

工學碩士 學位論文

에멀션 燃料를 適用한 디젤기관의  
耐久性 및 燃燒特性에 관한 研究

Combustion Characteristics and Durability  
of Diesel Engine utilizing Emulsified Fuel

指導教授 朴 權 夏

2002年 2月

韓國海洋大學校 大學院

機 械 工 學 科

郭 仁 錫

郭仁錫의 工學碩士 學位論文을 認准함

委員長 배종욱 ㉠

委員 조권희 ㉠

委員 박권하 ㉠

2002年 2月

韓國海洋大學校 大學院

機械工學科

郭 仁 錫

## 目 次

List of Tables .....	iii
List of figures .....	iv
ABSTRACT .....	viii
<b>I. 序論</b>	
1.1 연구배경 .....	1
1.2 선행연구 .....	2
1.3 연구목표 .....	5
<b>II. 理論的 考察</b>	
2.1 에멀션연료(Emulsified fuel) .....	6
2.1.1 에멀션연료의 연소특성 .....	8
2.1.2 에멀션연료의 미세폭발(Micro-explosion) .....	10
2.1.3 해외 에멀션연료 개발현황 .....	10
<b>III. 實驗裝置 및 方法</b>	
3.1 D-13 모드 기관내구실험 및 배기가스 측정 .....	12
3.1.1 실험장치 .....	12
3.1.2 실험방법 .....	16
3.2 연소실 압력측정 .....	18
3.2.1 실험장치 .....	18
3.2.2 실험방법 .....	20

3.3 노즐 연료 분사량 .....	20
3.3.1 실험장치 .....	20
3.3.2 실험방법 .....	23
3.4 에멀션연료의 제조 .....	23
<b>IV. 實驗結果 및 考察</b>	
4.1 D-13 모드 기관내구실험 .....	26
4.2 D-13 모드 기관 배기가스 .....	37
4.3 연소압력 측정 .....	46
4.4 연료노즐 연료분사량 측정 및 기관소음측정 .....	62
<b>V. 結論</b> .....	65
<b>參考文獻</b> .....	67

## List of Tables

- Table 2.1 State of overseas emulsified fuel
- Table 3.1 Specification of test engine
- Table 3.2 D6AC engine exhaust gas
- Table 3.3 D-13 mode operation cycle
- Table 3.4 Component of the 15% emulsion
- Table 4.1 Properties of fuels
- Table 4.2 Comparison of exhaust gases

## List of Figures

- Fig. 2.1 Image for diesel and 20% water in oil type emulsified fuel
- Fig. 3.1 D-13 mode experimental engine setup
- Fig. 3.2 D6AC test engine
- Fig. 3.3 Pressure measuring system
- Fig. 3.4 Installation of the pressure sensor
- Fig. 3.5 Fuel injection test apparatus
- Fig. 3.6 Photograph of nozzle and nozzle tip
- Fig. 3.7 Photograph of motor and controller
- Fig. 4.1 Comparison of BSFC at 1200rpm
- Fig. 4.2 Comparison of BSFC at 2000rpm
- Fig. 4.3 Comparison of BSFC before/after durability test at 1200rpm
- Fig. 4.4 Comparison of BSFC before/after durability test at 2000rpm
- Fig. 4.5 Comparison of torque with water percent
- Fig. 4.6 Comparison of torque before/after durability test
- Fig. 4.7 Cylinder head and piston crown after durability test
- Fig. 4.8 Engine cylinder head after 500H durability test
- Fig. 4.9 Comparison of NO<sub>x</sub>
- Fig. 4.10 Comparison of PM
- Fig. 4.11 Comparison of CO
- Fig. 4.12 Comparison of HC
- Fig. 4.13 Comparison of effects of adding cetane improver on NO<sub>x</sub>
- Fig. 4.14 Comparison of effects of adding cetane improver on PM

Fig. 4.15 Comparison of effects of adding cetane improver on CO

Fig. 4.16 Comparison of effects of adding cetane improver on HC

Fig. 4.17 Comparison of NO<sub>x</sub> before/after durability test

Fig. 4.18 Comparison of PM before/after durability test

Fig. 4.19 Comparison of CO before/after durability test

Fig. 4.20 Comparison of HC before/after durability test

Fig. 4.21(a) Part load cylinder pressure at 1200rpm  
during the combustion process

Fig. 4.21(b) Part load cylinder pressure at 1200rpm  
during the exhaust and intake process

Fig. 4.22(a) Part load cylinder pressure at 2000rpm  
during the combustion process

Fig. 4.22(b) Part load cylinder pressure at 2000rpm  
during the exhaust and intake process

Fig. 4.23(a) Cylinder pressure at 1200rpm/445Nm  
during the combustion process

Fig. 4.23(b) Cylinder pressure at 1200rpm/445Nm  
during the exhaust and intake process

Fig. 4.24(a) Cylinder pressure at 2000rpm/445Nm  
during the combustion process

Fig. 4.24(b) Cylinder pressure at 2000rpm/445Nm  
during the exhaust and intake process

Fig. 4.25(a) Cylinder pressure at 1200rpm/890Nm

- during the combustion process
- Fig. 4.25(b) Cylinder pressure at 1200rpm/890Nm  
during the exhaust and intake process
- Fig. 4.26(a) Cylinder pressure at 2000rpm/890Nm  
during the combustion process
- Fig. 4.26(b) Cylinder pressure at 2000rpm/890Nm  
during the exhaust and intake process
- Fig. 4.27(a) Cylinder pressure at 1200rpm/270Nm  
during the combustion process
- Fig. 4.27(b) Cylinder pressure at 1200rpm/270Nm  
during the exhaust and intake process
- Fig. 4.28(a) Cylinder pressure at 1200rpm/445Nm  
during the combustion process
- Fig. 4.28(b) Cylinder pressure at 1200rpm/445Nm  
during the exhaust and intake process
- Fig. 4.29(a) Cylinder pressure at 1200rpm/890Nm  
during the combustion process
- Fig. 4.29(b) Cylinder pressure at 1200rpm/890Nm  
during the exhaust and intake process
- Fig. 4.30(a) Cylinder pressure at 2000rpm/270Nm  
during the combustion process
- Fig. 4.30(b) Cylinder pressure at 2000rpm/270Nm  
during the exhaust and intake process

- Fig. 4.31(a) Cylinder pressure at 2000rpm/445Nm  
during the combustion process
- Fig. 4.31(b) Cylinder pressure at 2000rpm/445Nm  
during the exhaust and intake process
- Fig. 4.32(a) Cylinder pressure at 2000rpm/890Nm  
during the combustion process
- Fig. 4.32(b) Cylinder pressure at 2000rpm/890Nm  
during the exhaust and intake process
- Fig. 4.33 Nozzle injection quantity before/after durability(ml)
- Fig. 4.34 Sound level test with water percent

# ABSTRACT

Combustion Characteristics and Durability  
of Diesel Engine utilizing Emulsified Fuel

In-Seok Kwak

Department of Mechanical Engineering, Graduate School  
Korea Maritime National University  
Busan, Korea

(Supervised by Professor Kweonha Park)

This study is carried out to investigate the combustion characteristics and durability of a diesel engine utilizing emulsified fuel. Recently, air pollution from the vehicle is one of the most serious problem . NO<sub>x</sub>, PM and sfc reduction is further required in diesel engines. In this study, for the reduction of harmful emissions, W/O(water in oil) type emulsified fuels with 13%, 15%, 17% water are used. Piezo-electric pressure sensor is used to get combustion pressure in cylinder and exhaust gas analyzer is used to

measure exhaust emissions. Specific fuel consumption, sound level, and maximum torque are also measured.

In order to understand the effect of emulsified fuel at wide range of engine running condition, D-13 mode test method is selected as a test condition, and durability test with commercial high-way bus engine is conducted to ascertain the influence of water addition. All the test is performed with D-13 mode.

It was ascertained that the results show the 15% water emulsified fuel is good for NO<sub>x</sub> and PM reduction simultaneously and does not have much effect on a fuel consumption and a durability.

# I. 序論

## 1.1 연구배경

지구환경에 관한 관심이 증가하면서 기관에 대한 배기규제가 강화되고 있다. 디젤기관은 예혼합기를 흡입하는 가솔린기관과 달리 연소실 내에 연료를 직접분사하기 때문에 고압축 희박연소가 가능하다. 따라서, 연소효율의 향상과 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 탄화수소(HC)의 배출은 줄일 수 있지만 입자상 물질(particulate matter), 질소산화물(NO<sub>x</sub>)의 배출이 증가하는 문제가 있다. 디젤기관의 유해 배출물 저감기술을 크게 분류하면 연료 질의 개선, 기관의 개량과 후처리 기술을 들 수 있다[1]. 특히, 디젤기관에 있어서 질소산화물과 입자상 물질을 동시에 저감하는 기술의 개발이 요구되고 있으며 그에 대한 규제가 해마다 강화되고 있다[2]. 연료의 개선을 위해서 경유 중의 황 함유량을 낮추거나 증발가스 저감, 방향족 탄화수소 함유량 저하, 세탄가 향상 등이 요구되고 있는데, 연료개선기술의 하나에 포함되는 에멀션연료(emulsified fuel) 기술은 물을 콜로이드상으로 디젤연료에 혼합하여 연소시키는 것으로써 연료를 분사하면 물액적을 함유한 디젤연료 액적들이 고온의 연소실에서 연소하게 되는 방법이다. 에멀션 액적의 미세폭발을 동반하는 연소는 디젤연료를 더욱 작은 액적으로 2차 미립화하는 역할을 하며, 동시에 물의 증발잠열에 의한 국부적인 온도저감을 가져온다. 결과적으로 이 기술은 연소의 활성화와 동시에 질소산화물과 입자상 물질을 동시에 저감하는 청정연료기술로서 받아들여지고 있다[3]. 그러나 개발된 에멀션연료의 기술적 문제가 해결된다 하더라도 상용화시키기 위해서는 연료의 분배 및 공급과 관련한 문제가 발생하게 되며 물 첨가에 따른 연료탑재량이 감소함으로써 발생하는 운행거리감소 등의 문제가 뒤따르고 있다[4]. 따라서 이에 대한 연구가 유럽의 프랑스, 독일과 미

국 및 일본을 중심으로 활발히 진행되고 있는 상황이며 우리나라에서 90년대 이후부터 활발히 진행되고 있다.

물혼합 에멀션연료는 연소에 직접 참여하지 않고 주위로부터 열을 흡수하는 역할을 하는 물의 영향에 의해 디젤연료의 경우와는 연소특성이 매우 다르다. 특히 분사시기와 착화지연기간이 매우 중요한 요소가 되고 있으며 이에 관한 연구의 필요성이 제기되고 있다. 단기간의 연구용으로 적용되는 경우에는 문제가 없지만 실제 기관에 사용하기 위해서는 에멀션연료의 물과 기름의 상분리가 중요한 요소가 되며 이러한 상분리를 막기 위한 유화제의 개발이 절실히 요구되고 있다. 또한 유화제가 연소에 미치는 영향에 관한 연구도 병행되어 필요하다.

## 1.2 선행연구

디젤기관의  $\text{NO}_x$  저감을 위하여 기관 연소실 내에 수분을 공급하는 방법으로는 흡입공기에 수분을 포함시켜 공급하는 방법[5], 연소실 내에 물을 분사하는 방법[6], 물혼합연료 분사방법[7] 등으로 구분된다. 수분을 함유한 흡입공기 공급기술이나 물분사기술은 수분의 잠열과 불활성 가스효과에 의한 연소온도 저하를 가져와  $\text{NO}_x$  저감에 매우 효과적인 것이 확인되었으나, 매연의 증가와 연소효율의 저하를 수반하며, 수분에 의한 기관의 부식과 기관오일 희석 등의 부작용이 커서 실용화 기술로 발전되지는 못하였다. 반면, 물혼합연료는 물의 작은 액적들을 디젤연료유 내부에 혼입한 에멀션연료를 연소실에 분사하기 때문에 고온 연소영역에서 연료 내부에 있는 물이 열을 받아 미세폭발(micro explosion) 현상을 일으키면서 연소한다. 따라서 연료 액적이 미립화되어 연소실 내부에 골고루 퍼지면서 연소효율을 향상시키고, 물증발이 연소온도 상승

을 억제하여  $\text{NO}_x$  감소와 함께 매연의 감소 효과도 동반한다. 또한 수분은 미세폭발 현상과 함께 매우 미세한 액적으로 변하여 증발되기 때문에 연소실 벽면에 직접 닿지 않아 기관부식이나 기관오일 희석 같은 영향은 거의 없는 것으로 알려져 있다[8].

Tsukahara[9], Yoshimoto 등[10]은 에멀션연료 사용에 의해 가솔린연료보다 저압축비에서 연소기간동안 미세폭발에 의한 효과로, 연소압력이 증가함에도 불구하고 연소실 온도는 저하하여 연료소비율 악화 없이  $\text{NO}_x$ 는 약 36%, Smoke는 약 41% 정도로 현저하게 저감되었고, 최고연소압력이 11% 가량 감소함에도 불구하고 연료소비율은 악화가 없음을 보여주었다. 또한 디젤기관에 있어서도 마찬가지로 에멀션연료의 미세폭발 현상에 의해 연료소비율이 감소하는 것을 밝혔고, 미세폭발의 발생과 그 세기는 기본 연료의 점도와 물 함량, 그리고 물입자에 의존함을 알아내는 등 물입자의 크기, 형상 및 액적형태에 대해서 다양한 연구결과를 제시하였다.

Gunnerman 등[11]은 A-55, D-55라 명명한 에멀션연료의 다양한 기관 실험을 통한 기관회전수에 대한 배출가스 특성에 대한 연구를 수행하여 물과 탄화수소계열의 유화를 이용하여 안정된 에멀션연료를 제조하였고, 디젤기관에 적용하여 디젤기관에서  $\text{NO}_x$ 와 PM을 동시저감 할 수 있다는 것을 보여주었다.

Ishida 등[12]은 고속 직접분사식 디젤기관의 실린더 내에 압력센서를 부착하여 연소압력을 측정함으로써 연소실 내 공간으로부터 변화하는 압력의 무작위성과 사이클마다 변화하는 사이클변동 등을 해석하여 연소실 내 연소에 대한 정확한 분석을 기하였으며, 에멀션연료에 의한 예연소영역의 가스온도를 감소시키는 분무 끝단의 과잉공기 증가로  $\text{NO}_x$ 가 감소한다는 것을 밝혔다.

Chen 등[13]은 직접분사식 디젤기관에서의 NO 형성에 있어서, 물혼합의 영

향에 대해 연소가스 비열변화의 관점에서 흡입공기와 연료 내의 물의 영향에 대해 실험과 함께 이론적인 분석을 하여, NO<sub>x</sub>의 감소는 혼합되는 물의 양에 기인하여 약 20% 감소하는 것을 보여주었으며, 단점으로서 물혼합 양이 증가함에 따른 착화지연기간이 증가하여 예혼합 연소에서의 최대 열발생율이 높게 된다고 하였다.

Sheng 등[14]은 유중수적형의 에멀션연료 액적들의 미세폭발에 관한 연구에서 주위 온도가 미세폭발의 형성과 세기에 가장 중요한 영향을 끼친다고 밝혔으며 여러 가지로 물혼합량을 달리한 에멀션연료의 연료소비와 배기가스를 수치적인 컴퓨터 모의실험과 기관실험에 의한 다양한 운전조건 하에서 연구하였다.

中野眞三 등[15]은 에멀션연료의 연소에서 입자상 물질이 감소하는 효과와 관련해서, 에멀션연료 액적의 연소에 있어서 입자상 물질의 생성에 대한 영향을 조사하는 실험을 수행하여 연료 액적의 미세폭발에 의해 화염폭이 넓어지는 것은 연료와 공기의 접촉율을 높이고 연소 반응을 촉진해서 연소 시간이 단축된다고 하였다. 그러나, 물에 의한 열용량 증가에 의해 착화지연이나 연소시의 액적 온도가 저하되는 경향을 확인하였고, 물혼합량의 증가와 더불어 연소성도 나쁘게 된다고 하였다. 또한, 입자상 물질의 입경 분포나 입자상 물질의 단일 입자 내의 결정자의 크기에까지 에멀션연료의 영향을 확인하였다.

이와 같은 여러 선행연구에서 에멀션연료가 기관에 미치는 영향에 대해 많은 연구들이 수행되어졌으나 에멀션연료를 실기관에 적용하여 실제적으로 기관에 미치는 영향에 대한 연구는 많지 않다. 특히 에멀션연료의 연소특성에 대한 정보를 얻기 위해서 연소실 내의 압력해석과 배기가스의 분석이 무엇보다 중요하다. 따라서 본 연구에서는 선행연구를 바탕으로 에멀션연료가 실제

디젤기관에 미치는 영향에 관하여 연소실 내의 연소압력과 기관 배기가스를 분석함으로써 그 결과를 알아보고자 한다.

### 1.3 연구목표

이와 같은 선행연구에서 에멀션연료의 연소특성과 분무특성 및 디젤기관의 성능에 미치는 특성들에 대한 연구들이 많이 수행되었다.

본 연구에서는 에멀션연료의 실기관적용에 의한 연소실 내 연소압력의 특성, D-13 모드실험을 통한 내구실험 및 에멀션연료 배기가스의 배기특성 등을 파악하고자 다음과 같은 연구목표를 설정하였다.

에멀션연료를 사용하여 기관의 성능실험을 하고 동력계를 이용한 D-13 모드실험을 통해서 에멀션연료의 내구실험과 연소실 내 압력의 변화와 내구실험 250시간 및 500시간 후의 연소실 내부의 변화추이의 파악과 실차적용의 가능성을 파악하며, 에멀션연료가 노즐에 미치는 영향을 관찰한다. 배기가스 측정기를 이용하여 D-13 모드별로 배기가스를 측정하고 각 경우에 따르는 에멀션연료와 디젤연료의 배기가스 특성을 파악하여  $\text{NO}_x$ 와 PM의 동시저감의 효과를 파악한다. 그리고 연소실 내의 압력에 대한 정보를 얻기 위하여 연소실 내에 압력센서를 삽입하여 압력에 관한 정보를 얻음으로써 기관의 출력 및 에멀션연료의 연소성능을 파악한다. 따라서 실기관 적용의 타당성을 검증하고 에멀션연료의 사용으로 인한 디젤기관의 환경적 측면에서의 배기규제에 대한 대처방안을 제시하고자 한다.

