

흡기관내로의 물 분사에 의한 디젤기관의 연소특성 (I)

유경현* · 윤용진** · 오영택†

(2002년 7월 24일 접수, 2002년 10월 30일 심사완료)

The Combustion Characteristics of Diesel Engine by the Water Injection through the Intake Port (I)

Kyunghyun Ryu, Yoongjin Yun and Youngtaig Oh

Key Words: NOx(질소산화물), Smoke(매연), Water Injection(물 분사), Diesel Engine(디젤기관), Intake Port(흡기관)

Abstract

To effectively meet current regulations on the exhaust emissions of diesel engine required to control the deterioration of air pollution in the whole world, this study is to investigate the effects of water induction through the air intake system on the characteristics of combustion and exhaust emissions in IDI diesel engine. A method for supplying water through the air intake system to reduce the exhaust emissions has been considered with other methods such as water introduction in the form of water-in-fuel emulsion or water injection directly into the combustion chamber, but it has not been studied about the effects of water on the combustion concepts and the characteristics of exhaust emissions in detail until now. In this study, the formation of NOx was significantly suppressed by decreasing the gas peak temperature during the initial combustion process because the water play a role as a heat sink during evaporating in the combustion chamber, but the smoke was slightly increased by increasing water amount.

1. 서 론

자동차에서 배출되는 유해가스에 의한 환경오염이 악화됨에 따라 전 세계적으로 배출가스 규제가 날로 강화되고 있는 실정이다. 특히, 미국과 유럽을 비롯한 자동차 선진국에서는 환경보호를 앞세운 대기환경 개선이라는 논리에 밀려 아주 엄격한 기준을 적용하고 있고, 우리나라에서도 2002년부터는 저공해 자동차 배기규제를 더욱 강

화함에 따라 이에 대한 대책을 강구하지 않으면 안되는 실정이다.

배출가스를 저감시키기 위한 관련 기술로는 연료가 연소되기 전에 배출가스를 저감시키는 전처리 기술과 연소 후에 촉매 등을 통해 배출가스를 저감시키는 후처리 기술로 나눌 수 있다. 후처리 기술로는 촉매의 활성화 특성을 향상시키는 등의 여러 가지 방법 등을 들 수 있지만, 다른 부가적인 장치나 비용이 소요되기 때문에 배출가스를 저감하는 원초적인 방법이 되지 못하고 있다.

촉매받는 전처리 기술로는 실린더의 형상이나 공기 유동 특성의 개선과 같은 엔진 본체와 관련된 기술과 연료 자체를 개선하거나 연료에 연소를 촉진할 수 있는 첨가제를 혼합하는 방법 등과 같은 기술들을 들 수 있다. 이 중에서도 불과 금속산화물을 함유한 수용액을 연소실로 도입하는 방법은 이러한 여러 전처리 기술중의 하나로서

† 책임저자, 회원, 전북대학교 기계공학과, 공학연구원 자동차신기술연구센터

E-mail : ohyt@moak.chonbuk.ac.kr

TEL : (063)270-2323 FAX : (063)270-2315

* 전북대학교 기계공학과

** 전북대학교 대학원 기계공학과

내연기관이 시작되면서 지금까지 많은 노력을 기울여왔다.

물을 이용하여 동력을 얻고자 하는 기술은 전 세계적으로 연구가 진행되어 왔으나,⁽¹⁾ 아직까지 순수 물만을 이용하여 동력을 얻어내는 결과를 얻어내지는 못하고, 연료에 물을 혼합하는 방법 등을 통하여 연소를 촉진시키는 방향으로 많은 연구가 이루어져 왔다.^(2,3)

