

물 분사 시스템에 의한 소형 디젤엔진의 NOx 및 그 외 배출물의 특성에 관한 연구

남정길† · 최재성*

(원고접수일 : 2005년 2월 23일, 심사완료일 : 2005년 6월 10일)

A Study on the Characteristics of NOx and another Emission by Water Injection System for a Light-Duty Diesel Engine

Jeong-Gil Nam† · Jae-Sung Choi*

Abstract : In this paper, the effects of a WI(Water Injection) in the intake pipe for a 4-cylinder DI(Direct Injection) diesel engine are investigated experimentally. The WI system was controlled by the duty cycle from the intake manifold's temperature and MAF(Manifold Air Flow). First, effect of EGR on NOx reduction was investigated. Then WI system was applied to reduce NOx. As the results, we can make the NOx map and visualize the NOx results by variation of engine speed and engine load. It was known that effect of WI system on NOx reduction without the EGR was better than the with EGR base engine except of low load and speed condition.

Key words : Direct injection(직접 분사식), Water injection system(물 분사 시스템), Manifold air flow(흡기관 공기 흐름량), NOx reduction(질소산화물 저감), NOx map(질소산화물 지도)

1. 서 론

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 물 분사에 관한 연구도 많이 보고되고 있다^{[1]-[4]}.

현재 상용화 되어 있는 NOx 저감기술로는 자동차엔진에는 EGR 시스템이 주로 사용되고 있으며^{[5]-[11]}, 선박엔진이나 산업용엔진에는 Urea-SCR 시스템이 주로 사용되고 있다. 또한, 최근에는 바닷물을 조수기로 증류수를 만들어서 흡기관에 증류수를 분사하여 NOx를 저감시키는 기술인 HAM(Humid Air Motor) 시스템이 일부 선박엔진에 도입되어 선을 보이고 있기도 하다.

그러나 자동차엔진에 현재 사용되고 있는 EGR

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

* 한국해양대학교 기관시스템공학부

시스템은 NOx 저감효과가 적으며 NOx를 제외한 다른 Emission이 악화될 뿐만아니라, 엔진 내구성 및 성능까지도 저하시키는 많은 단점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 자동차엔진용으로 사용되고 있는 EGR 시스템의 단점을 극복하고, 더욱 엄격해지는 NOx 규제를 만족시키기 위해서 인터쿨러와 흡기 매니폴드 사이에 물을 분사시키는 물 분사 (Water Injection) 시스템을 구축하였다. 실험 엔진은 VM 2.5L 디젤엔진으로써 EGR 사용 엔진과 EGR를 사용한 엔진 및 각각의 엔진에 대해서 물 분사를 시켰을 때 발생하는 NOx의 저감효과를 분석하고자 하며, 그 외 배출물인 THC, CO, CO2 및 O2 량의 변화도 비교·검토하고자 한다.

또한, EGR 사용 엔진과 EGR를 사용한 엔진에 물 분사를 시켰을때 발생하는 NOx 저감 정도를 비교·분석 하고자 NOx map을 만들었으며, 물 분사시스템의 개발가능성에 대해서 검토하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

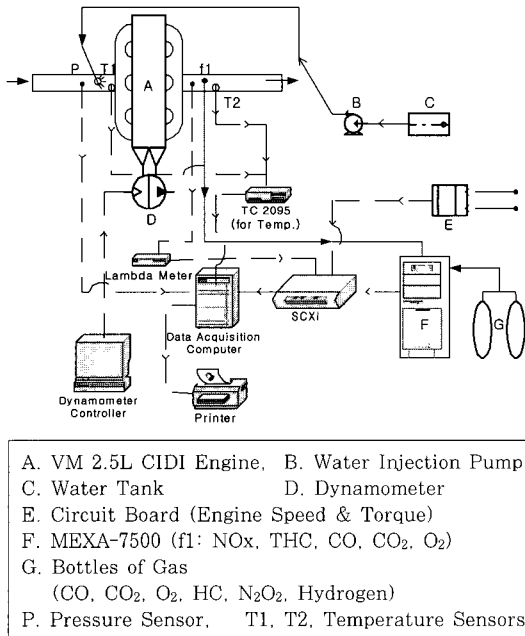
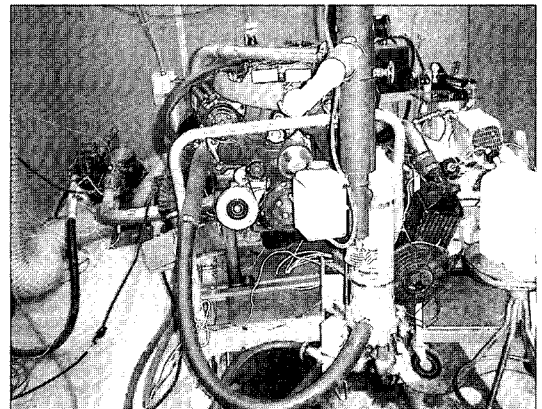