이와 같은 연구를 통해 에멀션연료의 실기관 적용에 대한 가능성을 평가하고 실험적 증명을 하고자 하며, 연소실 내 연소압력에 대한 해석을 통해 기관 출력에 따르는 문제점을 파악하며 배기가스 저감대책을 마련하고자 한다.

## II. 理論的 考察

### 2.1 에멀션연료(Emulsified fuel)

에멀션연료는 디젤기관에서 배출되는 유해 배기가스 저감대책을 위한 청정 연료기술의 하나로서 물을 연료와 함께 혼합하여 만든 것이다. 배기가스 저감을 목적으로 연구된 것은 비교적 최근의 일이며 자동차 회사 및 정유회사를 중심으로 많은 연구가 이루어지고 있다.

에멀션연료는 쉽게 말해서 물과 기름의 관계로 서로 잘 혼합되지 않는다. 이런 혼합되지 않는 두 종류의 액체를 혼합하기 위해 유화라는 방법이 쓰인다. 서로 혼합되지 않는 두 액체를 심하게 흔들거나 섞으면 어느 한 쪽이 미립자로 되어 다른 쪽의 액체 중에 분산이 된다. 이러한 과정을 유화(emulsification)라고 하고 유화를 통하여 일어난 분산계를 에멀션이라 한다. 그러나 유화제 즉, 계면활성제(surfactant)가 없이 두 액체를 혼합하여 그대로 방치하면 일정시간이 흐른 뒤에 분산이 되어 원래의 두 액체로 분리된다. 두 액체를 교반하여 생성된 에멀션을 그 상태로 유지시키려면 일반적으로 계면활성제를 첨가하는 것이 필요하며, 보다 장기간의 안정화를 위하여 계면활성제 외에 다른 몇 가지 안정화제가 첨가된다. 계면활성제에는 기름에 사용되는 것(oil surfactant)과 물에 사용되는 것(water surfactant)이 있으며 계면활성제 외에 물을 첨가함으로써 저하될 수 있는 디젤연료의 세탄가를 유지 혹은 향상시키기 위해서 세탄가 향상제(cetane improver)를 첨가한다. 특히 디젤연료의 유화에는 계면활성제가 꼭 필요하다. 물 첨가량에 있어서는 사용하는 기관의 목적에 따라 다르지만 수 % ~ 50%에 이르며, 내연기관에는 일반적으로 유중수적형 에멀션연료가 사용되며 물 첨가량은 12% ~ 20% 정도이다.

에멀션연료의 제조는 초음파 진동을 이용하는 에멀션연료 제조장치나 연료의 유화와 미립화를 동시에 하는 분사밸브를 이용하는 제조방법 등 다수의 유화방법이 개발되어 있다. 그리고 기화성이 강하고 물과 기름을 섞어 주며 연소실 내의 수분을 빼앗아 가면서 연소실 내 열을 동시에 빼앗아 가는 IPA(iso propyl alcohol)를 사용한다.

에멀션연료는 크게 두 가지로 나누어지는데 수중유적형 에멀션연료와 유중수적형 에멀션연료가 있다.

수중유적형 에멀션연료는 기름이 분산질로서 중질유의 유동성 개선에 효과가 높은 것으로 알려져 있으나, 액적 주위에 물이 연속상으로 되어 있어서 기관에 적용 시 연소실 내부에서 분무 및 연소 될 때와 연료라인 계통에 부식의 우려가 있어 일반적으로 잘 쓰이지 않고 있다. 유중수적형 에멀션연료는 수중유적형 에멀션연료와는 반대로 기름이 연속상으로 있는 액적의 형태로서 이 형식의 경우 일반적으로 미세폭발이 잘 발생하고, 연소실 내에서의 연소 시에도 물이 먼저 증발하기 때문에 연소실의 온도를 낮출 수 있다. 따라서 질소산화물의 생성억제효과가 커서 디젤기관에 많이 적용하여 연구되고 있다.

에멀션연료의 2차 미립화 현상을 포함하여 그 연소과정은 원래 연료의 단일 액적의 연소와 비교해서 매우 복잡하고 난해하나 그 기본적인 성질을 파악하는 것이 매우 중요하다. 현재 응용의 주류를 이루고 있는 유중수적형 에멀션연료에 대해서 많은 연구가 이루어지고 있으나, 연소성의 견지에 있어서 수중유적형 에멀션연료와 비교해서 그 상위 또는 득실이 아직 명확하게 밝혀지지 않고 있다.

### 2.1.1 에멀션연료의 연소특성

에멀션연료의 연소에 관한 연구는 단일 액적의 연소, 디젤기관, 공업로 등에 대하여 이미 시도되었다. 그 결과, 에멀션연료는 미세폭발이나 순간터짐 (splashing)에 의한 연소 중의 분무와 공기의 혼합을 촉진시켜 예혼합 연소에 가까운 효과와 물 분사와 똑같은 수성 가스 반응이나 연소가스온도를 저감시키는 효과 등이 나타난다. 그러나 에멀션연료의 분무 연소에서는 에멀션연료의 미립화, 증발, 착화 등의 기본적인 특성이 확실하지 않기 때문에 연료의 유화와 유화에 의한 효과와의 인과 관계에는 불명확한 점이 많다. 대부분의 연구는 연소 실험이 쉬운 경질유에 계면활성제를 이용하여 물을 유화시킨 연료를 대상으로 하고 있다. 유해 배기가스의 저감이나 연소 개선 등 유화에 의한 효과가 가장 요망되고 있으며, 유화 중질유에 관한 연구는 비교적 적고 유화 경질유에 나타나는 유화에 의한 연소 개선 등의 효과에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

에멀션연료는 디젤연료만으로 운전되는 경우와 동일한 출력을 얻기 위해서는 물 첨가량만큼 더 많은 연료의 공급이 필요하다. 따라서 연료밀도 및 분사량 증가에 의한 분무연료의 운동량 증가로 주위의 공기유동을 활성화시킨다. 연료 연소 시에 연료액적이 가지는 미세폭발의 효과는 연소를 활성화시켜 연소특성을 향상시키며, 연소기간을 단축시킨다. 또 한편으로는, 물이 증발하면서 배기가스재순환(EGR)에 의한 연소실온도 저감과 같은 효과를 가지고 온다. 물 첨가량이 증가하면 착화시기는 비례하여 늦어지고, 연소실 압력도 상승하게 된다. 그러나 연소실 최고압력은 비례하지 않으며 첨가량이 적정수준을 넘게 되면 오히려 감소하게 된다. 일반적인 연소 현상에서 착화지연기간이 길어지면 예혼합연료량이 증가하게 되어 예혼합연소와 함께 급격한 압력상승과

최고압력이 증가하지만, 물을 첨가하는 경우에는 액적의 미세폭발효과, 즉 액적의 2차 미립화, 연료확산과 난류강도의 증가에 의한 연소실 체적대비 연료의 과대공급, 분무퇴적, 물 첨가로 인한 연소실 온도저감효과 등에 의한 연소 억제정도에 의하여 연소실 압력상승이 변화하게 된다. 기관부하가 일정 조건 이상일 때는 연소실 최고압력이 더 이상 증가하지 아니하며 부하가 증가된 만큼의 연료를 고압분사하기 때문에 연료의 연소실 벽면 퇴적현상이 국부적으로 발생하며 이는 연소특성에 좋지 못한 영향을 미친다[16].

K Park 등[22]은 급속 압축팽창장치(RCEM)를 이용한 에멀션연료의 연소특성에 관한 연구에서는 유중수적형 에멀션연료의 40% 물 첨가에서 분사시기 BTDC 20°에 최대효율과 NOx 및 매연(soot)의 저감효과를 가져오며 물과 기름(W/O)의 비가 증가할수록 화염의 밝기와 화염온도가 감소한다고 하였다. 이 연구에서 고속카메라를 이용한 에멀션연료 연소화염을 촬영한 사진(Fig. 2.1)은 분사시기 BTDC 10°에서 디젤연료와 20% W/O 에멀션연료의 분무끝단 가까이 밝은 화염영역 밑부분에 강한 미세폭발 현상이 일어나고 있음을 보여준다. 에멀션연료의 화염사진에서 보면 액적 내에서 과열된 물 입자의 미세폭발 현상으로 인하여 수많은 작고 둥근 영역들을 사진의 원내에서처럼 관찰할 수 있다. 디젤연료의 밝은 연소 화염은 미세폭발 현상 없이 보다 안정적이며 밝고 노란 화염임을 알 수 있다. 에멀션연료 액적들의 미세폭발은 분무각과 분무끝단까지 충분히 액적들이 찢겨질 만큼 발생하고, 잔염들이 퍼질 수 있을 만큼 상당히 폭발력이 강하며, 연소 화염들의 국부적인 형상과 밝기에 영향을 미치는 것을 관찰할 수 있다.

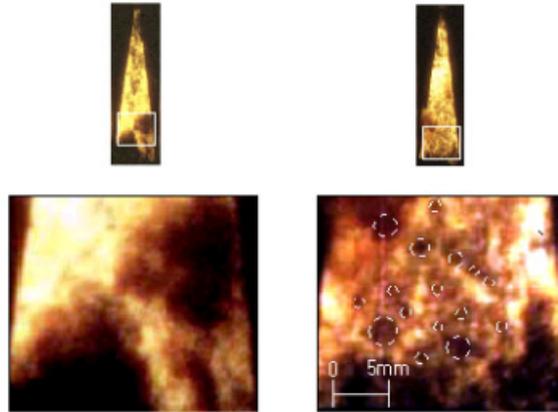


Fig. 2.1 Image for diesel and 20% water in oil emulsified fuel

### 2.1.2 에멀션연료의 미세폭발(Micro-explosion)

에멀션연료에는 디젤연료의 연소와는 달리 2차 미립화가 존재한다. 이 2차 미립화 현상에는 연료 액적에서의 증발과 토출, 액적의 분열, 액적의 폭발(micro explosion) 등이 관찰되고 있다. 이 현상은 연료 중 첨가 수분의 급격한 체적팽창에 의해 발생하는 것이고, 연료와 공기와의 혼합을 촉진하는 효과를 가져온다. 이것은 연소 효율의 향상, 매연 및 미연 탄화수소 발생억제 같은 효과를 가져오고 연소 과정에서 수증기의 발생은 연소 온도를 저하시켜 질소산화물의 발생을 억제하는 등의 효과를 가져온다[21].

### 2.1.3 해외 에멀션연료 개발현황

연료에 물을 첨가하여 NOx 및 smoke 저감효과를 볼 수 있다는 것은 1913년에 이미 밝혀졌고, 지금까지 수많은 연구결과 그 관련특허만 해도 500가지

이상이 된다. 그러나 여전히 몇 가지 문제점을 가지고 있으며 그 중 대표적인 문제점이 물과 기름의 혼합에 있어서 시간의 경과에 따르는 상분리를 막을 수 있는 기술이 진보되지 못하고 있다는 것이다. 이는 첨가제에 관한 문제로 첨가제의 개발이 무엇보다 어려운 기술로서 에멀션연료를 연구개발하고 있는 측면에서는 난해한 문제일 수밖에 없다. Table 2.1은 해외에서 개발된 상품들의 현황을 나타낸 것으로서 공개된 데이터로서는 어느 회사의 제품이 우수하다고 말할 수 없는 상태이며, 보급이 활성화되지 못하여 확실한 검증이 이루어지지도 않았다. 에멀션연료는 기관의 개조 없이 바로 주유만 하면 사용할 수 있게 제품생산이 이루어지므로 연료라인 계통의 문제점을 비롯한 몇 가지의 개선이 최적상태로 이루어진다면 보급이 활성화 될 것이다. 자동차회사와 연계하여 자동차의 내구, 마모, 부식 등과 관련한 기관실험이 이루어지고 있으며, 연료는 오래 보관해도 상분리를 막을 수 있어야 하기 때문에 2달 이상 유지가 가능하도록 개발되고 있다[4].

Table 2.1 State of overseas emulsified fuel

Product	Company	Water content	Exhaust gas reduction	Etc.
PuriNOx	Lubrizol	10-20%	NOx 5-30% reduced PM 20-50% reduced	Searching with Caterpillar
A-55	Clean Fuels Technology Inc.	20-30%	NOx 5-30% reduced	Pat. dispute with Lubrizol
Aquazole	Elf	10-15%	NOx 5-30% reduced PM 20-50% reduced Smoke 30-80% reduced	

### Ⅲ. 實驗裝置 및 方法

본 연구의 실험장치는 D-13 모드실험을 위한 실험기관, 동력계, 배기가스 분석기와 연소실 내부의 압력을 구하기 위한 압력센서 및 데이터 획득장치 시스템, 그리고 노즐 분사량 테스트를 위한 분사량 실험장치, 에멀션연료 제조를 위한 장치로 구성되었다.

#### 3.1 D-13 모드 기관내구실험 및 배기가스 측정

##### 3.1.1 실험장치

전체적인 기관실험 장치의 개략도는 Fig. 3.1과 같고, Fig. 3.2는 실험에 사용된 디젤기관의 사진이다. 실험에 사용된 기관의 제원은 Table 3.1과 같으며 일반 상용고속버스의 340마력급 6기통 기관(현대 D6AC)으로 배기량은 11,149cc이다. Table 3.2는 현 배기가스 규제치와 기관의 최초 측정치를 나타내고 있다.

배기가스의 측정은 배기가스 분석계(HORIBA, MEXA 8120D)를 이용하여 일산화탄소(CO), 탄화수소(HC), 질소산화물(NO<sub>x</sub>)을, 입자상 물질(particulate matter)은 마이크로 희석터널(Sierra, BG-2)에 의하여 측정하였다.

매연(Smoke)은 보쉬형의 매연측정테스터기(Bosche smoke meter)를 사용하였다.

Table 3.1 Specification of test engine

Item	Specification
Engine type	Hyundai D6AC TCI Diesel Engine
Displacement [cc]	11,149
Bore × Stroke [mm]	130 × 140
No. of Cylinder	6
Output [ps]	340
Compression Ratio	16.4
Clearance Volume [cc]	24.7
Injection Timing	BTDC 12°

Table 3.2 D6AC engine exhaust gas

	NO <sub>x</sub> (g/kw-h)	CO(g/kw-h)	HC(g/kw-h)	PM(g/kw-h)
Restriction	9.0	4.9	1.2	0.25
Measurement	9.0	-	-	0.25

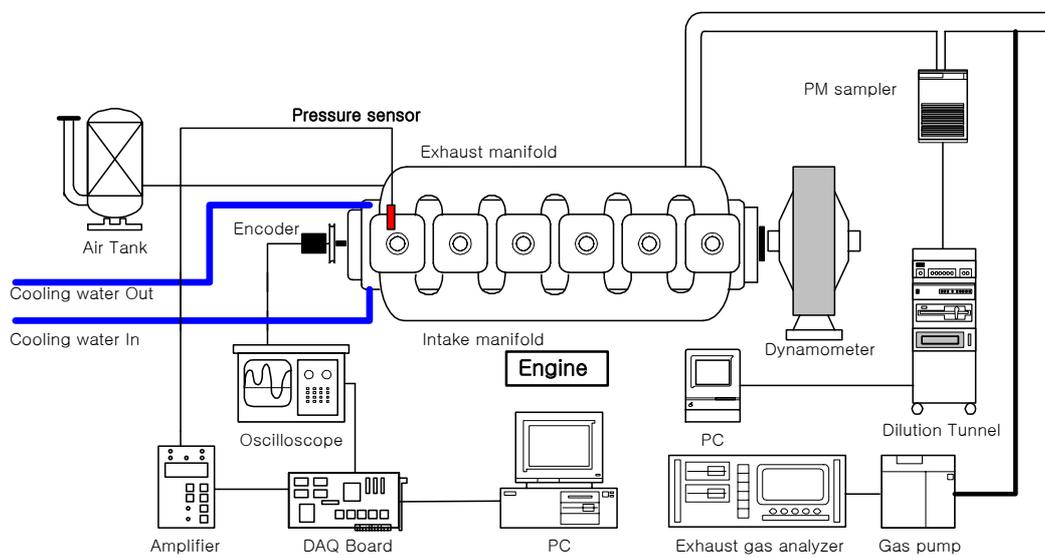


Fig. 3.1 D-13 mode experimental engine setup



Fig. 3.2 D6AC test engine

### 3.1.2 실험방법

휘발유, 경유 및 가스를 연료로 사용하는 자동차의 배출가스를 측정하는 방법으로 환경부의 제작자동차 배출허용기준의 검사방법 및 절차에 관한 규정에 따라 기관 각 모드의 출력마다 대형 디젤기관 자동차의 배출가스 시험법 중 하나인 D-13 모드실험방법에 의하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 연료는 디젤연료와 물 첨가량이 각각 13%, 15%, 17%인 에멀션연료이며 세탄가 향상제를 각 연료마다 그 첨가량을 0.2%, 0.5%, 1%인 경우로 바꿔가면서 실험하였다.

기관 동력계는 동력계의 부하에 관계없이 기관 회전수를  $\pm 20\text{rpm}$  이내로 제어할 수 있고, 해당기관 회전수에서 최대 부하시 축토크를 전범위의  $\pm 1\%$  이내로 제어할 수 있어야 하며, 기타의 제반조건은 자동차용 기관출력 시험방법인 KSR 0071의 방법을 만족시키는 규정 내에서 실험하였다.

D-13 모드실험은 13개의 주행모드가 있어 동력계에서 각 모드마다 6분씩 주행하게 되고, 아이들링(idling), 저부하 및 중부하, 그리고 최대출력시 부하에서 각 회전수에 대한 최대출력시 부하(100%)를 기준으로 그 부하율(%)을 달리하여 실험한다. Table 3.3은 D-13 모드실험의 주행주기를 나타낸 표로서 회전수에 따른 부하율과 가중계수를 나타내고 있다. 표에서 중속도(intermediate speed)는 최대기관회전수의 60% ~ 75% 범위 이내에서 최대토크를 갖는 기관회전수이거나 그 이외의 경우 최대기관회전수의 60%에 해당하는 회전수를 의미한다.

배기가스의 측정은 배기가스 분석기를 통하여 Table 3.3의 각 운전모드에서 6분간 운전하여 처음 1분간 기관의 회전수와 부하변화를 완료시킨다. 분석기의 출력신호는 6분 동안 기록계에 기록하고 마지막 3분간은 배출가스를 분석

기에 보내어 측정한다. 기관 회전속도, 출력, 흡기온도, 연료유량, 흡입공기를 각 모드의 마지막 5분 동안 기록한다. 각 모드의 마지막 60초간의 배출가스 기록결과를 읽고 이에 대한 평균값을 기록하였다. 각 모드의 운전기간동안 CO, HC 및 NO<sub>x</sub>의 농도는 평균기록지 판독치에 상당하는 교정치로부터 결정하게 된다.