이러한 물 공급의 효과에 관한 연구로 Greeves 등⁽⁴⁾은 직분식 디젤엔진에서 연료소비와 착화 지연, 그리고 배기 배출물에 관한 물 분사의 효과를 보고하였다. 특히, 물/연료 비와 물공급 방법 면에 있어서 물을 공기 흡입구로 분사하거나 연료와 함께 분사하였을 경우 NO를 약 70%까지 감소시켰으며, 공기흡입구로 분사하는 방법의 경우 매연과 CO는 증가하는 반면, 연료와 함께 분사하는 경우 비연료소비율을 약간 개선시키면서 CO와 매연을 약 50%까지 감소시킬 수 있으나, 물/연료 비가 0.6 이상에서는 HC의 증가로 인해 NO는 50%까지 밖에 감소되지 않는다고 하였다. 또한, 이러한 결과들을 다른 문헌들과 비교하여 나타내었으며, 연소과정의 모델을 통해 물 분사는 열적 효과와 더불어 공기 급기율과 연료/공기 혼합율에 영향을 준다고 보고하였다.

Crookes 등⁽⁵⁾은 디젤엔진의 연료로서 바이오연료(biofuel)들과 물을 함유한 에멀전 연료의 연소 특성에 대한 연구에서, 단실린더 엔진에서는 에멀전 연료의 착화 지연이 길어졌으며 다실린더 기관에서는 착화지연이 더 짧아지는 상반된 결과를 얻기도 하였지만, 에멀전 연료를 사용하였을 경우 매연과 질소산화물을 모두 감소시킬 수 있다고 보고하였다.

Dryer⁽¹⁾는 보조 연소 제어 기술로서 물을 실제 연소에 적용할 수 있는 기본적인 개념들을 정리하여 보고하면서 디젤엔진에서 물/연료 에멀전이 디젤 입자상물질을 제어하는 매우 효과적인 수단이라고 보고하였으며, Nazha 등⁽⁶⁾은 NOx와 매연 배출물의 감소를 위해 에멀전(water-in-liquid) 연료를 적용한 연구에서 분무 연소시에 그을음 생성물에 관한 연료내에 존재하는 물의 효과를 모델링을 통하여 제공하였다.

일본에서는 이미 물을 연소실 내로 직접 분사하여 제동연료소비율의 저하없이 NOx 배출물을 감소시킬 수 있다고 보고하였으며^(2,7,8,9), 우리나라

의 경우, 유화연료로서 물을 디젤기관에 적용하여 착화지연을 감소시키거나 NOx와 매연을 저감시킬 수 있다는 결과를 발표하기도 하였다.⁽¹⁰⁻¹²⁾

이처럼 유화연료를 통해서나 실린더 내로 직접 분사하는 방법을 통한 물의 도입에 관한 연구는 전 세계적으로 많이 수행되어 왔고,⁽¹³⁻¹⁵⁾ 그 결과로 실제 유럽에서는 일부 초대형 디젤 엔진에 워터제트 엔진이라는 이름으로, 일본에서는 물 분사장치를 고안하여 적용시키려는 노력을 기울이고 있는 실정이다.⁽¹⁶⁾

그러나 에멀전 연료의 경우 물과 연료의 혼합성에 많은 문제가 있으며, 실린더내로 직접분사할 경우에도 물 및 연료의 고압 분사장치 등을 비롯한 많은 엔진 변경이 불가피하다는 문제점을 갖고 있다. 하지만, 디젤기관에서 에멀전연료나 물을 실린더내로의 직접분사가 아닌 흡기관 내로 물을 직접 공급하였을 경우에는 에멀전 연료와 같은 문제점을 내포하지 않으면서 현재의 상용기관에도 적용하기 용이하다는 장점을 갖고 있다. 특히, 물을 흡기관내로 공급할 경우 물이 기관성능 및 배출가스 특성에 미치는 영향에 관한 연구가 거의 찾아볼 수 없는 상황에서 이에 대한 연구가 절실히 필요한 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 간접분사식 디젤기관에서 물을 흡기관 내로 공급할 경우 물의 도입에 따른 디젤기관의 연소특성을 고찰하고자 한다. 특히, 흡기관내로의 물공급으로 기관 성능 및 배출가스 특성에 미치는 영향을 경우만을 사용한 경우와 비교·분석하고자 하며, 추후 금속회화물을 이용한 수용액을 사용하기 위한 기초자료로 사용하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험에 사용된 기관은 수냉식, 4기통, 4행정, 간접분사식 디젤기관이며, 시동모터에 의해서 시동이 되고 기관부하와 기관 회전속도는 엔진 동력계에 의해 임의로 조정할 수 있도록 되었다. 실험에 사용된 기관과 실험장치들에 대한 주요 사양을 Table 1과 2에 각각 나타내었다.

