

## 물혼합연료의 분사특성과 디젤연소에 미치는 영향

### Injection characteristics of emulsified fuel and effect on diesel combustion

박 권 하\*

K. Park

#### ABSTRACT

Many technologies have been developed to improve diesel emissions or performance, however NOx/PM trade-off occurs because normal methods that reduce NOx emissions tend to increase PM emissions. On the other hand many measures used to control PM emissions tend to increase NOx emissions. Thus, simultaneously controlling both NOx and PM emissions has become a significant challenge for diesel engine manufacturers. As one of the measures, the technology using emulsified fuel has recently become important under the stringent emission regulations of diesel engines.

This paper investigates injection characteristics of emulsified fuel and its effect on a combustion performance in a diesel engine. In order to supply emulsified fuel into injection system a mixing unit produced by Harrier is used, then the fuel mixed with water is supplied into injector directly. The spray injected is investigated with a shadowgraph photo system and injection analyzing apparatus, then applied into a diesel engine.

Those results showed that the emulsified fuel has an effect on reducing both NOx and PM.

주요기술용어 : Emulsified Fuel(혼합연료), Diesel Injection(디젤분사), Diesel Engine(디젤기관)

#### 1. 서론

디젤엔진은 효율이 높은 내연기관으로서 유럽을 중심으로 사용이 급증하고 있다. 하지만 강화되고 있는 환경법규와 함께 NOx와 매연미립자의 저감이 필연적으로 요구되고 있다. 이

를 위하여 많은 연구들이 진행되고 있지만, 이들 배기가스는 서로 교환(trade-off)관계에 있기 때문에 대책에 어려움이 있다. NOx를 저감하기 위한 일반적인 기술, 즉 실린더내의 최고 온도를 낮게 하고 연소시간을 길게 하는 기술은 매연미립자를 증가시키게되며, 반대로 매연미립자를 저감하기 위한 대책은 질소산화물을 증가시키는 경향이 있다. EGR기술이나 물분사

\* 한국기계연구원 동력시스템연구부

기술<sup>(1)</sup>은 NOx의 저감에 매우 효과적이지만 매연미립자의 배출이 증가되고 연비가 악화되기 때문에 미립자의 배출이 급격히 증가하는 고부하 영역에서는 사용되지 못하고 있다.

물을 혼합한 연료를 사용하는 기술은 이러한 문제를 해결할 수 있는 기술로서 70년대 이후 많이 연구되고 있다. Valdmanis와 Wulfhorst<sup>(2)</sup>, Cook와 Law<sup>(3)</sup>는 단기통 디젤엔진에 혼합연료를 적용하였으며 스모크저감을 보고하고 있다. Murayama등<sup>(4)</sup>은 파이프내의 혼합장치를 이용하여 혼합연료를 제조하였으며 선박용 디젤기관에 적용하였다. 결과로서 질소산화물과 매연미립자 및 연비의 동시 저감을 보여준다. 다른 연구<sup>(5)</sup>에서도 유사한 결과들을 보고하고 있는데, 실험조건에 따라 CO나 연비의 증가를 보여 주기도 한다.

본 연구에서는 해리어사의 혼합장치를 사용하여 혼합연료를 제조하고 이를 분사실험장치에 공급함으로써 분사특성을 분석하고, 또한 디젤기관에 적용함으로써 연소특성을 분석한다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 분사 및 엔진실험을 위한 실험장치의 구성도이다. 물혼합장치는 믹서와 이의 구동을 위한 모터, 물의 양을 조절하기 위한 물 분사기 및 조절장치, 물과 오일의 소모량 측정