입자상 물질은 마이크로 희석터널을 통하여 측정하며, 시료의 채취는 부분 유량 희석시스템(partial flow dilution system)을 사용하고 일정 조건을 만족하는 시료채취용 여지로 채취한다. 규정 조건을 만족하는 온도 및 습도조건이 일정하고 주위공기에 오염되지 않은 무게 측정실에서 전자측정저울로 계량하여 수치를 기록하였다.

Table 3.3 D-13 mode operation cycle

Mode	Engine speed(RPM)	Load(%)	Weighting factor
1	Idling	-	0.25/3
2	Intermediate speed	10	0.08
3	"	25	0.08
4	"	50	0.08
5	"	75	0.08
6	"	100	0.25
7	Idling	-	0.25/3
8	Maximum speed	100	0.10
9	"	75	0.02
10	"	50	0.02
11	"	25	0.02
12	"	10	0.02
13	Idling	-	0.25/3

## 3.2 연소실 압력측정

### 3.2.1 실험장치

Fig. 3.3은 연소압력을 측정하기 위한 전체 개요도로서 연소실 내부 연소압력은 실린더 헤드를 가공하여 노즐 뒷부분에 경사지게 압전형(Piezo-resistive type) 압력센서(Kistler사 Type-6061B)를 실린더 헤드 하면을 통해 연소실에 삽입하여 측정하였다. 센서신호를 증폭하여 PC에 송부하고 이 데이터를 이용하여 압력선도를 구하였다. 기관의 크랭크각도를 구하기 위하여, 기관 출력축에 동축형 로터리 엔코더(Omron)를 설치하여 그 신호를 오실로스코프(4600B, HP)를 이용하여 파악하고, NI사의 DAQ(Data Acquisition) 보드를 통해 PC에서 데이터를 처리하여 구하였다.



Fig. 3.3 Pressure measuring system

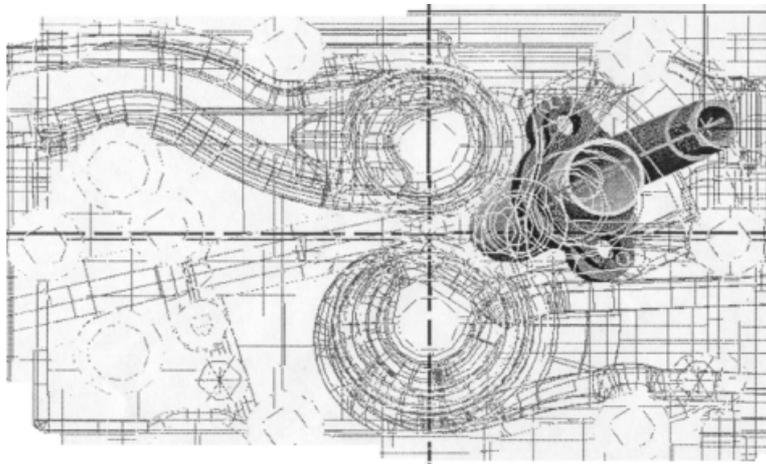
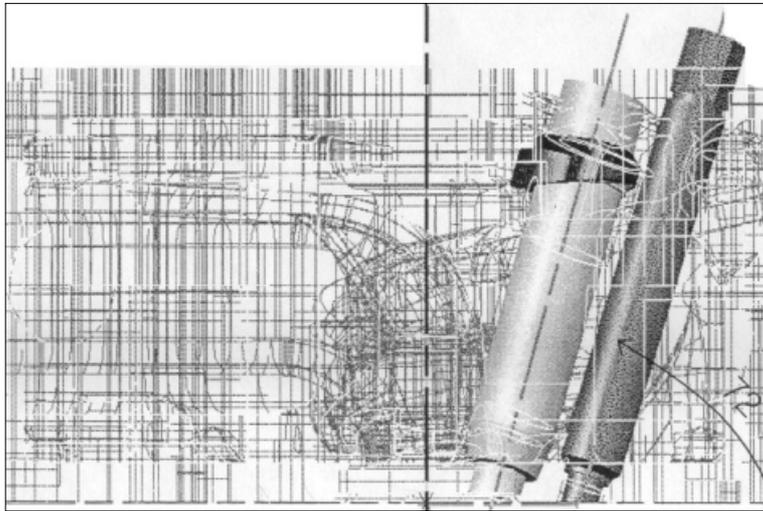


Fig. 3.4 Installation of the pressure sensor

### 3.2.2 실험방법

연소실 압력측정을 위해 기관 1번 실린더 헤드에 압력센서를 설치하여 Fig. 3.4와 같이 실린더 헤드를 가공하여 압력센서를 설치하기 위한 더미(dummy)를 장착하였으며, 실제 제작 시에는 실린더 헤드 가공의 어려움으로 인해 수차례 시행착오를 거쳐 실린더 헤드에 맞추어 가는 방법으로 설치하였다.

압력센서 설치용 더미는 실린더 헤드를 관통하여 하면의 살 두께가 약 1.2mm 정도로 더미와 헤드가 맞물리는 면적이 적으므로 냉각수의 누출 위험이 없고 견고하도록 연소실 내의 고온고압에 견딜 수 있는 철본드(steel bond)를 이용해서 24시간 이상 경화시켜 장착하였고, 압력센서는 키슬러사의 6061B 압력센서 전용 토크렌치를 사용하여 규정토크(10Nm)로 조였으며, 압력센서는 AVL사의 전용 냉각시스템을 이용하여 냉각수를 순환시켜 냉각하였다.

연소실 압력은 압력센서로부터의 압력, 엔코더의 Z-펄스 신호가 발생하는 위치, 그리고 기관의 TDC를 오실로스코프를 통해 파형을 파악하여 일치시킨 기관 크랭크각도의 정보를 NI(National Instrument)사의 DAQ(Data Acquisition) 보드를 거쳐 PC상에서 데이터를 읽어들이어 처리하였다.

## 3.3 노즐 연료 분사량

### 3.3.1 실험장치

연료분사장치는 Fig. 3.5와 같이 노즐, AC모터 및 제어장치, 분사펌프 등으로 구성된다. 연료분사장치의 분사펌프는 직렬(In-line)식으로, 상용기관에서 사용되고 있는 분사펌프의 타이머와 가버너 부분을 제거하여 회전수에 대해 랙을 고정시킬 수 있도록 하였다. 분사펌프 구동은 5마력의 AC모터를 이용하였고, 타이밍 벨트를 작동시켜 연료를 분사하게 하였다. AC모터의 회전수는

360펄스의 해상도를 가지는 동축형 로타리 엔코더를 장착하여  $\pm 2\text{rpm}$  이내에서 제어되었다.

Fig. 3.6은 실험기관에 장착된 노즐이고, 직접분사식 디젤기관에 사용되는 노즐은 홀형 노즐로서 주로 다공 노즐을 사용하며, 실험기관 노즐의 팁부분에는 5공 노즐로 분사되는 연료를 한 곳으로 모으기 위해 캡을 설치하였다. Fig. 3.7은 AC모터와 모터 제어장치의 사진이다.

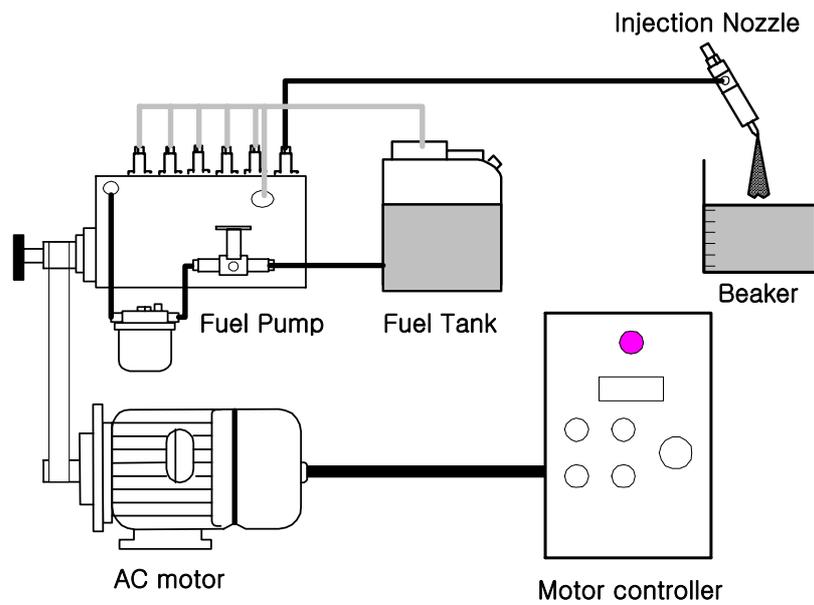


Fig. 3.5 Fuel injection test apparatus



(a) Nozzle



(b) Nozzle tip

Fig. 3.6 Photograph of nozzle and nozzle tip



Fig. 3.7 Photograph of motor and controller

### 3.3.2 실험방법

기관의 500시간 내구실험 전과 후를 기준으로 하여, 에멀션연료를 상온, 대기압 상태 하에서 노즐을 통한 10분간 분사량을 전자저울로 측정하였다. 실험의 정확성을 기하기 위하여 6개의 노즐마다 5회 이상의 실험을 수행하여 그 평균데이터를 산출하였다. 분사펌프 6개의 라인 중 5개는 연료탱크로 리턴시키고 1개의 연료라인에 노즐을 장착하였다.

모든 실험에서 펌프의 회전수를 700rpm으로 고정하여 실시하였으며, 이는 실제 기관에서 1400rpm에 해당하며, 랙(rack)의 위치는 랙이 움직이는 전체 길이의 1/2 지점에 고정하여 실험을 수행하였다.

### 3.4 에멀션연료의 제조

본 실험에 사용된 에멀션연료는 기계적인 교반기를 이용하여 직접 제조하였으며 제조방법은 다음과 같다.

에멀션연료는 1회 200kg 제조를 기준으로 하여 수용성 계면활성제 1kg을 물중탕에 의한 방법을 이용해서 70°~ 80°C 정도의 액체상태로 녹인다. 동시에, 증류수를 데울 수 있는 전열기구(Hot plate)를 사용하여 증류수 10kg을 약 10분간 데워준다. 수용성 계면활성제가 녹아서 액체상태로 되면 전열기구에 데우고 있는 증류수에 넣어서 잘 섞어 주면서 데운다.

다음으로 경유 162kg과 유용성 계면활성제 3kg을 에멀션연료 제조용 교반기에 넣고 약 5분간 작동시킨다. 이어서 증류수와 수용성 계면활성제의 혼합물을 에멀션연료 제조장치에 넣은 다음 20kg의 증류수를 추가로 넣고, 이소프로필 알콜 4kg, 세탄가 향상제 400g을 제조장치에 넣는다.

마지막으로 모든 준비가 끝난 후에 교반기를 15분 동안 작동시킴으로써 연

료제조는 끝이 난다.

연료와 첨가제의 계량은 전자저울로 측정하였으며, 특히 세탄가 향상제의 첨가량 계량은 1/100g까지 측정 가능한 정밀 전자저울에 의하여 행하였다. Table 3.4은 에멀션연료의 조성비를 표로서 나타낸 것이다.

Table 3.4 Component of the 15% emulsion

Item	Weight
Diesel oil	162kg
Distilled water	30kg
Iso propyl alcohol	4kg
Water surfactant	1kg
Oil surfactant	3kg
Cetane improver	0.4kg

#### IV. 實驗結果 및 考察

본 실험에서는 물 첨가량이 15%이고 세탄가 향상제가 0.2%인 에멀션연료를 중심으로 실제 상용버스의 디젤기관에 적용하여 동력계에서 기관의 D-13 모드 내구실험을 수행하면서 부하에 따른 디젤연료와의 연료소비율을 측정 비교하고 동시에 기관 배기가스인 CO, HC, NO<sub>x</sub> 및 PM을 측정하여 비교분석하였다. 본 연구에 사용된 연료는 일반 국내정유회사(H사)의 상용 디젤연료이며, 에멀션연료는 일정한 조성비에 의해 그 제조법에 따라 실험을 수행할 때마다 동일한 조건과 방법에 의해 기계적인 혼합기를 이용하여 제조한 것이다. 에멀션연료의 물리적 특성은 Table 4.1과 같고, 디젤연료에 비해 최고 2배 이상의 동점도를 나타낸다는 것을 알 수 있으며 실험에 사용된 연료는 디젤연료와, 물 첨가량이 13%, 15%, 17%, 세탄가 향상제의 첨가량이 0.2%, 0.3%, 0.5%, 1.0%인 에멀션연료이다. 본 연구에서는 기관성능에 거의 영향을 주지 않고 질소산화물 및 매연미립자를 동시에 저감시키는 최적 적정 수준인 물 첨가량 15%, 세탄가 향상제 첨가량 0.2%인 에멀션연료를 중심으로 비교분석하였다.

Table 4.1 Properties of fuels

Classification \ Fuel	Diesel oil	Emulsified fuel		
		13%	15%	17%
Density (kg/m <sup>3</sup> )	0.8369	0.8579	0.8619	0.8640
kinematic viscosity (m <sup>2</sup> /s)	$2.9 \times 10^{-6}$	$4.81 \times 10^{-6}$	$5.32 \times 10^{-6}$	$6.32 \times 10^{-6}$
Ratio of kinematic viscosity	1	1.66	1.83	2.17
Reference		IPA : 2wt%, Surfactant : 2wt%		

## 4.1 D-13 모드 기관내구실험

기존 디젤기관에서 에멀션연료를 사용할 경우 우려되는 몇 가지 문제점으로 는 물 첨가에 의한 기관연소실의 부식, 연료계통의 부식과 윤활유의 열화를 들 수 있다. 따라서, 에멀션연료를 이용하여 장시간 운전하고 전후의 기관 제 반 성능을 비교 관찰함으로써 연료가 기관에 미치는 기계적인 문제점을 분석 하기 위하여 내구실험을 수행하였다. 내구실험은 목적에 따라 다양하게 수행 되지만 본 연구에서는 연료의 영향을 평가하는 것이므로 연료공급계통과 연료 가 연소되는 연소실을 중심으로 살펴보았다. 본 실험에 사용한 기관은 실용화 되어 버스에 탑재되는 엔진으로서 디젤연료를 사용하는 경우 내구시험을 통과 한 제품이다. 따라서 본 실험에서는 이에 대한 검증 없이 물혼합 에멀션연료 를 적용하여 내구실험 전후의 기관상태를 비교검토하였다.

본 연구에서는 하루에 평균 8시간씩 2개월 반동안 500시간을 운전하였고 D-13 모드실험의 운전조건으로 반복해서 실시하여 토크, 연료소비율, 연소실 이상유무 등을 살펴보았다.

Figs. 4.1, 4.2는 디젤연료와 물 첨가량이 15%인 에멀션연료에 세탄가 향상 제의 첨가량이 0.2%, 0.5%, 1.0%인 경우의 연료소비율을 부하별로 비교한 것 이다. 에멀션연료가 수분의 미세폭발에 의한 연소촉진효과와 증기의 배출에 의한 열손실효과를 가진다는 것은 널리 알려진 사실이다. 따라서 열효율이 증 가하여 연료소비량을 줄일 수 있을 것으로 예상되지만 차량과 같이 운전조건 이 단순하지 않은 경우에는 특정 영역에서만 효과를 볼 수 있다. 반대로 부분 적으로는 역효과도 나타날 수 있게 된다. Fig. 4.1의 1200rpm인 경우를 보면 저부하에서는 에멀션연료를 사용했을 때의 연료소비량이 크게 나타나고 있다. 저부하 영역인 기관부하 10%에서 디젤연료만의 경우가 가장 낮은 연료소비율

을 나타내었고, 세탄가 향상제가 0.2% 포함된 경우가 23% 증가한 가장 높은 연료소비율을 보였으며, 세탄가 향상제가 증가하면 연료소비율이 낮아지는 경향이 있음을 알 수 있었다. 기관부하가 25% 이상이 되면 에멀션연료가 디젤연료만을 사용한 경우보다 좋은 결과를 나타내는데 세탄가 향상제의 첨가가 적을수록 좋은 결과를 가져왔다. 중부하 및 전부하 영역으로 가면서 기관부하가 50%, 75%, 100%가 되면 이러한 현상이 뚜렷해지며 기관부하 100%에서 7.4%의 연료소비율 향상을 나타낸다. 특히 10% 부하의 경우는 30% 이상 증가하고 있고 50% 부하 이상에서 에멀션연료의 연료소비량이 디젤연료보다 작게 된다. 이것은 저부하에서는 연소온도가 낮으므로 수분의 미세폭발 효과가 크게 떨어지게 되면서 나타나는 현상이며 75% 부하 이상에서는 에멀션연료의 열효율이 증가하고 있음을 나타낸다. 따라서 기관의 운전 영역이 고부하 영역에 분포할 경우 열효율은 크게 증가할 수 있으므로 실제 차량에서의 연비는 운전조건에 따라서 큰 효과를 볼 수 있을 것으로 예상된다.

Fig. 4.2의 2000rpm의 경우도 1200rpm의 경우와 매우 유사하게 저부하 영역인 10% 부하에서 순수 디젤연료인 경우가 가장 낮은 연료소비율로 16.5% 가량 에멀션연료보다 좋게 나타나는데 세탄가 향상제가 적을수록 높은 연료소비율을 보여준다. 20% 부하가 되면 모든 경우가 비슷한 연료소비율을 보여주지만 여전히 디젤연료가 가장 낮으며 50% 부하 역시 유사한 결과를 나타낸다. 이 영역의 중부하 정도까지는 세탄가 향상제의 첨가량이 많을수록 좋은 것을 알 수 있다. 75% 부하인 경우에는 디젤연료만의 경우보다 에멀션연료의 연료소비율이 3.8% 낮으며 세탄가 향상제의 첨가량이 적을수록 좋은 결과를 나타낸다. 이러한 효과는 전부하 즉, 100% 부하일 때 9.2%로서 더욱 커진다.

