공 학 석 사 학 위 논 문

# 바이오디젤유를 이용한 디젤기관의 연소특성에 관한 연구

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2004년 2월


부 경 대 학 교 대 학 원

제어기계공학과

정 석 호

# 정석호의 공학석사 학위논문을 인준함

2003년 12월 18일

주 심 공학박사 김 시 영 (인)

위 원 공학박사 안 수 길 (인)

위 원 공학박사 고 대 권

# 목 차

Abstract ····· Ⅲ
1. 서론 ····· 1
2. 시료유의 특성 ····· 3
2.1 바이오 디젤유의 사용현황 ····· 3
2.2 바이오 디젤유의 특성 ····· 4
2.3 시료유의 제조 ····· 6
2.4 시료유의 특성 ····· 9
3. 계측 장비 ····· 11
3.1 PXI 시스템 ····· 12
3.1.1 PXI 섀시 ····· 12
3.1.2 DAQ 보드 ····· 15
3.2 LabVIEW ····· 17
3.3 PM 계측 장비 ····· 19
3.3.1 PM의 개요 ····· 19
3.3.2 PM의 계측 방법 ····· 21
3.3.3 PM 농도 측정 장치 ····· 22
3.3.4 PM 농도 산출법 ····· 24
4. 실험장치 및 실험방법 ····· 27
5. 결과 및 고찰 ····· 30
5.1 온라인 계측 ····· 30
5.2 압력선도 스무싱 및 열발생율 검증 ····· 33
5.2.1 압력선도 스무싱 ····· 33
5.2.2 열발생율 검증 ····· 35

5.3 연소 특성 ····· 37
5.3.1 압력거동과 열발생율 ····· 37
5.3.2 연료소비율, 공기과잉률과 체적효율 ····· 41
5.3.3 최고압력, 분사기간, 착화지연과 연소기간 ····· 45
5.4 배기 특성 ····· 50
5.5 PM 배출 농도 ····· 54
6. 결론 ····· 57
참고 문헌 ····· 58

# A Study on the Characteristics of Combustion in Diesel Engines Using the Bio Diesel Oil

Suk-Ho Jung

*Department of Control Mechanical Engineering*

*Graduate School*

*Pukyong National University*

## Abstract

Recently many researchers have been studying the development of alternative energy due to serious pollution and drying up fossil energy. For instance it is the BDF(Bio Diesel Fuel) that uses wasted vegetable oil. It may get an effect of being two-bird one-stone solution in a side of resource reuse.

The BDF must be esterified because it has higher viscosity than diesel fuel in using as the fuel of the diesel engines. It thus increases a price of the BDF due to the complex manufacturing process. If the manufacturing process of the blend oil is simpler than that of TVO, the blend oil will be cheaper and used easily.

This research analyzed combustion characteristics of the diesel

engine using the diesel fuel, TVO and Blending Oil. we also measured quantitatively PM mass with the light absorption method especially.

And we applied the PXI and LabVIEW for signal acquisition on the test engine. PXI and LabVIEW are a novel measurement system which is possible to acquire and analyze the signal on-line.

The results were as follows :

1) It was possible to measure the cylinder pressure and calculate the rate of heat release on-line with the PXI and LabVIEW in diesel engines.

2) Cylinder pressure behavior of the BO blending diesel fuel made by waste vegetable oil was similar to diesel fuel and possible to alternative for diesel fuel.

3) A small quantity of PM mass wasn't measured by Bosch smoke-meter, but was measured by the equipment which applied the method of light absorption.

# 1. 서론

현재 세계 각 국에서는 고갈되어 가는 지구의 화석연료에 대한 대체 에너지의 연구와 환경오염에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 이러한 연구로써, 신개념의 엔진기술로 평가되고 있는 Hybrid Engine, Fuel Cell Engine으로부터 현재 디젤차량에 많이 탑재되고 있는 CRDI(Commonrail Direct Injection) 엔진과 HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition) 엔진 등, 엔진기술 개발이 활발히 진행되고 있다. 그러나 이러한 연구들에도 불구하고 화석연료를 사용하는 엔진을 벗어나기에는 아직도 많은 시일이 걸릴 전망이다.

비산유국인 우리나라는 대체에너지가 시급한 실정이다. 이러한 대체에너지 중의 하나로 최근 많은 연구가 이루어지고 있는 것이 바이오 디젤유이다. 바이오 디젤유(BDF:Bio Diesel Fuel)란 식물성 기름, 동물성 지방, 폐식용유 등 재생 가능한 자원을 촉매(산 또는 알카리) 존재 하에 알콜과 반응시켜 생성하는 에스테르화한 것[1] 또는 경유와 혼합하여 사용하는 혼합유 등으로 경유와 물성이 비슷하여 디젤기관의 연료로 사용할 수 있는 연료를 의미한다.

이미 유럽에서는 주유소에서 바이오 디젤유를 판매하고 있을 정도이며 가까운 일본도 수 년 전부터 사용하고 있다. 최근 우리나라도 지방에서 미강유와 폐식용유를 이용한 바이오 디젤유를 사용하는 차를 시험운행하고 있다.

그러나, 현재 바이오 디젤유는 경유보다 높은 점도를 낮추기 위해 에스테르화(에스테르화한 연료를 이후 에스테르유라 칭함)를 하는데, 이 때 메탄올과 촉매를 사용해야 하기 때문에 비용이 많이 들고 제조공정도 복잡해지는 단점을 가지고 있다. 에스테르화 한 BDF는 폐식용유나 식용유를 원료로 생산하는 경우, 경유보다 세금을 붙이지 않았을 때 1.5~3.0배 정도 높은 것으로 알려져 있다.

따라서 경제성을 올리기 위한 방안이 모색되어야 하며, 정부의 지원도

필요로 한다. 이러한 단점을 극복하기 위해 폐식용유를 경유와 단순히 혼합한 블렌드유를 만들어서 세 가지 연료, 즉 경유, 에스테르유, 블렌드유를 사용하여 연료에 따른 기관의 성능을 분석·비교하였다.

그리고, 기관의 성능을 분석하기 위한 계측장비를 PXI와 LabVIEW로 구축하였다. 기존의 계측장비를 교체하여 얻는 이득은 계측에 사용되는 프로그램 코딩에 걸리는 시간의 절약, 계측하는데 걸리는 시간의 절약, 계측된 데이터의 온라인(On-line) 분석, 실험에 참여하는 인원의 감소 등이다.

마지막으로 PM의 발생량을 정량적으로 측정하기 위해 흡광법을 적용하는 PM 농도 측정장치를 자체 제작하였다. 이 장치를 이용하여 각 연료유별 실험조건에 따른 PM의 배출량을 실시간으로 측정하였다.

# 2. 시료유의 특성

## 2.1 바이오 디젤유의 사용현황

이미 Dr. Rudolf Diesel은 1900년에 파리에서 있었던 만국박람회에서 피넛오일을 연료로 사용하여 그의 발명품인 압축점화기관을 운전하였다. 그리고, 그 때 앞으로 바이오 연료가 사용될 것을 예견했다고 한다.

BDF는 1990년대 초부터 유럽과 미국에서 버스나 트럭 등에 연료로 사용해 오고 있다. 일부 개조차량에는 100%의 BDF를 사용하기도 하고 대개의 차량은 이것을 경유와 혼합하여 사용하고 있다. 또 독일의 AT사에서는 연간 6천 톤의 식물을 처리해서 약 2천 톤 정도의 BDF를 제조하며, BDF 주유소도 운영이 되고 있을 정도이다.

가까운 일본에서는 1992년경부터 폐식용유를 수거하여 BDF를 만들어 판매하기 시작하였으며 최근에는 소형 BDF 제조장치를 만들어 판매하고 있다. 특히 교토시에서는 가정에서 나오는 폐식용유를 수거하여 BDF를 제조하여 이를 청소차 220대에 사용하고 있다[2].

조금은 늦었지만 우리나라도 모기업과 연구소에서 폐식용유를 이용한 BDF 제조공정 개발과 통근버스 및 미니밴을 이용하여 장기간 실증 및 성능평가 연구를 하고 있고, 현미유 BDF에 대한 실증 평가연구도 되고 있다[1].

## 2.2 바이오 디젤유의 특성

바이오 디젤유는 원료 자체의 점도가 높기 때문에 에스테르화를 시키더라도 경유에 비해 점도가 높은 특성이 있다. 점도가 높다는 것이 바이오 디젤유의 단점이지만 함산소 연료이므로 배기배출물에 좋은 영향을 미치는 장점도 있다.

다른 문헌[3]을 참조한 바이오 디젤유의 성상을 Table 2-1에 나타내었다. Blend 50은 폐식용유를 50% 경유와 체적비로 혼합한 것이고, TVO는 에스테르유이다.

Table 2-1과 같이 BDF는 경유에 비해 인화점, 밀도, 점도가 높다. 그러나 산소의 함유가 많고 물을 함유하고 있기 때문에 연소에 도움이 되고, 연소실의 온도도 낮출 수 있기 때문에 NOx의 저감도 기대할 수 있다. 이러한 특성들은 바이오 디젤유에 특화된 엔진에서 더 좋은 효과를 기대할 수 있을 것으로 추측된다.

Table 2-1 Properties of fuels

| Fuel / properties | Diesel fuel | Blend 50 | TVO |
|---|---|---|---|
| Flash point ℃ | 68 | 80 | 80 |
| Density(30℃) (kg/㎥) | 836 | 883 | 885 |
| Viscosity(35℃) (㎟/s) | 3.25 | 11.49 | 4.59 |
| Cetane index | 54.6 | 48.0 | 53.7 |
| Lower C.V (MJ/kg) | 43.50 | 39.83 | 37.24 |
| Carbon residue (wt%) | 0.01 | 0.19 | 0.08 |
| Carbon (wt%) | 86.0 | 81.3 | 75.8 |
| Hydrogen (wt%) | 13.8 | 12.5 | 12.2 |
| Oxygen (wt%) | <0.1 | 6.1 | 12.0 |
| Nitrogen (wt%) | <0.1 | <0.1 | <0.1 |
| Sulfur (wt%) | 0.02 | 0.01 | <0.01 |
| Ash (wt%) | <0.01 | <0.01 | 0.03 |
| Water (wt ppm) | 100 | 200 | 600 |

NREL(National Renewable Energy Laboratory : 미국 국립재생에너지 연구소)의 발표에 따른 경유대비 BDF의 공해저감 효과를 Table 2에 나타내었다. 여기서 B100은 바이오 디젤유가 100%일 때이고, B20은 바이오 디젤유가 20%, 경유가 80%로 혼합된 것이다. Table 2의 내용에 따르면 NOx를 제외하고는 거의 대부분이 저감하는 것을 알 수 있다. 따라서, 공해저감에 효과가 있는 BDF는 점차 사용량이 증가할 것으로 기대된다.

Table 2-2 Pollution depreciation efficiency of BDF by contrast with diesel fuel

| Item | B100 | B20 |
|---|---|---|
| THC | -36.7 | -7.3 |
| SOx | -100 | -17.6 |
| NOx | +8.9 | +1.8 |
| CO | -46.2 | -9.3 |
| PM | -68.1 | -13.6 |
| OFP | -50 | -10 |
| PAH | -80 | -13 |
| nPAH | -90 | -50 |
| reduce of Life Cycle $CO_2$ | -78.45 | -15.33 |

## 2.3 시료유의 제조

실험에 사용한 연료는 시중에서 판매되고 있는 L사의 경유, 경유와 폐식용유를 단순히 혼합한 블렌드유(BO:Blend Oil), 폐식용유를 에스테르화한 에스테르유(TVO:Transesterified Vegetable Oil)이다.

먼저 블렌드유의 제조에 대해서 설명한다. 블렌드유는 학교식당에서 튀김용으로 사용한 폐식용유를 수거하였고, 여기에 섞인 고형물을 제거하기 위하여 첫 번째 필터를 통과시켰다. 그 다음 이것을 경유와 중량비로 섞었다. 경유와 폐식용유의 중량비는 7:3로 하였다. 그리고 경유와 폐식용유를 충분히 섞은 다음 여분의 이물질이 침전되도록 하루 정도 기다린 후, 두 번째 필터로 잔류 이물질을 완전히 제거하여 제조하였다. 그 공정을 Fig. 2-1에 나타내었다.

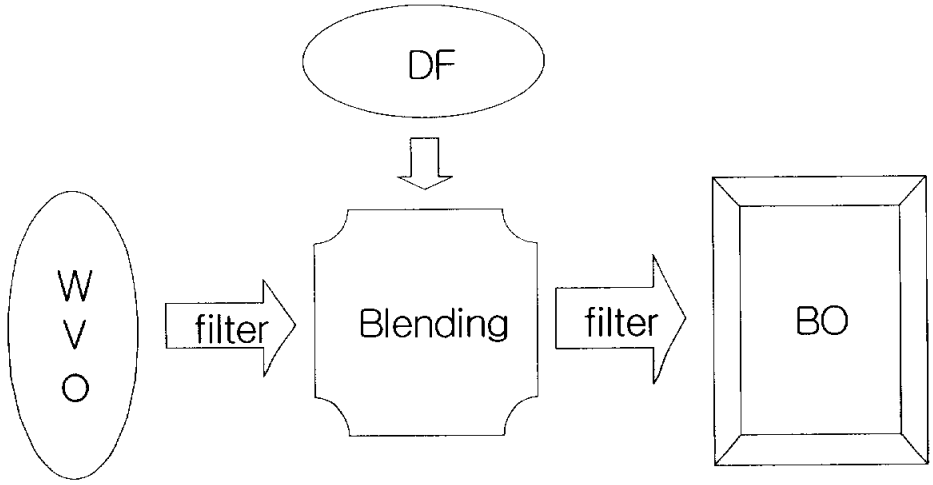



Fig. 2-1 Manufacturing progress of BO

에스테르유의 제조과정은 블렌드유에 비해 상당히 많은 공정이 필요하고 그 비용도 많이 든다. 에스테르유의 제조과정은 Fig. 2-2와 같다.

에스테르화를 시키기 위해서는 메탄올을 사용하여야 하며 반응을 일으키기 위해 촉매도 사용하여야 한다. 또한 수율을 높이기 위해서는 약 70℃로 유지하면 좋다. 이렇게 하여 수 시간을 교반 시킨 후에야 에스테르유가 생성이 된다. 그러나 일단 이렇게 에스테르화 된 뒤, 교반 후 남은 메탄올과 글리세롤 사이에서 에스테르유만을 꺼내는 것도 쉬운 일은 아니다.

