

## 물혼합 연료 및 EGR의 조합에 의한 디젤기관의 질소산화물과 매연미립자 동시저감 기술에 관한 연구

박 권 하\*, 박 태 인\*, 김 기 형\*\*

Technology for Reducing NOx and Soot Particulate using  
EGR with Water Emulsified Fuel in Diesel Engines

K. Park, T. I. Park, K. H. Kim

**Key words** : Emulsified fuel(유화유), EGR(배기재순환), Diesel engine(디젤 기관),  
Emission(배출물), Micro-explosion(미폭발)

### Abstract

Many research works have been carried out to investigate the factors governing the performance of diesel engine. The area of the study has been focused on reducing both of NOx and smoke because of many difficulties to reduce them simultaneously in diesel engines. One of the efforts is an application of EGR technology to reduce NOx emission, which is very effective, but increases other emissions and makes fuel economy worse.

In order to solve the problem, EGR is employed with water emulsified fuel and tested in this paper. Emulsified fuel is produced by centrifugal mixer and the amount of water is controlled by water injector and pulse generator, and EGR rate is controlled with 6-step control valve. The chamber pressure, fuel consumption and emissions are measured with various values of both EGR and water mixing rate. The results show that NOx emission is reduced much rather and smoke is also reduced simultaneously.

### 1. 서 론

열효율 및 내구성이 우수한 디젤기관은 선박, 산업 및 자동차에 그 적용이 확대되고 있지만, 환경 오염에 대한 세계적인 관심과 규제가 강화되면서 대체 연료의 사용이나 기관의 개선이 심각하게 는

의되고 있다. 혼합기를 흡입하여 연소하는 가솔린 기관과 달리 고온고압의 압축공기에 연료를 분사함으로써 연소가 진행되는 디젤기관에서는, 연소가 불균일한 혼합기조건하에서 행해진다. 분무된 연료가 주위 공기와 충분히 섞이지 못한 상태에서 연소가 시작되기 때문에 분무연료의 중심부에는

\* 한국기계연구원 (원고접수일 : 97년 2월)

\*\* 학생회원, 대전산업대학교

아직 공기가 도달하지 못하게 됨으로 미연가스의 발생과 함께 연료소모율의 증가를 가져온다. 불균 일한 연소는 국부적인 온도상승을 동반하게 되는데 이는 상대적으로 높은 연소실 온도특성과 함께 NOx의 배출을 증가시키는 요인이 되고 있다. 이러한 디젤기관의 연소현상을 개선하기 위하여 우선 연소실내의 연료분포를 균일하게 하여야 하며, 이를 실현하기 위하여 분사기를 개선하거나 연소실형상을 개선하여 분무액적의 크기를 작게 하고 연소실내부에 균등하게 분포시키는 연구<sup>1)</sup> 등이 진행되고 있지만 기술의 신뢰성, 내구성 등의 문제로 실기관에 적용되지 못하고 있다.

NOx를 줄이기 위한 대책으로는 EGR기술이 널리 이용되고 있다. 이 기술은 NOx를 가장 효과적으로 줄일 수 있지만, 고부하영역에서 급격히 증가되는 매연미립자에 의한 흡기계통 및 연소실내의 퇴적, 윤활유의 열화 등 많은 문제를 동반하게 됨으로 적용이 부진한 상태이다. 특히 고부하영역의 운전을 주로 하는 대형기관에서는 채용자체가 곤란한 단계이다.

수분효과를 이용한 기술이 근래 들어 많이 연구되고 있는데, 수분을 포함한 공기의 흡입, 물분사 및 혼합연료의 분사기술로서 구분된다. 수분을 포함한 흡기공급과 물분사기술은 수분의 공급에 의한 연소실내의 불활성가스증가효과와 잠열에 의한 연소실내의 온도 저감을 가져오기 때문에 NOx 저감에 매우 효과적이지만 역시 배기재순환기술에서와 같이 미립자의 증가와 연소효율의 저감을 가져오는 문제를 보여준다.