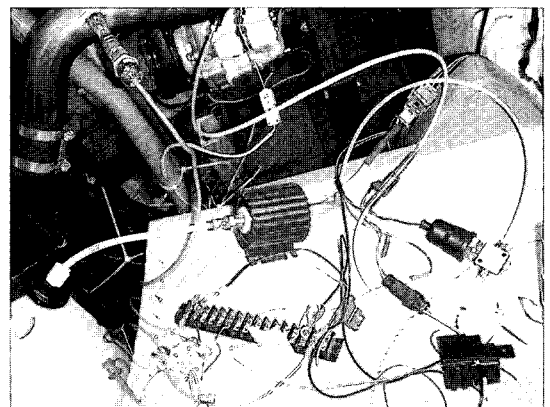
Fig. 1 Schematic diagram of experimental measuring apparatus

Table 1 Specifications of test engine

Engine Parameter	Value
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. Efficiency	44 %
Max. Speed	4800 rpm
Weight	220 kg
Additional Features	Turbochargrer, intercooler, cooled EGR, 16 valves, dual overhead cams, twin balance shafts.



(a) View of engine equipped with water injection system



(b) Water injection system

Fig. 2 Photographs of test equipments

Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타내고 있으며, 실험엔진은 독일에서 만든 직접분사식 소형 디젤 엔진으로 그 사양은 Table 1에 보여주고 있다. 또한, Fig. 2는 실험실 및 각종 실험장치의 사진을 보여주고 있다. 사진 (a)는 물 분사 시스템이 장착된 실험엔진을 보여주고 있으며, 사진 (b)는 물 분사 시스템을 보여주고 있다.

2.2 실험방법

2.2.1 물 분사량 조절 방법

물 분사량을 조절하기 위해서 식 (1)과 같이 흡기관내의 공기 흐름량(Manifold Air Flow) 및 흡기 온도를 고려해서 물 분사 펌프의 밸브 개도를 계산하였으며, 계산된 값에 따라서 물 분사량을 Duty cycle 제어 하였다. 또한, 계산된 밸브 개도가 90% 이상인 경우에는 90% 까지만 밸브를 열어서 흡기 매니폴드에 물을 분사시켰다.

$$Duty_cycle = ((5) - 0.6081) / 0.0336 \quad (1)$$

여기에서

- T_{intake} (흡기 온도, °C) ①
- MAF_V (흡입 공기량, Volt) ②
- MAF = 2.0143 * ②^{3.0771} ③
- abs_{humid} = 3.7016 * e^(0.0581*①) ④
- V_{dot_w} = (④ * (③/1000)) / 0.997 ⑤

2.2.2 Lab. View 구성

Table 2 Lab. view

	Items	Units	Remarks
1	Humidity	%	100*V
2	MAF		air flow
3	AFR (Air Flow Rate)		
4	CO ₂	% Vol	(20/10)*V
5	CO High	% Vol	(12/10)*V
6	CO Low	ppm	(5000/10)*V
7	NOx Eng. Out	ppm	(5000/10)*V
8	THC	ppm	(1000/10)*V
9	EGR CO ₂	% Vol	(20/10)*V
10	Ambient Temp.	°C	
11	Intake Temp.	°C	
12	O ₂	% Vol	(25/10)*V
13	MAP	psi	14.7 + 26.325*(V-1)
14	Eng. Speed	rpm	
15	Eng. Torque	ft-lb	
16	WI Valve Duty Cycle	%	

각종 Sensor에서 측정된 Voltage 값을 측정장치 (NOx Analyzer) 및 Monitor(Data acquisition)에서 원하는 단위로 볼 수 있도록 Lab. view 를 이용하여 구성하였으며, Table 2는 실험장치의 Lab. view 항목들을 나타내고 있다.