2.2 실험 방법

실험은 디젤기관의 연료인 경유를 기존 방식에

Table 1 The specification of test engine

Item	Specification
Engine model	HD D4BA
Bore × stroke	91.1 × 95(mm)
Displacement	2476(cm ³)
Compression ratio	21
Combustion chamber type	Pre-combustion
Injection timing	Variable
Coolant temperature	80 ± 2 °C

Table 2 The specification of test apparatus

Item	Specification
Dynamometer	HE-130 (35kg · m/9000rpm, eddy current type)
Pressure pick-up	Kistler 6061B
Charge amplifier	Kistler 5011
Smoke meter	HBN-1500
Fuel metering gauge	3연구식(150cc)
Exhaust gas analyzer	Eurotron Gline MK

Table 3 The amount of water injected

Pw (MPa)	Engine speed(rpm)	Engine load(%)	Amount of water injected(mg)
0.2	1000	0, 25, 50, 75, 90, 100	10, 20, 30, 40
	1500		
	2000		
	2500		

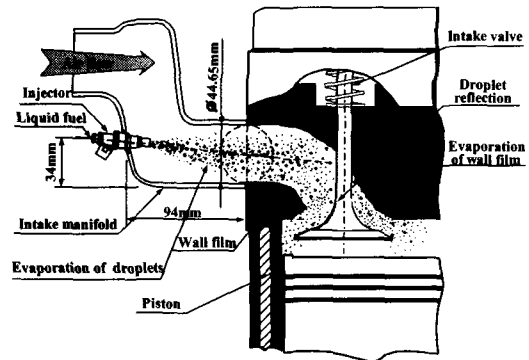


Fig. 2 Location of water injector

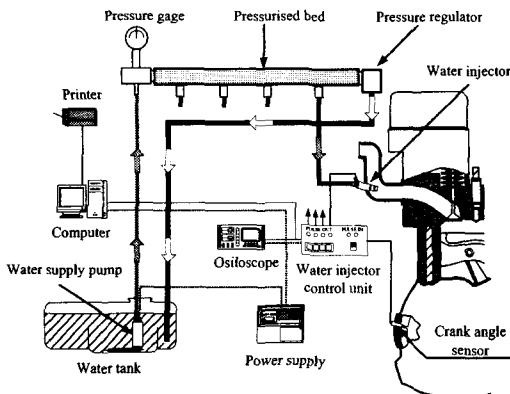


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

의해 사용함과 동시에 부수적으로 흡기관내로 물을 공급할 경우 기관성능 및 배출가스 특성을 고찰하기 위하여 인젝터는 2공타입의 가솔린인젝터를 사용하였으며, Table 3에 나타낸 바와 같이 각 기관 회전속도 및 부하에서 10mg, 20mg, 30mg, 40mg의 물을 0.2MPa의 분사압력(Pw)으로 일정하게 공급하였다. 실험에 사용된 물은 1차 증류수를 사용하였다. Fig. 1은 물 공급 시스템의 개략도를 나타낸 것으로, 물을 공급하기 위하여 엔코