본 실험에 사용된 시료유는 먼저 폐식용유를 메탄올과 체적비 2:1로 섞어서 폐식용유 1ℓ당 촉매로 수산화칼륨(KOH) 5g을 첨가해서 상온에서 약 2시간을 교반시켰다. 물론 수율을 높이기 위해서는 70℃정도로 유지하는 것이 좋지만 충분한 시료량이 확보되었기 때문에 상온에서 교반을 실시하였다. 교반 후에는 Fig. 2 3과 같이 층상으로 분리가 되었다. 그러나 메탄올과 에스테르유의 층상은 별로 나타나지 않았다. 이는 메탄올의 양을 조금 작게 넣었기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 실험에 사용할 에스테르유는 메탄올에 의해 발열량이 떨어지지 않도록 중간부분만을 따로 빼내어 사용하였고, 추출량은 폐식용유 1ℓ당 에스테르유도 약 1ℓ로 거의 같았다.

Fig. 2 3은 제조된 에스테르유로서 아랫부분의 검은 부분이 글리세롤층이다. 그리고 윗부분에 약간의 층이 보이는데 반응하고 남은 메탄올층이다. 메탄올이 남은 것은 손으로 만져보면 시원한 느낌으로 바로 알 수가 있다. 따라서 메탄올이 섞이는 것을 방지하기 위해서 가운데 부분만을 꺼내어 사용하였다.

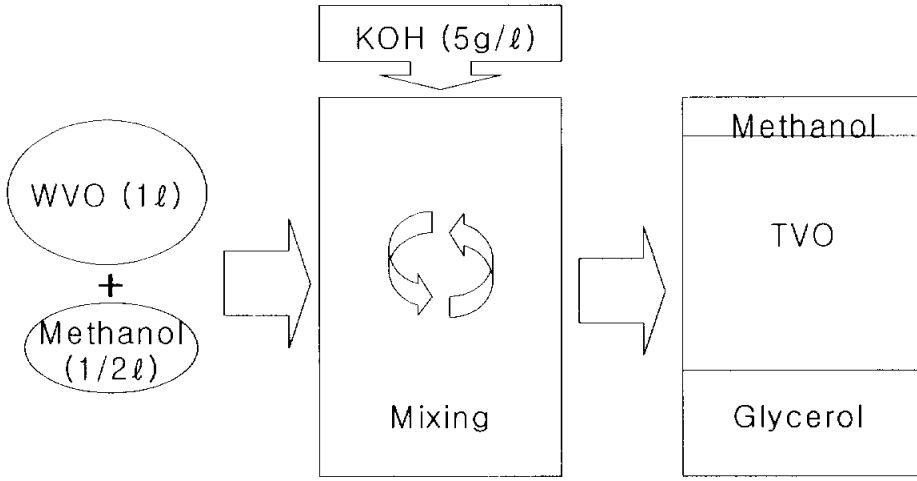



Fig. 2-2 Manufacturing progress of TVO

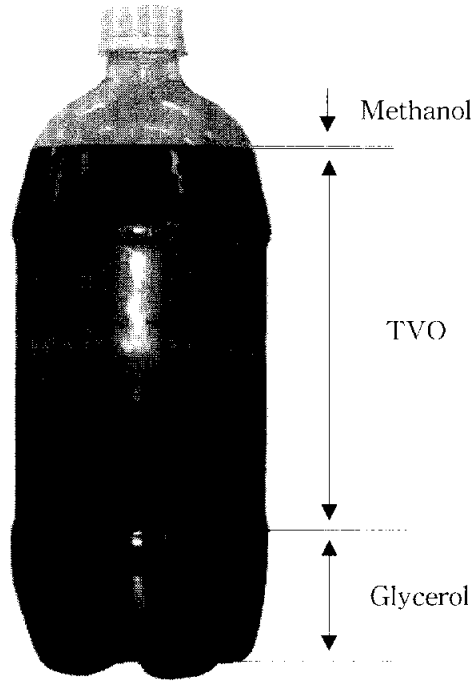



Fig. 2-3 Manufactured TVO

## 2.4 시료유의 특성

시료유의 동점도와 비중을 측정하여 Table 2-3에 나타내었다. 측정값은 Table 2-1은 물론이고, 다른 문헌과도 비슷함을 확인하였다.

비중의 측정은 액체비중계를 이용하여 계측하였다. 동점도의 경우는 Fig. 2 4에 나타낸 것과 같은 BROOKFIELD DV-I+ 디지털 점도계를 사용하여 측정하였다. Fig.2 4와 같이 샘플 컨테이너 바깥에 항온조를 직접 제작하여 40℃를 유지하여 동점도를 측정하였다.

Table 2-3 Gravity and viscosity of fuels

| | Gravity | Kinematic viscosity (cSt, at 40℃) |
|---|---|---|
| DF | 0.81 | 2.843 |
| TVO | 0.887 | 4.115 |
| BO | 0.872 | 9.4725 |

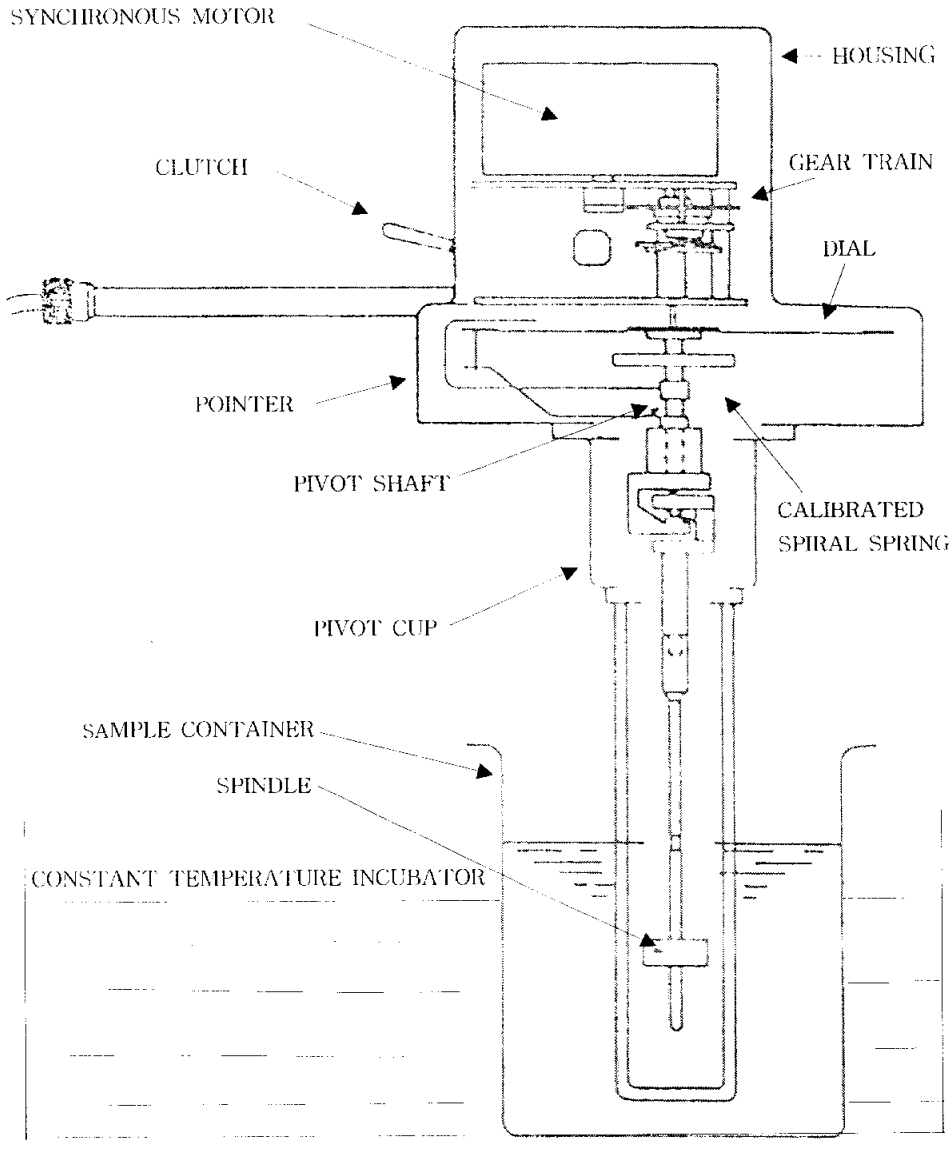



Fig. 2-4 Schematic diagram of dynamo viscometer

# 3. 계측 장비

각종 센서에서 계측되는 아날로그 신호를 컴퓨터에 저장하고 편집하기 위해서는 디지털 신호로 바꾸어 주어야 한다. 이러한 기능을 가진 장비를 A/D 컨버터(analog to digital converter)라고 한다. 본 연구에서는 A/D 컨버터 기능 외에 다른 몇 가지 기능들을 한 보드에 집합시켜 놓은 DAQ 보드(data acquisition board)를 사용하였다. 또 DAQ Board를 동기화시켜 4채널의 신호들을 동시에 계측할 수 있는 PXI 방식을 사용하였다.

연소실 압력 센서, 니들 리프트 갭 센서, 분사 압력 센서, PM 농도 측정장치, 엔코더에서 나오는 신호를 모두 PXI와 LabVIEW를 사용하여 계측하였다. 또 LabVIEW로 몇 개의 프로그램을 작성하여 계측된 데이터를 온라인으로 분석하였다.

또, PM 농도 측정장치는 직접 제작한 것으로 Laser 광이 배기가스를 통과할 때 PM에 흡수되기 때문에 강도가 감쇄된다. 이 때 초기값과 통과 후 감쇄된 값의 비, 즉 투과율을 이용하여 PM을 계측하는 것이다. 이 PM 농도 측정장치의 특징, 사양과 빛의 흡수율로부터 질량을 산출하는 방법 등에 대해서도 설명 하고자 한다.

## 3.1 PXI 시스템

### 3.1.1 PXI 섀시(chassis)

일반적으로 계측을 할 때는 신호원이 아날로그 신호이기 때문에 이를 컴퓨터가 인식할 수 있도록 하기 위해서 A/D 컨버터를 이용한다. 이 때 A/D 컨버터는 컴퓨터의 PCI(Peripheral Component Interconnect) 버스에 연결이 된다. 그러나 PCI 버스는 동시에 여러 개의 채널로 데이터를 취득하는 것은 매우 어렵다는 단점이 있다.

그러므로 여러 개의 데이터를 동시에 취득하기 위해서 PXI(PCI eXtensions for Instrumentation)를 사용한다. 이 장비는 프로그래밍에 능숙하지 못한 사람도 쉽게 동시계측을 할 수 있는 장점이 있다.

PXI의 구조를 Fig. 3-1에 나타내었다. PXI는 컴퓨터(Controller)와 여러 개의 DAQ 보드를 한 섀시에 장착할 수 있도록 되어있는 장비이다.

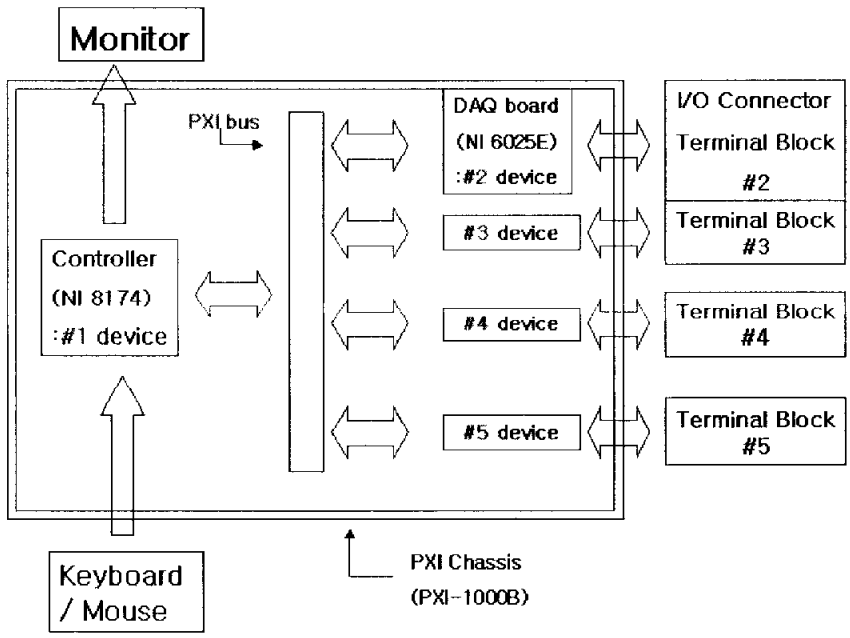



Fig. 3-1 Schematic structure of PXI system

일반적으로 PCI를 이용할 때에는 컴퓨터 본체의 메인보드에 있는 PCI 버스 슬롯(slot)에 DAQ 보드를 장착하여 사용하지만 PXI는 Fig.3-1과 같이 PXI 버스를 통하여 여러 개의 DAQ 보드와 시스템 컨트롤러가 연결되어 있고, 이 PXI 버스를 통해 각 보드는 동기화가 된다.

PCI를 이용하여 여러 개의 보드를 사용할 경우, 보통 각 보드에서 데이터가 취득되는 시각이 다르게 나타난다. 만일 이를 동기화 또는 같은 시각에 데이터를 취득할 수 있도록 하기 위해서는 고도의 기술을 요하기 때문에 이 분야의 비전공자로서는 여간 어려운 일이 아니다. 그러나 PXI를 이용하면 PCI를 사용하는 것보다 한결 간편하게 비전공자들도 사용할 수가 있다. PXI를 사용하면 여러 개의 채널을 동시에 측정할 수 있다. 현재 아주 고가의 엔진 성능 분석 장비들은 엔진의 정해진 곳만을 측정하게 되지만, PXI는 엔진 성능 분석 장비로 구축할 수 있을 뿐 아니라 사용자의 필요에 따라 여러 가지 다른 측정과 계측에도 활용할 수 있어 더욱 유용하다.

또 이 장비에는 Real Time 모드가 있어서 일반 컴퓨터의 O/S로 계측할 때 생기는 Jitter라는 시간 오차를 감소시킬 수가 있다. Jitter라는 것은 정확한 루프타임을 벗어나는 시간을 의미하는 것으로, 일반 O/S 환경인 Window 등은 여러 개의 작업을 병행하기 때문에 CPU의 속도보다 빠른 루프에서는 정확한 루프 타임을 맞출 수 없어 Jitter가 생길 수밖에 없다. 그러나 Real Time 환경에서는 실행한 작업에 우선권을 주기 때문에 다른 작업을 하더라도 정확한 루프를 맞출 수 있어 Jitter의 발생이 적어진다. 그러나 정확한 루프를 맞춘다고 하지만 수 ns정도의 오차는 가지고 있다.