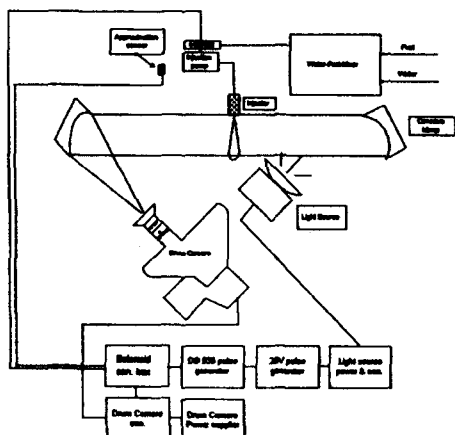


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

을 위한 유량계로 구성된다. 분사특성실험을 위한 연료분사장치는 연료펌프 구동부, 분사시스템, shadowgraphy 광학계, 고속드럼카메라로 구성된다. 연료펌프는 4기통 분배형펌프를 사용하였으며, 펌프의 회전속을 DC모터와 커플링하여 타코미터로 RPM을 측정, 변화시킬 수 있도록 하였다. 연료펌프의 4개의 플런저중 한개의 플런저만 이용하였으며 나머지는 연료탱크로 재순환하도록 하였다. shadowgraphy 광학계구성을 위하여, 순간발광에너지가 100J이며 발광시간을 11ms까지 제어할 수 있는 광원을 이용하였으며, 초점거리 1480mm인 오목거울을 2개 사용하여 평행광을 만들어 실험하였다. 분사와 광원을 동기 시키기 위하여 분사펌프 레버작동의 신호를 DG535 time delay board를 이용하여 적절히 지연함으로써 분사시기와 광원의 발광시기를 동기시켰다. 분사특성분석을 위하여 분사기를 개조하여 니들양정, 관로압력을 측정할 수 있도록 하였으며 제작된 분사율 측정 장치를 이용하여 분사율을 측정하였다. 관로압력은 AVL 5QP6002압력계이저를 분사기와 관로의 연결부위에 설치하여 측정하였고, 니들양정은 마그네틱코아와 검출기를 이용하여 측정하였다. 분사율측정장치는 측정관과 유도관 및 압력측정부위로 구성되며, 반사파 제거를 위해 1회 토출되는 연료의 양이 모두 오리피스를 통하여 유도관으로 흘러갈 수 있도록 하였으며, 압력파와 중첩되지 않도록 충분히 긴, 8m의 측정관과 6m의 유도관을 제작하여 연결하였다. 측정관과 유도관 사이에는 미터링밸브를 장착하여 개구부 면적을 조절함으로써

Table 1 Specification of test engine

항 목	사 양
형식	에연소실식
최대출력/회전수	29.4kW/1800rpm
기통수/사이클	4/4
배기량	3260cc
실린더경×행정	96×115mm
연료분사시기	BTDC 15.3°
압축비	20:1

압력신호에 나타나는 노이즈를 제거하였다. 압력측정은 보쉬<sup>(6)</sup>에서 사용한 스트레인게이지형 센서 대신에 키슬러사의 DN6004 압력센서로 동압을 측정함으로써 분사율을 계산하였다.

엔진실험장치는 실험기관과 동력계, 물혼합장치, 배기가스분석기, 매연측정기 및 기타 계측기로 구성되어 있다. 실험에 사용된 기관은 국내에서 생산된 4행정 디젤 박용기관으로 주요계원은 Table 1과 같다. 연소실내의 압력측정을 위하여 키슬러사의 609A 압력센서를 엔진헤드에 설치하였다.

본 실험은 엔진회전수 1600rpm에서 기관부하를 25%, 50%, 75%, 100%로 유지하고 물혼합 체적비율을 0%, 10%, 30%, 50%로 변화시키면서 실험하였다.

### 3. 분사계 특성

#### 3.1 분사특성

핀틀형 노즐을 사용하며, Fig. 2는 최대부하, 즉 분사펌프레버를 최대로 당긴상태에서 측정

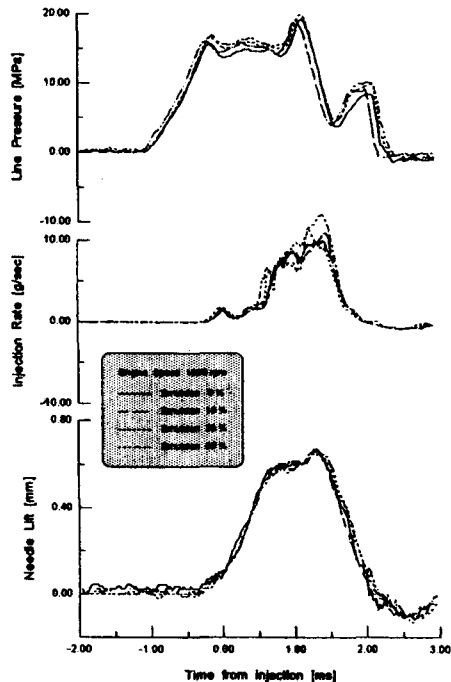


Fig. 2 Effect of water emulsion on injection characteristics

한 물혼합율에 따른 관로압력, 분사율 및 니들양정의 변화특성을 보여주며, Table 2는 분사시기를 나타낸다. 분사의 실제시작은 엔진설계에서 제시한 BTDC 15.3° 물 약3도 지난 후에 이루어진다. 물혼합율의 증가와 함께 분사가 미소하게 지연됨을 알 수 있다.