한편 물혼합연료인 경우에는 기름내부에 물을 포함한 액적들을 분사하게 되며, 따라서 미폭발효과와 더불어 연소실온도상승을 억제하기 때문에 질소산화물의 저감과 함께 매연의 감소효과를 보여준다. 미폭발효과에 대한 연구로서, Lebedev<sup>2)</sup>는 물/연료 혼합액적의 연소특성을 관찰하였다. 순수한 연료만을 연소한 경우와 물30%를 혼합한 경우를 비교하였는데, 순수연료의 경우에는 액적표면에서의 열전달과 함께 연료가 증발하면서 연소되어 액적표면이 대칭적으로 서서히 작아짐을 알 수 있으며 연소종료후에도 상당부분 액적의 크기가 유지되었다. 한편 물/연료 유화의 경우는 매우 다

른 현상을 보여주는 데, 초기액적의 표면에서는 연소현상을 볼 수 없으며 열전달에 의해 액적이 가열되면서 급속히 커지게 된다. 이는 내부 물액적의 비등에 의한 것으로, 연료의 인장력이 한계에 달하면 폭발과 함께 많은 연료조각들이 빠른 속도(0.6~1.2 m/s)로 멀리(6~10 mm) 퍼져 나간다. 연소가 종료되었을 때 액적의 크기가 매우 작아짐을 알 수 있었다. 유사한 연구들도 이러한 현상을 보고하고 있다. 결과적으로 유화연료에서는 폭발현상과 함께 액적의 크기가 매우 작아지고 주위공기와 섞이면서 빠른 속도로 증발/연소된다.

디젤기관에 혼합연료를 적용하는 연구는 70년대 이후 많이 연구되고 있다. Valdmanis 와 Wulfhorst<sup>3)</sup>, Cook 와 Law<sup>4)</sup>는 단기통 디젤기관에 유화연료를 적용하였는데, 성능은 물의 혼합에 거의 영향을 받지 않으며 물의 양이 10~20%일 때 매연이 많이 저감되었으며 그 이상이 되면 저감율이 줄어드는 것을 보고하고 있다. Murayama 등<sup>5)</sup>은 파이프내의 혼합장치를 이용하여 0~80%까지 물을 혼합하여 선박용 디젤기관에 적용하였다. 혼합량의 증가와 함께 CO의 감소와 연료소모율(max 16%), NOx(max 60%), smoke(max 48%)가 크게 감소하였지만 HC는 62%까지 증가하였다. 부식은 JIS절차에 따른 시험결과 큰 문제가 없었으며 현재의 일반적인 분무시스템의 사용에도 문제가 없었다. 다른 연구에서도 유사한 결과들을 보여주고 있지만 실험조건에 따라 CO의 증가<sup>6)</sup>를 보고하기도 한다. 보고된 내용을 종합하면, 유화연료는 기관부하의 크기에 관계없이 매연미립자저감에 매우 효과적이다. 이는 확산연소기간중 물폭발현상과 함께 활발히 진행되는 연소 때문으로 생각된다. NOx는 연소지연시간의 증가에도 불구하고 매우 감소한다. 하지만 부하의 영향을 크게 받으며 부하가 증가하게 되면 그 효과는 감소하며, 저부하영역에서 많은 물을 혼합하면 CO, HC의 증가와 함께 연비가 급격히 악화된다.

본 연구에서는 디젤기관에 물혼합연료를 사용한 EGR기술을 적용하고, 연소 및 배기특성을 분석하고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 배기재순환 및 물혼합을 위한 실험장치를 나타낸다. 이 실험장치는 실험기관과 동력계, 물 연료혼합장치, 연소해석장치, 배기분석기, 매연 측정기 및 계측기 등으로 구성된다.

실험에 사용된 기관은 국내에서 생산되는 선박용 기관으로 수냉 4기통 간접분사식의 4행정 디젤

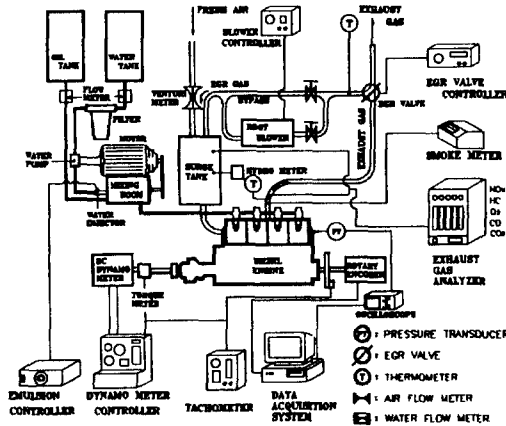


Fig. 1 Experimental apparatus

Table 1 Specification of test engine

Items	Specification
Type	IDI
Power/Eng. speed	29.4 kW/1800 rpm
Cylinder/Cycle	4/4
Displacement	3260 cc
Bore × Stroke	96 mm × 115 mm
Injection timing	BTDC 15.3°
Compression ratio	20 : 1