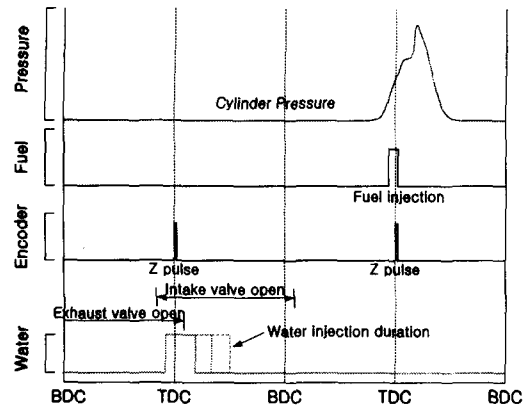


Fig. 3 Timing and duration of water injection

더에서 나오는 2종류(Z and A pulse)의 출력 신호를 이용하여 물 공급 시스템을 제어하였으며, 각각의 물 분사 인젝터는 독립적으로 제어가 가능하도록 하였다. Fig. 2는 물 공급 인젝터의 설치 위치를 나타낸 것으로 물이 실린더내로 효과적으로 공급되도록 그림과 같이 설계하였으며, Fig. 3은 물 분사 시기와 공급 각도를 나타낸 것으로, 물 분사시기는 흡기밸브가 열린후 10° 로 일정하게 하였으며 물의 공급량에 따라 분사각도를 증가시켜 물의 양을 조절하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 기관 회전속도 변화에 대한 물 분사 효과

Fig. 4는 전부하(100% load)시 기관 회전속도 변화에 따른 제동 토크, 출력, 제동연료소비율, 및 소음의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 전회전속도 범위에 걸쳐 토크 및 출력은 물의 공급량이 증가함에 따라 감소하였으며, 제동연료 소비율은 물의 공급량이 증가함에 따라 약간 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 물의 공급으로 압축과정시 물의 기화열로 인한 초기 착화 온도의 감소와 이에 따른 폭발압력의 감소 때문으로 생각된다.

Fig. 5는 Fig. 4와 같은 실험 조건의 경우 실린더내의 압력과 압력상승률을 나타낸 것이다. 물의 공급량이 증가함에 따라 실린더내 최고압력이 감소함을 알 수 있으며, 압력상승률에서도 압력상승 기온기가 늦게 시작됨을 알 수 있어 착화시

기가 지각되었음을 알 수 있다. 이는 물의 공급으로 실린더내의 온도 상승이 억제됨에 따라 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 6은 Fig. 4와 같은 실험 조건의 경우 배출