이러한 실험결과는 에멀션연료의 두 가지 특성인 물증발에 의한 연소실 냉

각효과 및 배기배출 열량증가와 액적의 미세폭발에 의한 연소촉진 효과의 상호작용으로 보여진다. 낮은 기관속도와 저부하의 경우에는 압축행정 시의 냉각손실과 공기누출손실의 증가에 의한 연소압력과 온도가 낮아지며 동시에 저부하이기 때문에 주연소기간 동안 낮은 온도가 유지된다. 따라서 물증발에 의한 연소실 온도의 추가적인 온도저하와 낮은 온도에서 발생하기 어려운 미세폭발 효과의 감소로 연소특성이 악화됨으로서 에멀션연료인 경우 연료소비율이 급격히 악화된다. 이러한 연료소비율 악화의 문제는 세탄가 향상제를 첨가하여 연료의 착화성을 개선함으로써 완화시킬 수 있다. 기관부하가 증가하고 기관속도가 증가하면 충분한 연소온도를 유지하기 때문에 물증발에 의한 온도 감소를 극복하고 미세폭발 효과에 의한 연소활성화로 효율이 향상된다. 이 영역에서는 세탄가 향상제가 이러한 효과를 오히려 억제하는 것으로 생각된다. 따라서 기관의 운전 영역이 고부하 영역에 분포할 경우 열효율은 크게 증가할 수 있으므로 실제 차량에서의 연료소비율은 운전조건에 따라서 큰 효과를 볼 수 있을 것으로 예상된다.

Figs. 4.3, 4.4는 내구실험 전후의 연료소비량을 측정하여 부하별로 비교한 것이다. 부하가 10%, 50%, 100%에서 연료소비량의 저감율은 대부분 같은 수준을 보이고 있으며 연료소비량의 절대값도 변화량이 매우 미미하게 나타나고 있다. 고부하에서 연료소비량 저감효과도 내구실험 전후에 거의 변동 없이 5% 이상 나타내고 있음을 알 수 있다. 500시간 운전 후의 기관배출물 변화나 연료소비량 측정 결과로부터 전반적인 기관특성변화는 나타나고 있지 않으며 기관성능 및 연료의 연소측면에서도 문제가 없음을 알 수 있다.

Fig. 4.5는 디젤연료와 세탄가 향상제 첨가량에 따른 에멀션연료의 토크를 비교한 그래프로서 디젤연료의 경우보다 에멀션연료의 토크가 중부하 영역인

1200rpm 4, 5mode에서는 13% 정도의 출력저하가 있었고 전부하인 6mode에서는 20%까지 출력감소가 발생했다. 그러나 2000rpm의 전부하 영역인 8mode에서는 1200rpm에 비해 출력의 감소가 9%밖에 되지 않았으며 중부하 영역의 출력감소도 크지 않은 것으로 보아서 2000rpm에서 기관이 더욱 안정됨을 알 수 있었다. 이는 단지 물의 첨가량만큼 나타나는 출력의 감소이며 물 첨가량이 15%인 에멀션연료에 세탄가 향상제를 달리한 경우는 토크에 영향을 미치지 않고 있음을 알 수 있고, 세탄가 향상제의 첨가량이 0.3%를 넘어 1.0%까지는 연료에 미치는 변화가 없음을 보인다. 그리고 Diesel\*의 경우는 에멀션연료의 출력을 기준으로 하여 디젤연료의 출력을 맞추어 D-13 모드실험을 수행하기 위한 것으로서 약간 오차가 있었으나, 디젤연료와 에멀션연료에 있어 토크가 오히려 2% ~ 5% 정도 증가하거나 동일 수준을 유지하여 Diesel\*와 에멀션연료를 비교해도 무리가 없었다.

Fig. 4.6은 물 첨가량이 15%인 에멀션연료의 기관내구실험 초기와 500시간 내구실험 종료시의 기관의 토크변화를 비교한 것으로 내구실험 전후의 토크 변화가 전구간에서 5% 내에서 이루어지고 있다. 이는 오차범위 내에 들어가는 것으로서 무시해도 좋을 만큼 에멀션연료가 기관의 출력이나 내구성능에 있어 나쁜 영향을 끼치지 않는 것으로 보인다.

Fig. 4.7은 에멀션연료가 디젤기관의 연소실에 미치는 영향을 알아보기 위해 500시간의 내구실험 후에 기관으로부터 실린더 헤드를 분리하여 찍은 실린더 헤드의 사진이다. 에멀션연료의 큰 동점도가 마모현상에 영향을 줄 것으로 생각되진 않았지만 물에 의한 부식은 우려되는 사항이므로 면밀한 검사를 수행하였다. Fig. 4.8은 근접촬영 사진으로, 보는 바와 같이 육안으로 검사하였을 때 일반적인 디젤연료 사용에 의한 헤드의 단면에 검은색의 카본이 두텁게 퇴

적되는 것과는 달리 흰 우유빛의 그을음 영역을 확인할 수 있고, 이는 에멀션 연료의 계면활성제에 포함된 나트륨 성분의 석출에 기인하는 것으로 생각된다. 특히 흡기밸브 주변에 많이 분포하고 있는 것을 알 수 있으며 육안으로 볼 때는 희고 미세한 가루가 뿌려져 있는 양상을 띠고 있다. 이것이 에멀션 연료에 첨가된 물질이 연소하면서 생긴 것으로 추정되며, 특별히 헤드를 구성하고 있는 금속과 반응하여 생긴 것으로는 생각되지 않는다. 밸브주위나 분사노즐에 묻어있는 퇴적물도 일반적인 디젤기관 수준으로서 디젤연료와 크게 상이한 점이 없는 일반적인 수준이었다. 기관내구실험 500시간 종료 시까지 에멀션 연료를 사용했다고 해서 기관 내구성 자체에 특별히 문제점을 야기하거나 사용에 문제점이 발생하지 않았음을 직접 실험에 의해 확인할 수 있었다. 이로부터 에멀션 연료가 기관의 내구성 자체에 디젤연료와 비교해서 문제가 없음을 알 수 있고, 다만 퇴적물의 성분을 분석하는 작업을 통해 기관에 미칠 수 있는 2차적인 영향은 정확한 평가가 필요하리라 생각된다.

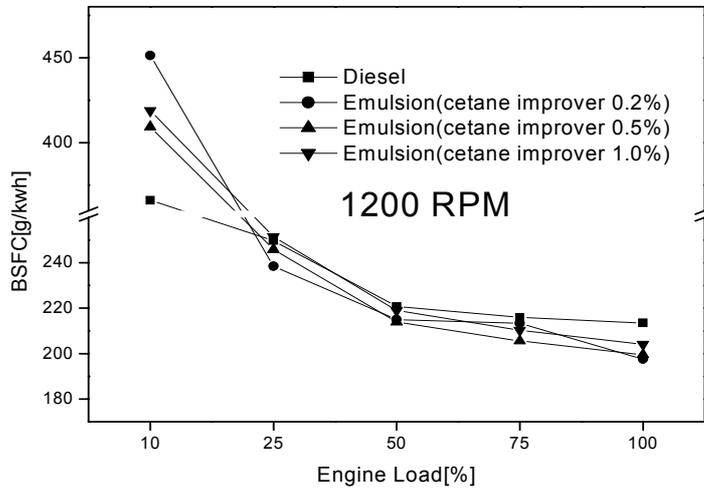


Fig. 4.1 Comparison of BSFC at 1200rpm

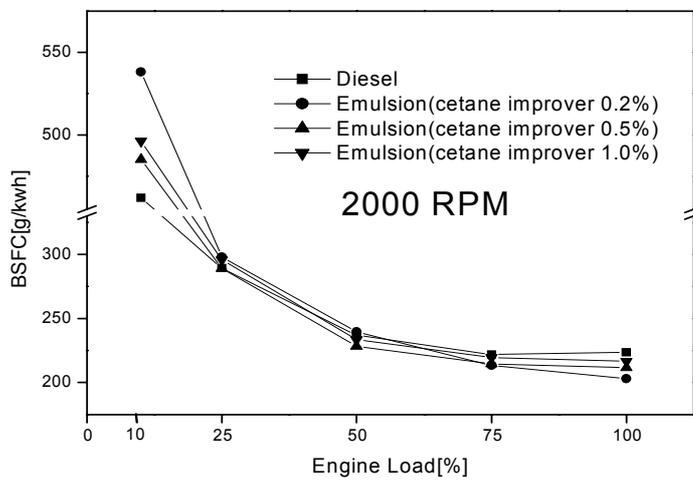
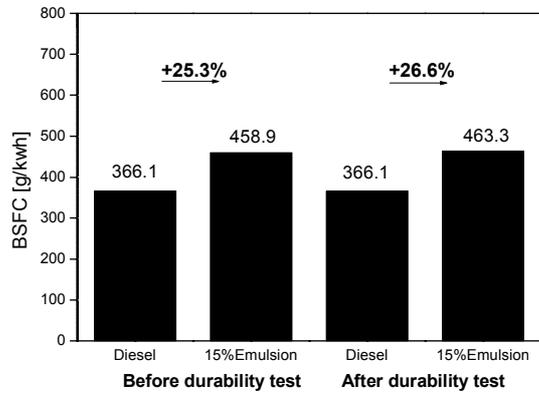
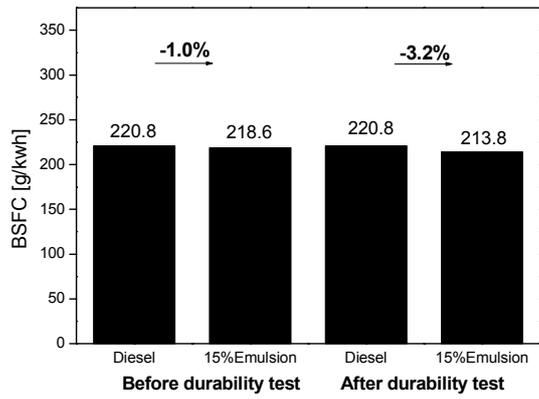


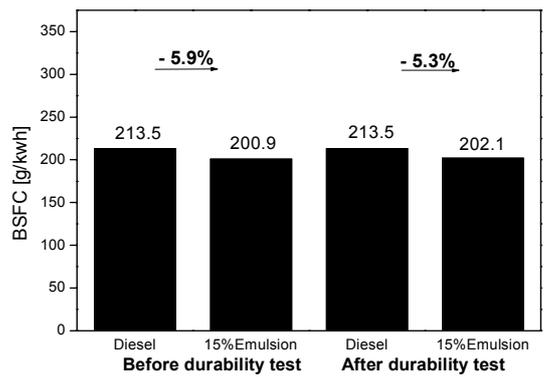
Fig. 4.2 Comparison of BSFC at 2000rpm



(a) 10% load

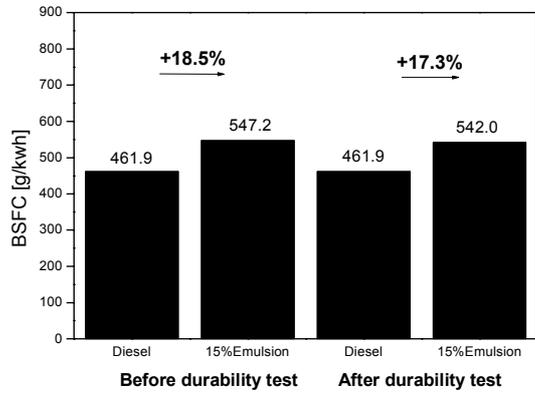


(b) 50% load

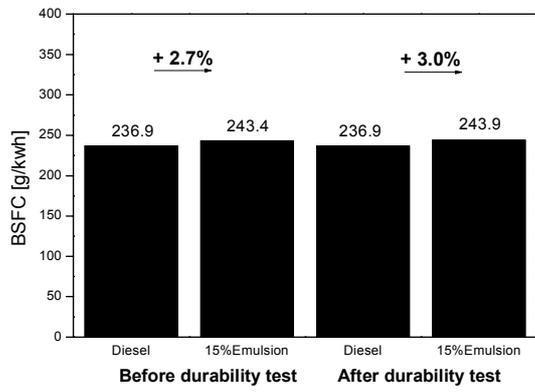


(c) 100% load

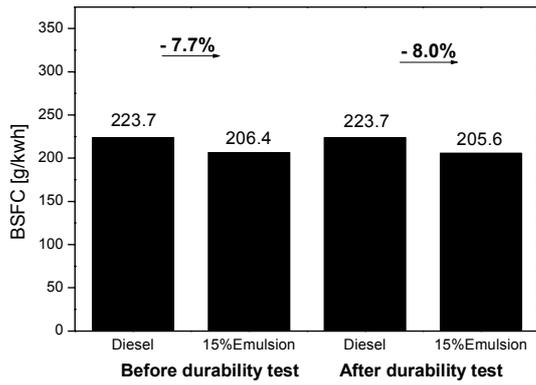
Fig. 4.3 Comparison of BSFC before/after durability test at 1200rpm



(a) 10% load



(b) 50% load



(c) 100% load

Fig. 4.4 Comparison of BSFC before/after durability test at 1200rpm

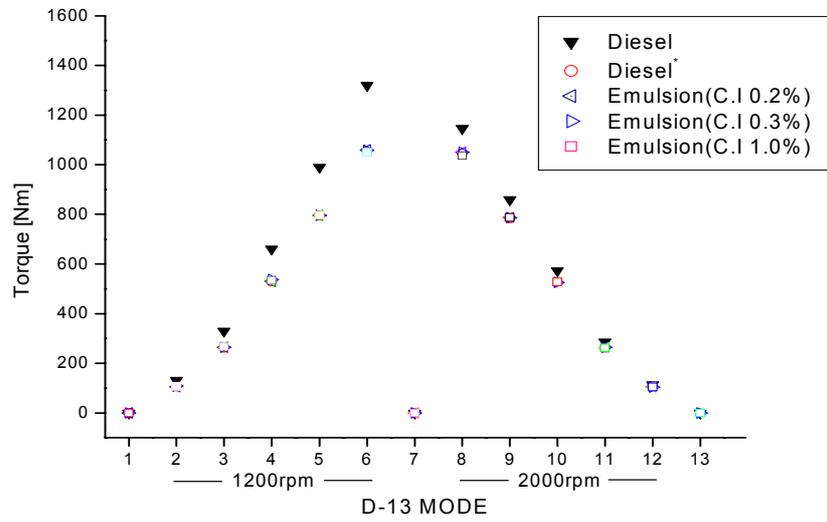


Fig. 4.5 Comparison of torque with water percent

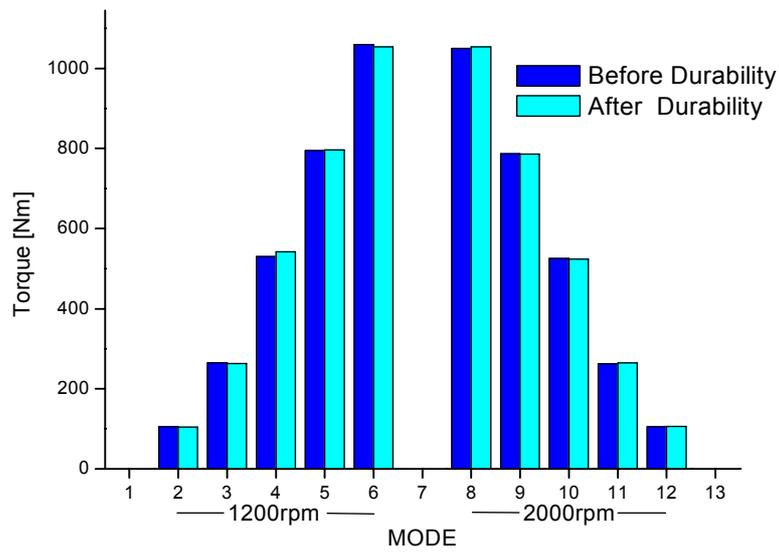


Fig. 4.6 Comparison of torque before/after durability test



(a) Cylinder head



(b) Piston crown

Fig. 4.7 Cylinder head and piston crown after durability test

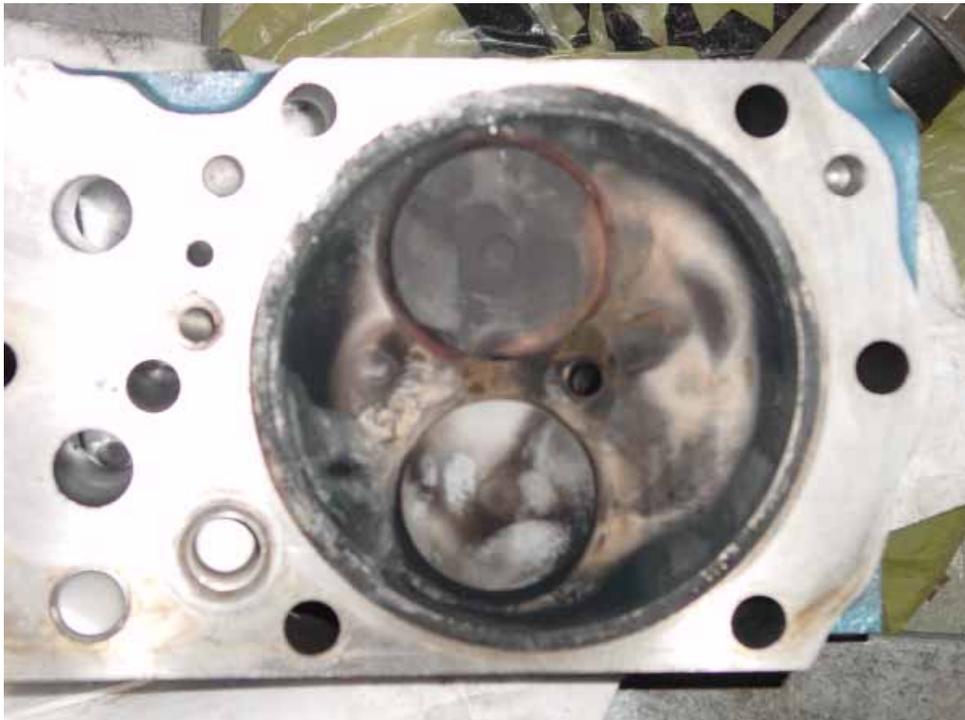


Fig. 4.8 Engine cylinder head after 500H durability test

## 4.2 D-13 모드 기관 배기가스

기관의 D-13 모드실험에 의한 배기가스 측정으로 본 연구에서 목적하는 PM과 NO<sub>x</sub>를 동시에 저감시킬 수 있는지를 확인하고, 실제 기관실험을 통하여 배기가스 배출 수준을 분석하였다.

에멀션연료는 일반적으로 알고 있는 불리한 분무특성에도 불구하고 미세폭발(micro-explosion)에 의한 연소촉진 효과 및 연소실온도 저하에 의해서 배기가스 오염물질 배출량을 크게 감소시킨다.