기관이며 주요 제원은 Table 1과 같다. 배기재순환장치는 EGR밸브를 시스템에 설치하여 배기순환가스와 신기의 비율을 조절하고, 재순환가스의 흐름을 일정하게 조절하기 위해 루트 블로워가 설치되고 기관의 흡기측에 서지탱크를 두어 신기와 순환가스의 혼합이 잘되도록 한다. 물혼합장치는 스위스의 HDC시스템을 본 실험에 적합하도록 개조하여 사용하였다. 모터를 이용하여 원심펌프를 구동하며 펌프의 접선방향으로 연료가 연속적으로 공급되고 펌프의 중심으로 물이 공급된다. 물의 양

을 적절히 조절하기 위하여 솔레노이드식 분사기를 사용하며, 펄스발생기에서 분사기작동시간을 제어함으로써 물혼합율을 조절할 수 있도록 하였다.

기관의 출력은 직류형 전기동력계에 의해 측정한다. 회전수는 크랭크축 타이밍 검출기로부터의 신호에 의해 계측했다. 흡입공기량은 탱크 오리피스로 계측되고 기관 및 기타 각부온도는 열전대 및 다점디지털 온도계에 의해 각각 측정했다. 매연미립자 농도는 보쉬식 스모크미터에 의해 측정했고 그 외의 NOx, CO, O2, CO2 등 배기배출물은 배기 분석기(Horiba)에 의해 측정했다. 실린더내의 연소압력을 계측하기 위해서 Kistler 609A 압력변환기(고유진동수 100kHz)를 연소실에 직접설치하여 검출하도록하고있다. 압력변환기로부터의 신호는 전압증폭기에 의해서 증폭되고, PC로 받아들여진다.

본 실험에서는 회전수 1600 RPM에서 기관의 부하를 25%, 50%, 75%, 100% 의 각 조건에서 EGR율을 각각 6단계로 변환하고 물혼합율을 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%로 변화하면서 실험을 수행하였다. EGR율은 밸브의 개도를 단계별로 조정, 즉 완전히 닫힌 상태(EGR 0)에서 단계별로 동일하게 개도량이 증가되며 마지막 단계(EGR 5)에서는 완전히 열린 상태가 되도록 변환되었으며, 물혼합율은 펄스의 시기를 조절하여 변환하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3. 1. 착화시기와 연소특성

Fig. 2는 부하 50%일 때 EGR적용율에 따른 연소실내의 압력변화를 보여준다.

연소실내의 압력변화는 모든 부하영역에서 유사한 경향을 보여주었으며 EGR적용율변화에 따른 착화시기와 연소실압력변화가 거의 없었다.

Fig. 3, 4, 5는 각각 부하 25, 50, 75%일 때 물혼합율에 따른 연소실내의 압력변화를 보여준다. 물혼합연료는 연료만으로 운전되는 기관과 같은 출력을 갖기 위해서는 물혼합량만큼 더 많은 혼합연료의 공급이 필요하다. 따라서 연료밀도 및 분사량 증가에 의한 분무연료의 운동량증가로 주위공기