Table 2 Injection timing

Water perc. (%)	Needle-up time (BTDC deg.)	Inject.Duration (deg.)
0	11.71	27.26
10	11.90	26.69
30	11.33	25.92
50	10.94	26.30

분사시기의 지연과 함께 분사기간도 줄어든다. 이는 물혼합에 의한 점성의 증가에 의한 것으로 판단된다.

분사기간이 조금 적어진 것을 제외하면 니들양정의 변화는 물혼합율에 거의 관계없는 것을 알 수 있다. 관로압력은 물혼합에 의하여 증가됨을 알 수 있으며, 더불어 분사율도 많아짐을 알 수 있다.

#### 3.2 분무특성

Fig. 3-6은 각각 물혼합율 0%-50%에서의 분무의 형상을 보여준다. 물혼합량이 증가함에 따라 분무각이 작아짐을 알 수 있으며, 전한분무농도부위가 더욱 줄어드는 것을 보여 준다. 이는 물혼합율의 증가와 함께 분사압력이 증가되는 영향과 분무의 모멘텀이 증가되는 영향에 의하여 주위공기와의 상호작용이 상대적으로 줄어들기 때문에 진행은 멀리 되지만 분무의 확산은 줄어드는 것을 알 수 있다.

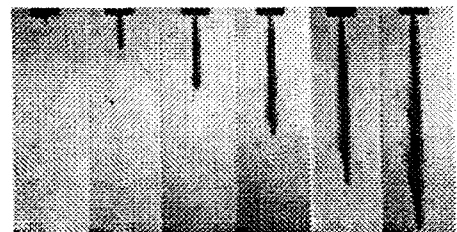


Fig. 3 Spray development without water

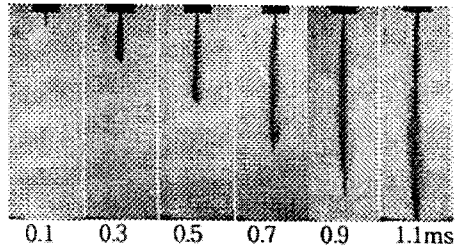


Fig. 4 Spray development with water 10%

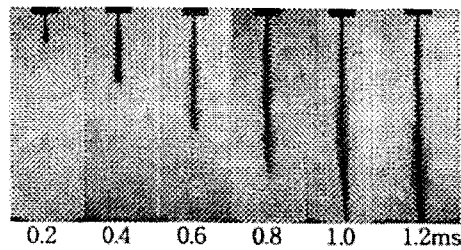


Fig. 5 Spray development with water 30%

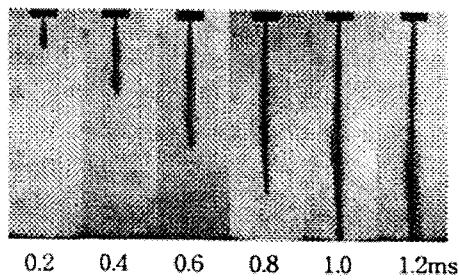
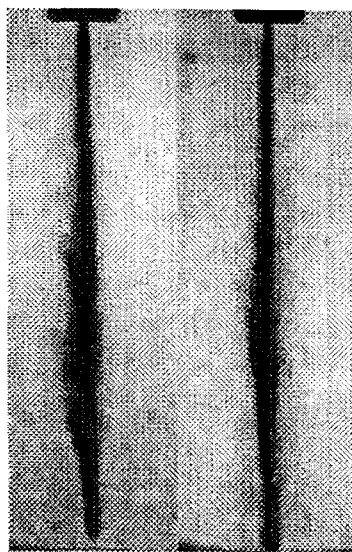


Fig. 6 Spray development with water 50%



Water 0% Water 50%  
Fig. 7 Comparison of spray shapes

Fig. 7은 분무의 형상을 보다 상세히 비교하기 위하여 물혼합율 0%와 50%에서 분무거리가 약 85mm일 때의 분무형상을 보여준다. 앞에서 설명한 것처럼 물이 혼합되지 않은 경우는 분무액적들이 전단면(shear layer)에서 주위공기와 활발히 상호작용 하면서 확산되는 것을 알 수 있다. 물이 50%혼합되면 밀도의 증가와 함께 분무가 앞으로만 신속히 진행됨을 보여준다.