PXI-1000B에 탑재된 시스템 컨트롤러 NI 8174의 사양을 Table 3-1에 나타내었으며, 그 블록 선도를 Fig. 3-2에 나타내었다.

Table 3-1 Specifications of NI 8174 controller

| | |
|---|---|
| CPU | Pentium Ⅲ 566MHz |
| Memory | SDRAM 256MB |
| HDD | 10GB |
| OS | Windows 2000 professional |

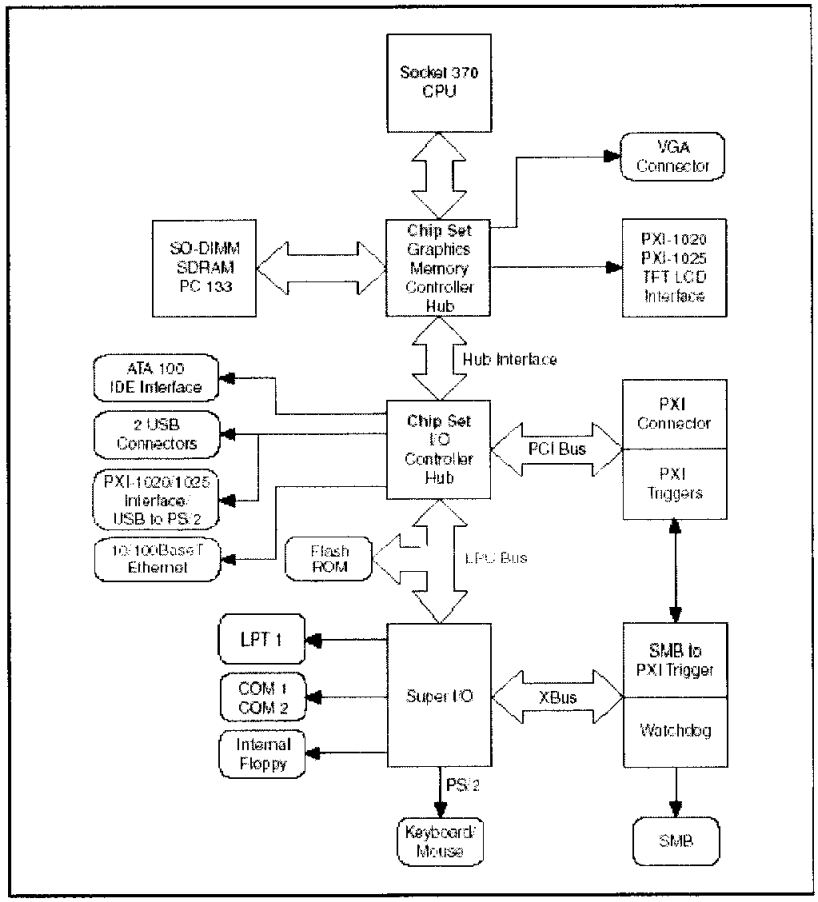



Fig. 3-2 Block diagram of NI 8174 controller

### 3.1.2 DAQ 보드

DAQ 보드는 센서로부터 오는 아날로그 신호를 컨트롤러가 처리할 수 있도록 전처리하는 단계이다. PGIA, A/D Converter, Buffer(ADC FIFO), RTSI Connector 등을 내장하고 있다. 실제 디젤기관의 성능 계측에 사용한 DAQ 6025E의 순서도를 Fig. 3-3에 나타내었다.

Fig. 3-3의 왼쪽이 터미널 블럭에서 들어오거나 터미널 블록으로 나가는 신호들과 연결되는 곳이다. 센서에 의해 계측된 신호들은 보드 내에서 컨트롤러가 읽어내고 제어할 수 있도록 처리되어서 Fig. 3-3 오른쪽의 PXI bus를 통하여 컨트롤러로 전해진다.

DAQ 6025E의 사양을 Table 3-2에 나타내었다. 아날로그 input의 채널 수는 16개이다. 또, 해상도는 12bit이고 샘플링 속도는 200k[Sampling/s], input 영역은 최대 ±10V이고 최저 ±0.05V의 작은 전압도 측정할 수가 있다. 여기서 신호원을 터미널 블록에 연결하는 방법을 input mode라고 한다. input mode는 신호원의 접지 여부에 따라 두 가지, 터미널 블록에 연결하는 방법에 따라 세 가지로 나뉜다. 따라서 총 여섯 가지가 있다. 일반적으로 터미널 블록의 채널 두 개를 신호원의 +,-로 연결하는 것이 differential mode로써, 노이즈에 강한 장점이 있기 때문에 이를 많이 사용한다. Fig. 3-4에 differential mode인 경우의 신호원 연결방법을 나타내었다.

Table 3-2 Specifications of NI 6025E DAQ board

| | Number of channel | Resolution (bit) | Sampling rate (kS/s) | Input or output Range (V) |
|---|---|---|---|---|
| Analog input | 16 | 12 | 200 | ±0.05 ~ ±10 |
| Analog output | 2 | 12 | 10 | |
| Digital I/O | 32 | | | |
| Counter/Timer | 2 | 24 | | |

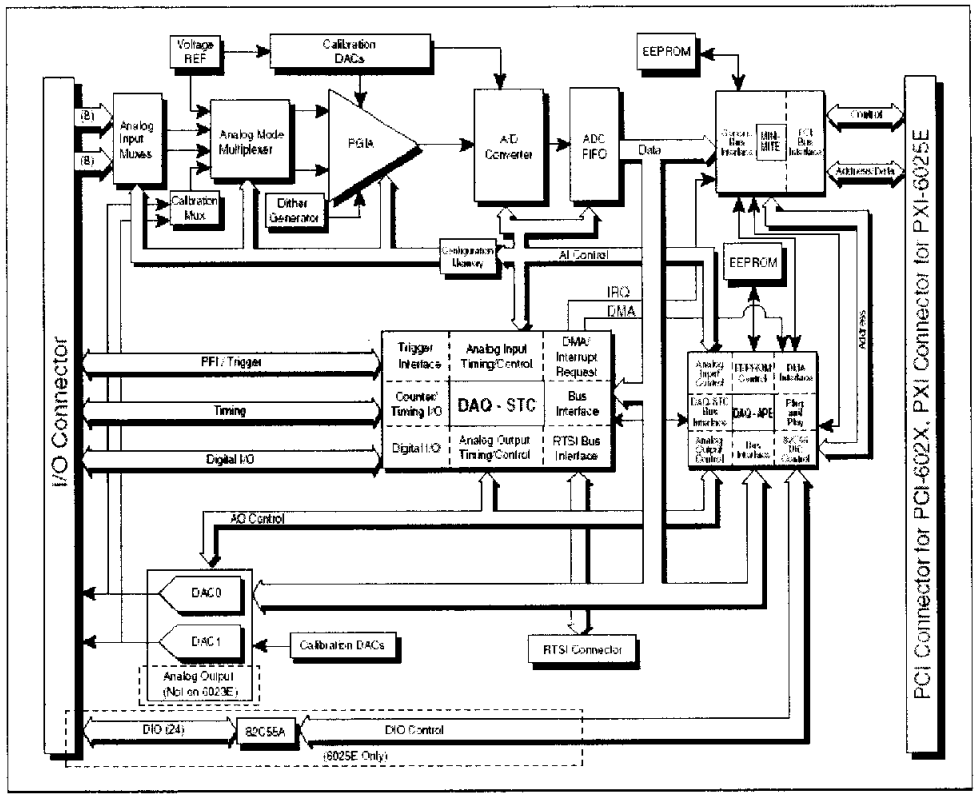



Fig. 3-3 Block diagram of NI 6025E DAQ board

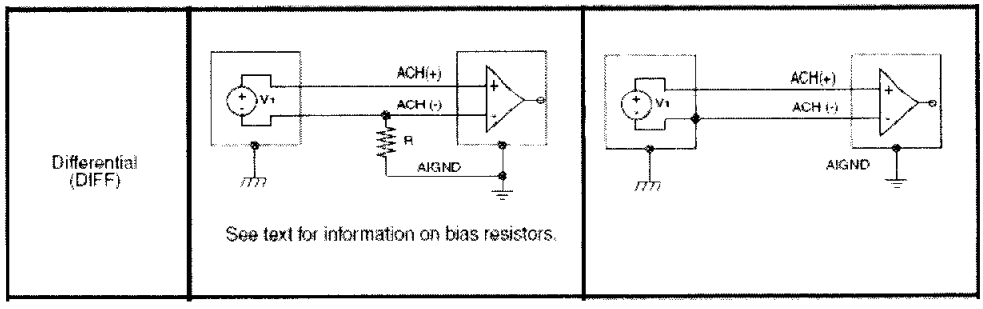



Fig. 3-4 Method of connecting signal source to DAQ board by differential mode

## 3.2 LabVIEW

LabVIEW는 아이콘(Icon)을 이용하여 프로그램을 작성하는 언어로서 제 4세대 언어라고 할 수 있다. 다른 텍스트(Text) 기반의 언어들과 비교하여 가장 큰 차이점은 유저 인터페이스(User interface)뿐만 아니라 소스 코드(Source code) 또한 그래픽화한 환경으로 이루어져 있다는 것이다[4]. LabVIEW는 순서도(Flowchart)를 그리듯이 만드는 프로그램이므로 텍스트 기반의 언어들보다 쉽게 접근할 수가 있다. 텍스트 기반의 언어들은 한 눈에 쉽게 알아볼 수가 없으나 LabVIEW는 간단하면서도 프로그램의 흐름을 읽어내기가 쉽도록 되어있다. 실제 텍스트 언어로 프로그램을 짜는 것보다 1/3 이하의 시간이 든다고 한다.

LabVIEW는 프론트 패널(Front panel)과 블록 선도(Block diagram)로 나뉜다. Fig. 3-5는 프론트 패널을 나타낸 것으로 회색바탕의 창으로 데이터를 취득하거나 제어하기 위해 필요한 설정값을 지정하고, 취득한 데이터를 모니터링하는 창이다. Fig. 3-5는 아날로그 신호를 수집하는 간단한 예로써 신호를 수집하는 하드웨어의 제어와 계측된 신호를 바로 볼 수 있도록 되어있다. scan rate와 sampling rate 등을 쉽게 바꿀 수가 있고, 데이터를 저장하는 버퍼의 크기도 자유롭게 바꾸기가 쉽도록 되어 있다. 또한 수집된 데이터를 그래프에 연속적으로 나타내는 것도 가능하다.

Fig. 3-6은 블록 다이어그램(Block diagram)이다. 이는 Fig.3-5의 Front panel을 코딩한 것으로 지금까지 봤던 텍스트 기반의 언어들과는 다르다. Block diagram 창에서는 코딩한 프로그램의 디버깅이 가능하며, 프로그램이 실행되는 순서를 선으로 그으며 나타내어주기 때문에 쉽게 알아볼 수 있다. 실제로 Fig. 3-6과 같이 아이콘으로 된 함수들을 찾아서 위치를 정하고 서로 선으로 연결만 하면 되는 아주 간단한 프로그램 언어이다.

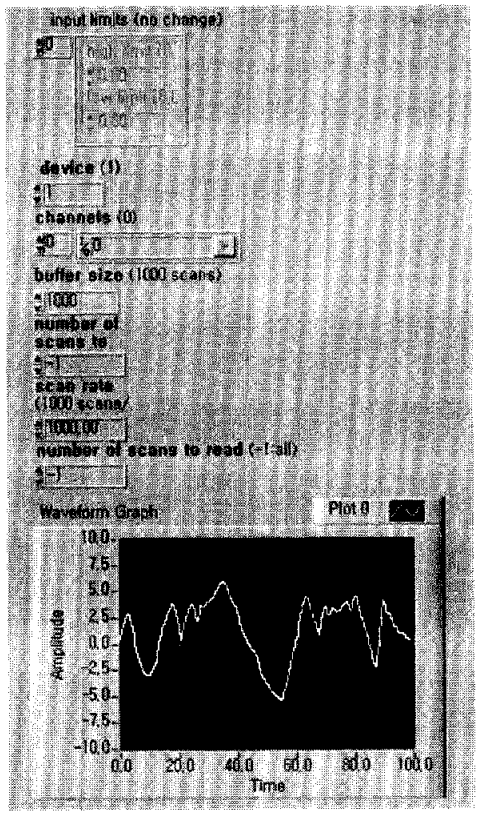



Fig. 3-5 Example of front panel

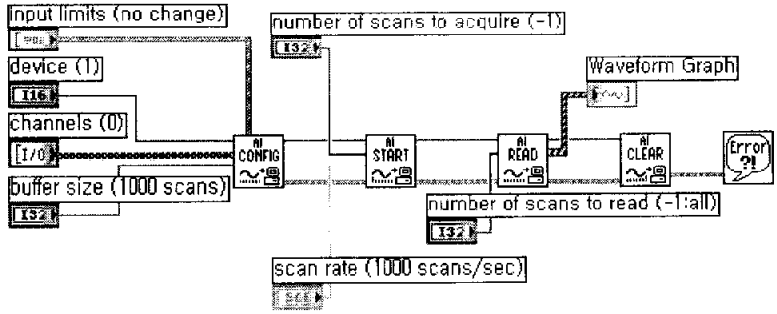



Fig. 3-6 Example of block diagram for front panel of Fig. 3-5

## 3.3. PM 계측장치

### 3.3.1 PM (Particulate Matter)

부유입자상 물질 (SPM : Suspended Particulate Matter)은 대기 중에 부유하는 입자상 물질 중에서 입경이 10 ㎛ 이하인 입자로 정의되고 있다. 또 SPM은 미소하기 때문에 대기 중에 장시간 부유하는 특징이 있고, 호흡에 의해 체내에 유입되어 그 일부가 폐포나 기관 등에 달라붙고, 장기간 고농도에 노출될 경우 호흡기 질환을 일으키는 염려가 있는 것으로 보고되고 있다.

SPM의 주 발생원에 대해서 설명한다. SPM은 해염과 토양 등 자연적 발생기원과 더불어 각종 고정, 이동 발생원 등의 인위적 발생기원에서 SPM으로 직접 배출되는 1차 배출입자와 기체상의 물질이 대기중에서 입자화하는 2차 생성입자로 구성된다. 다시 말해 1차 배출입자는 발생원에서 대기 중으로 방출될 때 이미 입자로 되어 있는 것을 말하고, 2차 생성입자는 발생원에서 가스 형태로 배출되어 대기 중에서 광화학반응과 중화반응을 거쳐 입자로 변하는 것을 말한다.