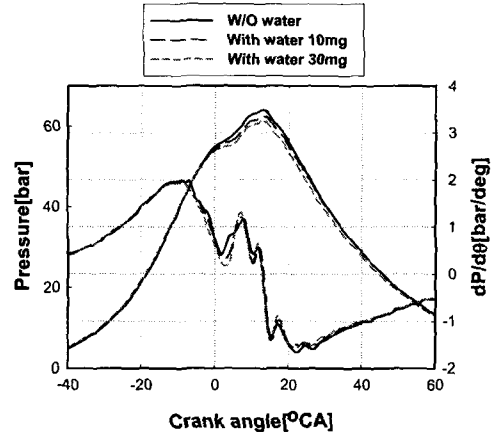


Fig. 5 Pressure and $dP/d\theta$ at engine speed 2500rpm and load 100%

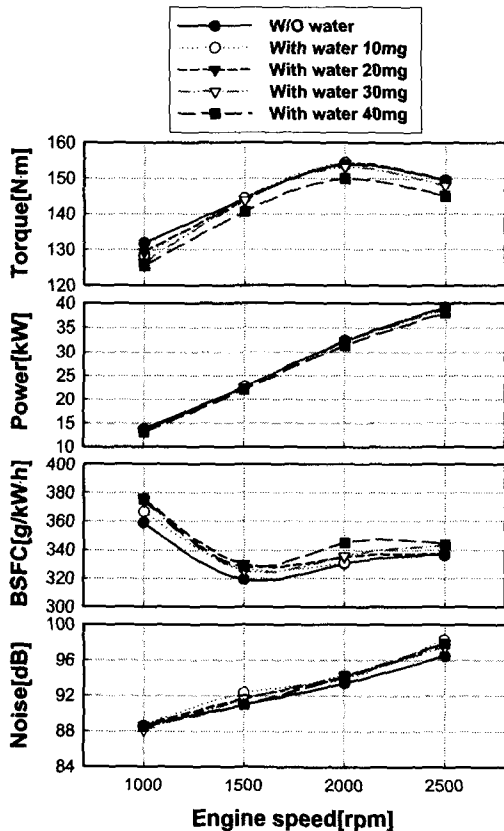


Fig. 4 Engine performance versus engine speed at engine load 100%

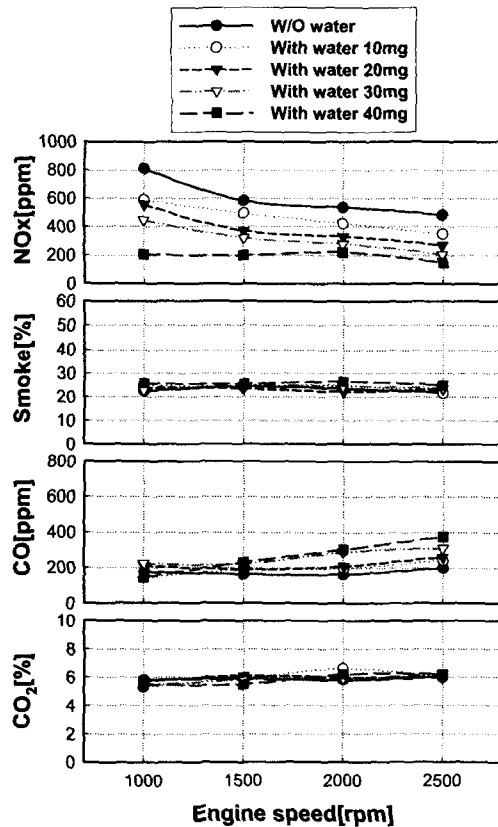


Fig. 6 Exhaust emissions versus engine speed at engine load 100%

가스 특성을 나타낸 것이다. NOx의 경우 기관 회전속도가 증가할수록 전체적으로 감소하는 경향을 나타냈으며, 물의 공급량이 증가함에 따라 전 회전속도에 있어서 큰 폭의 감소 경향을 나타내었다. 이는 Fig. 5에서 살펴본 것처럼 물의 공급으로 실린더내의 온도가 감소하였기 때문으로 판단된다. 매연과 CO의 경우 물의 공급량이 증가함에 따라 약간 증가하는 NOx와의 상반관계 경향을 나타내었으며, CO₂는 특별한 경향을 나타내지 않았다.

3.2 부하변화에 대한 물 분사 효과

Fig. 7은 기관 회전속도 2000rpm에서 기관부하 변화에 따른 배출가스 특성 및 제동연료소비율을 나타낸 것이다. NOx의 경우 기관부하가 증가함에 따라 증가하다가 중부하를 기점으로 감소하는 경향을 볼 수 있으며, 물의 공급량이 증가함에 따라 NOx의 배출량이 50-67% 감소함을 알 수 있고, 중부하에서 저감 효과가 크게 나타났다.