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 2,500rpm 이하와 엔진부하 150 ft-lb 이하로 나타났다. 따라서, 실험조건으로 는 엔진속도는 1,250에서 2,500rpm까지 250 rpm 간격으로 측정하였으며, 엔진부하는 30에서 150 ft-lb 까지 30 ft-lb 간격으로 측정하였다.

3.2 각 실험조건에 대한 배기 배출물 분석

3.2.1 NOx 발생량의 비교

Fig. 3은 EGR을 사용한 엔진과 EGR 사용 엔진 및 각각의 엔진에 대해서 물 분사를 시켰을 때의 NOx 발생량을 나타내고 있다. 그래프 (a)는 EGR을 사용한 엔진의 NOx 발생량을 나타내고 있으며, 그래프 (b)는 EGR 사용 엔진의 NOx 발생량을 나타내고 있다. 그래프 (a)에 비해서, 그래프 (b)의 NOx 발생량이 전 영역에 걸쳐서 적음을 알 수 있다. 또한, 각각의 엔진에 대해서 물 분사를 시킨 경우인 그래프 (c) 와 (d)를 비교해 보면 NOx 저감효과가 거의 비슷함을 알 수 있으며, 그래프 (c) 와 (d)는 전 영역에 걸쳐서 EGR 사용 엔진의 그래프 (b) 보다 NOx 발생량이 훨씬 적음을 알 수 있다. 그러나 물 분사 시스템은 저속(1250rpm) 및 저부하(30, 60 lb-ft) 영역에서는 엔진 정지(Stall) 현상이 발생하여 물 분사를 시킬 수가 없을뿐만 아니라, 물의 소비량

이 많기 때문에 큰 물 탱크를 탑재해야 하는 어려움을 가지고 있다. 또한, 고속·고부하 영역에서는 약 5% 정도의 Torque drop 현상이 생기는 단점도 가지고 있다.

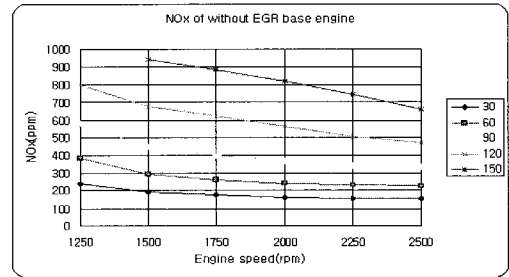
3.2.2 THC 발생량의 비교

Fig. 4는 각각의 시험조건에서 THC의 발생량을 나타내고 있다. EGR을 사용안한 엔진의 그래프 (a)에 비해서, EGR 사용 엔진의 그래프 (b)의 THC 발생량이 중·고부하 영역에서는 비슷하나, 저부하·저속으로 갈수록 많음을 알 수 있다. 또한, 각각의 엔진에 대해서 물 분사를 시킨 그래프(c)와 (d)는 저부하인 30 lb-ft 부근에서 THC 발생량이 특히 많음을 알 수 있으며, EGR 사용 엔진에 물 분사를 시킨 그래프(d)의 THC 발생량이 그래프 (c)보다 대체적으로 더 많음을 알 수 있다. 그리고 EGR을 사용안한 엔진에 물 분사만 시킨 그래프 (c)와 EGR 사용 엔진인 그래프 (b)를 비교해 보면 THC 발생량이 중·고부하 영역에서는 거의 비슷하지만, 저부하 영역에서는 그래프 (c)가 훨씬 많음을 알 수 있다. 따라서 불완전 연소시에 많이 발생하는 THC는 EGR 사용시와 물 분사시에 많이 발생하며, 특히, 물 분사시에 저부하 영역에서 THC가 많이 발생하는 것을 보면 불완전 연소 영역임을 알 수 있다.