Table 4.2는 실험에 사용된 기관의 배기가스 측정치와 유럽의 각 나라 및 우리나라의 배기가스 규제치를 나타내고 있다. 우리나라의 경우 유럽 각 국의 환경규제에 대응하려면 새로 개발되는 기관에 있어 40% 이상의 NO<sub>x</sub>를 저감시켜야 하는 기술적인 부담을 안고 있다.

Table 4.2 Comparison of exhaust gases

Exh. gas Type/Country	NO <sub>x</sub>	THC	CO
D6AV	7.40	0.54	1.76
D6AC	7.81	0.54	0.94
Euro II	7.0	1.1	4.0
Euro III	5.0	0.6	2.0
Korea(2000.1.1)	9.0	1.2	4.9
Korea(2002.1.1)	6.0	1.2	4.9

Fig. 4.9 ~ 4.12는 내구실험 중에 기관에 사용한 연료별로 D-13 모드실험에 의한 배기가스를 측정하여 비교 분석한 것이다. 비교실험에 사용된 연료는 디젤연료와 물 첨가량이 13%, 15%인 에멀션연료, 그리고 에멀션연료일 때의 출력을 기준으로 D-13 모드 기관출력을 조정했을 때의 디젤연료이다. 먼저 Fig. 4.9의 NO<sub>x</sub> 배출량의 비교에서는 전체적으로 디젤연료보다 에멀션연료가 7% ~ 10% 정도 NO<sub>x</sub>의 배출량이 감소하였으며 Diesel보다는 에멀션연료일 때의 기관 최고출력을 기준으로 D-13 모드를 설정한 Diesel\*가 보다 많은 NO<sub>x</sub>의 배출을 보이고 있다. 17% 에멀션연료의 경우 15% 에멀션연료의 NO<sub>x</sub> 배출량보다 많이 배출되는데 이는 고부하 영역에서 연소특성 향상에 의한 연소실 고온화에 의한 것으로 생각된다.

Fig. 4.10은 PM의 경우로 에멀션연료를 사용한 경우가 Diesel 및 Diesel\*의 경우에 비해 PM이 약 30% 이상 감소하고 있음을 알 수 있으며, 내구실험을 수행하는 동안 NO<sub>x</sub>와 PM이 전반적으로 동시에 저감되는 경향을 나타내었다.

Figs. 4.11, 12의 CO 및 HC 배출량의 비교에서는 CO의 경우 디젤연료에 비해 에멀션연료를 사용한 경우 12% 정도 증가하는 경향을 보이고 있고 HC의 경우는 20% 정도의 증가를 나타내고 있다. 이는 저부하 영역에서 과도한 물 첨가로 인하여 연소가 완전히 이루어지지 못한 영향으로 판단되어진다.

Fig. 4.13 ~ 4.16은 15%의 물을 혼합한 에멀션연료에서 세탄가 향상제의 첨가량에 따른 배기가스를 디젤연료일 때를 기준으로 해서 비교한 것이다. 세탄가 향상제의 첨가량을 0.2%, 0.5%, 1.0%로 변화시켜 실험한 결과 전체적으로 보았을 때 첨가량이 증가하면서 HC, CO의 양은 감소하지만 NO<sub>x</sub> 및 PM의 경우는 세탄가 향상제의 첨가량에 따르는 변화가 거의 없음을 보였다. 디젤연료와 비교했을 때 그 감소량이 NO<sub>x</sub>가 평균 12%, PM의 경우는 32% 정도였

다. CO는 세탄가 향상제의 첨가량이 0.2%일 때 12% 증가하였고 0.5%, 1.0%는 거의 차이가 없었다. HC는 세탄가 향상제 첨가량 0.2%에서 36%의 증가를, 0.5%, 1.0%에서 27% 정도의 증가를 보였다. 여기에서 HC의 배출량이 가장 크게 세탄가 향상제 첨가량의 영향을 받고 있는 것을 알 수 있었다. 그러나 HC, CO의 증가량은 크게 우려할 정도는 아니며 배기규제도 충분히 만족할 수 있는 수준임을 알 수 있었다.

Fig. 4.17 ~ 4.20은 D-13 모드 내구실험 전후에 있어서 디젤연료 및 물첨가량이 15%인 에멀션연료를 사용한 경우의 기관 배기가스 변화량을 비교한 것으로서 에멀션연료를 사용하는 디젤기관의 내구성을 디젤연료를 사용하는 디젤기관에 대하여 상대적으로 평가할 수 있게 한다. Figs. 4.17, 4.18의 NO<sub>x</sub>와 PM의 내구실험 전후 배기가스의 변화량을 보면 두 물질은 디젤기관에서 특히 문제가 되고, 동시저감에 어려움을 겪고 있는 물질이지만 내구실험 과정 중, 혹은 후에 각각 약 12%와 35%의 저감효과를 보이고 있다. Figs. 4.19, 4.20의 CO와 HC는 디젤연료에 비해 에멀션연료의 경우가 많이 배출되고 있으며, 특히 HC의 경우는 배출량이 50% 가량이 증가한다. CO는 내구실험 전후로 평균 14% 정도가 증가했으나 CO의 배기규제치를 만족하므로 크게 문제가 되지 않는 것으로 보인다.

내구실험 전과 비교하여 내구실험 후에 NO<sub>x</sub>의 양이 증가하고 PM의 양은 감소하고 있으며 HC, CO의 값은 내구실험 전후 비슷하게 나왔다. 내구실험 전후의 NO<sub>x</sub> 저감율은 11.6%에서 12.3%로 증가하였고, PM의 저감율은 34.5%에서 32.1%로 감소하였다. 배기 수준이 내구실험 전후로 큰 변화가 없으며 이는 에멀션연료를 기관에 적용하는데 있어서 내구성능을 충분히 만족하고 있는 것으로 판단된다.