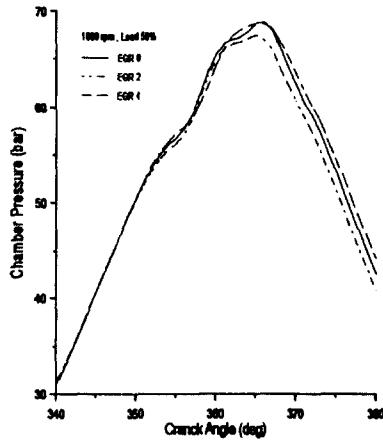


Fig. 2 Effect of EGR on Chamber pressure

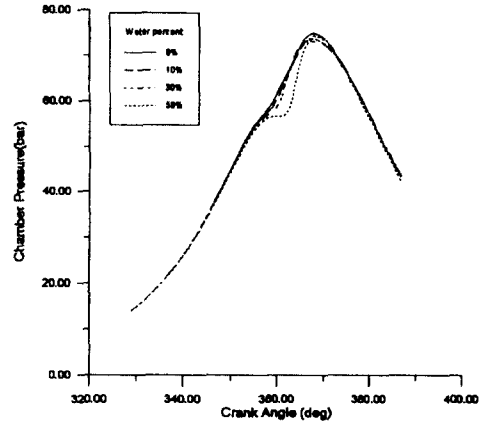


Fig. 5 Chamber pressure at load 75%

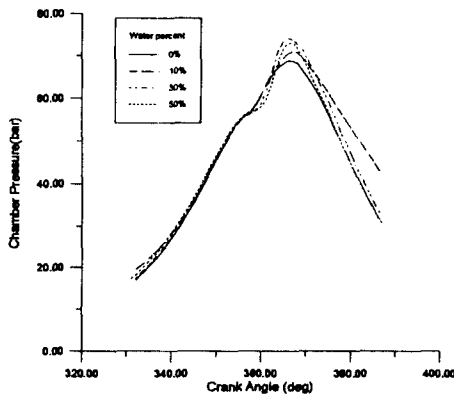


Fig. 3 Chamber pressure at load 25%

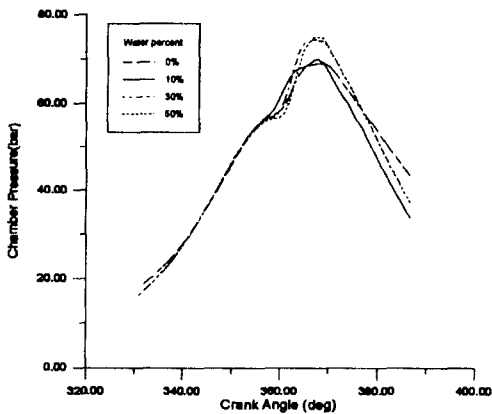


Fig. 4 Chamber pressure at load 50%

유동을 활성화시킨다. 또한 액적의 폭발현상에 의한 연소의 활성화에 의하여 연소특성을 향상시키며 연소기간을 단축한다. 한편으로는 물이 증발하면서 EGR에 의한 연소실온도저감과 같은 효과를 나타낸다.

부하 25%인 경우 물혼합량이 증가하면서 착화시기가 비례적으로 늦어짐을 보여 주며, 압력도 비례하여 급격하게 상승함을 알 수 있다. 하지만 최고 압력은 비례하지 않으며 물혼합량이 30%일 때 최고치를 나타내며 50%가 되면 오히려 감소함을 알 수 있다. 보통의 연소현상에서는 착화지연기간이 길어지면 예혼합연료량이 증가하게 되어 예혼합연소와 함께 급격한 압력상승과 최고압력의 증가를 보여주지만, 물을 첨가하게 되면 액적폭발효과, 즉 액적의 2차분쇄, 연료확산과 난류강도 증가에 의한 연소 활성화의 정도와 분사량증가에 의한 연소실체적대비 연료의 과대공급, 분무퇴적, 물의 연소실 온도저감 효과 등에 의한 연소억제의 정도에 의하여 연소실 압력 상승이 변화하게 된다.

부하 25%인 경우는 물혼합량 30%인 경우에 액적폭발에 의한 효과가 가장 컸던 것으로 생각된다. 부하 50%인 경우에도 25%인 경우와 유사함을 보여 준다. 물혼합량 증가에 따라 착화지연기간이 증가하며 압력상승이 급격해진다. 부하 25%에서는 물혼합량이 50%인 경우가 30%인 경우보다 최고압력이 낮아지지만 부하 50%에서는 다소 높아지는 것을 알 수 있었다. 이는 50% 부하 조건에서

는 물첨가량이 증가하여도 액적폭발효과를 충분히 얻을 수 있도록 연소실온도가 유지됨을 말하여 준다.