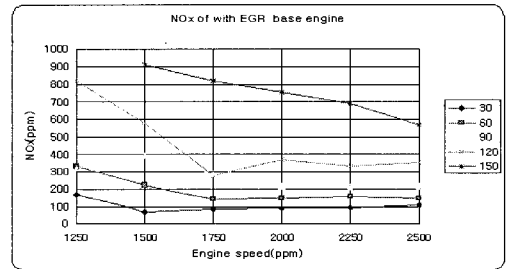
3.2.3 CO 발생량의 비교

Fig. 5는 각각의 시험조건에서 CO의 발생량을 나타내고 있다. EGR을 사용안한 엔진의 그래프 (a)에 비해서, EGR 사용 엔진의 그래프 (b)가 CO 발생량이 고부하를 제외한 전 영역에 걸쳐서 많음을 알 수 있으며, 저부하 일수록 CO 발생량이 많음을 알 수 있다. 또한, 각각의 엔진에 대해서 물 분사를 시킨 그래프 (c)와 (d)를 비교해 보면 고부하 영역에서는 CO 발생량이 비슷하지만, 저부하 영역으로 갈수록 EGR 사용 엔진에 물 분사를 시킨 그래프(d)의 CO 발생량이 훨씬 많음을 알 수 있다. EGR을 사용안한 엔진에 물 분사만 시킨 그래프 (c)와 EGR 사용 엔진의 그래프 (b)를 비교해 보면 저부하 영역으로 갈수록 그래프 (c)의 CO 발생량이 훨씬 많지만, 고부하 영역에서는 거의 비슷해짐을 알 수 있다. 따라서 CO 역

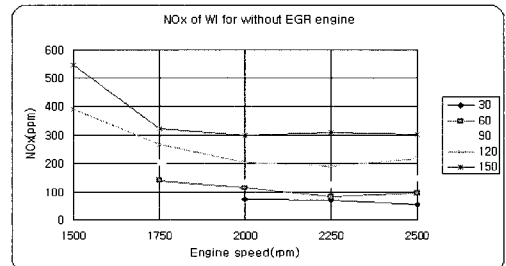
시 불완전 연소시에 많이 발생함을 알 수 있으며, 물 분사시와 EGR 사용시에 많이 발생한다. 또한, 물 분사시에 저부하 영역에서 CO가 많이 발생하는 것을 보면 불완전 연소 영역임을 알 수 있다.



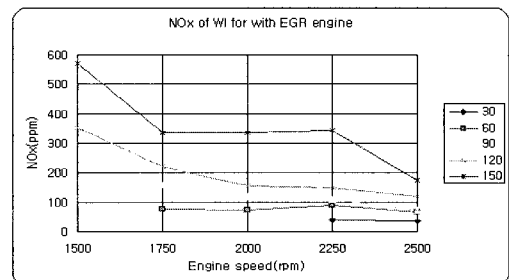
(a) NOx of without EGR engine



(b) NOx of with EGR base engine

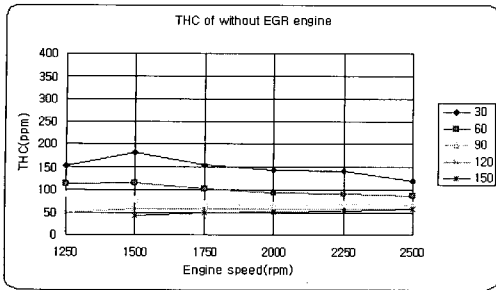


(c) NOx of WI system without EGR engine

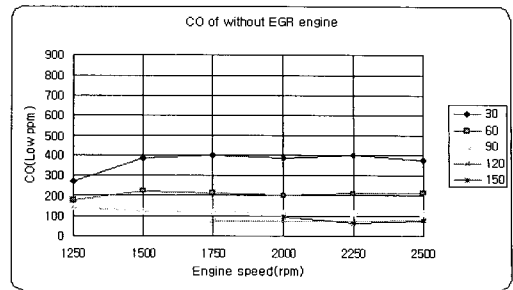


(d) NOx of WI system with EGR engine

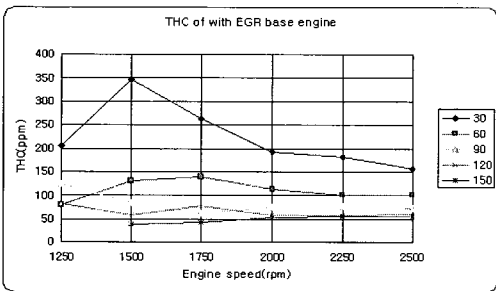
Fig. 3 Comparison of NOx for each test conditions