디젤엔진에서 배출가스 중의 99.9 % 이상은 가스형태의 성분이고, 그 중 100 ppm 정도가 Fig. 3-7과 같이 PM이 된다. PM의 화학적 성상은 엔진의 운전조건과 연료의 성상, 연소상태에 의해서 크게 다르지만 일반적으로 디젤 PM은 원소상 탄소에서 생성되는 그을음 주위에 비교적 높은 비점의 유기물과 황산염 등이 Fig. 3-7과 같이 흡착하고 있는 것으로 알려져 있다. PM을 원소별로 보면 주원소는 탄소로 PM의 약 60 %전후를 차지한다. 그 외에 P, B, Al, Fe, Mg, Zn, Ca 등 금속성분도 미량이지만 함유한다. 또 PM의 물리적 성상으로는 Fig. 3-7과 같이 그 형상은 입경이 약 0.02 ㎛ 정도인 각각의 입자가 다수의 쇄상(사슬형)으로 늘어서 있는 것이 전자현미경에 의해서 관찰되고 있다.

PM이 인체에 미치는 영향에 대해 살펴보도록 한다. $PM_{10}$ (PM의 입경이 10 ㎛ 이하인 것) 구성하는 $PM_{2.5}$ (PM의 입경이 2.5 ㎛ 이하인 미소

입자)와 그 외의 조대입자는 발생원과 특성에 큰 차이점이 있기 때문에 별개의 구성부분으로 보는 것이 가능하다. 미소입자는 호흡기 깊숙이 침입하여 달라붙고, 장기간 축적해서 인체에 악영향을 미치는 것으로 고려된다.

디젤 PM은 앞서 설명한 것처럼 미소입자에 포함된다. 디젤 배출가스는 발암성(發癌性), 만성기관지염(慢性氣管支炎), 화분증(花粉症), 내분비교란성(內分泌 攪亂性), 심장질환(心臟疾患) 등 건강에 많은 악영향을 초래할 가능성이 있다고 시사되고 있다 또, 인체에 미치는 영향을 평가하기 위해서 변이원성 시험과 실험동물에 의해 노출시험 등이 행해지고 있다.

예전에는 $PM_{10}$에 대해서 규제를 해 오고 있었지만, 선진국에서 $PM_{2.5}$가 인체에 미치는 영향 등을 조사하면서 2.5 ㎛ 이하의 미립자에 대해서도 규제가 생겨났다. 앞으로 DPF (Diesel Particulate Filter)등 PM의 배출을 줄이기 위한 연구가 계속되겠지만, PM의 양을 감소시키는 것은 앞으로 디젤엔진의 기술개발에 중요한 관건이 될 것으로 생각된다.

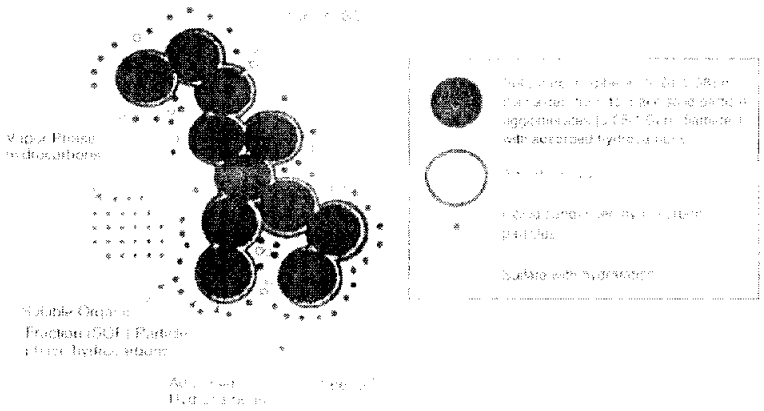


Fig. 3-7 Formation of PM[65]

### 3.3.2 PM의 계측방법

디젤엔진에서 배출되는 배기배출물을 측정하는데 있어 광의 투과율로써 평가하는 방법은 스모크 농도 측정법이고, 입자로써 평가하는 방법은 PM 측정법이다[6].

스모크 농도 측정법은 크게 필터식과 오퍼시티(opacity : 불투명도)식이 있다. 필터 식은 흔히 볼 수 있는 BOSCH 스모크 메타가 있고, 오퍼시티식은 현재 미국과 유럽에서 채용되고 있는 측정법이다.

PM 측정에는 PM의 질량농도를 평가하는 측정법과 PM의 입자경 분포를 평가하는 측정법으로 나누어진다. Table 3-3에 PM 측정에 대해서 나타내었다. 현재에는 앞서 설명한 것처럼 입자의 크기에 따른 PM의 규제가 이루어지므로 PM의 입자경 분포를 측정하는 방법이 많이 개발될 것으로 생각된다.

여기서 본 연구에 사용된 PM 농도 측정장치는 광감쇄법을 이용한 것으로 다음 장에서 자세히 살펴보기로 한다.

Table 3-3 Methods of measuring a PM concentration

| Method | Principle | Collection Method |
|---|---|---|
| EDM | Conductivity method | Continuos |
| PAS | Photo acoustic detection method | Continuos |
| Differential pressure transducer | Differential pressure detection method | Filter method |
| Combustion PM analyzer | Filter combustion method | Filter method |
| TEOM | Tapered element oscillating micro-balance | Filter method |
| DIPA | 2 wave length NDIR method | Continuos |
| FID PM analyzer | FID method | Continuos |
| Filter oxidization & deoxidization analyzer | Filter oxidization & deoxidization method | Filter method |
| Differential $CO_2$ analyzer | differential $CO_2$ method | Continuos |

### 3.3.3 PM 농도 측정장치

PM 농도 측정장치도를 Fig. 3-8에 나타내었다. PM 농도 측정장치는 배기가스 라인의 중간에 레이저 광을 입사할 수 있는 광 프루브와 광전자증배관(PMT:Photo Multiplier Tube)을 설치하여 배기가스가 통과할 때 감쇄되는 빛의 강도를 계측하는 장치이다.

광원으로는 정격용량은 5 ㎽이며, 파장이 632.5 ㎚인 He-Ne 레이저를 사용하였다. 레이저에서 배기관까지는 광프루브를 사용하였으며, 프루브 끝에는 4개의 Aperture를 설치하여 광이 퍼져나가는 것을 최대한 억제하였다. 이 때 구멍의 크기는 0.7 ㎜로 하였다. 자세한 치수 등은 Fig. 3-8에 나타내었다. 레이저광의 강도를 측정하는 PMT는 350~650 ㎚의 파장을 감지하는 것으로 -1100 V에서 전류를 $10^7$배까지 증폭시킬 수가 있다. PMT에서 나온 신호는 약간의 시그널 컨디셔닝을 거쳐 PXI로 계측하였다.

PMT로 계측하여 산출되는 PM질량과 보쉬 스모크미터를 통해 포집된 PM의 질량을 비교하기 위해 배기가스 inlet 부위에 보쉬 스모크미터를 설치하였다. 또 광로를 형성하기 위해 뚫은 배기관 구멍으로 나오는 배기가스를 억제하고 PMT의 오염을 막기 위해 0.2MPa 정도의 압력으로 신선한 공기(Fresh air)를 실험 내내 공급하였다.

레이저광 단면적의 지름은 0.7 ㎜의 아퍼쳐(Aperture)를 설치하였으나 실제로 배기관의 광프루브측 입구에서는 8 ㎜였고, PMT가 있는 출구 쪽에서는 22 ㎜였다. 따라서 광로 단면적 $A_b$의 지름은 15 ㎜로 하였다. 그리고 광로의 길이 $L_m$은 Fig. 3-8에 표시된 바와 같이 66.8 ㎜이다.

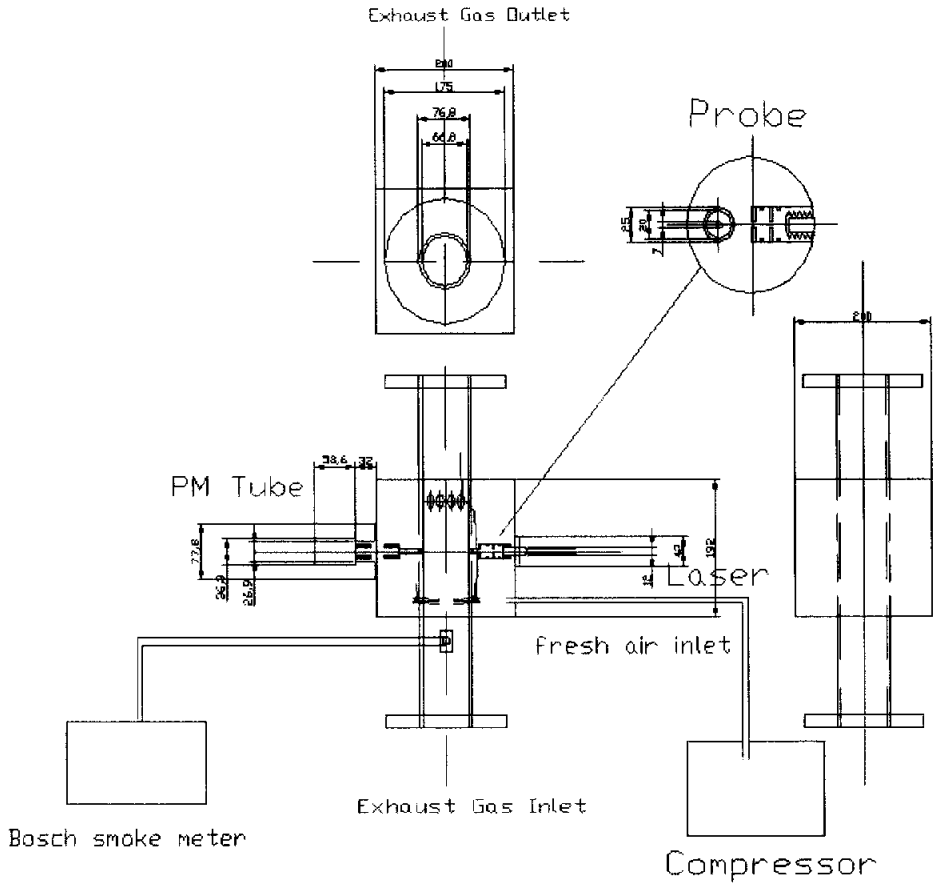



Fig. 3-8 Schematic diagram of PM measuring apparatus

### 3.3.4 PM 농도 산출법

PM 농도 측정법은 앞에서 설명한 것과 같고 측정 원리는 Lambert-Beer 원리를 이용한 것으로 다음과 같이 구한다.

균일한 흡수매체를 통과한 빛의 강도는 Beer의 법칙에 따라 식 (1)로 주어진다.

$$I = I_0 \exp(-kL) \tag{1}$$

여기서, $I_0$는 입사광의 강도, $k$는 흡광률, $L$은 광로의 길이다. 앞장에서 설명한 측정장비로 배기가스가 통과되지 않을 때 측정된 빛의 강도를 $I_0$, 배기가스가 통과되고 있을 때 측정된 빛의 강도를 $I$라고 하면 투과율(τ)을 구할 수 있다.

식 (1)은 흡광률 $k$를 흡광단면적 $C_{ext}$와 경로 중의 미립자의 밀도 수 N의 곱으로 대체하여 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\tau = \frac{I}{I_0} = \exp(-kL) = \exp(-NC_{ext}L) \tag{2}$$

다음으로 흡광단면적 $C_{ext}$는식 (3)과 같이 정의한다.

$$C_{ext} = Q_{ext}\frac{\pi d^2}{4} \tag{3}$$

여기서 $Q_{ext}$는 흡광률이고, $d$는 PM의 직경이다.

식 (4)는 레이저 광로 상에 있는 미립자의 총 수 $n$을 정의한다.

$$n = NLA_b \tag{4}$$

여기서 $A_b$는 레이저 단면적이다.

마지막으로 PM의 총질량 $m_s$를 정의하면 식 (5)와 같다.

$$m_s = \frac{1}{6}\pi d^3 \rho_s n \tag{5}$$

식 (2)에 식 (3), (4), (5)를 대입하면 식 (6)과 같이 된다.

$$\tau = \exp\left( \frac{-3\, Q_{ext} m_s}{2 A_b d \rho_s} \right) \tag{6}$$

여기서 $Q_{ext}$는 Raleigh limit, 즉 $\alpha=\pi d/\lambda<0.3$($\lambda$는 입사광의 파장)일 때 산란률을 무시해서 흡수률과 같다고 볼 수 있다. 따라서 식 (7)과 같이 된다.

$$Q_{ext} = Q_{abs} + Q_{scat} = Q_{abs} = -4\,\alpha Im\left\{ \frac{m^2-1}{m^2+2} \right\} \tag{7}$$

여기서 PM에 대한 복소 굴절률 $m$은 $m=n\ ki$로 나타내며 많은 연구자들에 의해서 $n$과 $k$값들이 나와있는데, 여기서는 Lee와 Tien[7]의 연구에 의한 값인 $n=1.9$와 $k=0.55$를 선택했다.

식 (6)을 질량에 관한 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{m_s}{A_b} = -\frac{2\ln(\tau)\rho_s d}{3 Q_{ext}} \tag{8}$$

식 (8)에 식 (7)을 대입하면,

$$\frac{m_s}{A_b} = -\frac{2\ln(\tau)\rho_s d_s}{3\times\left(-4\alpha\, Im\left\{\frac{m^2-1}{m^2+2}\right\}\right)} = \frac{\ln(\tau)\rho_s\lambda}{6\pi\, Im\left\{\frac{m^2-1}{m^2+2}\right\}} \quad (9)$$

와 같이 된다.

여기서 식 (9)의 허수부를 계산하면,

$$Im\left[\frac{m^2-1}{m^2+2}\right] = Im\left[\frac{(n-ki)^2-1}{(n-ki)^2+2}\right] = Im\left[\frac{(n^2-k^2-1)-2nki}{(n^2-k^2+2)-2nki}\right] \quad (10)$$

$$= \frac{-6nk}{n^4+2n^2k^2+k^4-4k^2+4}$$

식 (10)을 식 (9)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\frac{m_s}{A_b} = -\frac{\ln(\tau)\rho_s\lambda(n^4+2n^2k^2+4n^2+k^4-4k^2+4)}{36\pi nk} \quad (11)$$

식 (11)은 광의 단면적 당 발생 질량이므로 여기에 광로의 길이를 곱하면 체적 당 발생 질량을 구할 수가 있다. 따라서 식 (12)와 같이 된다.

$$\frac{m_s}{A_b L} = -\frac{\ln(\tau)\rho_s\lambda(n^4+2n^2k^2+4n^2+k^4-4k^2+4)}{36\pi nkL} \quad (12)$$

여기서, PM의 밀도 $\rho_s$는 Park and Appleton[8]에 의해 1.8g/㎤으로 결정했다. 최종적으로 식 (12)에 의해서 PM의 질량을 산출하였다. 산출된 값의 단위는 g/㎥로 하였다.