부하가 75%가 되면 저부하인 경우와 같이 연소 지연기간은 비례적으로 늘어나지만 최대연소실압력은 더 이상 증가하지 않는다. 이는 본 연구에 적용한 연소실조건이 더 이상 물혼합연료를 사용하기에 적합하지 못함을 보여준 것이며 물혼합연료를 사용하기 위해서는 분사시기 등을 적절히 조절할 필요가 있음을 말해준다. 부하가 증가되면 그만큼 더 많은 연료를 고압분사하기 때문에 분사연료가 연소실벽면에 퇴적되는 것을 피할 수 없게 되며, 더욱이 물을 첨가하는 경우에는 그만큼 연료를 추가로 분사하여야하기 때문에 퇴적현상이 심화되며 연소특성에 좋지 못한 영향을 미친다. 물론 충분히 큰 연소실에서는 주위공기의 활발한 유동 효과에 의하여 연소를 활성화할 것이다.

Fig. 6, 7은 각각 EGR율이 0, 15%이때 부하 100%에서 물혼합량에 따른 열발생 선도를 나타낸다. 연소실압력변화에서 설명한 것처럼 물혼합량이 증가하면서 착화시기가 지연됨을 보여주며 더욱 급격한 열발생을 보여준다. 이는 예혼합증발연료의 증가에 의한 영향과 액적폭발에 의한 연소활성화의 영향으로 보여진다. EGR율이 증가하면서 물혼합이 열발생에 미치는 영향이 현저히 감소하는 데, 이는 불활성가스의 증가로 연료의 확산

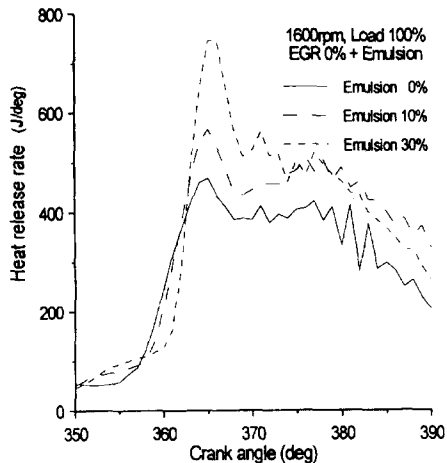


Fig. 6 Heat release rate with varying emulsion at zero EGR

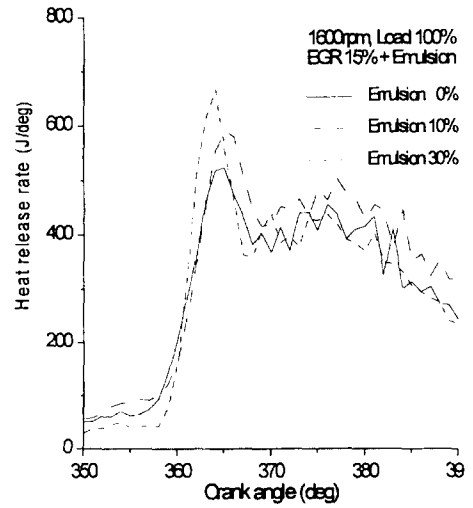


그림 7 Heat release rate with varying emulsion at EGR 15%

에도 불구하고 급기산소농도가 감소하면서 충분한 연소가 이루어지지 못했음을 말해준다.

### 3. 2. 연료소비율

Fig. 8은 기관의 부하가 75%일 때의 연료소비율을 물혼합 0%, EGR 0% 일때를 기준값 1로 하여 나타낸 것이다. 전 부하영역에서 EGR율의 영향은 거의 없는 것을 보여 주고 있다. 물혼합의 영향도 크지는 않지만 약 3%정도의 감소를 나타낸다.