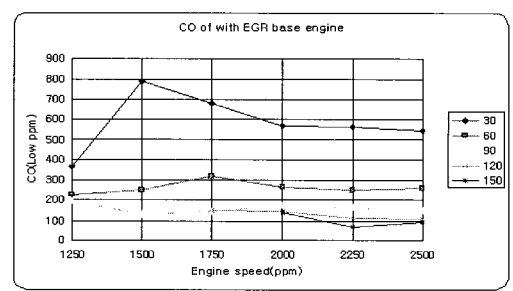
(a) THC of without EGR engine



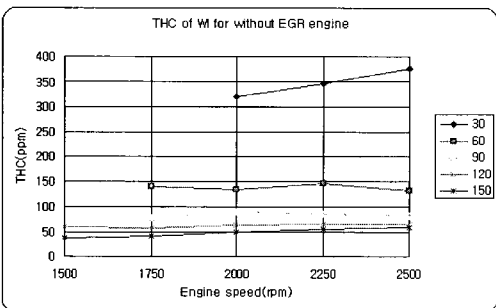
(a) CO of without EGR engine



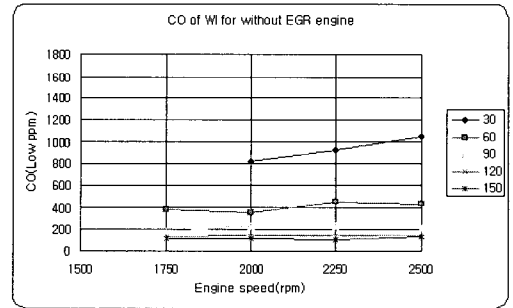
(b) THC of with EGR base engine



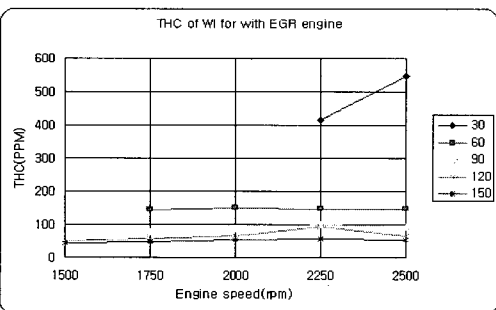
(b) CO of with EGR base engine



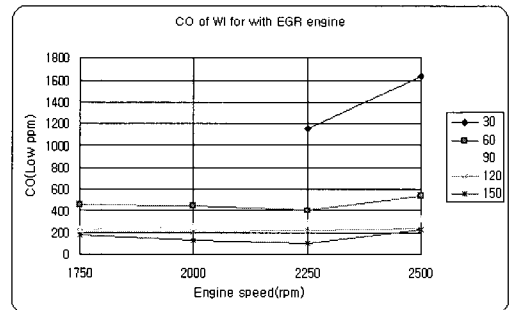
(c) THC of WI system without EGR engine



(c) CO of WI system without EGR engine



(d) THC of WI system with EGR engine



(d) CO of WI system with EGR engine

Fig. 4 Comparison of THC for each test conditions

Fig. 5 Comparison of CO for each test conditions

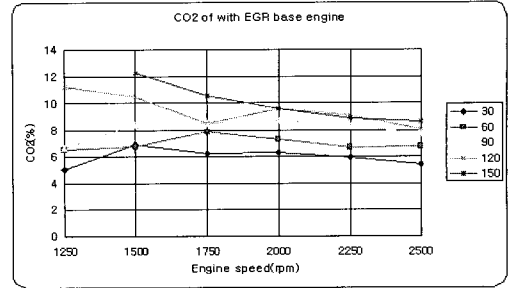
3.2.4 CO₂ 발생량의 비교

Fig. 6은 각각의 시험조건에서 CO₂의 발생량을 나타내고 있다. EGR을 사용안한 엔진의 그래프 (a)에 비해서, EGR 사용 엔진의 그래프 (b)가 CO₂ 발생량이 거의 전 영역에 걸쳐서 많음을 알 수 있다. 또한, 각각의 엔진에 대해서 물 분사를 시킨 그래프 (c)와 (d)를 비교해 보면 EGR을 사용안한 엔진에 물 분사만 시킨 그래프 (c)의 CO₂ 발생량이 대체적으로 적음을 알 수 있다. 그리고 EGR을 사용안한 엔진에 물 분사만 시킨 그래프 (c)는 EGR 사용 엔진의 그래프 (b)에 비해서 CO₂ 발생량이 전 영역에 걸쳐서 훨씬 적음을 알 수 있다.