Fig. 8은 물혼합율 및 시간에 따른 분무선단거리를 보여준다. 혼합연료의 분무선단거리는 물을 포함하지 않은 경우에 비하여 매우 증가되지만 물혼합율에 따라 비례적으로 증가되지는 않는다는 것을 알 수 있다.

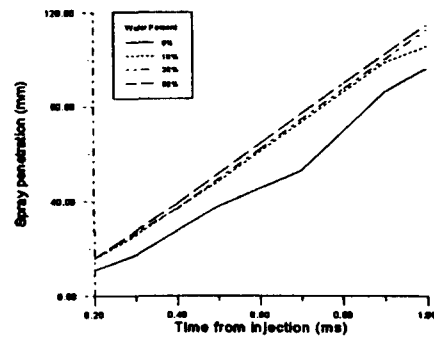


Fig. 8 Effect of emulsion on spray penetrations

이상에서 알 수 있는 것처럼 물혼합율에 따른 분무특성은 동일한 분사펌프레버 위치에서 분사량과 분사압력이 약간 증가되는 것을 제외하면 크게 변화되지 않음을 보여 주었다. 하지만 엔진에서 동일한 출력을 갖기 위해서는 물혼합량만큼 더 많은 연료를 분사하게 됨으로, 그만큼 연료의 운동량이 증가하며 주위공기의 활발한 유동을 동반할 것이다. 따라서 연소실공간이 충분한 경우 연소성능향상을 기대할 수 있을 것으로 생각되지만, 혼합연료를 사용하지 않는 일반연소실은 그 연료에 적합한 크기로 설계되었기 때문에 물혼합과 함께 증가되는 분사연료의 진행거리는 연료가 벽면에 퇴적되는 것을 피할 수 없게 되며, 결국 분무특성에만 의하여 불 때 연소에 좋지 못한 영향을 미칠

것으로 사료된다. 또한 최대래버위치에서 물을 혼합한 경우 분사량이 물을 포함하지 않은 경우 보다 약간 증가하는 정도이기 때문에, 물혼합연료를 사용하는 경우 동일한 엔진출력을 얻기 위하여는 물첨가량만큼의 연료공급이 더 필요하지만 물을 혼합한 경우에도 가능한 최대공급량이 물을 혼합하지 않은 경우와 유사하기 때문에 그만큼의 출력저하를 피할 수 없게 된다. 즉, 동일한 엔진출력을 갖기 위해서는 분사시스템을 개조하여 분사용량을 확대하여야만 한다.