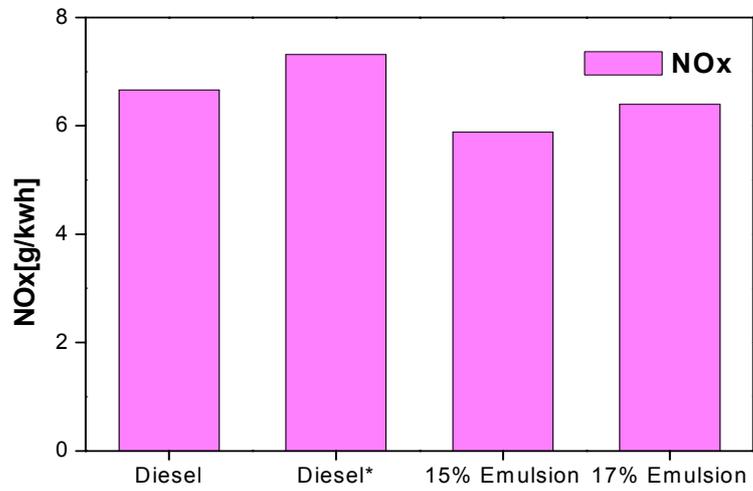


Fig. 4.9 Comparison of NOx

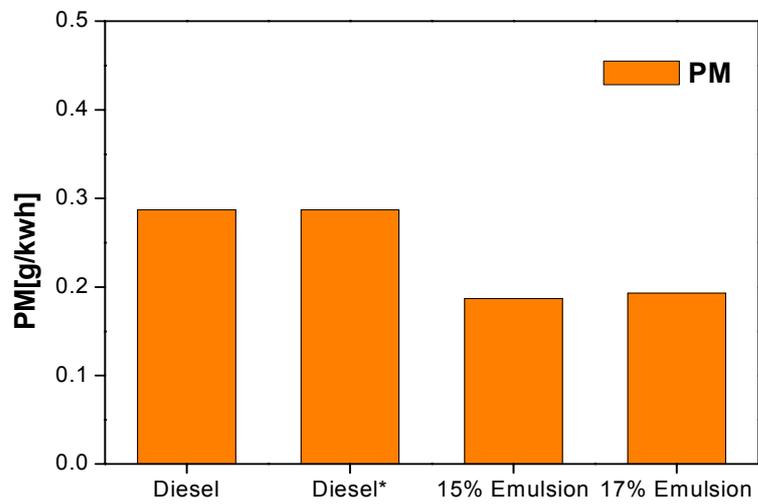


Fig. 4.10 Comparison of PM

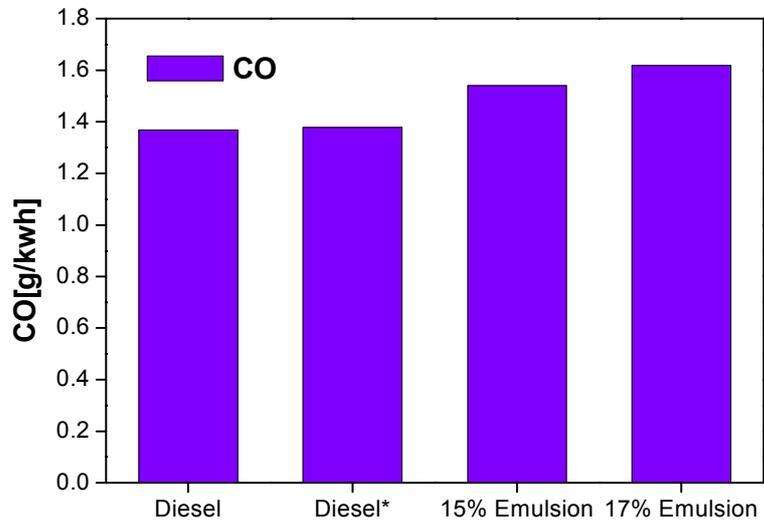


Fig. 4.11 Comparison of CO

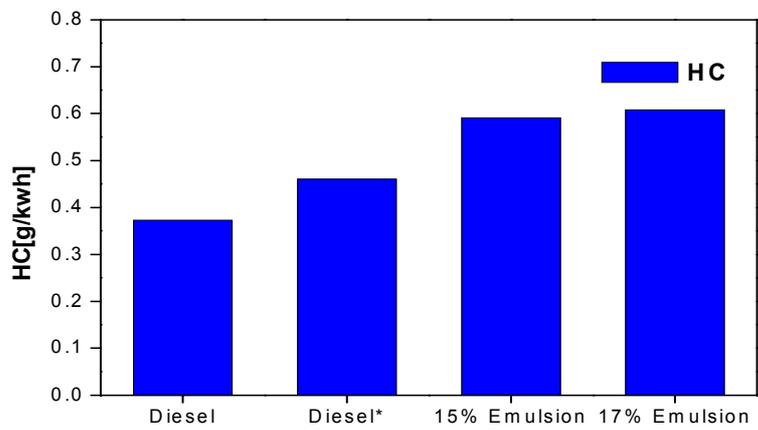


Fig. 4.12 Comparison of HC

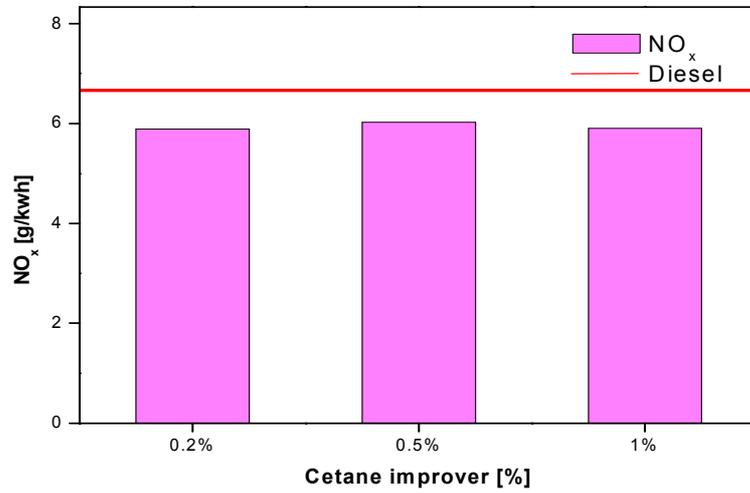


Fig. 4.13 Comparison of effects of adding cetane improver on NOx

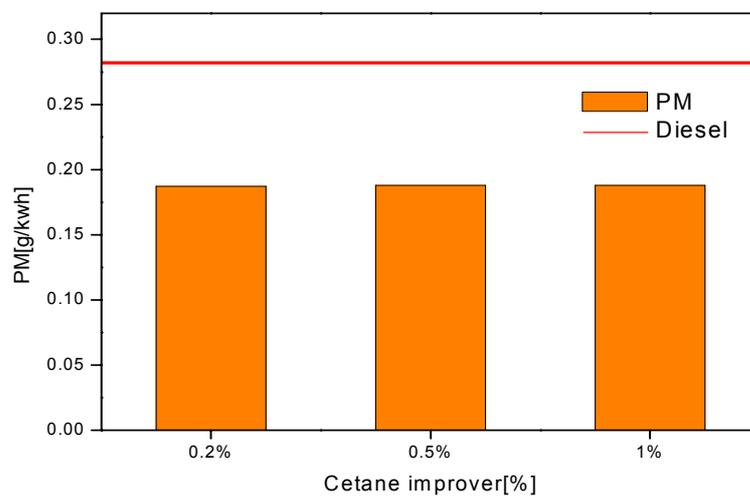


Fig. 4.14 Comparison of effects of adding cetane improver on PM

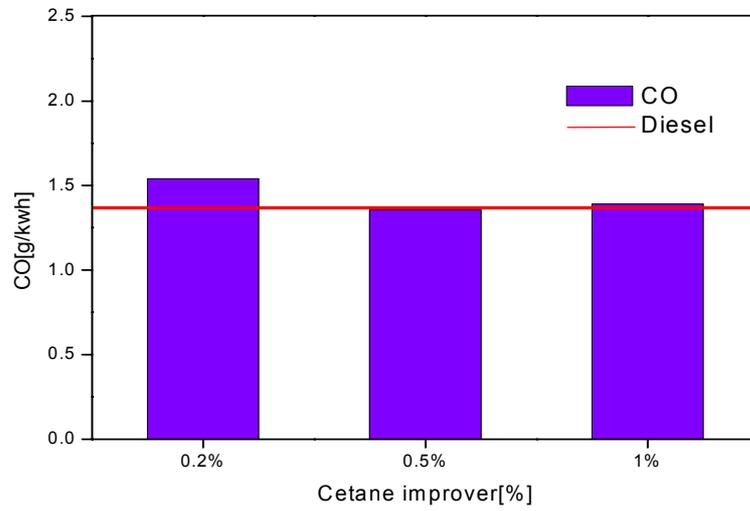


Fig. 4.15 Comparison of effects of adding cetane improver on CO

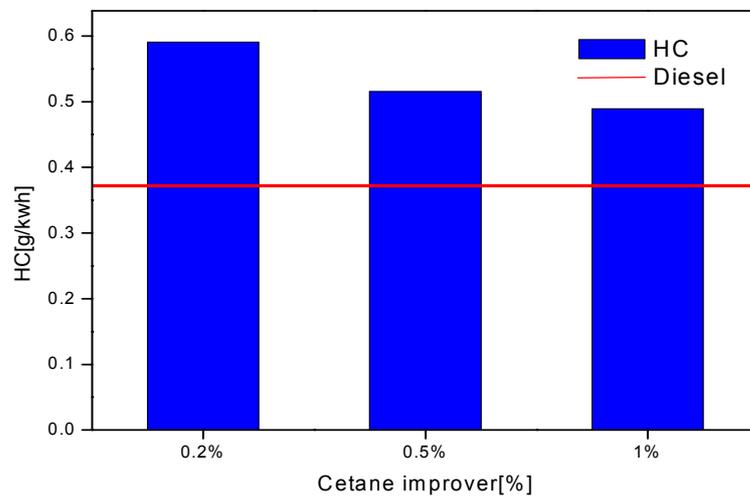


Fig. 4.16 Comparison of effects of adding cetane improver on HC

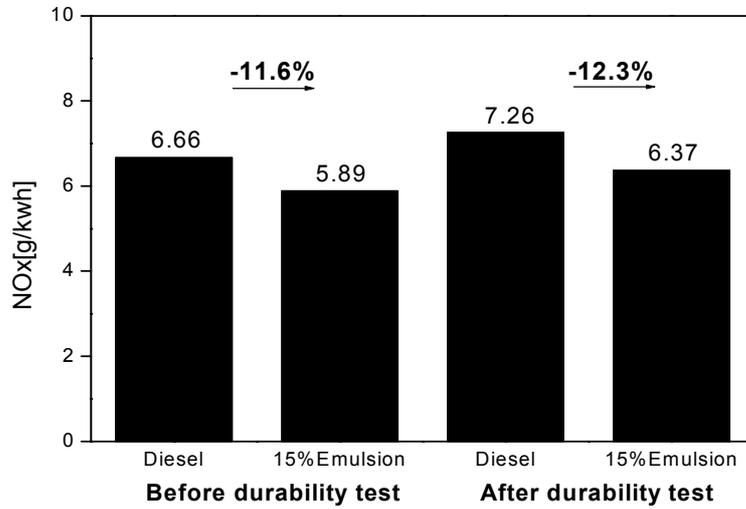


Fig. 4.17 Comparison of NOx before/after durability test

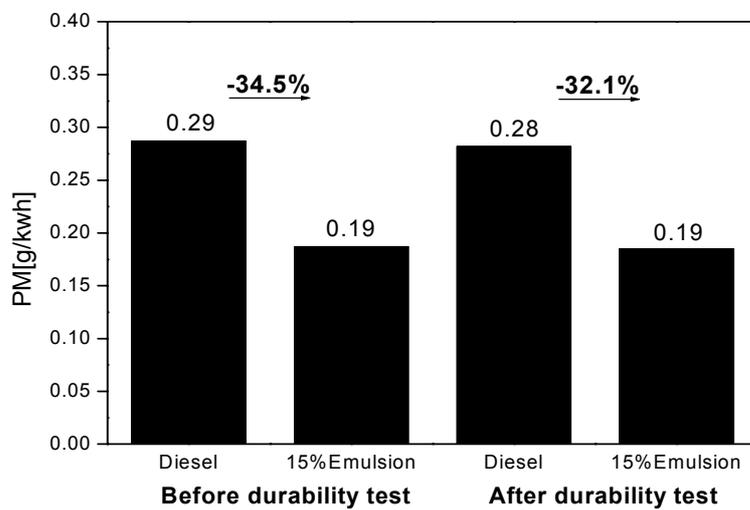


Fig. 4.18 Comparison of PM before/after durability test

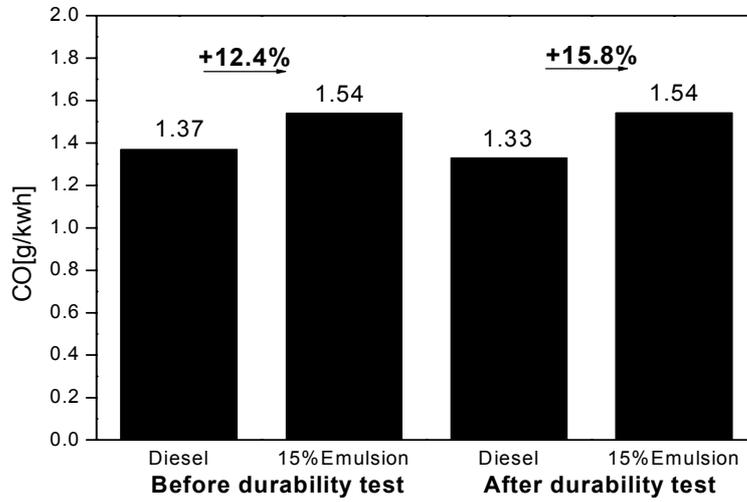


Fig. 4.19 Comparison of CO before/after durability test

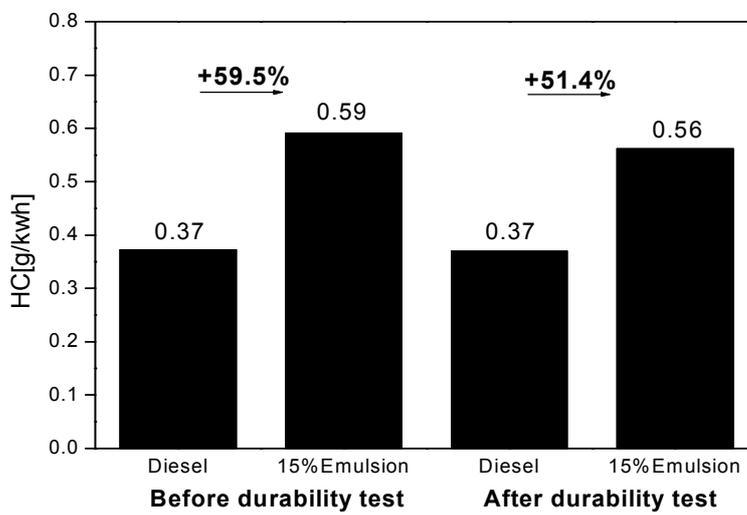


Fig. 4.20 Comparison of HC before/after durability test

### 4.3 연소압력 측정

에멀션연료와 디젤연료의 기관연소실에서의 연소과정을 비교하기 위하여 연소압력측정에 의하여 분석 검토하였다. 일반적으로 에멀션연료가 기존 운행차량에 특별한 개조없이 바로 적용되기 위해서는 디젤연료와 비교해서 연료의 세탄가가 비슷한 값을 가져야하는 조건을 만족해야한다. 이것은 연소압력곡선의 최대압력값이 나타나는 위치가 ATDC 0°에서 10° 근처에서 나타나는 것이 바람직하며 안정된 연소로 연료소비량 및 배기가스 측면에서 유리한 영향을 미친다. 에멀션연료의 물 첨가량을 13%, 15%, 17%로 변화시켜 각각 1200rpm, 2000rpm에서 3가지의 부하조건(270Nm, 445Nm, 890Nm)으로 측정하였으며 연소압력은 각 조건별로 400사이클씩 측정 후 평균을 구하여 처리하였다. 기관에서 연료의 분사시기는 BTDC 12°이며, 세탄가 향상제 첨가량은 연료가 가장 안정하다고 판단된 0.2%를 유지하였다.

Figs. 4.21, 22는 에멀션연료의 부하별 연소압력을 나타내고 있다. 2000rpm의 경우 1200rpm의 경우보다 전반적으로 안정적인 압력특성을 보이고 있으며, Fig. 4.22(a)에서 각 토크에서 연료분사시작 이후 압력을 보면 상사점 부근에서 압력강하가 이루어지고 있으며 또한 착화지연기간이 디젤연료(Fig. 4.30 ~ 32 a참조)의 경우보다 증가한 것을 알 수 있는데 이는 물 첨가로 인한 수분 증발 시의 연소실 냉각에 의한 것과 에혼합연소의 활성화와 함께 미세폭발의 영향, 혹은 착화지연 과도에 의해 연소가 불안정한 특성을 나타내는 것으로 생각되어진다. Fig. 4.22(b)를 보면 에멀션연료의 연소는 배기과정 중에 20 0° ~ 370° 부근 배기과정 중의 압력이 디젤연료(Fig. 4.30 ~ 32 b참조)보다 모든 부하에서 다소 높은 압력특성을 나타내고 있는데 이는 에멀션연료의 경우 디젤연료와는 달리 물의 첨가로 디젤 연소생성물과 잉여공기량에 추가로

증기가 포함된 영향과 또 하나의 이유로 배기과정 중에 증발수분에 의해 생성된 미연가스의 연소로 인한 영향으로 압력이 상승하였을 것으로 판단되어진다. 연소말기에 배기밸브가 열리면서 배기가 이루어지는 시점인 180° 부근까지 압력이 떨어지고 흡기밸브가 열리면서 배기밸브가 닫히는 360°부근에서 1bar 정도의 압력강하가 일어나고 있음을 알 수 있다. 최고연소압력은 2000rpm, 890Nm의 경우가 1200rpm의 경우보다 약 15bar 정도 높게 나타났다.

Fig. 4.23 ~ 4.26은 디젤연료와 15% 에멀션연료의 연소특성을 비교한 압력선도로 전체적으로 고부하로 갈수록 연소압력이 디젤연료와 유사하게 나타나 연소의 안정화를 이루고 있음을 알 수 있다. 1200rpm, 445Nm 및 890Nm의 경우 물의 수분증발에 의한 효과로 인하여 디젤연료보다 에멀션연료가 착화 지연이 길어짐을 알 수 있으나 고속회전 및 고부하로 갈수록 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 다만 2000rpm, 445Nm 및 890Nm의 경우 연소말기에 배기가 이루어지는 과정에서 180° 부근에서 압력강하가 이루어지고 배기과정동안 부분적으로 압력이 1bar 정도 상승 혹은 감소되는 것을 확인할 수 있다. 이는 두 연료가 동일하게 비슷한 선도를 나타내는 것으로 보아 미연퇴적 연료가 배기행정 중에 연소되는 것으로 특별히 에멀션연료의 연소상에 문제는 없다고 생각이 된다.

Fig. 4.27 ~ 4.29는 최대토크가 나오는 1200rpm에서 0°에서 10° 부근의 연소압력을 보여주는 그림이다. 압력선도에서 나타나듯이 저부하 및 중부하 영역인 270Nm, 445Nm에서는 에멀션연료가 디젤연료에 비하여 압력상승이 늦게 일어나고 있는 것을 알 수 있다. 에멀션연료의 착화지연이 디젤연료에 비해 4°에서 5° 정도 일어나는 것으로 이렇게 되면 디젤기관에서는 연료의 예

혼합연소량이 증가하여 연소소음의 증가 및 이상연소의 가능성을 잠재하게 된다. 445Nm의 경우가 270Nm의 경우보다 착화지연이 약 1° 정도 짧아지는데 이것은 연료분사량 증가 및 연소온도의 상승으로 에멀션연료의 활성화가 촉진된 것으로 생각된다. 그리고 최고압력인 10° 부근에서 이상연소압력이 보이는 것으로 보아 중부하에서 그리 안정된 연소가 이루어지는 것으로 보이진 않지만 디젤연료인 경우도 비슷한 경향을 보이고 있는 것으로 보아 문제가 될 것으로 생각되진 않는다. 고부하 영역에 해당하는 890Nm의 경우에는 에멀션연료의 경우가 더욱 가파르게 연소압력이 상승하는 것을 알 수 있으며, 이것 또한 연료의 착화지연이 길어지는 것을 의미하는 것으로 해석된다. 특히 고부하 영역에서는 최대압력이 나타나는 곳의 위치가 디젤연료인 경우와 동일함으로 짧은 시간 안에 빠른 압력상승을 동반하게 되어 기관의 내구성 측면에서 나쁜 영향을 줄 수도 있을 것으로 생각된다. 전반적으로 에멀션연료의 수분함량비에 따라서 연소압력선도에는 큰 차이를 보이지 않는다.

Figs. 4.30 ~ 4.32는 2000rpm에서 부하별 연소압력곡선을 나타내는 그림이다. 1200rpm과 비교하여 정성적으로 큰 차이를 보이지 않으나 착화지연이 2°에서 3° 정도로 줄어든 것을 알 수 있는데 이것도 전술한 바와 같이 에멀션연료가 고회전, 고부하 또는 고출력 영역에서 연소에 유리한 특성을 보이는 것을 나타낸다.

에멀션연료의 연소압력을 측정한 결과 연소압력선도가 디젤연료에 비하여 보다 매끄럽지 못한 성향을 띄고 있으며 이는 저부하 영역에서 더 심하게 나타나고 있다. 연소실 최고압력 이후에 압력이 떨어지면서 매끄럽지 못하게 압력이 떨어지고 있는 것은 불완전연소에 의한 이상연소로 판단되어진다. 한가지 특이한 점은 2000rpm에서 최고압력 이후 압력이 강하하다가 180°전 배기

밸브가 열리면서 배기행정 말기까지 즉, 흡기밸브가 열리는 시간(360°부근) 사이에 이상압력이 발생한다는 것이다. 이는 엔도스코프(endoscope)와 같은 실험장치에 의한 연소실의 촬영에 의해 정확한 원인을 밝혀야 알 수 있겠으나 단순히 실험에 있어 발생한 오차이거나, 연소실 벽 또는 실린더 가장자리에 퇴적되거나 미연소된 에멀션연료가 연소과정 말기에 부분적으로 연소가 이루어진 결과로 추정되어진다.

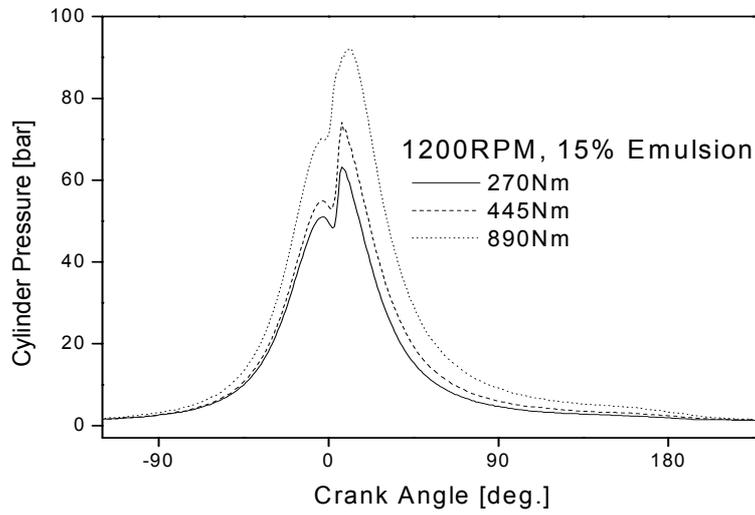


Fig. 4.21(a) Part load cylinder pressure at 1200rpm during the combustion process

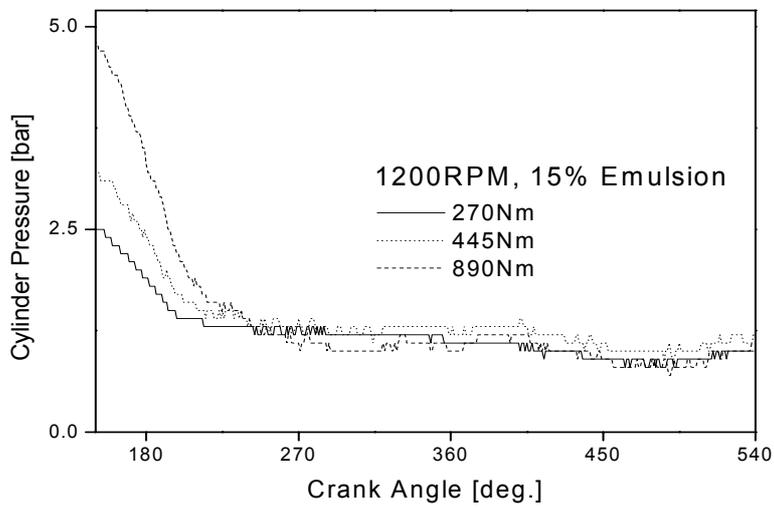


Fig. 4.21(b) Part load cylinder pressure at 1200rpm during the exhaust and intake process

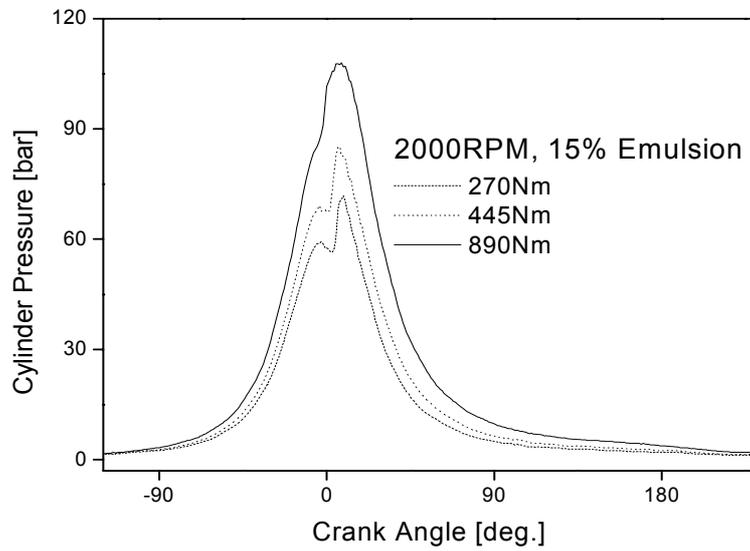


Fig. 4.22(a) Part load cylinder pressure at 2000rpm during the combustion process

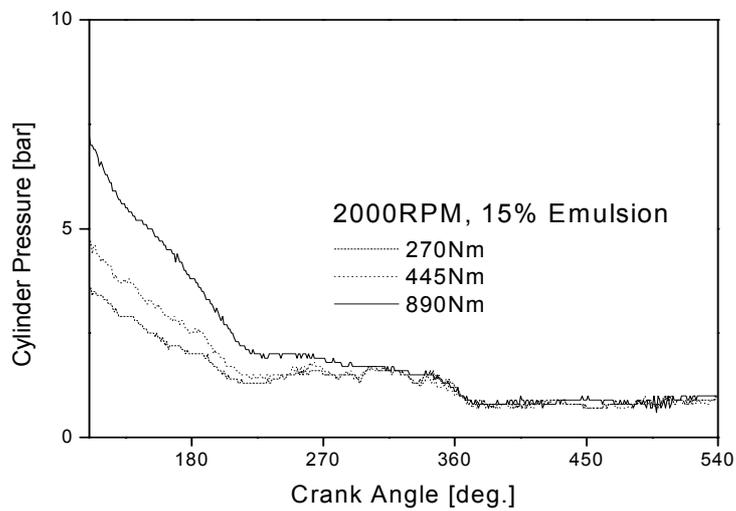


Fig. 4.22(b) Part load cylinder pressure at 2000rpm during the exhaust and intake process

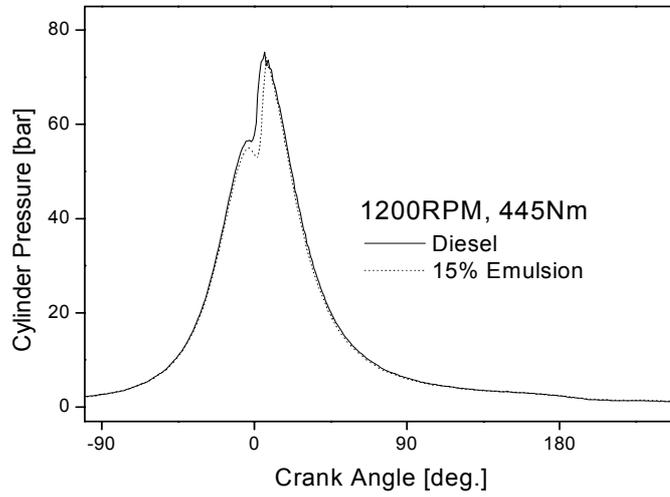


Fig. 4.23(a) Cylinder pressure at 1200rpm/445Nm during the combustion process

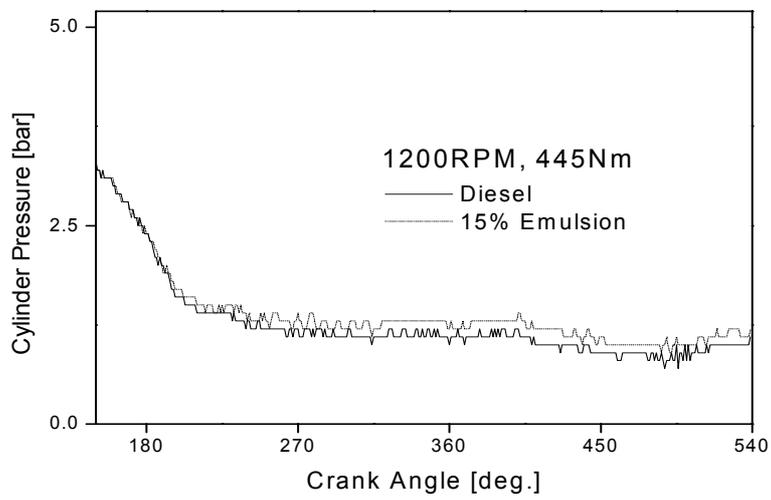


Fig. 4.23(b) Cylinder pressure at 1200rpm/445Nm during the exhaust and intake process