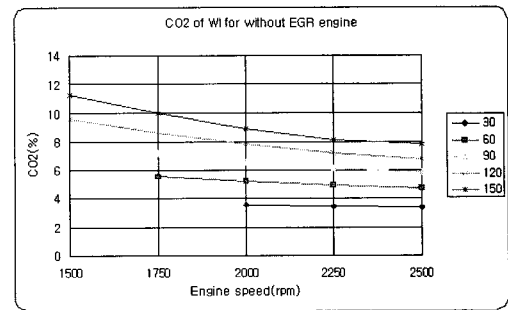
따라서 EGR 사용시에 CO₂ 발생이 많음을 확인할 수 있으며, 물 분사시에는 오히려 CO₂ 발생량이 적어짐을 알 수 있다.

3.2.5 O₂ 발생량의 비교

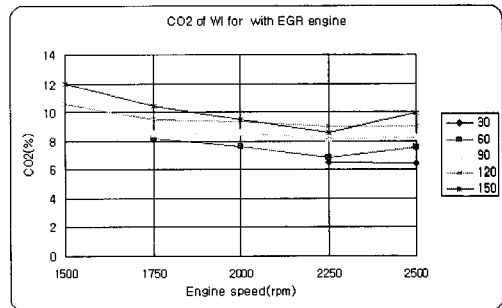
Fig. 7은 각각의 시험조건에서 O₂의 발생량을 나타내고 있다. EGR을 사용안한 엔진의 그래프 (a)에 비해서, EGR 사용 엔진의 그래프 (b)의 O₂ 발생량이 전 영역에 걸쳐서 적음을 알 수 있으며, 고부로 갈수록 O₂ 발생량이 적음을 알 수 있다. 또한, 각각의 엔진에 대해서 물 분사를 시킨 그래프 (c)와 (d)를 비교해 보면 EGR 사용 엔진에 물 분사를 시킨 그래프 (d)의 O₂ 발생량이 대체적으로 더 적음을 알 수 있다. 또한, EGR을 사용안한 엔진의 그래프 (a)와 (c)의 O₂ 발생량이 일정하게 변함을 알 수 있다. 따라서 물 분사시와 EGR 적용시에 O₂ 발생량이 적은 이유는 흡기관으로 들어오는 산소 공급량이 적기 때문이며, 고부하로 갈수록 O₂ 발생량이 적은 이유는 완전연소에 가깝기 때문이라고 사료된다.



(b) CO₂ of with EGR base engine

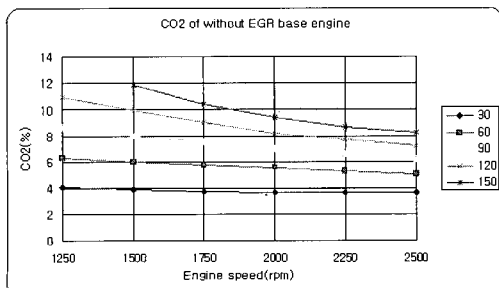


(c) CO₂ of WI system without EGR engine

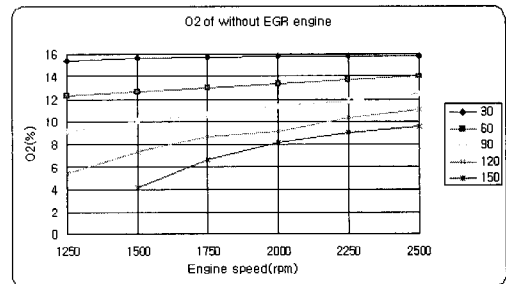


(d) CO₂ of WI system with EGR engine

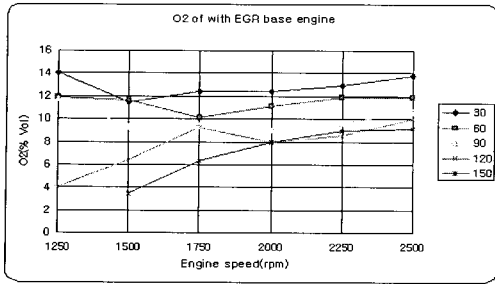
Fig. 6 Comparison of CO₂ for each test conditions