4. 연소 및 배기특성

4.1 연소특성

Fig. 9,10,11은 각각 부하 25, 50, 75%일 때

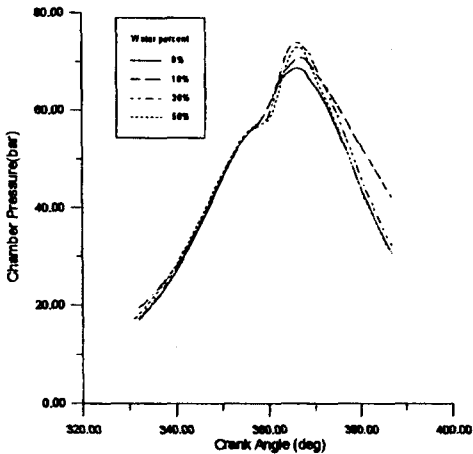


Fig. 9 Chamber pressure at load 25%

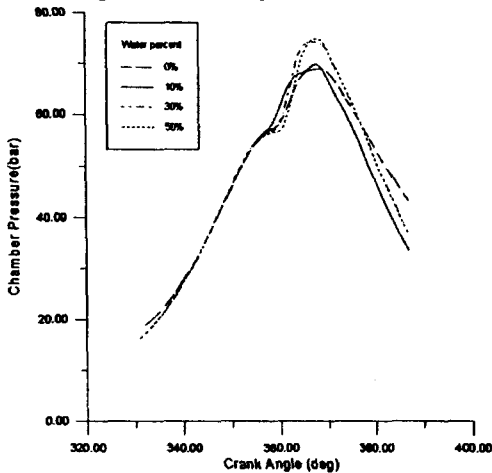


Fig. 10 Chamber pressure at load 50%

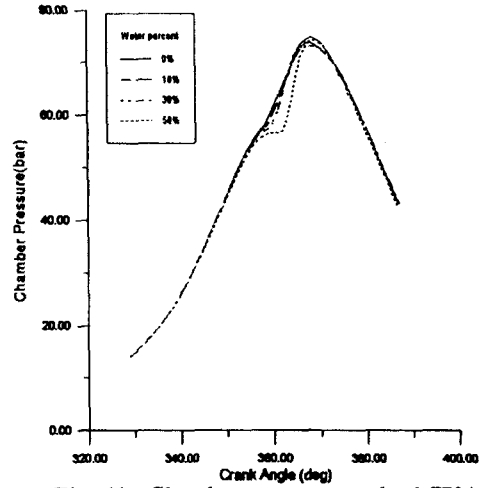


Fig. 11 Chamber pressure at load 75%

물혼합율에 따른 연소실내의 압력변화를 보여 준다. 각 결과들은 9회 측정된 데이터를 평균한 값으로 2%정도의 편차를 갖는다. 물혼합연료는 디젤오일만으로 운전되는 기관과 동일한 출력을 갖기 위해서는 물혼합량만큼 더 많은 연료의 공급이 필요하다. 따라서 연료밀도 및 분사량증가에 의한 분무연료의 운동량증가로 주위공기유동을 활성화시킨다. 또한 액적의 폭발현상에 의한 연소의 활성화에 의하여 연소특성을 향상시키며 연소기간을 단축한다. 한편으로는 물이 증발하면서 EGR에 의한 연소실 온도저감과 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 에혼합연료량이 증가하게 되어 에혼합연소와 함께 급격한 압력상승과 최고압력의 증가를 보여주지만, 물을 첨가하게 되면 액적폭발효과, 즉 액적의 2차분쇄, 연료확산과 난류강도 증가에 의한 연소 활성화의 정도와 분사량증가에 의한 연소실 체적대비 연료의 과대공급, 분무퇴적, 물의 연소실 온도저감 효과 등에 의한 연소억제의 정도에 의하여 연소실 압력 상승이 변화하게 된다. 부하 25%인 경우는 물혼합량 30%인 경우

에 액적폭발 등에 의한 연소활성화 효과가 가장 컸던 것으로 생각된다.

부하 50%인 경우에도 25%인 경우와 유사함을 보여 준다. 물혼합량 증가에 따라 착화지연기간이 증가하며 압력상승이 급격해 진다. 부하 25%에서는 물혼합량이 50%인 경우가 30%인 경우보다 최고압력이 낮아지지만 부하 50%에서는 다소 높아지는 것을 알 수 있었다. 이는 50%부하 조건에서는 물첨가량이 증가하여도 액적폭발효과를 충분히 가질 수 있도록 연소실온도가 유지됨을 보여 준다.

부하가 75%가 되면 저부하인 경우와 같이 연소지연기간은 비례적으로 늘어나지만 최대연소실압력은 더 이상 증가하지 않는다. 이는 본 연구에 적용한 연소실조건이 더 이상 물혼합연료를 사용하기에 적합하지 못함을 보여준 것이며 물혼합연료를 사용하기 위해서는 분사시기를 적절히 조절할 필요가 있음을 말해준다. 부하가 증가되면 그만큼 더많은 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 주위공기를 끌어드리는 효과와 더불어 연소를 활성화할 것이다.

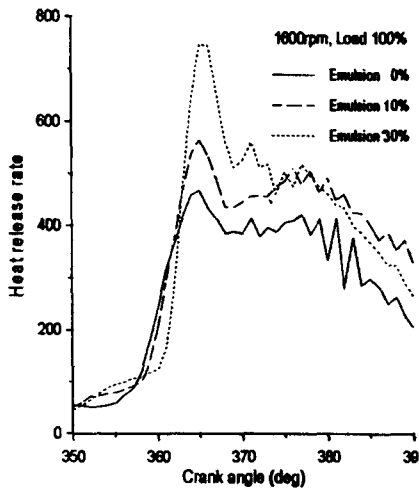


Fig. 12 Heat release rate with water rate

Fig. 12는 부하가 100%에서 물혼합량에 따른 열발생을 선도이다. 연소실압력변화에서 설명한 것처럼 물혼합량이 증가하면서 착화시기가 지연됨을 보여주며 더욱 급격한 열발생을 보여준다. 이는 예혼합기간 증가에 의한 예혼합중발연료의 증가와 액적폭발에 의한 연소활성화의 영향으로 보여진다.