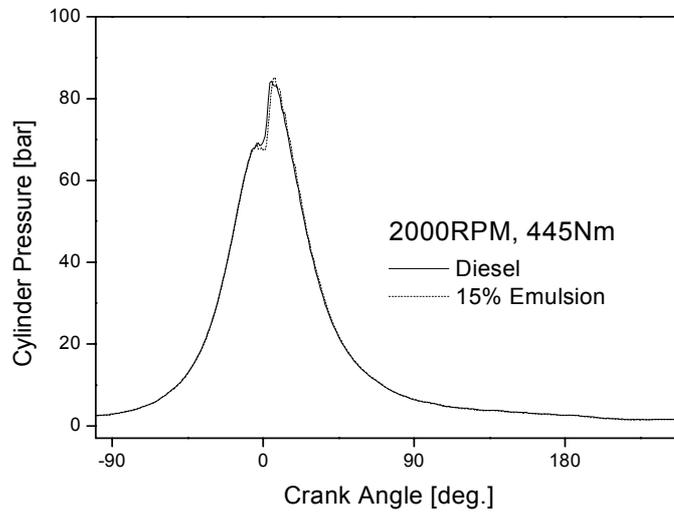


Fig. 4.24(a) Cylinder pressure at 2000rpm/445Nm during the combustion process

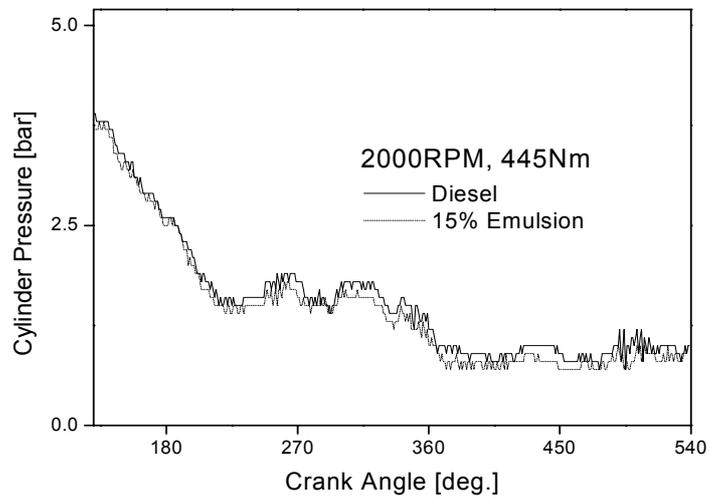


Fig. 4.24(b) Cylinder pressure at 2000rpm/445Nm during the exhaust and intake process

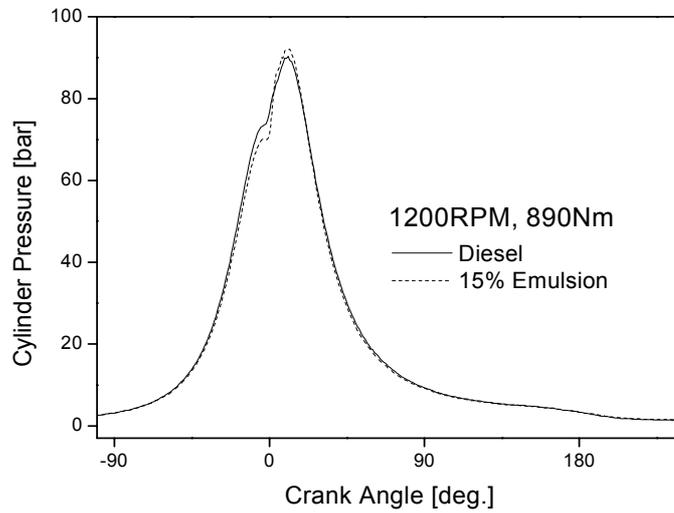


Fig. 4.25(a) Cylinder pressure at 1200rpm/890Nm during the combustion process

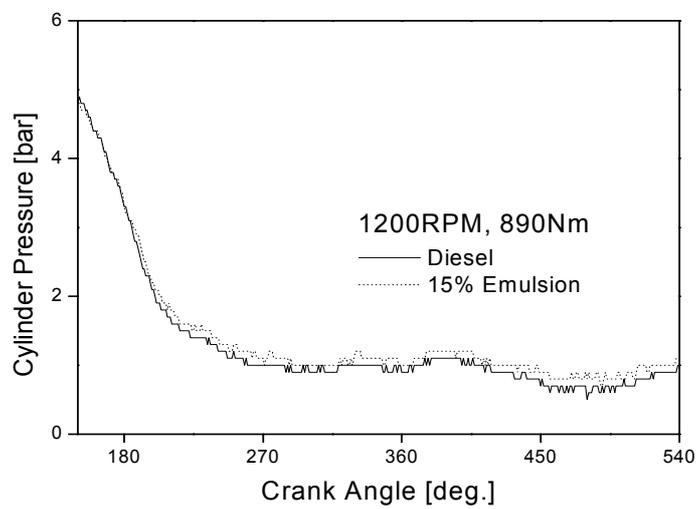


Fig. 4.25(b) Cylinder pressure at 1200rpm/890Nm during the exhaust and intake process

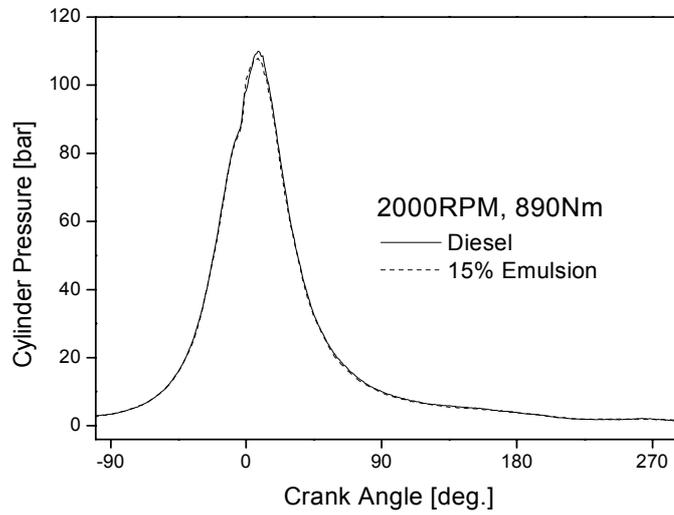


Fig. 4.26(a) Cylinder pressure at 2000rpm/890Nm during the combustion process

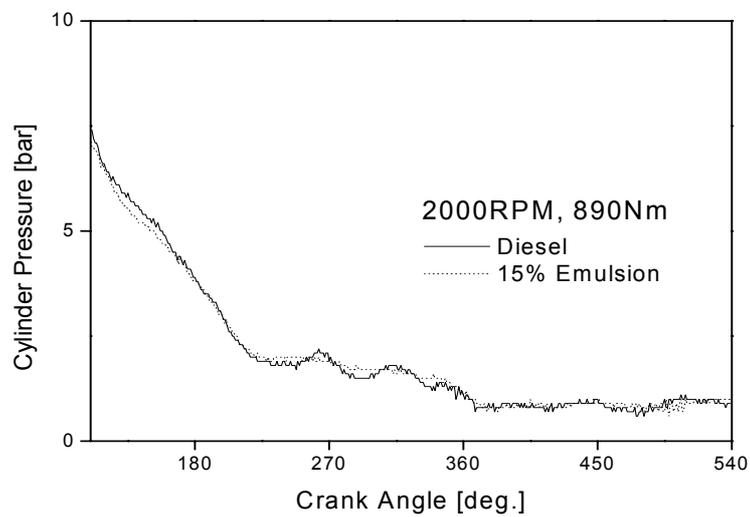


Fig. 4.26(b) Cylinder pressure at 2000rpm/890Nm during the exhaust and intake process

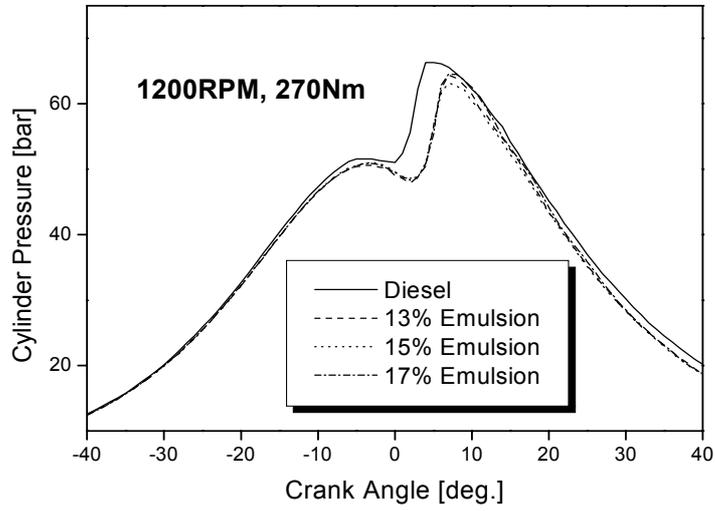


Fig. 4.27(a) Cylinder pressure at 1200rpm/270Nm during the combustion process

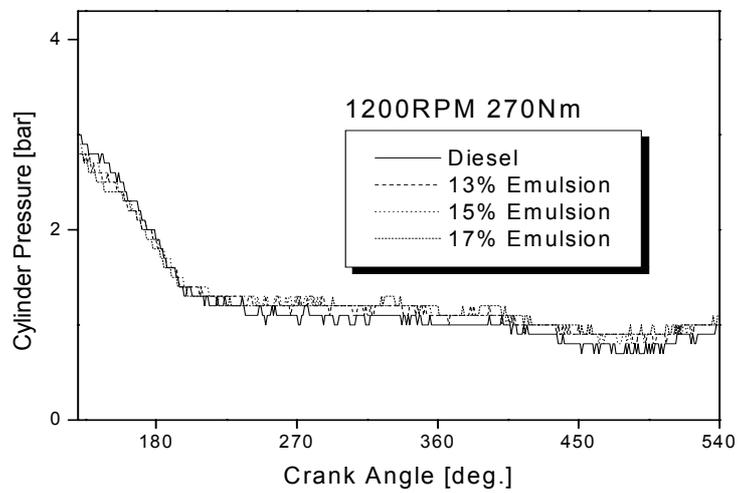


Fig. 4.27(b) Cylinder pressure at 1200rpm/270Nm during the exhaust and intake process

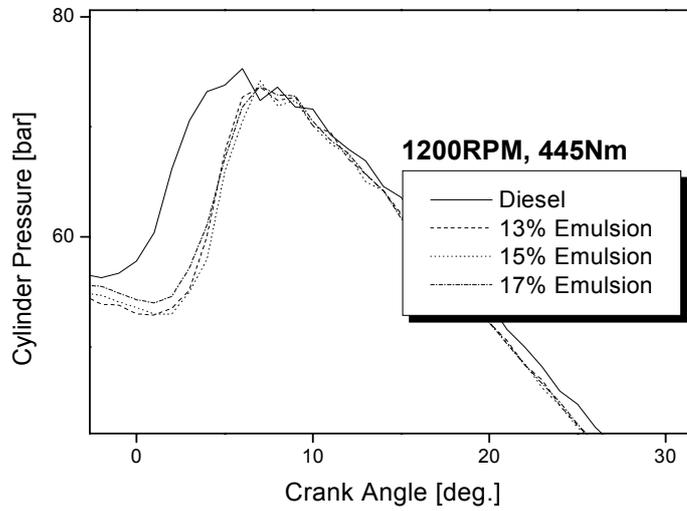


Fig. 4.28(a) Cylinder pressure at 1200rpm/445Nm during the combustion process

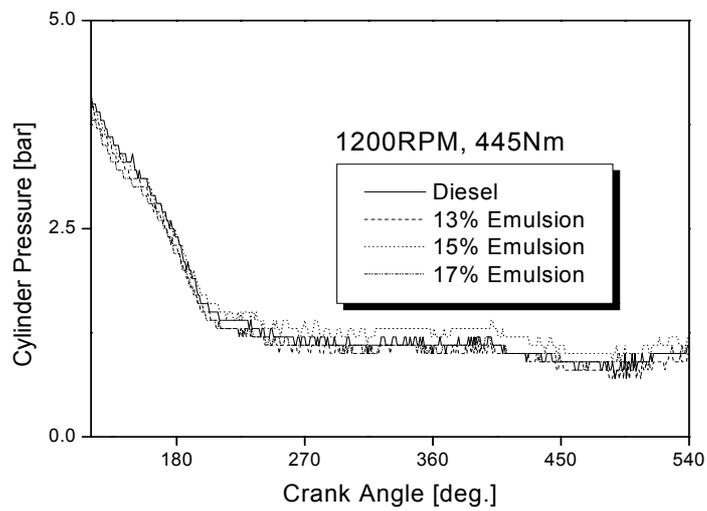


Fig. 4.28(b) Cylinder pressure at 1200rpm/445Nm during the exhaust and intake process

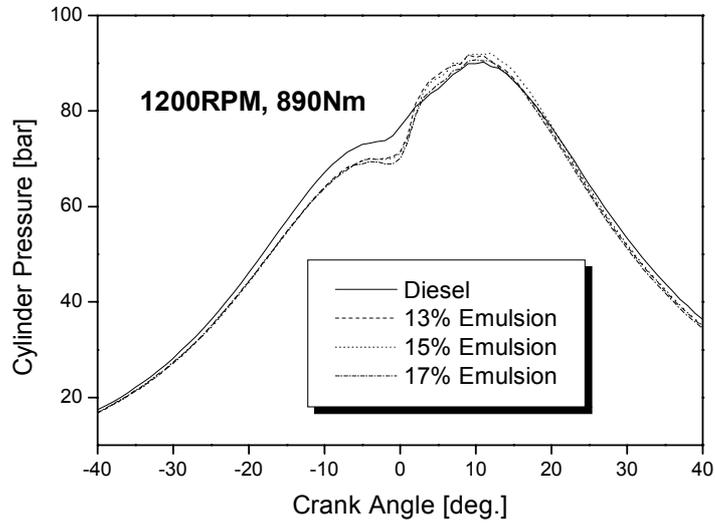


Fig. 4.29(a) Cylinder pressure at 1200rpm/890Nm during the combustion process

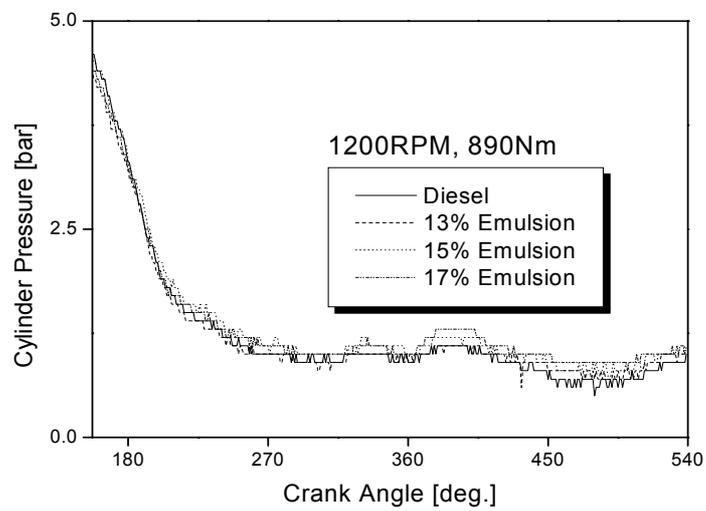


Fig. 4.29(b) Cylinder pressure at 1200rpm/890Nm during the exhaust and intake process

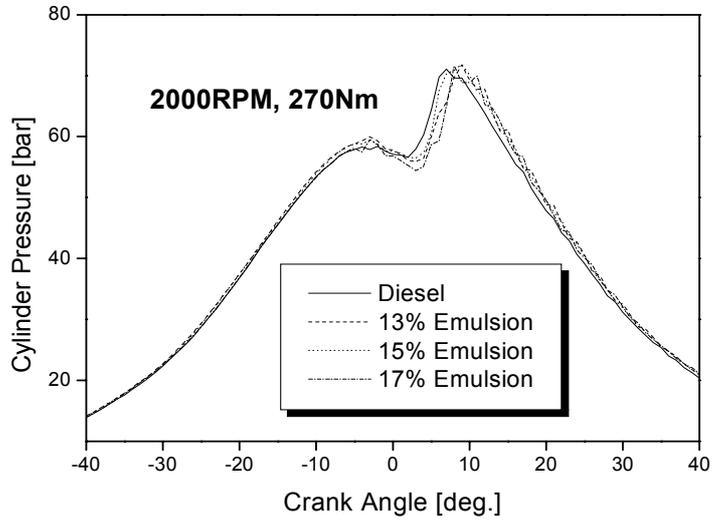


Fig. 4.30(a) Cylinder pressure at 2000rpm/270Nm during the combustion process

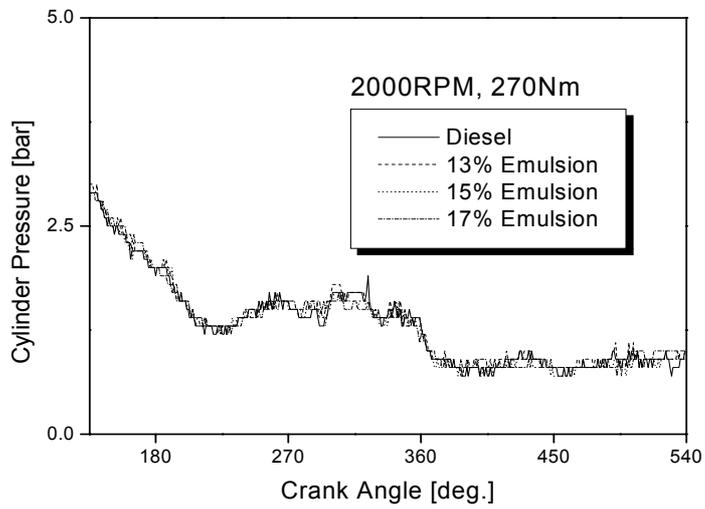


Fig. 4.30(b) Cylinder pressure at 2000rpm/270Nm during the exhaust and intake process