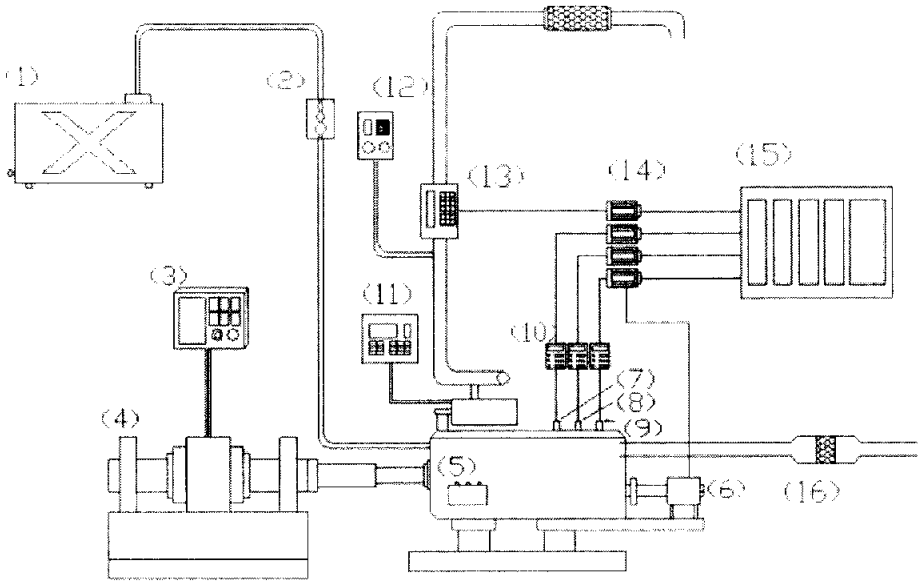
# 4. 실험장치 및 실험방법

실험장치도를 Fig. 4-1에 나타내었다. 먼저 실험에 사용한 기관은 3기통 수냉식 4행정 직접 분사식 디젤기관으로 기관 사양을 Table 4-1에 나타내었다.

동력계는 와전류식 전기동력계를 사용하였고, PM 농도 측정장치는 배기관의 중간에 연결하였으며 계측은 PXI로 하였다. 연소압력 센서는 쿨링타입으로 AVL사의 QC32C-E(X)를 사용하였고, 분사압력 센서는 Kistler 4067A를 사용하였다. 니들리프트는 Gap sensor AEC-5502를 사용하였다. 층류유량계는 흡입관에 연결되어 있고, 차압을 측정하여 유량을 산출하는 방식이다. 그리고, 연료유량계는 10cc 소모되는데 걸리는 시간을 측정하는 방식이다. 마지막으로 연소가스분석기는 Eurotron사의 GreenLine MK2를 사용하였다.

Table 4-1 Specifications of test engine

| | |
|---|---|
| Engine Model | F455DN-K |
| Bore ×Stroke(mm) | 100×110 |
| Displacement(cc) | 2591 |
| Number of the Cylinder | 3 |
| Type | 4 Stroke DI Diesel<br>Engine cooled water |
| Injection pressure(MPa) | 18.62 |
| Compressin ratio | 17.6 |
| Combustion chamber | Star shape deep bowl type |




(1) Fuel tank
(2) Fuel flow meter
(3) Dynamo-meter controller
(4) Dynamo-meter
(5) Test engine
(6) Rotary encoder
(7) Cylinder pressure sensor
(8) Injection pressure sensor
(9) Needle lift(gab sensor)
(10) Amplifier
(11) Exhaust gas analyzer
(12) Bosch smoke meter
(13) PM concentration measurement
(14) Terminal block
(15) PXI
(16) Laminar air flow meter

Fig. 4-1 Schematic diagram of experimental apparatus

실험은 세 가지의 시료유(DF, BO, TVO)를 각각 1500, 2000, 2500rpm에서 부하를 20, 40, 60Nm로 변화를 주며 수행하였다. 각 시료유를 교환할 때는 기관 내부에 있는 이전 시료유를 제거하고 새 시료유를 공급할 수 있도록 고부하에서 충분한 운전시간을 주었다. 데이터의 취득은 연소압력, 니들리프트, 분사압력, PM 농도 등을 PXI로 계측하였다. 이 때, 크랭크 각도는 크랭크 축에 연결된 엔코더(720ppr)를 이용하여 계측하였다. 엔코더의 Z펄스를 Trigger 신호로 사용하였고, 크랭크 각도로 0.5°마다 한번씩 펄스가 생성되는 B펄스를 외부클럭으로 사용하여 데이터를 크랭크 각 0.5°마다 취득하였다.

배기가스 분석기로는 $O_2$, 공기 과잉률, $CO_2$, CO, NOx, SOx, 배기가스 온도를 계측하였다. 또 자체 제작한 PM 농도 측정장비와 Bosch smoke meter를 이용해서 PM 농도를 정량적으로 분석·비교하고, 보정을 하고자 하였다.

# 5. 결과 및 고찰

## 5.1 온라인 계측

Fig. 5-1은 회전수는 1500rpm, 부하는 60Nm일 때, 경유로 운전하였을 때의 온라인 분석 결과이다. LabVIEW 프로그램의 프론트 패널로 연소압력, 니들리프트, 분사압력, PM 농도, 열발생율 그래프만을 나타내었다. 이 외에, 압력변화율, 누적열발생율 및 최고압력과 최고압력점 등도 나타낼 수가 있다. PXI에는 Voltage값으로 모든 데이터가 수집되지만 온라인 분석을 위해 코딩된 LabVIEW 프로그램에 따라 연소압력은 MPa 단위로 환산되고 압력변화율, 열발생율, 누적 열발생율 및 최고압력과 최고압력점 등이 온라인으로 산출된다. 또 PM 농도도 빛의 강도 비를 측정하여 g/m³의 단위로 환산되어 컴퓨터에 저장이 된다. 니들 리프트와 분사압력은 환산된 값을 필요로 하지 않기 때문에 수집된 전압값으로 나타내었다. 그리고, Fig. 5-2는 실험에 사용된 프로그램의 블록 다이어그램이다.

온라인 분석을 위해 확대해서 한 화면에 나타내면 Fig. 5-3과 같다. Fig. 5-3에서 압력선도의 원 안에 있는 부분이 최고압력값을 분석하는 부분이다. 누적열발생율의 원 안에 있는 부분은 연소끝점을 찾는 부분이다. 이 두 값은 LabVIEW에 있는 함수로 쉽게 알아낼 수 있으나, 열발생율과 니들리프트의 원 안에 있는 부분에서 연소시작점과 분사끝점을 알아내는 것은 쉽지가 않다. 연소시작점을 찾는 것은 연소시작 부근에서 연소시작점의 정의에 따라 열발생율 선도가 음으로 떨어지다가 다시 상승하는 점 또는 음으로 떨어졌다가 다시 0을 지나치는 점을 찾아야 한다. 그러나, 열발생율 선도가 이 부근에서 매끄럽지 못하기 때문에 이 점을 찾는 것은 쉽지 않다. 그리고, 니들리프트에서는 분사시작점은 찾기 쉽지만 분사끝점은 진동을 하기 때문에 분사끝점을 프로그램으로 찾기는 쉽지 않다.

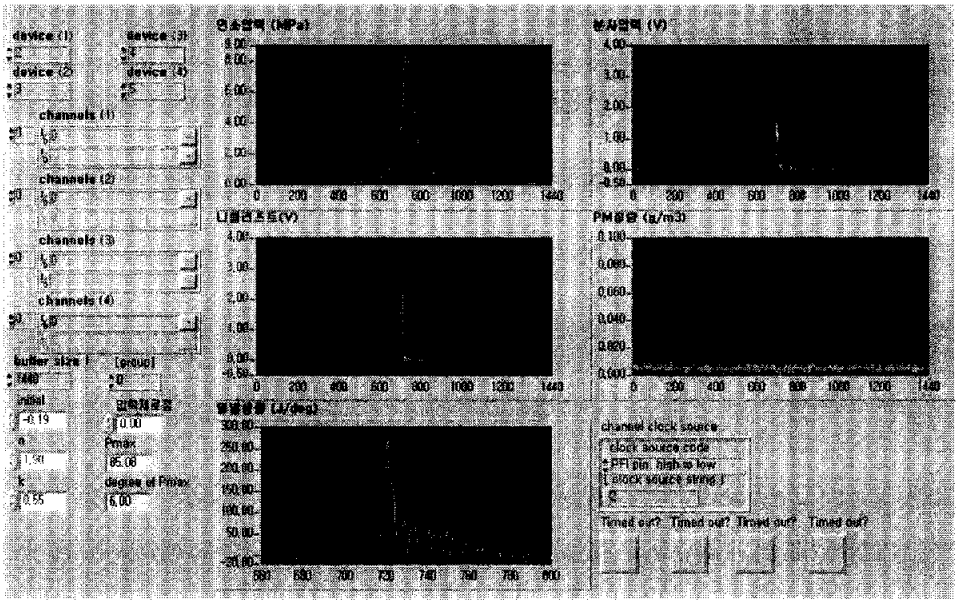


Fig. 5-1 Front panel used for experiment

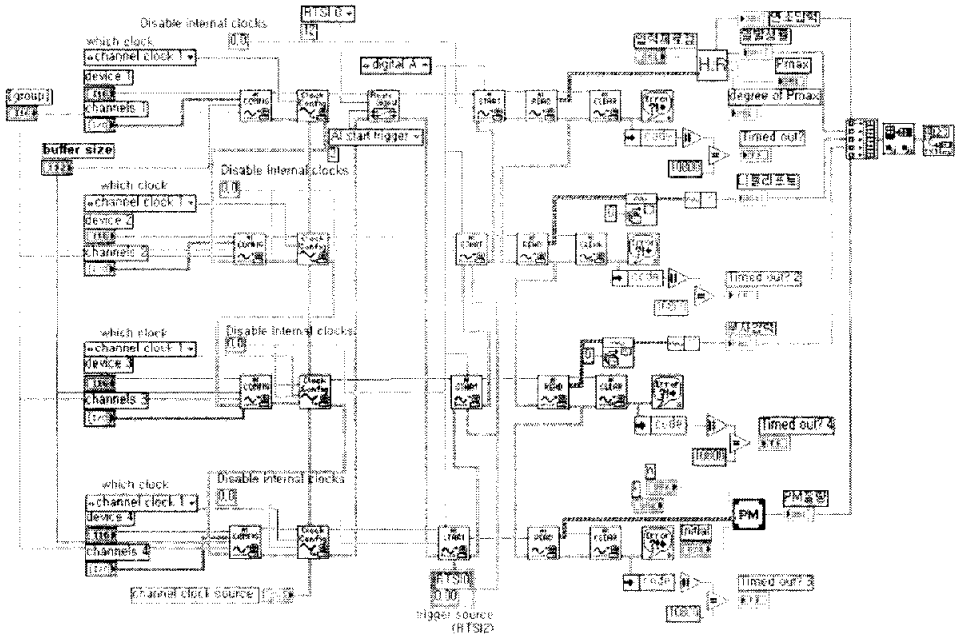


Fig 5-2 Block diagram used for experiment

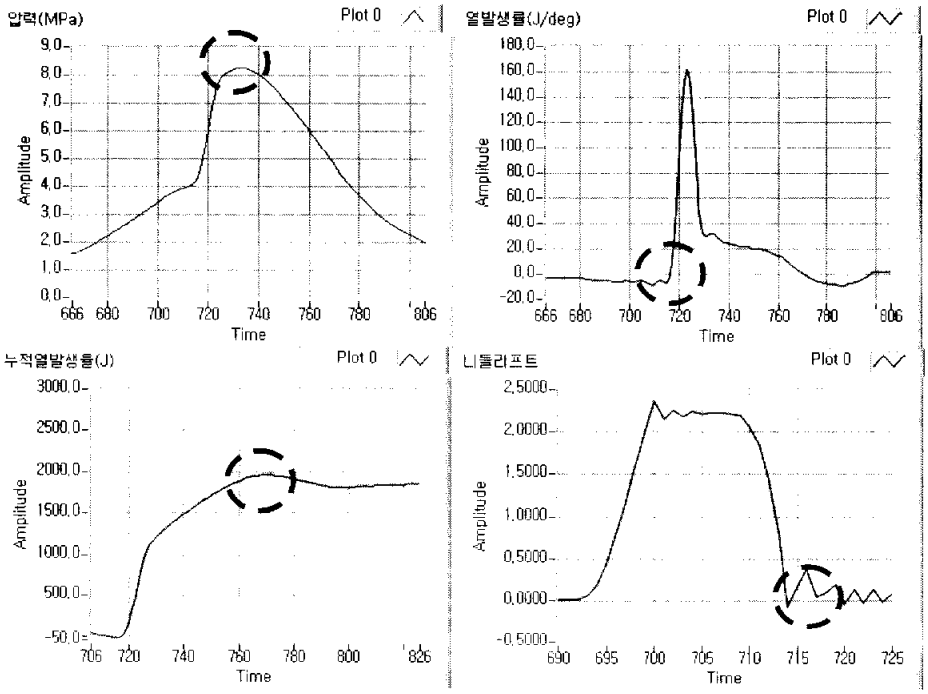



Fig. 5-3 Analysis data On-line in detail

## 5.2 압력선도 스무싱 및 열발생율 검증

### 5.2.1 압력선도 스무싱

연소실에서의 연소압력은 불균일 혼합기의 폭발적 연소에 의해 연소진동을 동반한다. 이와 같은 연소압력거동을 열발생율 계산에 사용하면 열발생율의 피크치 후에 많은 진동이 발생하기 때문에 정밀 분석에는 사용하기가 용이하지 않다. 따라서 압력선도를 매끄럽게 해야 할 필요가 있다. Fig. 5-4는 Origin 6에서 5포인트 FFT filter smoothing한 압력거동과 스무싱하지 않은 압력거동의 예를 니들리프트와 동시에 나타내었다.

Fig. 5-4를 살펴보면 스무싱함으로써 압력의 피크치와 급상승 시의 기울기에 약간의 차이를 나타내었지만 그 외에는 별다른 차이없이 진동을 잡아주는 역할을 하였다. 따라서 압력선도를 스무싱한 결과를 이용하여 열발생율과 누적열발생율 및 연소압력거동을 분석하였다.