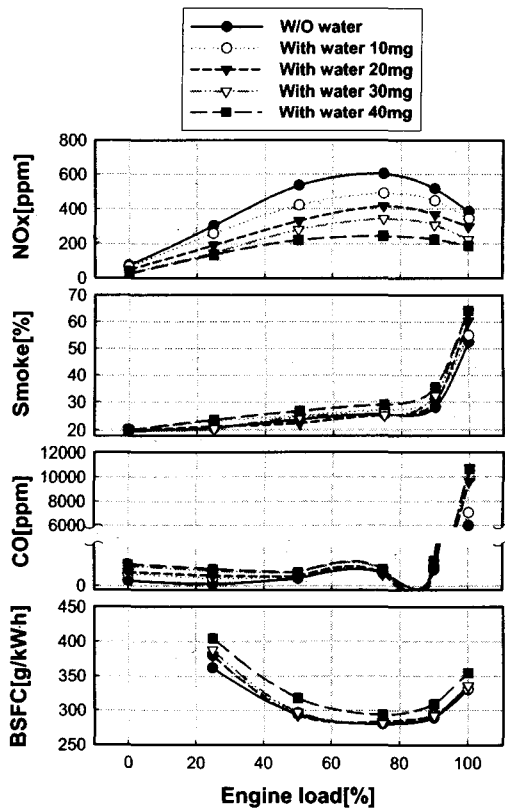


Fig. 7 Exhaust emissions and BSFC versus engine load at engine speed 2000rpm

매연과 CO의 경우 기관부하가 증가함에 따라 배출량도 함께 증가하였으며 물의 공급량이 증가함에 따라 약간 증가함을 알 수 있다. 제동연료 소비율의 경우 기관부하가 변화함에 따라 모든 연료에 있어서 전형적인 특성을 보이지만, 물의 공급량이 증가함에 따라 전 부하에서 물을 사용하지 않은 경우보다 증가함을 알 수 있다.

Fig. 8은 여러 기관 회전속도에서 부하변화에 따라 NOx의 배출특성을 물을 사용하지 않는 경우(NOx*)와 물을 사용한 경우(NOx°)의 비로서 나타낸 것이다. 물을 공급할 경우 모든 회전속도와 부하에서 NOx가 저감함을 알 수 있으며, 물의 공급량과 기관 회전속도가 증가함에 따라 NOx의 저감폭도 커짐을 알 수 있다. 또한, 고부하인 경우보다는 무부하 및 저부하인 경우에 저감비가 크게 나타났다. 이는 물을 흡기관 내로 공급할 경우 실린더내의 온도 상승을 억제하였기 때문으로 생각된다.

