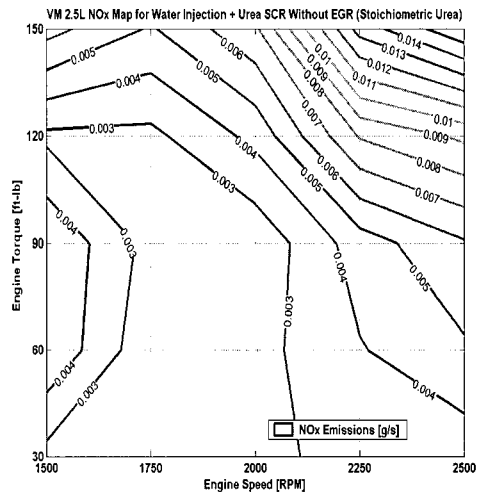
둘째, 최적의 요소 분사량(SUF)을 계산할 수 있었으며, NO_x 맵을 이용하여 탠덤 시스템의 엔진사용에 따른 NO_x 발생량을 예측할 수 있었다.

셋째, EGR 적용 엔진은 저부하로 갈수록 NO_x

저감률이 높아짐을 알 수 있었으며, 탠덤 시스템은 고부하로 갈수록 NO_x 저감률이 대체적으로 높아짐을 알 수 있었다. 따라서 더욱 엄격해지는 NO_x 규제를 만족시키기 위해서는 현재 사용중인 EGR 시스템은 저속·저부하 영역에서 적용하고, 그 이외의 운전 영역에서는 탠덤 시스템만을 적용하는 것이 효과적이라 할 수 있다.



(a) NO_x map for with EGR base engine



(b) NO_x map of tandem system without EGR engine (Stoichiometric points)

Fig. 6 Comparison of NO_x maps for each test conditions

참고문헌

- [1] 남정길, 최재성, "디젤기관의 내장형 EGR 시스템 적용 가능성에 관한 연구", 한국박용기관학회지, pp. 389~404, 제23권 제3호, 1999.
- [2] 남정길, 최주열, "디젤엔진의 NOx 배출 특성에 관한 연구", 한국박용기관학회지, 제27권 제3호, pp. 373~380, 2003.
- [3] J. Gieshoff, A. Schafer-Sindlinger, P. C. Spurk and J. A. A. Van den Tillaart, G. Garr, "Improved SCR Systems for Heavy-Duty Applications", SAE 2000-01-0189.
- [4] William R. Miller, et al., "The Development of Urea-SCR Technology for US Heavy Duty Trucks", SAE 2000-01-0190, 2000.
- [5] Rinie van Helden, et al., "Engine Dynamometer and Vehicle Performance of Urea SCR-System for Heavy-Duty Truck Engines" SAE 2002-01-0286, 2002.
- [6] S. Saito, R. Shinozaki, A. Suzuki, H. Jyoutaki, Y. Takeda, "Development of urea-SCR System for Commercial Vehicle", Society of Automotive Engineers, Inc., 2003, Paper No. 2003-01-3248.
- [7] P. G. Blakeman, G. R. Chandler, G. A. John, A. J. J. Wilkins, "Investigations into NOx Aftertreatment with urea-SCR for Light-Duty Diesel Vehicles", Society of Automotive Engineers, Inc., 2004, Paper No. 2004-01-3624.
- [8] Masahiro Ishida, Hironobu Ueki, and Daisaku Sakaguchi, "Prediction of NOx Reduction Rate Due to Port Water Injection in a DI Diesel Engine", SAE 972961, 1997.
- [9] J. P. Mellow, A. M. Mellor, "NOx Emissions from Direct Injection Diesel Engines with Water/Steam Dilution", SAE 1999-01-0836, 1999.
- [10] S. Brusca, R. Lanzafame, "Water Injection in IC-SI Engines to Control Detonation and to Reduce Pollutant Emissions", SAE 2003-01-1912, 2003.

저 자 소 개



남정길 (南廷吉)

1962년 3월생, 1985년 한국해양대학교 기관학과 학사, 1991년 동 대학원 기관학과 석사, 1999년 동 대학원 기관학과 박사, 1992년~1999년 현대자동차 중앙연구소(디젤엔진설계팀), 2004년 Ohio state University 연구교수, 2000년~현재 목포해양대학교 기관시스템공학부 조교수, 한국마린엔지니어링학회 증진회원.