Fig. 5-5는 동일 운전조건에서 smoothing에 의한 압력선도로 산출한 열발생율과 누적열발생율을 비교하였다. Fig. 5-5와 같이 smoothing하지 않은 것은 열발생율에 많은 진동을 수반했으나 smoothing에 의한 열발생율은 매끄러운 변화를 나타내고 있다. 그러나 그 형태는 별 차이가 없고, 특히 누적열발생율의 피크치나 그 형태는 약간의 진동을 제외하면 거의 비슷하다.

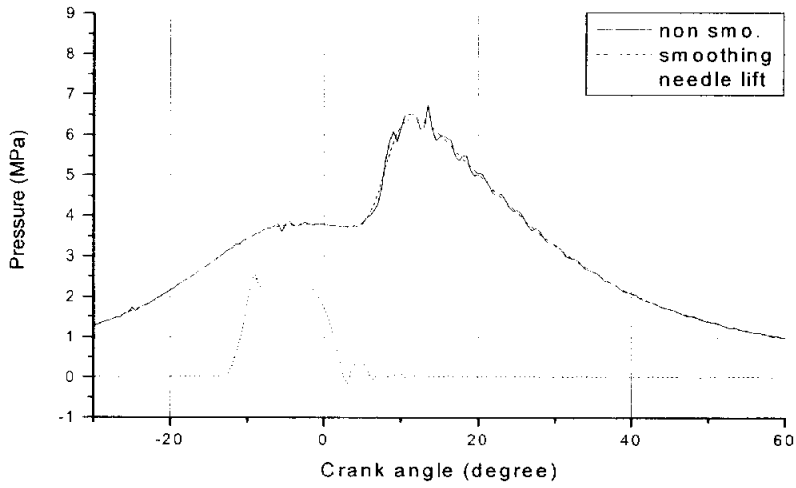



Fig. 5-4 Comparison of smoothing curve and non-smoothing curve for cylinder pressure

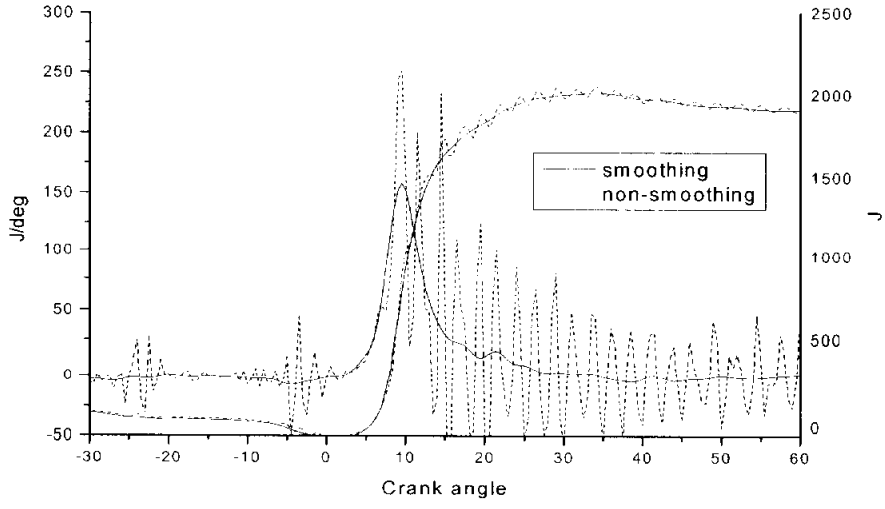



Fig. 5-5 Comparison of smoothing curve and non-smoothing curve for R.O.H.R. and C.H.R.

### 5.2.2 열발생율 검증

순열발생률 $dq/d\theta$는 열역학 제1법칙에서 유도된 식 (13)을 사용하여 산출하였다.

$$\frac{dq}{d\theta} = \frac{\kappa}{\kappa-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\kappa-1} V \frac{dP}{d\theta} \qquad (13)$$

여기서, $\kappa$는 비열비, $P$는 실린더 내 압력, $V$는 실린더 내 체적 그리고, $\theta$는 크랭크 각도이다.

비열비 $\kappa$값을 변수로 생각하고 열발생률을 구하면 피크치가 좀 더 상승하지만 경유와 같은 연료의 연소에는 큰 영향을 미치지 않으므로 식 (13)에서 $\kappa$의 값은 일정하다고 가정하고 1.33으로 했다. 순열발생율은 연소실 내의 작동유체의 내부에너지 변화와 한 일 및 비열비를 일정으로 하고 계산한 것으로, 여기서는 블로우 바이(blow-by), 크레비스(crevice), 비열비 및 열전달 항 등을 고려하지 않았다. 따라서 열발생율의 검증을 위해 연료를 분사하지 않고 모터링(motering)을 했을 때의 열발생율과 연소가 되었을 때의 열발생율을 비교해 볼 필요가 있다.

Fig. 5 6에서 점선은 모터링만의 결과이고 실선은 분사가 되어 실제 연소가 이루어졌을 때(1500 rpm, 20 Nm)의 열발생율로 모터링 시의 최고 열발생율은 4 J/deg로 이는 연소가 이루어졌을 때 최고치의 약 5 % 정도로 무시할 수 있다. 또한 이 결과는 Fig. 5-7의 Paul 등[9]의 결과와도 유사하여 본 실험에 사용한 PXI와 LabVIEW에 의한 계산 결과도 신뢰성이 있는 것으로 사료된다.

또, 모터링을 해서 TDC를 정확히 설정하였다. 모터링했을 때의 최고압력점을 TDC로 설정한 결과, 설정 전의 TDC와 3°CA 차이가 났다. 이 때 열발생율을 구해보면 TDC를 잘못 설정하고 구한 것이 모터링에 의해 정확한 TDC를 설정한 실린더 내 압력선도로 열발생율을 구했을 때보다 피크치가 3배정도 높게 나타났다.

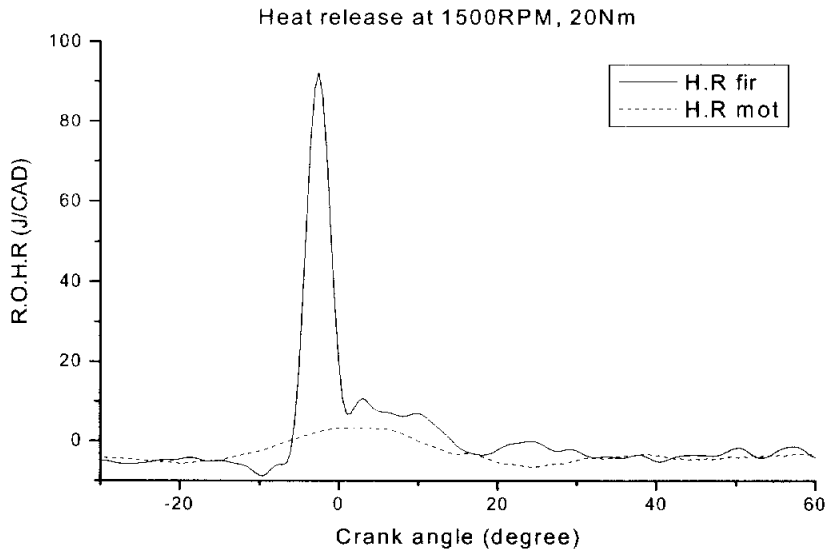



Fig. 5-6 Net R.O.H.R under motored and fired on experiment

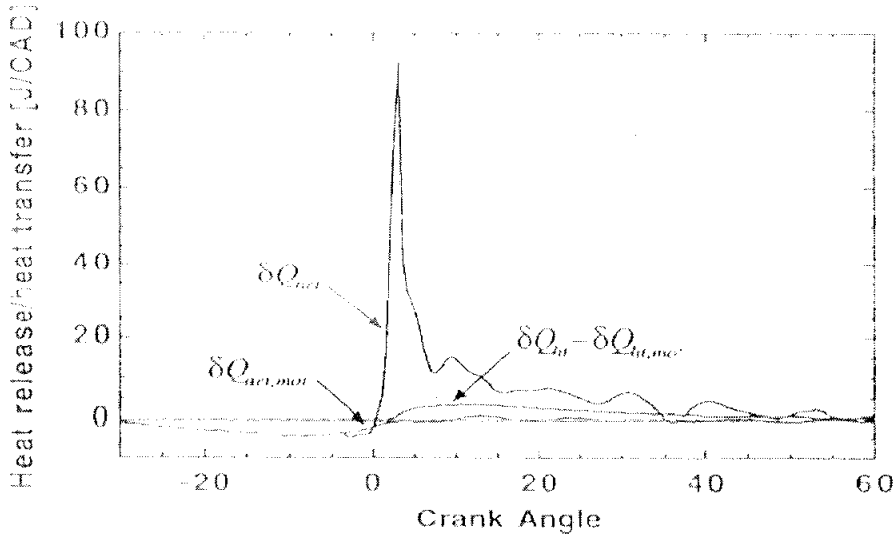



Fig. 5-7 Net R.O.H.R under motored and fired on reference[9]

## 5.3 연소특성

### 5.3.1 압력거동과 열발생율

Fig. 5 8에 부하가 60 Nm일 때 회전수에 따른 연료들의 연소압력거동과 니들리프트를 나타내었다. 회전수가 1500 rpm일 때는 각 연료별로 차이가 크게 나타나지 않지만 회전수가 증가함에 따라 연료별 연소압력거동이 달라지고 있다. 이는 회전수가 증가함에 따라 각 연료가 가지는 물성치 중에서 특히 점도의 영향이 크게 미친 것으로 사료된다. 이러한 경향은 Fig. 5-9, 5-10의 열발생율과 누적열발생율에서도 나타난다. 그리고 회전수 2500 rpm에서 경유의 착화점이 늦은 것은 착화가 산소의 양에 영향을 받기 때문인 것으로 고려된다. 즉, 산소의 양이 많을수록 착화가 빨리 이루어지기 때문에 함산소 연료인 바이오 디젤유들의 착화점이 빠르게 나타난 것으로 생각된다. 따라서 연료유에 따라 회전수에 알맞은 분사시기 조정이 필요할 것으로 생각된다.

또 니들리프트가 열리는 시기는 2500 rpm의 경우 경유, 에스테르유, 블렌드유의 순으로 늦게 열리는 것이 나타났다. 이는 각 연료의 점도와 관계가 있는 것으로 생각되며 특히 Bosch식 펌프의 특성상 고회전수로 갈수록 토출압력이 높아지므로 점도의 영향이 커진 것으로 고려된다.

어느 조건에서나 분사는 폭발적 연소기간 이전에 끝이 나고 있다. 따라서 대부분이 예혼합연소로만 이루어지기 때문에 NOx와 soot의 생성이 감소한 것으로 고려된다.

Fig. 5-9에 나타낸 열발생율에서 에스테르유의 피크치 발생 경향은 경유와 블렌드유에 비해 다른 경향을 보이고 있다.

Fig. 5-10에는 누적열발생율을 나타내었다. 연소압력에서 설명한 것처럼 고회전수에서 각 연료별 특성이 확연히 달라짐을 알 수 있다. 한편 에스테르유의 변곡점을 살펴보면 다른 연료들보다 변곡점이 오른쪽으로 치우쳐 있다. 이는 에스테르유의 배기가스 온도(Fig. 5-17참조)를 높이는 원인인 것으로 사료된다.

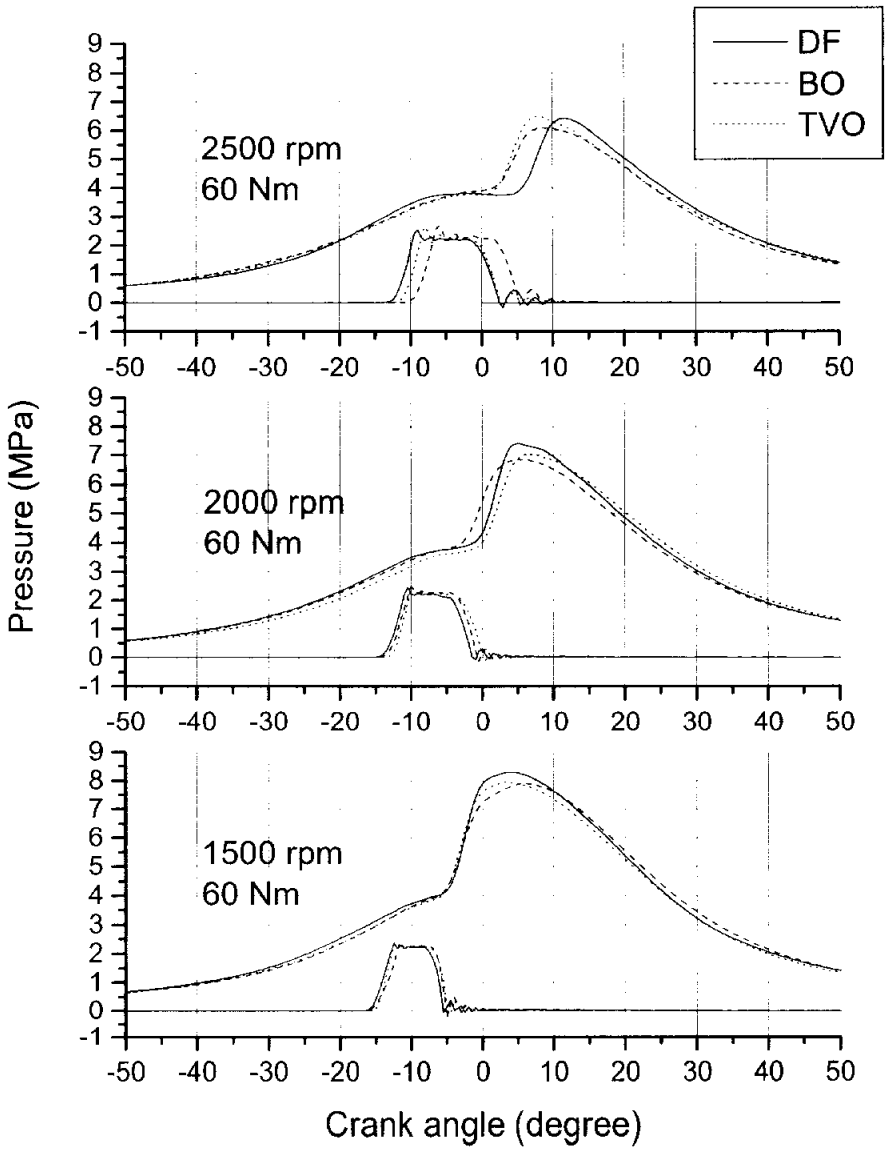



Fig. 5-8 Comparison of cylinder pressure and injection period using DF, BO and TVO at various engine conditions