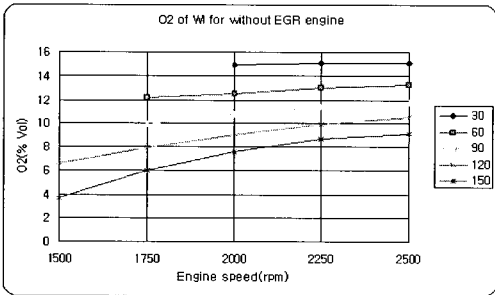
(a) CO₂ of without EGR engine



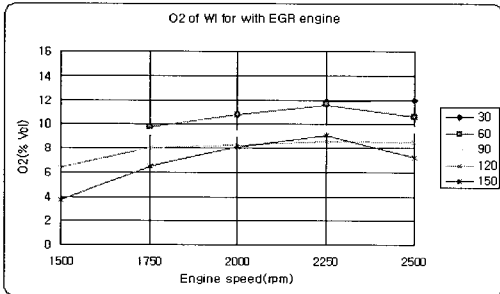
(a) O₂ of without EGR engine



(b) O₂ of with EGR base engine



(c) O₂ of WI system without EGR engine



(d) O₂ of WI system with EGR engine

Fig. 7 Comparison of O₂ for each test conditions

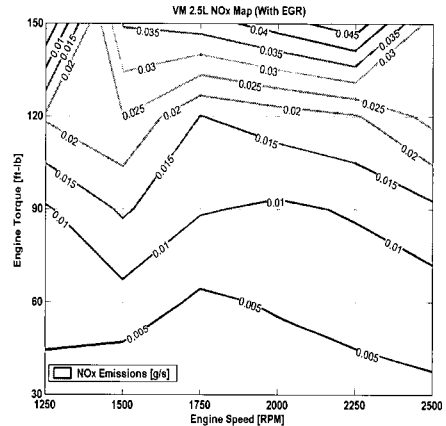
3.3 배기 배출물의 특성 및 NOx map

Table 3은 각 실험 조건에 따른 배기 배출물의 특성을 나타내고 있으며, NOx 발생량은 EGR 사용시, 물 분사시 및 고속·저부하로 갈수록 감소함을 알 수 있다. 또한, Fig. 8은 EGR 사용 엔진과 EGR를 사용안한 엔진에 물 분사를 시킨 경우의 NOx map을 나타내고 있다. Map (a)는 EGR 사용 엔진의 NOx map을 나타내고 있으며, Map (b)는 EGR를 사용안한 엔진에 물 분사를 시킨 경우의 NOx map을 나타내고 있다. Map (a)와

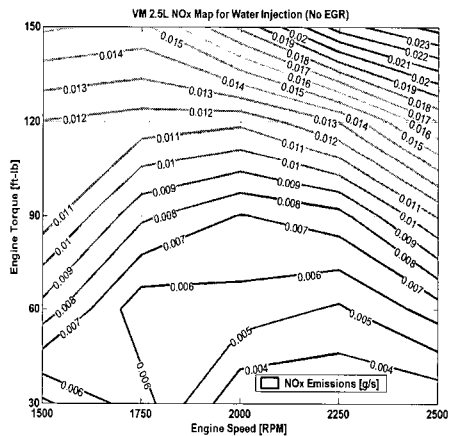
(b)를 비교해 보면, Map (b)의 NOx 발생량이 저속·저부하 영역을 제외한 전 영역에 걸쳐서 훨씬 낮음을 알 수 있다. 따라서 현행의 EGR 시스템에 비해서 물 분사 시스템의 NOx 저감효과가 전체적으로 더 좋음을 알 수 있다.