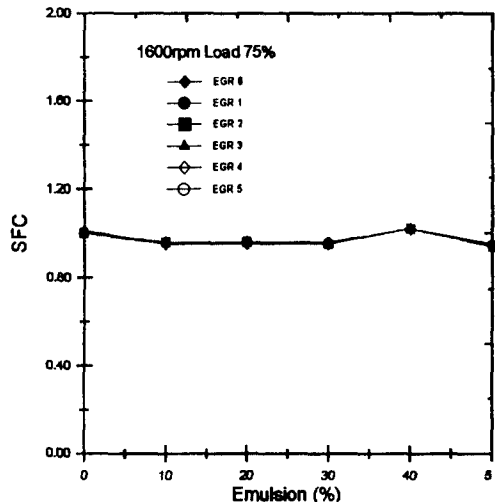


Fig. 8 Fuel consumption at load 75%

### 3. 3. 일산화탄소

Table 2와 Fig. 9는 CO배출물 특성에 대한 EGR 및 물혼합의 영향을 나타낸다. CO의 배출특성은 부하의 변화에 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 저부하(25, 50%)인 경우 EGR율의 증가에 큰 영향이 없지만 물첨가율이 증가하면 크게 증가되는 것을 알 수 있다. 고부하(75, 100%)인 경우는 반대로 EGR율이 증가하면 CO가 급격히 증가하며 물혼합량이 증가하면 감소하는 경향을 보인다. 따라서 EGR을 적용하면서 동시에 물혼합연료를 사용하는 경우 저부하에서는 CO의 급격한 증가를 고부하에서는 유사한 수준을 유지함을 알 수 있었다.

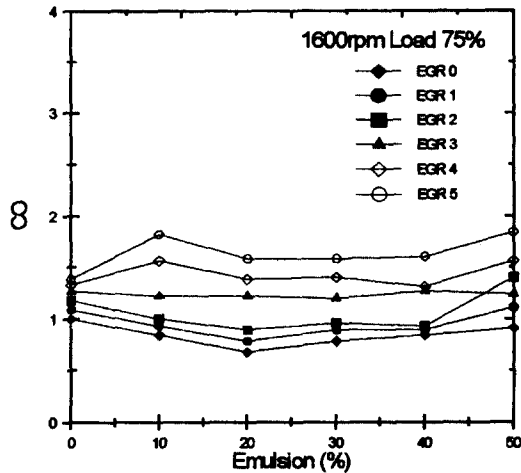


Fig. 9 CO emission at load 75%

Table 2 CO emission concentration (ppm)

Load(%)	25	50	75	100
EGR0%+Water0%	56	126	270	444
EGR5단계+Water0%	68	186	372	1134
EGR0%+Water50%	422	260	246	*222
EGR5단계+Water50%	786	452	498	*498

\* At Water 40%

### 3. 4. NOx 배출물의 특성

Fig. 10은 75% 부하에서의 질소산화물배출특성을 보여준다. NOx저감에 대한 EGR 및 물 혼합의 영향은 전부하영역에서 유사하다. EGR율이 30%에 이르면 NOx가 전 부하영역에서 약 50% 저감되

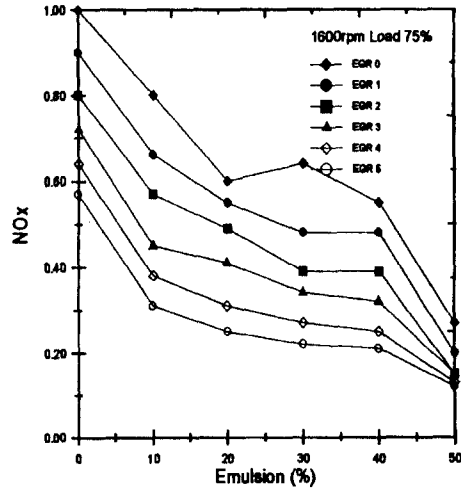


Fig. 10 NOx emissions at load 75%

며, 물혼합율이 50%가 되면 약 50%의 저감효과를 보여준다. 물과 동시에 EGR을 적용하면 그 효과가 더욱 커짐을 알 수 있었다. EGR기술은 연소실 내에 불활성가스를 증가시켜 연소를 억제함으로써 NOx의 저감을 가져오며, 물혼합연료기술 역시 디젤유의 분사와 함께 물을 공급함으로써 EGR과 유사한 이유로 NOx를 저감하게 된다. 더욱이 액적폭발과 주위공기유동의 활성화로 국부적인 온도상승에 의한 NOx발생요인을 제거하는 효과도 있다. 따라서 NOx저감을 최대의 목표로 하는 기관에서는 EGR과 동시에 물혼합연료를 사용하면 90%이상의 NOx 저감을 수행할 수 있다.