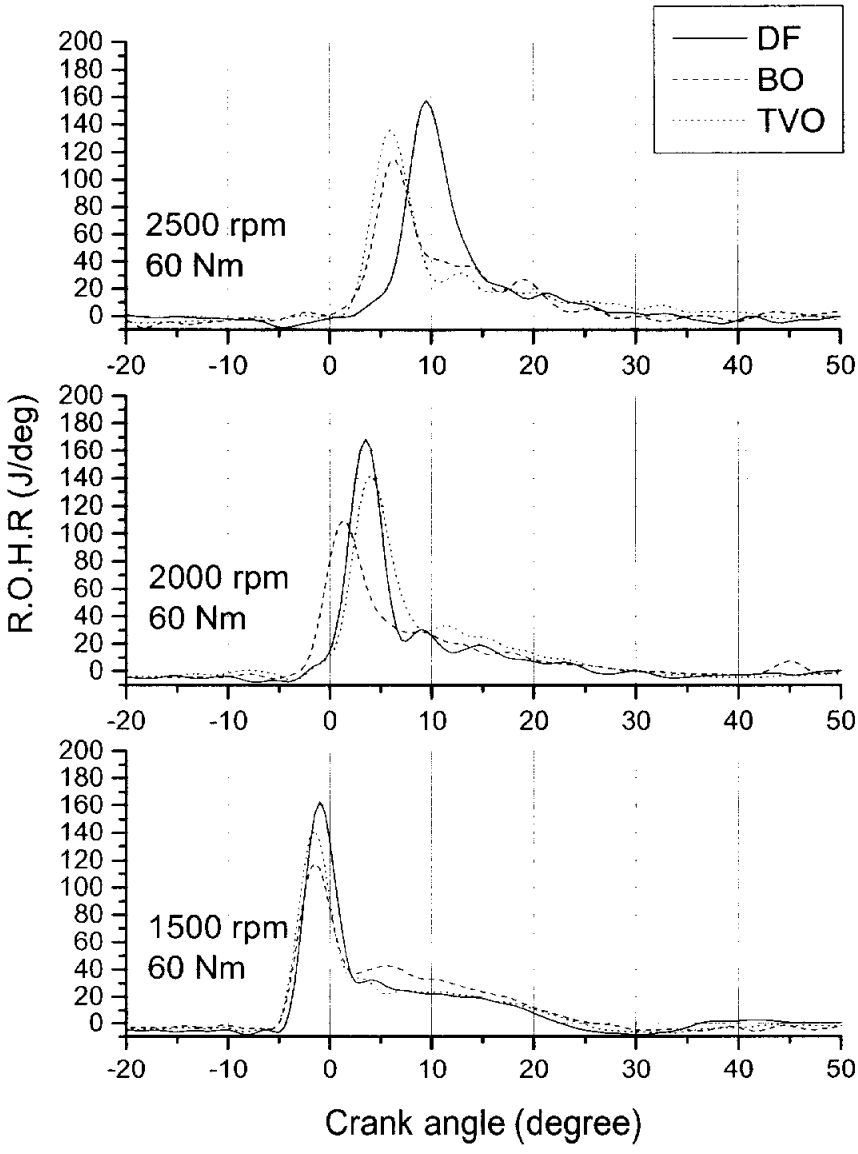



Fig. 5-9 Comparison of R.O.H.R using DF, BO and TVO at various engine conditions

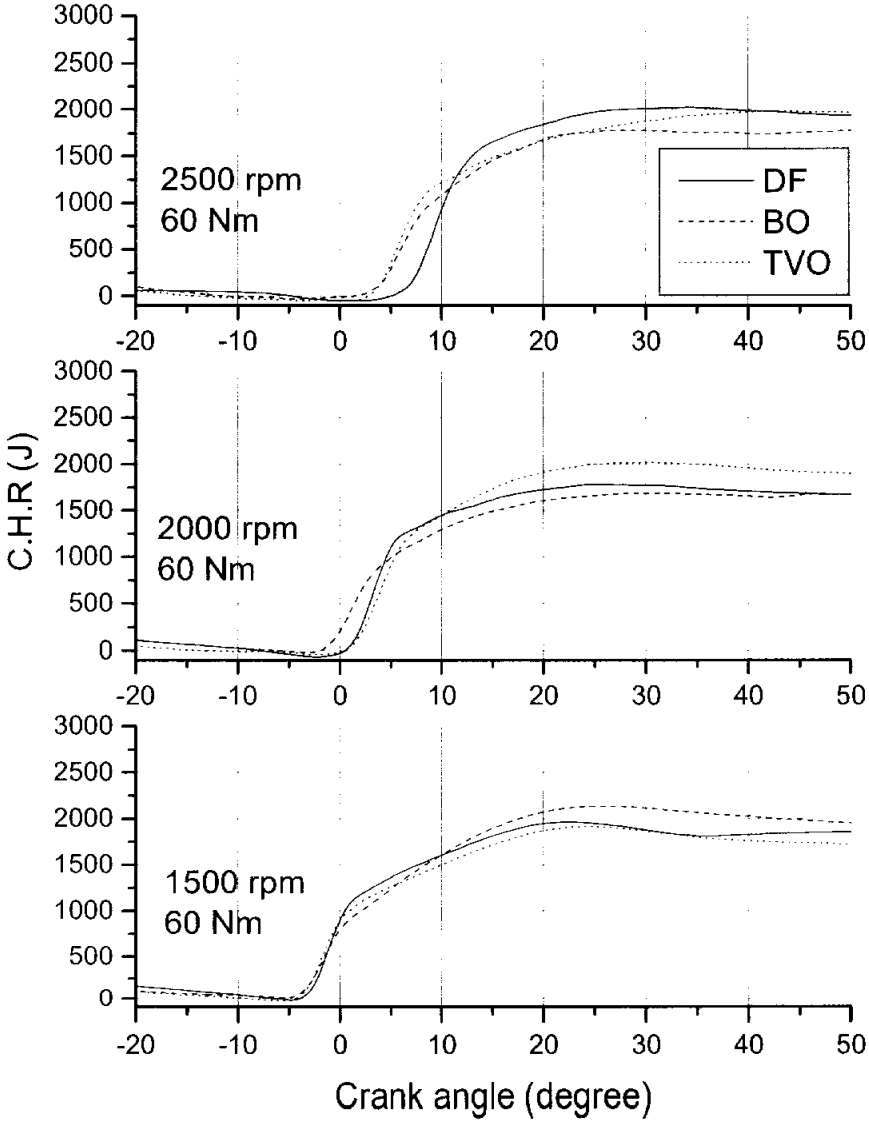



Fig. 5-10 Comparison of C.H.R using DF, BO and TVO at various engine conditions

### 5.3.2 연료소비율, 공기과잉률과 체적효율

연료소비율을 Fig. 5-11에 나타내었다. 부하가 증가함에 따라 연료소비율은 감소하는 경향을 나타내고 있고, 회전수에 따른 영향은 크지 않았다. 특히, 경유의 연료소비율이 부하와 회전수에 관계없이 다른 연료들에 비해 낮게 나타나고 있다. 또 미소하나마 블렌드유가 에스테르유보다 낮은 값을 나타내고 있다. 이는 각 연료의 발열량 차이와 잘 일치한다.

Fig. 5-12에는 공기과잉률을 나타내었다. 경유와 블렌드유는 모든 영역에서 거의 같은 값을 나타내고 있고, 에스테르유는 부하가 작을수록 다른 연료들과 많은 차이를 나타내고 있다. 이는 에스테르유가 다른 연료들에 비해 탄소와 수소의 비가 작고 상대적으로 산소를 많이 함유하기 때문인 것으로 고려된다.

Fig. 5-13에 체적효율을 나타내었다. 체적효율은 부하의 변화에는 거의 영향을 받지 않지만 회전수의 변화에는 영향을 받고 있다. 회전수가 증가할수록 체적효율은 감소하고 있다. 이는 연료와 부하에는 무관하며 회전수의 증가에 따라 공기가 유동할 때 마찰저항이 커지기 때문인 것으로 생각된다. 그리고, 회전수 2500 rpm, 부하가 20 Nm일 때에 차이가 나는 것은 측정상의 오차인 것으로 사료된다.

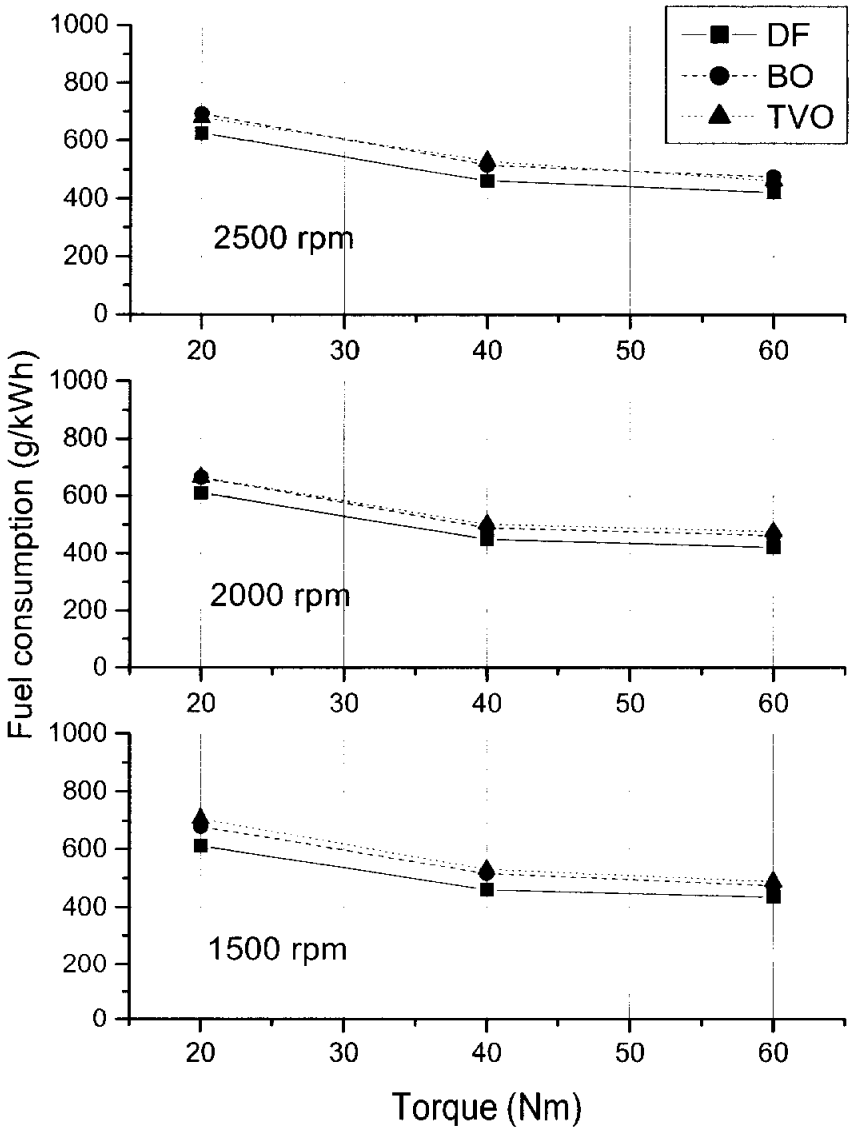



Fig. 5-11 Comparison of fuel consumption using DF, BO and TVO at various engine conditions

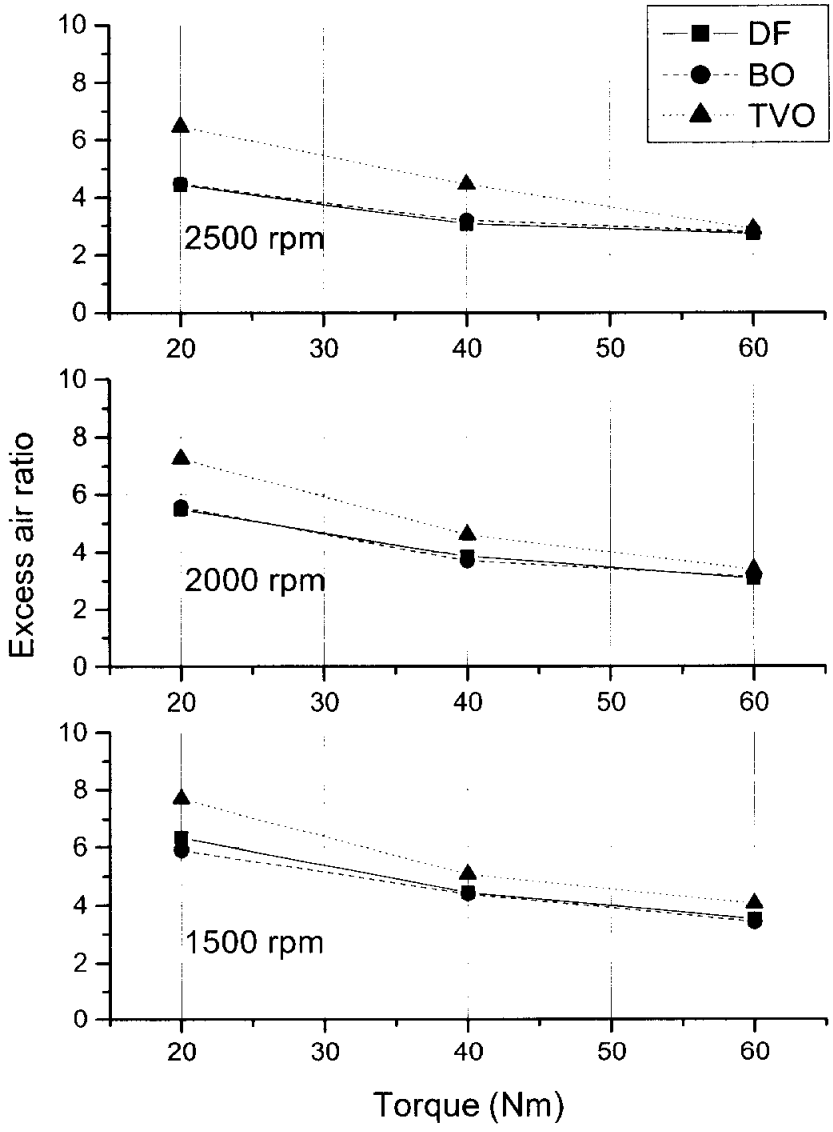



Fig. 5-12 Comparison of excess air ratio using DF, BO and TVO at various engine conditions