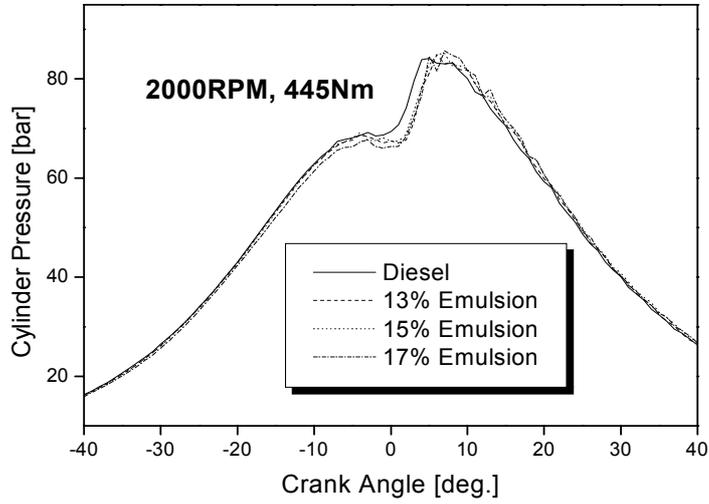


Fig. 4.31(a) Cylinder pressure at 2000rpm/445Nm during the combustion process

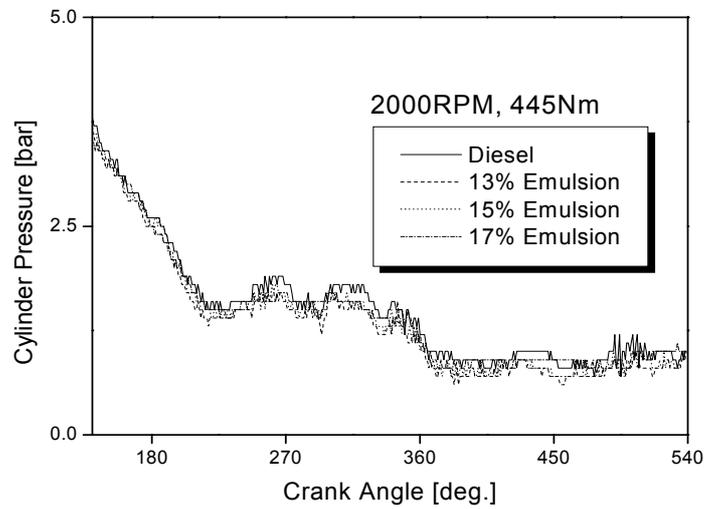


Fig. 4.31(b) Cylinder pressure at 2000rpm/445Nm during the exhaust and intake process

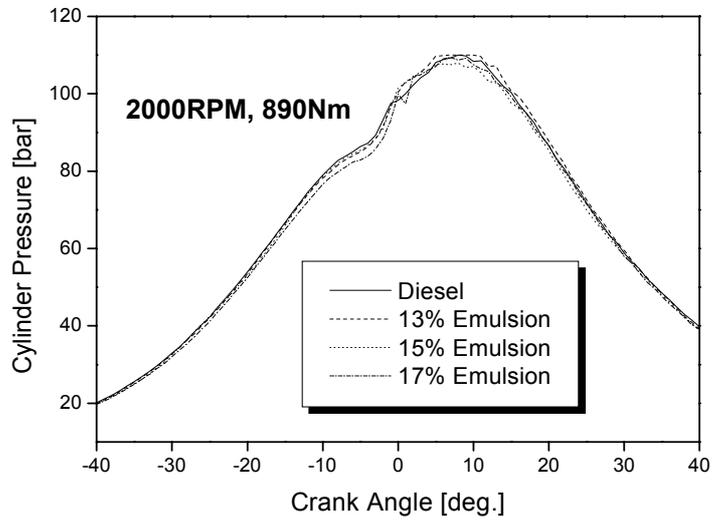


Fig. 4.32(a) Cylinder pressure at 2000rpm/890Nm during combustion process

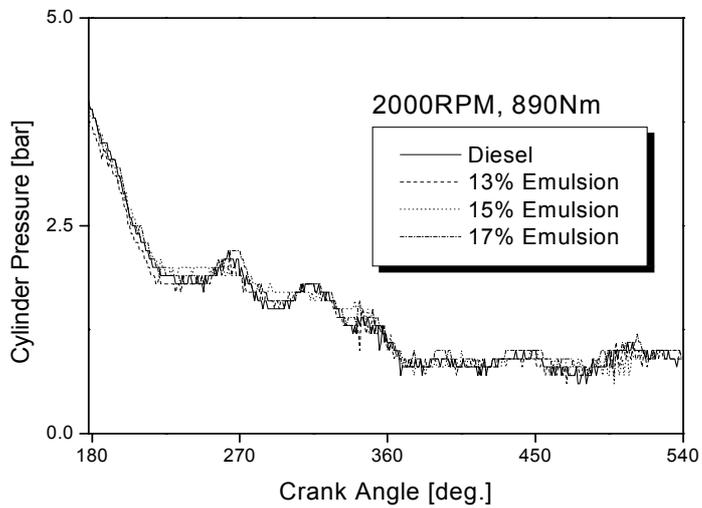


Fig. 4.32(b) Cylinder pressure at 2000rpm/890Nm during the exhaust and intake process

#### 4.4 연료노즐 연료분사량 측정 및 기관소음 측정

Fig. 4.33은 500시간 내구실험을 수행 전후에 6개 연료노즐의 에멀션연료 분사량 변화를 측정한 결과로, 에멀션연료는 연료분사계통에 가장 큰 영향을 미칠 수 있으므로 연료노즐을 따로 분리하여 연료분사 테스트를 실시하였다. 마모나 부식이 발생할 경우 분사량 변화가 관찰될 수 있다. 연료분사량 측정을 위하여 연료노즐 6개와 연료분사펌프를 기관에서 분리하여 Fig. 3.5와 같은 실험장치에서 반복하여 일정시간 동안 분사하는 동안의 분사량을 측정하였다.

분사량은 내구실험 후에 약 1ml 정도(1%) 증가하였으나 무시할 수 있을 만큼 미미한 변화로서 큰 차이가 없었음을 알 수 있었다. 이 같은 결과는 내구실험 전후의 랙 위치 설정의 오차로 생각되며 내구실험동안 마모에 의한 분공 확대로는 보이지 않는다. 측정값이 오차범위(1%) 내에서 큰 차이를 보이고 있지 않으며 노즐별 측정량도 고른 분포를 보이고 있다. 따라서 연료분사계통은 내구실험 전후로 정상적인 작동이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4.34는 물 첨가량이 15%인 에멀션연료를 적용한 기관과 기존 디젤연료를 사용한 경우의 기관소음을 B & K사의 모델 2230으로 측정하여 비교한 실험결과이다. 실제 기관소음이 사람의 귀에 들리기는 에멀션연료가 좀 더 시끄럽게 느껴졌으나 실험결과 중부하 정도인 1200rpm의 520Nm에서는 차이가 나지 않았고, 2000rpm의 1050Nm에서 0.6dB(사람이 구별하기 어려움)의 차이가 났을 뿐 디젤연료를 사용했을 때와 비교해 보았을 때 기관소음(sound level)이 거의 동일하였다. 에멀션연료가 실제로 더 시끄럽게 들리는 이유는 주파수대의 차이로 인한 체감소음으로 인한 것으로 판단되며, 소음 에너지로서 비교할 때에는 비슷하거나 큰 차이가 없음을 확인하였다.

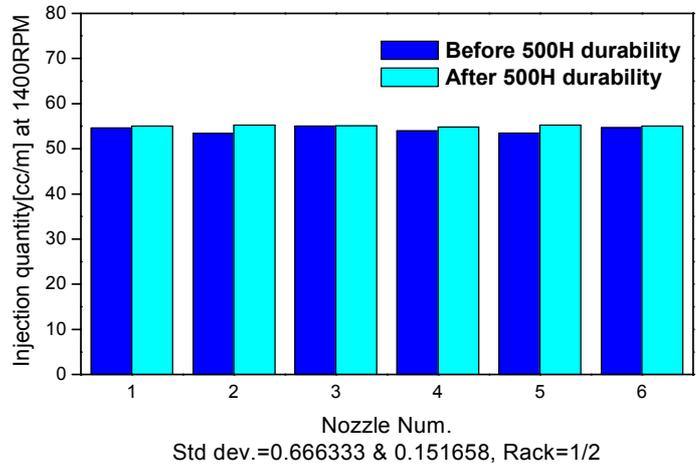


Fig. 4.33 Nozzle injection quantity before/after durability(ml)

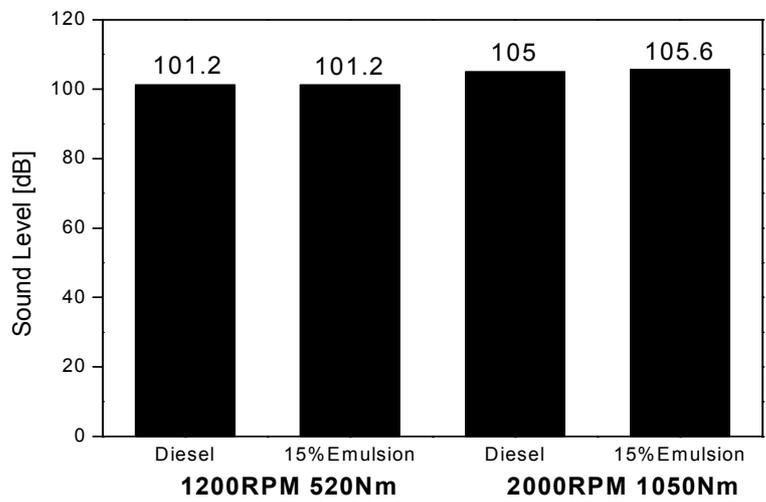


Fig. 4.34 Sound level with water percent

## V. 結論

에멀션연료가 디젤기관에 미치는 영향을 파악하기 위하여 D-13 모드시험 및 내구실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 에멀션연료를 디젤기관에 적용하였을 때 물 첨가량만큼의 출력이 감소하고 있으나 이는 단지 물 첨가에 의한 출력의 감소일 뿐 기관출력에 악영향을 주지는 않았다.

2. 연료소비율은 저부하 영역에서 에멀션연료를 적용한 경우가 디젤연료보다 높게 나타나고, 고부하 영역으로 갈수록 우수한 결과를 나타내어 전부하에서 7%의 연료소비율 감소를 가져왔다. 이러한 현상은 1200rpm의 경우보다 2000rpm에서 더 명백하게 나타났다.

3. D-13 모드 내구실험 후 기관의 연소실과 연료분사계통에서 특별한 문제점을 발견할 수 없었으며, 이는 에멀션연료가 기관 내구성 자체에 디젤연료와 비교해서 문제가 없음을 보여준다. 다만, 연소실 내부 퇴적물의 성분분석을 통해 기관연소실에 미칠 수 있는 2차적인 영향에 대한 분석이 필요하다.

4. 에멀션연료의 불리한 연소조건에도 불구하고 미세폭발현상에 의한 연소 촉진효과로 NO<sub>x</sub>와 PM이 각각 12%, 33% 동시저감 되었다.

5. 에멀션연료를 사용한 경우의 착화지연은 수분증발효과로 디젤연료보다 길었으며, 고속, 고부하로 갈수록 지연기간이 감소되었다.

6. 소음은 에멀션연료를 사용하는 경우 사람의 청각으로 구별하기 어려운

수준으로서 0.6dB의 미미한 증가를 나타내었다.

본 실험은 실제 사용되고 있는 기관에 적용하여 수행한 실험으로서, 에멀션 연료가 실제기관에 적용하여 사용할 수 있을 만큼 여러 장점이 있으며 큰 문제점이 없다는 것을 보여주고 있다. 다만 에멀션연료의 평가방법이 기관성능 실험에만 의존함으로써, 여전히 제반현상에 관한 체계적인 연구가 부족하며 디젤기관의 분무, 연소에 미치는 영향에 관한 연구는 미진하다. 에멀션연료가 디젤기관의 기계적 특성변화에 끼칠 수 있는 영향에 관한 연구는 에멀션연료의 개발과 동시에 병행되어야 한다. 특히 기관에서는 보일러와 같은 다른 기관과 달리 안정된 운전을 위한 연소조건 및 그 정보 확보가 중요하기 때문에 에멀션연료를 기관에 적용하는 데는 많은 어려움이 따른다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 소형기관보다 200마력급 이상의 대형 디젤기관에 적용하여 연소실 내에서 연소압력 분석과 함께 화염의 형태를 분석하고 적절한 물과 첨가제의 혼합비로 미세폭발(micro explosion)을 통한 2차 미립화를 극대화하며, 날로 강화되는 환경규제에 대응할 수 있는 새로운 배기제어의 기술개발이 필요하리라 생각된다.

## 參考文獻

- [1] Richard Stone, Introduction to Internal Combustion Engines, The Macmillan Press LTD, pp. 53~90, 169~212, 1992.
- [2] John B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Book Co., 1988.
- [3] 本 康文, 塚原 實, “乳化燃料驅動ディーゼル機關の性能に及ぼす噴射特性の影響(第 1報, 乳化燃料の噴霧特性)”, 日本機械學會論文集(B編), 54卷 503号, pp. 1866~1871, 1988.
- [4] 오승묵, “에멀션 연료를 이용한 저공해 디젤기관 기술”, 한국기계연구원 보고서 특집, 2000.
- [5] Masahiro Ishida, Hironobu Ueki and Daisaku Sakaguchi, “Prediction of NO<sub>x</sub> Reduction Rate due to Port Water Injection in a DI Diesel Engine”, SAE paper 972961, 1997.
- [6] Susumu Kohketsu, Kazutoshi Mori, Kenji Sakai and Hiroshi Nakagawa, “Reduction of Exhaust Emission with New Water Injection System in a Diesel Engine ”, SAE paper 960033, 1996.
- [7] Yasufumi Yoshimoto, Toshinori Kuramoto, Ziyi Li, Minoru Tsukahara, “Influence of Water Content Ratio on Combustion Fluctuation of Diesel Engine Using Emulsified Fuel”, Journal of MESJ, Vol. 26 NO. 1, pp. 16~23, 1998.
- [8] 정용일, 자동차와 환경, 한국기계연구원, pp. 169~202, 1999.
- [9] Minoru Tsukahara and Yasufumi Yoshimoto, “Reduction of NO<sub>x</sub>, Smoke, BSFC, and Maximum Combustion Pressure by Low Compression

Ratios in a Diesel Engine Fuelled by Emulsified Fuel”, SAE paper 920464, 1992.

[10] Minoru Tsukahara and Yasufumi Yoshimoto, “Influence of Emulsified Fuel Properties on the Reduction of BSFC in a Diesel Engine”, SAE paper 891841, 1989.

[11] Rudolf W. Gunnerman, Robert L. Russell, “Emission and Efficiency Benefits of Emulsified Fuels Internal Combustion Engines,” SAE paper 972099, 1997.

[12] Masahiro Ishida, Hironobu Ueki, Yoshihiro Yoshimura and Nororu Matsumura, “Studies on Combustion and Exhaust Emissions in a High Speed DI Diesel Engine”, SAE paper 901614, 1990.

[13] Masahiro Ishida, Zhi-Li Chen, “An Analysis of the Added Water Effect on NO Formation in D.I. Diesel Engines”, SAE paper 941691, 1994.

[14] Hong-zhi Sheng, Li Chen, Cheng-kang Wu, “The Droplet Group Micro-Explosions in W/O Diesel Fuel Emulsion Sprays”, SAE paper 950855. 1995.

[15] 中野眞三, 岡田 博, 内海 博, “乳化燃料液滴の燃焼におけるすす生成に関する研究”, 日本船用機関學會誌, 15卷 5号, pp. 393~398, 1980.

[16] 박권하, “물혼합연료의 분사특성과 디젤연소에 미치는 영향”, 한국액체미립화 학회지 제2권 제1호, pp. 29~35, 1997.

[17] K. O. Riesenber et al, Diesel Fuel Injection, Robert Bosch GmbH., 1994.

[18] Arthur H. Lefebvre, Atomization and Sprays, Hemisphere Publishing

Corporation, 1989.

[19] 이상용, 액체의 미립화, 민음사, 1996.

[20] 구자진, Oil/Water Emulsion 액적의 연소특성연구, 한국과학기술원 석사학위논문, 1982.

[21] 山崎博司, 津江光洋, 角田敏一, “乳化燃料の蒸發と燃焼(マイクロ爆發の發生)”, 日本機械學會論文集(B編), 58卷 546号, pp. 582~586, 1992.

[22] J W Park, K Y Huh and K H Park, “Experimental study on the combustion characteristics of emulsified diesel in a rapid compression and expansion machine”, IMechE Vol. 214, Part D, pp. 579~586, 2000.

[23] 서희준, 엑시머레이저를 이용한 에멀션연료의 연소특성 연구, 충남대학교 석사학위 논문, 2001.

## 감사의 글

새 천년이 시작된 이후 부족한 저에게 학문 뿐 아니라 살아가는 도리를 깨치게 해주시며, 2년간 이끌어주신 박 권하 교수님께 진심으로 고개 숙여 감사드립니다. 그리고 바쁘신 와중에도 꼼꼼히 심사를 맡아주신 배 종욱, 조 권희 교수님께 감사드립니다.

실험실에서 같이 자면서 고생한 제 하나밖에 없는 동기 현철이, 대전에서 온 병두, 친구같은 고마운 후배 상무, 재혁이, 진희, 찬국이에게 고마운 마음 전하며, 이제 곧 쓰게 될 논문 잘 쓰기를 바랍니다. 뒤늦게 합류한 석민이도 좋은 논문 쓰리라 믿습니다. 졸업 후로 잘 만나진 못하지만 자동차 연구회 생활과 대학원 생활을 같이 한 희성이형 수고 많았습니다. 옆집 아저씨같이 푸근한 경주의 김 재곤 선생님, 언제나 맛있는 식사 대접해 주시는 박 홍일 원장님 감사드립니다. 바쁘신 이 화순 교수님, 송 영호 부장님도 하시는 일 잘 되기를 바랍니다. 모든 실험실 가족들에게 이제 떠남을 앞두고 말로 하지 못했던 고마운 마음 전합니다.

제 대학원 생활의 절반 이상이었던 한국기계연구원에서 도움 주신 분들에게 감사드립니다. 저를 위해 많은 신경 써 주시고, 질책과 충고를 아끼지 않으신 오 승묵형께 멀리서나마 고마움을 전합니다. 많이 부족하고 답답한 제게 동생 처럼 가르쳐 주시고 설명 아끼지 않으시며, 술자리에 저를 꼭 불러주시던 규백이형, 같이 엔진실험하면서 고생하신 소 무영 선생님, 종배씨, 화룡씨 고맙습니다. 그리고 영민이형, 경선이, 준열이형, 대근씨, 재철씨, 상훈씨, 병주씨, 삼례씨, 민 석영씨, 종란이, 기복이, 복사실 은영누나 등 한국기계연구원에서 함께 한 모든 분들에게 감사드립니다.

끝으로 객지에서 고생한다고 언제나 걱정하시며 28년을 뒷바라지해 주시고 아낌없이 사랑해주시는 아버님, 어머님께 고개 숙여 제 마음을 전합니다. 제 몸같이 아끼는 큰형, 작은형, 그리고 제게 형수라는 존재를 주신 형수님, 저를 지켜봐 주셔서 감사합니다. 2년이란 시간을 더 저 때문에 마음 상해도, 변함없이 지켜주고 바라봐 준 Sunniii에게 본 논문을 바칩니다.

2002년 1월 4일

郭 仁 錫