### 3. 5. 매연미립자 배출의 특성

Fig. 11은 75%부하에서 매연의 배출특성을 보여준다. EGR의 증가와 함께 매연농도가 2.5배까지 증가하며, 물을 혼합함에 따라서는 반대로 55% 감소되는 것을 알 수 있다. Table 3은 전 부하영역에서의 변화경향을 보여준다. 저부하 영역에서는 EGR에 크게 영향을 받지 않지만 부하가 증가되면 급격한 매연증가를 보여준다. 한편 물을 혼합하였을 경우 모든 영역에서 저감효과가 현저함을 알 수 있다. 물혼합과 함께 EGR을 적용하는 경우는 부하에 따라 약간의 차이는 있지만 0-50%의 감소 효과가 있다. EGR적용에 의한 스모크증가는 흡입 산소농도의 저하로 연소가 억제되면서 발생하며,

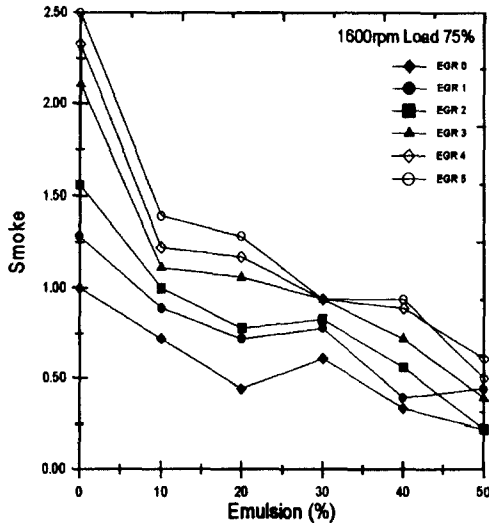


Fig. 11 Smoke emissions at load 75%

Table 3 Smoke emission concentration (%)

Load(%)	25	50	75	100
EGR0%+Water0%	6	10	18	26
EGR5단계+Water0%	9	14	45	64
EGR0%+Water50%	2	2	4	*6
EGR5단계+Water50%	2	9	9	*17

\* At Water 40%

부하가 높아지면 더욱 심화된다. 즉 분사량이 증가하면서 급격히 많은 양의 산소를 요구하지만 EGR에 의한 불활성가스 증가로 연소에 충분한 산소량을 공급하지 못함으로써 60% 이상의 스모크 농도를 나타낸다. 이는 EGR이 디젤기관에 널리 적용되고 있지 못하는 원인이다. 하지만 물혼합연료를 사용하면 액적의 폭발과 공기유동의 활성화로 액적 및 증발연료를 넓게 분산시킴으로써 연소기간 중에 연소실내의 산소를 충분히 이용하기 때문에 매연의 감소를 가져온다. 물혼합이 없는 보통연료를 사용하는 경우와 비교할 때 3-4배의 저감효과를 나타낸다. NOx의 최대저감을 위하여 EGR과 동시에 적용하는 경우에도 다소 스모크를 저감할 수 있었다.

### 3. 6. EGR과 유화연료의 NOx, 스모크 동시저감효과

앞에서 검토된 것과 같이 유화연료를 사용할 경

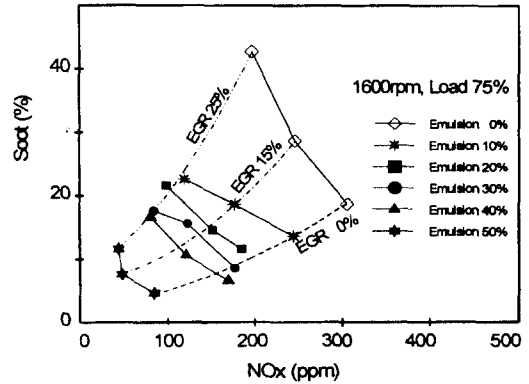


Fig.12 Nox and Soot emission

우에는 착화 지연, 액적 폭발 및 주위 공기 유동의 활성화에 의하여 연소가 활발히 진행되면서 매연의 저감을 보여준다. 동시에 물혼합에 의한 연소실 온도 저감과 액적 확산에 의한 국부적인 온도 상승 억제에 의하여 NOx 저감효과를 보여 준다.