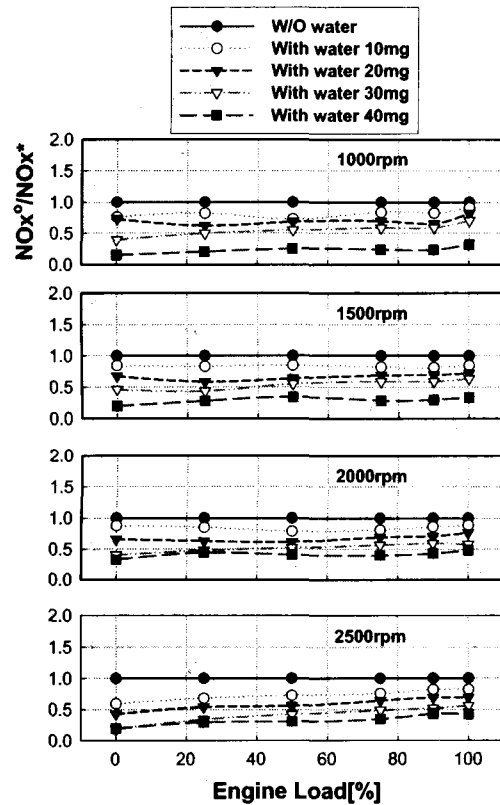


Fig. 8 Variation of NOx versus engine load at various engine speed

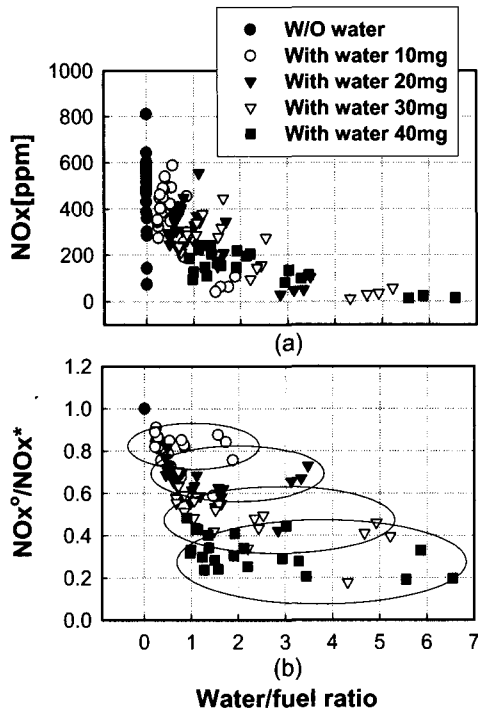


Fig. 9 Variation of NOx versus water/fuel ratio

3.3 물 공급량의 효과

Fig. 9는 연료에 대한 물의 비율에 따른 NOx의 배출 특성을 절대적인 양(그림 a)과 물을 분사하지 않은 경우에 대한 상대적인 비율(그림 b)로 나타낸 것이다. Fig. 9의 그림 (a)를 살펴보면, 물/연료의 비율이 증가함에 따라 NOx의 최대 배출값이 거의 지수함수적으로 감소함을 알 수 있으며, 물을 공급하지 않았을 경우보다 50-80%까지 큰 폭의 저감특성을 나타내었다. 그러나, Fig. 9의 (b)에서 살펴보면, 물을 분사하지 않은 경우에 대한 상대적인 NOx의 배출 특성은 물/연료의 비율 증가보다 물의 절대적인 양의 증가에 따라 더 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 기관 회전속도 2000rpm에서 고부하인 경우 NOx에 대한 매연과 제동연료소비율의 상관관계를 나타낸 것이다. 물의 공급량이 증가함에 따라 NOx와 매연의 상관관계가 개선되어짐을 알 수 있으며, 제동연료소비율도 또한 개선되어짐을 알 수 있어, 매연과 연료소비율의 큰 악화없이 NOx를 개선할 수 있음을 알 수 있다.

따라서, 최근 매연 저감을 위하여 각종 합산소 연료가 많이 사용되고 있으나, NOx의 증가가 큰

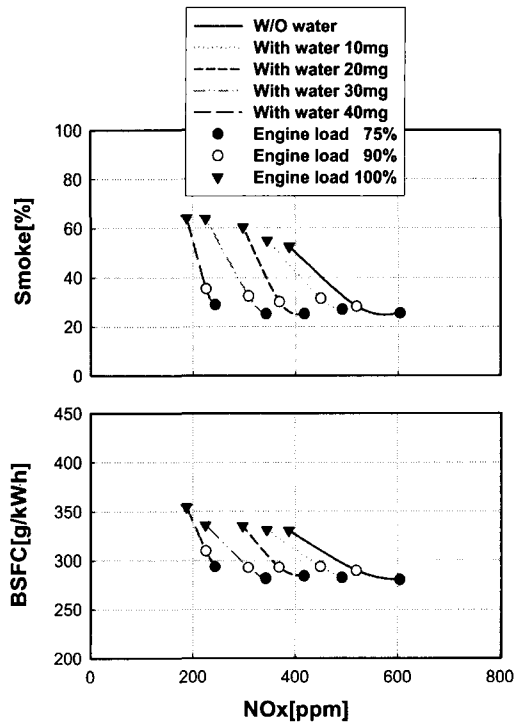


Fig. 10 Trade-off relationships between Smoke & NOx and BSFC & NOx

단점으로 지적되고 있어 본 방법과 병행하여 사용할 경우 매연과 NOx를 동시에 저감시킬 수 있는 커다란 효과가 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