Table 3 Characteristics of emission by each test condition

	NOx	THC	CO	CO ₂	O ₂
1 EGR적용	감소	증가	증가	증가	감소
2 물 분사	감소	증가	증가	감소	감소
3 저부하	감소	증가	증가	감소	증가
4 고속	감소	-	-	감소	증가



(a) NOx map of with EGR base engine



(b) NOx map of WI system without EGR engine

Fig. 8 Comparison of NOx maps for each test conditions

4. 결 론

본 연구에서 수행한 물 분사 시스템의 연구 결과로 엔진속도와 부하변동에 대한 NO_x 농도 값(ppm)의 변화를 가시적으로 나타낼 수 있었다. 그 외의 Emission인 THC, CO₂, CO 및 O₂의 변화량도 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 물 분사 시스템이 현행의 EGR 시스템과 비교해서 저속·저부하 영역을 제외한 전영역에 걸쳐서 NO_x 저감효과가 클 뿐만 아니라, 지구 온난화의 주범인 CO₂ 저감에도 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

둘째, 더욱 엄격해지는 NO_x 규제를 만족시키기 위해서는 현행의 EGR 시스템은 저속·저부하 영역에서 적용하고, 그 외의 운전 영역에서는 물 분사를 적용하는 것이 효과적이다.

셋째, 물 분사 시스템은 엔진의 정지(Stall) 현상 때문에 저속·저부하 영역에서는 적절하지 않을뿐만 아니라, 물 소비량이 많으므로 연료 탱크보다 더 큰 물 탱크가 필요하여 차량탑재시 Lay-out 상에 어려움이 있을 것으로 사료된다.

향후에는 본 연구에서 수행한 실험 데이터를 바탕으로 최적의 물 분사 시스템을 구축하고자 한다.

참고문헌

- [1] Masahiro Ishida, Hironobu Ueki, and Daisaku Sakaguchi, "Prediction of NO_x Reduction Rate Due to Port Water Injection in a DI Diesel Engine", SAE 972961, 1997.
- [2] S. Brusca, R. Lanzafame, "Evaluation of the Effects of Water Injection in a Single Cylinder CFR Cetane Engine", SAE 2001-01-1912, 2001.
- [3] S. Brusca, R. Lanzafame, "Injection in IC-SI Engines to Control Detonation and to Reduce Pollutant Emissions", SAE 2003-01-1912, 2003.
- [4] J. P. Mellow, A. M. Mellor, "Emissions from Direct Injection Diesel Engines with Water/Steam Dilution", SAE 1999-01-0836, 1999.
- [5] 남정길, 최주열, "디젤엔진의 NO_x 배출 특성에 관한 연구", 한국박용기관학회지, 제27권 제3호, pp. 373~380, 2003.
- [6] 남정길, "체적효율을 고려한 가변밸브 개폐시기의 조정에 의한 실린더내 잔류 가스량에 관한 연구", 한국자동차공학회논문집, 제9권 제5호, pp. 82~88, 2001.
- [7] 배병렬, 남정길, 최재성, "디젤기관의 연소실내 NO 생성농도 예측에 관한 연구", 한국박용기관학회지, pp. 543~551, 제23권 제4호, 1999.
- [8] M. Chan, S. Das, and R. D. Reitz, "Modeling multiple injection and EGR effects on diesel engine emissions", SAE972864, 1997.
- [9] J. G. Hawley, et al., "Reduction of Steady State NO_x Levels from an Automotive Diesel Engine Using Optimized VGT/EGR Schedules", SAE 1999-01-0835, 1999.
- [10] R. S. G. Baert, D. E. Beckman, A. Veen, "Efficient EGR Technology for Future HD Diesel Engine Emission Targets", SAE 1999-01-0837, 1999.
- [11] A. J. Dennis, C. P. Garner, D. H. C. Taylor, "The Effect of EGR on Diesel Engine Wear", SAE 1999-01-0839, 1999.

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 중신회원.



최재성 (崔在星)

1952년 5월생, 1974년 한국해양대학교 졸업, 1976년 한국해양대학교 대학원 졸업(석사), 1986년 일본경로대학교 대학원 졸업(박사), 1978년~현재 한국해양대학교 교수, 당학회 부회장.