EGR기술은 급기산소농도의 저하에 의한 NOx 저감효과를 가져오는 데, 물혼합연료와 동시 적용에 의하여 NOx를 더욱 저감할 수 있었으며 동시에 매연의 감소효과를 보여주었다. Fig. 12는 EGR과 물혼합율에 따른 질소산화물과 스모크 배출경향을 보여 준다. EGR과 물을 적절히 혼합함으로써 NOx를 전부하영역에서 60-90% 저감하면서 스모크를 30-70% 동시 저감할 수 있음을 보여 준다.

## 4. 결 론

최근 디젤기관의 NOx 및 매연미립자의 저감기술 개발이 많이 진행되고 있는데, 이들 배출물은 서로 상관관계에 있어 동시저감의 어려움을 안고 있다. 이 논문에서는 동시저감을 위한 기술로서 추진되고 있는 물혼합연료를 동반한 배기재순환시스템에 대하여 실험하였다.

배기재순환 및 혼합연료사용에 의한 디젤연소 특성을 정리하면 다음과 같다.

1) 연소실압력선도는 EGR만을 적용할 경우 큰 변화를 보이지 않지만, 물혼합연료를 적용한 경우에는 현저하게 변화되는 것을 알 수 있었다. 연료

내외에 존재하는 물액적들은 연소실내의 열을 흡수함으로써 연료의 발화시기를 지연시키며 이 기간동안 예혼합연료의 량을 증가시킴으로서 물의 폭발현상과 더불어 활발한 연소특성을 보여준다.

2) 연료소모율은 물혼합이나 EGR에 큰 영향을 받지 않는지만, 물혼합과 함께 3%정도 저감되었다.

3) CO의 배출농도는 부하에 크게 영향을 받는다. 저부하영역에서는 물혼합의 영향을, 고부하영역에서는 EGR의 영향을 많이 받음을 알 수 있었으며, EGR과 물혼합을 적절히 적용함으로써 CO 배출을 보통의 상태와 같은 수준에서 유지시킬 수 있었다.

4) NOx배출은 EGR만을 사용할 경우에는 50% 정도 감소효과를 얻을 수 있었지만, 물혼합과 함께 EGR을 적용하면 80% 이상의 저감효과를 기대할 수 있다.

5) 매연미립자 배출에 대한 EGR의 영향은 부하의 증가에 따라 더욱 악화됨을 보여주었으며, 100% 부하에서는 64%까지 증가되므로 이 영역에서는 적용이 어려움을 나타낸다. 하지만 물혼합연료를 동시에 적용하게 되면 부하에 따라 0 - 50%정도 매연미립자 저감효과를 얻을 수 있어 디젤기관에서의 EGR적용범위를 확대할 수 있을 것으로 사료된다.

이상에서 알 수 있는 것처럼, 물혼합연료를 동반한 EGR기술은 연료소모율 및 다른 배출물을 기본기관의 특성과 유사하게 유지하면서 NOx를 80% 이상 저감할 수 있는 기술로서, 질소산화물에 대한

대책이 시급한 디젤기관에서는 가장 효과적이며 바람직한 대책이라 생각된다.

### 참고문헌

- 1) Park, K., Wang, D.M. and Watkins, A.P. "A contribution to the design of a novel direct - injection diesel engine combustion system - analysis of pip size", Appl. Math. Modelling, vol. 17, pp. 114 - 124, 1993.
- 2) Lebedev, O.N., "Special characteristics of the combustion of water - fuel emulsions in diesels", Fizika Goreniya, vol. 14, no. 2, pp. 142 - 145, 1976.
- 3) Valdmanis, E. and Wulfhorst, B., "The effect of emulsified fuels and water introduction on diesel combustion", SAE 700736, 1970.
- 4) Cook, D.H. and Law, C.W., "A preliminary study on the utilisation of water - oil emulsion in diesel engines", Combustion Science and Technology, vol. 18, pp. 217 - 221, 1978.
- 5) Murayama, T., Morishima, Y., Tsukahara, M. and Miyamoto, N., "Experimental reduction of NOx, smoke, and BSFC in a diesel engine using uniquely produced water(0 - 80%) to fuel emulsion", SAE 78224, 1978.
- 6) Odaka, M., Koike, N. and Tsukamoto, Y., "Reduction effect of emulsion fuel on NOx and smoke emissions from direct injection diesel engines", 内燃機關合同 Symp., 17, pp. 14 - 16, 1992.