디젤기관의 NOx 저감을 위해 흡기관 내로 물을 공급할 경우 기관 성능 및 배출가스 특성에 미치는 영향을 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 흡기관내로 물을 공급할 경우 토크 및 출력은 물의 공급량이 증가할수록 감소하였으며, 제동연료소비율 및 소음은 증가함을 알 수 있었다.
- (2) 흡기관내로 물을 공급할 경우 물의 공급량이 증가함에 따라 매연 및 CO가 약간 증가하였으나, NOx가 물의 기화잠열에 의한 연소실내의 온도 저하로 80%까지 큰 폭으로 감소함을 알 수 있었다.
- (3) 흡기관내로의 물 분사로 인한 NOx의 저감 특성은 물/연료의 비율보다는 물의 절대적인 양에 더 큰 영향을 받음을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Dryer, F. L., 1977, "Water Addition to Practical Combustion Systems-Concepts and Applications," *16th Symp.(Int.) on Combustion*, pp. 279~295.
- (2) Ishida, M., Ueki, H., and Sakeguchi, D., 1997, "Prediction of NOx Reduction Rate Due to Port Water Injection in a DI Diesel Engine," SAE Paper, 972961.
- (3) Jacques, M. T., Jordan, J. B., Williams, A. and Hadley-coates, L., 1977, "The Combustion of Water-in-Oil Emulsions and the Influence of Asphaltene Content," *16th Symp.(Int.) on Combustion*, pp. 307~319.
- (4) G. Greeves, I. M. Khan, and G. Onion, 1977, "Effects of Water Introduction on Diesel Engine Combustion and Emissions," *16th Symp.(Int.) on Combustion*, pp. 321~336.
- (5) Crookes, R. J., Kiannejad, F. and Nazha, M. A. A., 1997, "Systematic Assessment of Combustion Characteristics of Biofuels and Emulsions with Water for Use as Diesel Engine Fuels," *Energy Conversion and Management*, Vol. 38, No. 15-17, pp. 1785~1795.
- (6) Nazha, M. A. A., Rajakaruna, H. and Crookes, R. J., 1998, "Soot and Gaseous Species Formation in a Water-in-Liquid Fuel Emulsion Spray-A Mathematical Approach," *Energy Conversion and Management*, Vol. 39, No. 16-18, pp. 1981~1989.
- (7) Miyamoto, N., Ogawa, H., Nurun, N. M., Obata, K. and Arima, T., 1998, "Smokeless, Low NOx, High Thermal Efficiency, and Low Noise Diesel Combustion with Oxygenated Agents as Main Fuel," SAE Paper 980506.
- (8) Murayama, T., Chikahisa, T. and Fujiwara, Y., 1998, "Diesel Engine Smoke Reduction by Controlling Early Thermal Cracking Process and Activation Later Stage Combustion," *Trans. of the ASME*, Vol. 120, pp. 648~656.
- (9) Miyamoto, N., Ogawa, H., and Wang, J., 1995, "Significant NOx Reductions with Direct Water Injection into the Sub-Chamber of an IDI Diesel Engine," SAE Paper, 950609.
- (10) Cho, J.H., Kim, H.S. and Park J.Y., 1991, "A Study on Combustion and Exhaust Emission of Diesel Engine - For Gas Oil-Water-Methahnol Emulsified Fuel," *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 13, No. 5, pp. 81~88.
- (11) Jurng, J.S. and Shin, H.D., 1989, "Combustion Characteristics of Water-in-Oil Emulsion Droplets," *Journal of Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 11, No. 2, pp. 34~40.
- (12) Psota, M. A., Easley, W. L., Fort, T. H. and Mellor, A. M., 1997, "Water Injection Effects on NOx Emissions for Engines Utilizing Diffusion Flame Combustion," SAE Paper, 971657.
- (13) Crookes, R. J., Nazha, M. A., Janota, M. S., and Slorey, T., 1980, "Investigation into the Combustion of Water/Diesel Fuel Emulsions," SAE Paper, 800094.
- (14) Storment, J. O. and Coon, C. W., 1978, "Single-cylinder Diesel Engine Tests with Unstabilized Water-in-Fuel Emulsions," Department of Transpotation, US Coastguard, Report No. CG-D-13-78.
- (15) Lee, M., 2000, CARPOS, Vol. 2, pp. 182~185.
- (16) Ryu, K.H., Yun, Y.J. and Oh, Y.T., 2002, "NOx Reduction by the Water Injection Through the Intake Port in IDI Diesel Engine," *Proceedings of the KSME 2002 Spring Annual Meeting*, pp. 2043~2048.
- (17) Ryu, K.H., Yun, Y.J. and Oh, Y.T., 2002, "An Experimental Study on the Water Induction Through the Intake Port for Reducing NOx Emission in IDI Diesel Engine," *Proceedings of the KSAE 2002 Spring Annual Meeting*, pp. 361~366.