4.2 배기특성

Fig. 13은 50%부하에서의 배기특성변화를 보여준다. 물혼합율의 증가와 함께 NOx와 스모크배출이 동시에 저감됨을 알 수 있으며 연료소모율에는 크게 영향을 미치지 않음을 보여 준다.

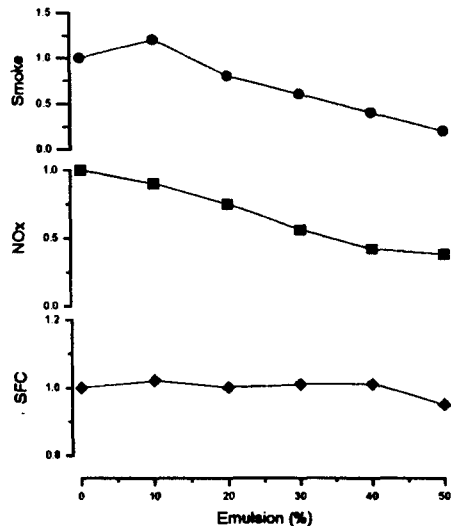


Fig. 13 Effect of emulsion on chamber pressure at Load 50%

발화시기의 지연과 연소실압력의 상승에도 불구하고 NOx가 물혼합 50%에서 50%이상 저감되는 데, 이는 물첨가에 의한 연소실내의 열흡수와 불활성가스로서의 수증기역할에 의하여 연소실내의 온도를 저감하며, 동시에 액적폭발 및 공기유동의 활성화에 의한 국부적인 온도상승의 억제에 의한 것으로 생각된다.

스모크 역시 물폭발효과와 난류유동의 활성화로 분사된 연료를 넓게 분산시킴으로서 연소면을 확대하고 연소실내의 산소를 충분히 이용

하여 연소를 활성화시키기 때문에 사료된다.

연소의 활성화에도 불구하고 연료소모율에는 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 이는 물혼합에 의한 연소성능향상역할과 저하역할의 상호작용으로 사료된다. 즉 물혼합연료를 적용하면 분사량 증가에 의한 주위공기유동의 활성화와 액적폭발에 의한 연소활성화, 물침가에 의한 열흡수와 분사진행거리 증가에 의한 연료의 벽면 퇴적현상을 들 수 있다. 앞의 두 가지는 연소효율을 향상시키는 역할을 하며 뒤의 두 가지 요소는 저하시키는 역할을 한다. 따라서 연소실을 물혼합연료에 알맞게 개조하면 연소효율은 향상 될 것이다.

### 5. 결론

물혼합연료의 사용이 분사기 및 디젤엔진에 미치는 영향을 연구한 본 논문을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 물혼합율의 증가는 분사시기를 지연시키며, 분사기간을 단축시킨다.
- 2) 물혼합율의 증가는 분사압력과 분사율을 상승시킨다.
- 3) 물혼합율의 증가는 발화시기를 지연시키며 연소실 압력 및 열발생율을 증가시킨다.
- 4) 연소실 최대압력은 저부하 영역에서 물혼합량의 증가와 함께 증가하지만 고부하영역에서는 큰 변화가 없었다.
- 5) 물혼합연료의 사용은 질소산화물과 스모크를 동시에 저감시킨다.

### 참 고 문 헌

- (1) 小高他, "吸氣管水噴射에 의한 大型디젤 車의 NOx 低減, 日本自動車技術學術講演會, 901011, 1990.
- (2) Valdmanis, E. and Wulfhorst, B., "The effect of emulsified fuels and water introduction on diesel combustion", SAE 700736, 1970.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) Odaka, M., Koike, N. and Tsukamoto, Y., "Reduction effect of emulsion fuel on NOx and smoke emissions from direct injection diesel engines", 內燃機聯合會 Symp. 講演論文集('92-7-14~16), 1992.
- (6) Wilhelm Bosch, The Fuel Rate Injector: A New Measuring Instrument for Display of the Characteristics of Individual Injection, SAE 660749, 1996.