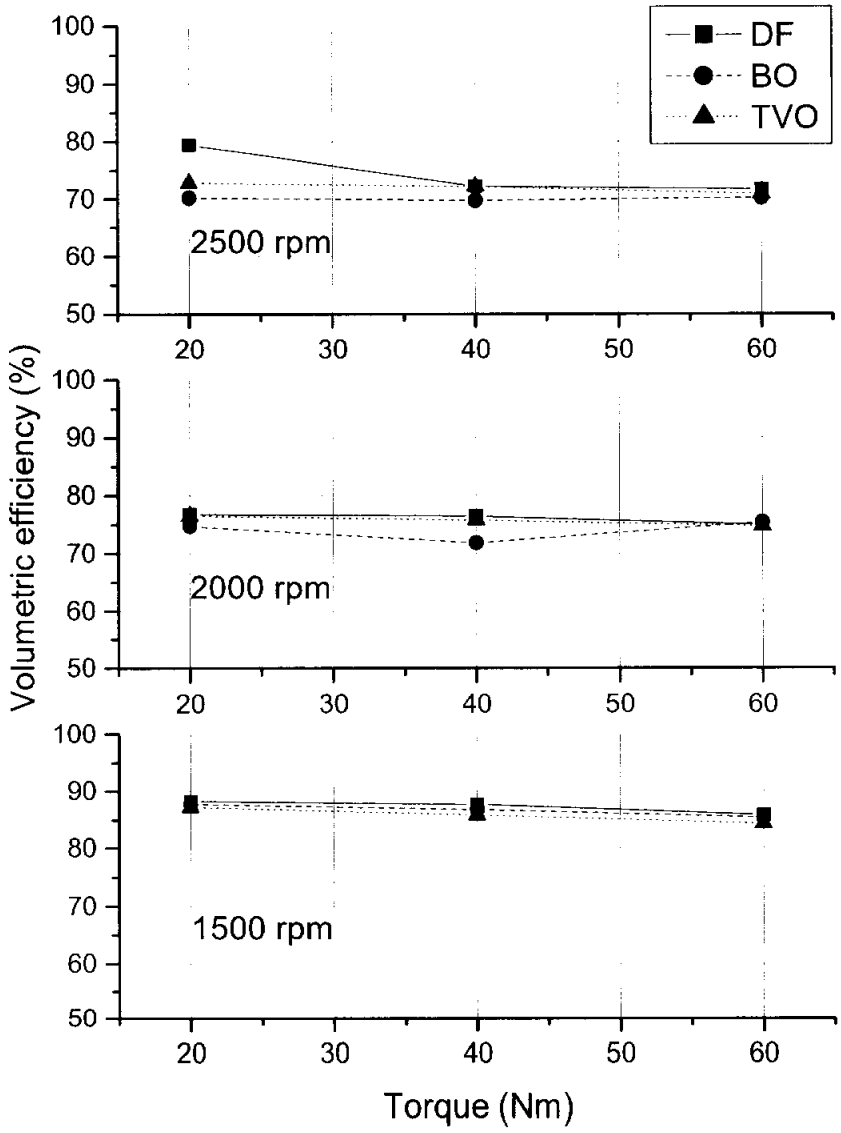



Fig. 5-13 Comparison of Volumetric efficiency using DF, BO and TVO at various engine conditions

### 5.3.3 최고압력, 분사기간, 착화지연과 연소기간

Fig. 5-14에 최고압력값을 나타내었다. 부하가 증가함에 따라 최고압력값이 높아지고 있다. 그러나 회전수가 증가함에 따라서는 최고압력값이 떨어지고 있다. 각각의 연료들이 이와 비슷한 경향을 보이고 있지만, 에스테르유의 경우 회전수와 부하의 변동에 따른 최고압력값의 변동이 다른 연료들에 비해 크게 나타나고 있다. 이러한 경향은 다른 특성에서도 나타나고 있다.

분사기간을 Fig. 5-15에 나타내었다. 분사기간은 회전수와 부하가 증가함에 따라 길어지는 경향을 나타내고 있다. 이는 당연히 회전수와 부하의 증가에 따라 연료의 분사량도 증가해야 하기 때문이다. 또 분사기간도 최고압력값과 마찬가지로 에스테르유의 변동이 다른 연료들에 비해 큰 편이다.

Fig. 5-16에는 착화지연, Fig. 5-17에는 연소기간을 나타내었다. Fig. 5-16에서 블랜드유의 경우, 착화지연이 각 회전수에서 부하에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 경유도 그 변동이 에스테르유에 비해 작은 편이다. 그리고 연소기간을 살펴보면, 각 연료에 관계없이 회전수 1500 rpm에서는 거의 비슷한 경향을 보이지만 회전수가 올라갈수록 약간 다른 경향들을 나타내고 있다. 특히 에스테르유의 경우 2500 rpm에서는 부하에 관계없이 다른 연료들에 비해 연소기간이 길어지고 있다. 이는 앞서 누적열발생율에서 피크치가 다른 연료에 비해 크랭크 각도로 늦게 나타난 것에 기인한다.

이상을 종합적으로 살펴볼 때, 에스테르유의 경우 다른 연료들에 비해 조건의 변화에 따른 특성이 가장 많이 변하고 있다. 이에 대해서는 좀 더 깊은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

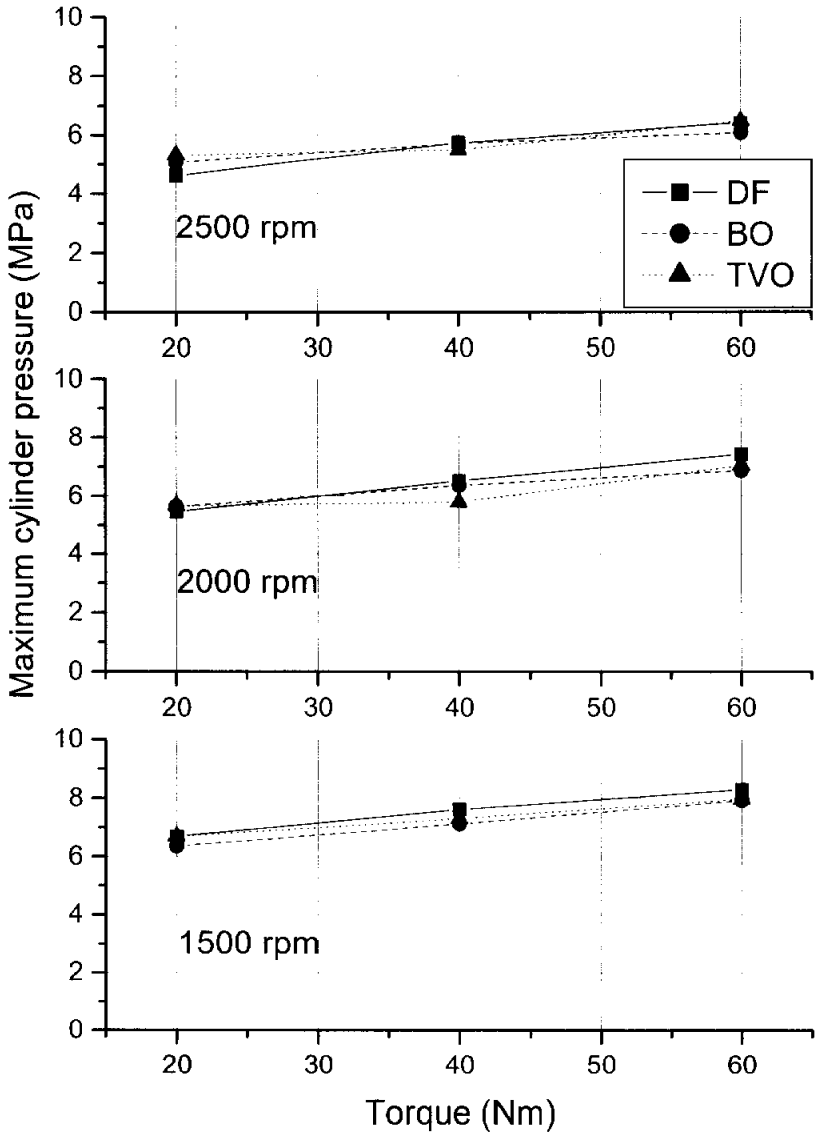



Fig. 5-14 Comparison of maximum cylinder pressure using DF, BO and TVO at various engine conditions

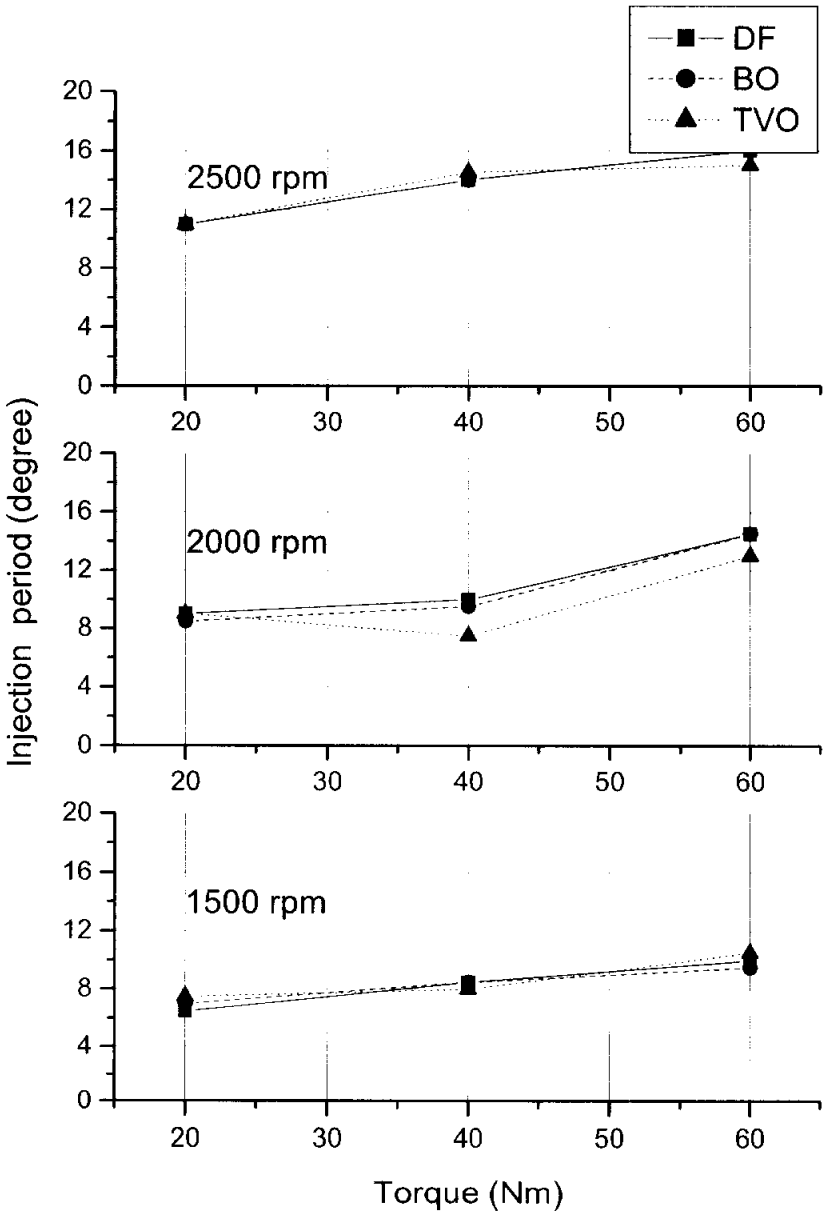



Fig. 5-15 Comparison of injection period using DF, BO and TVO at various engine conditions

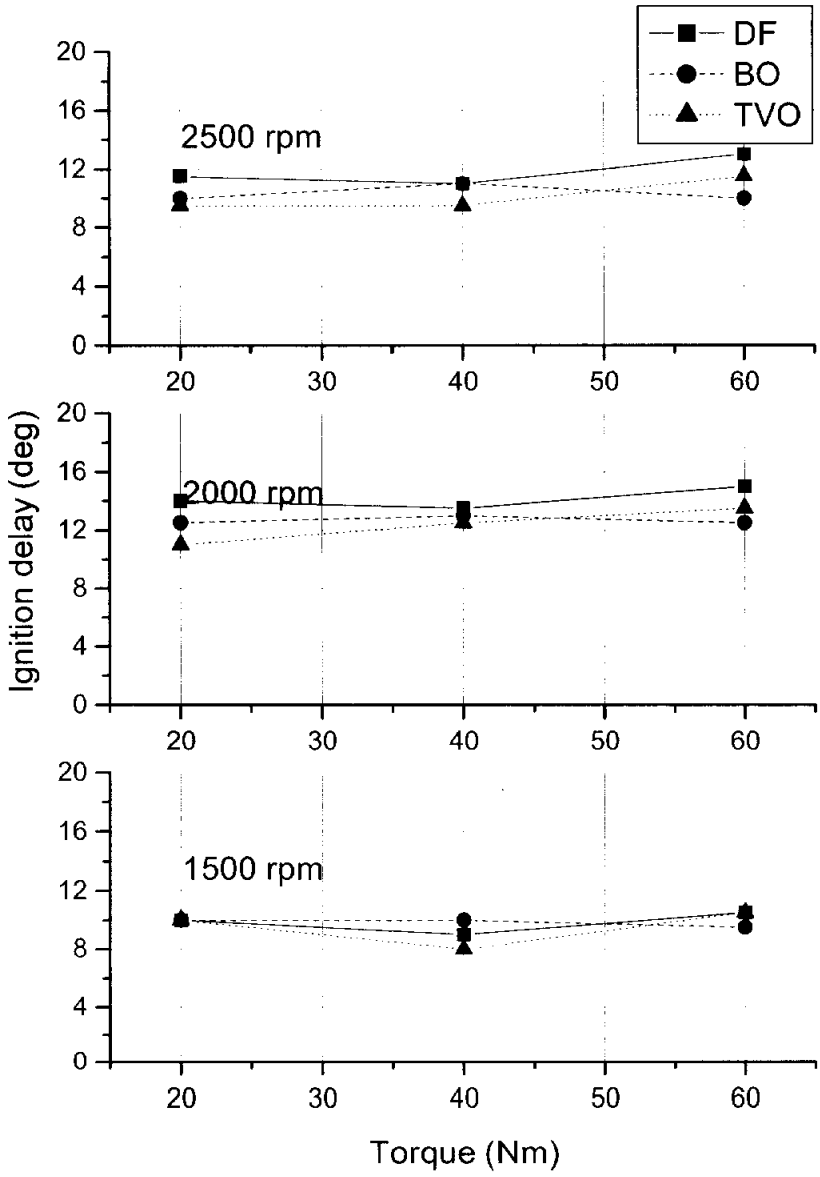



Fig. 5-16 Comparison of ignition delay using DF, BO and TVO at various engine conditions

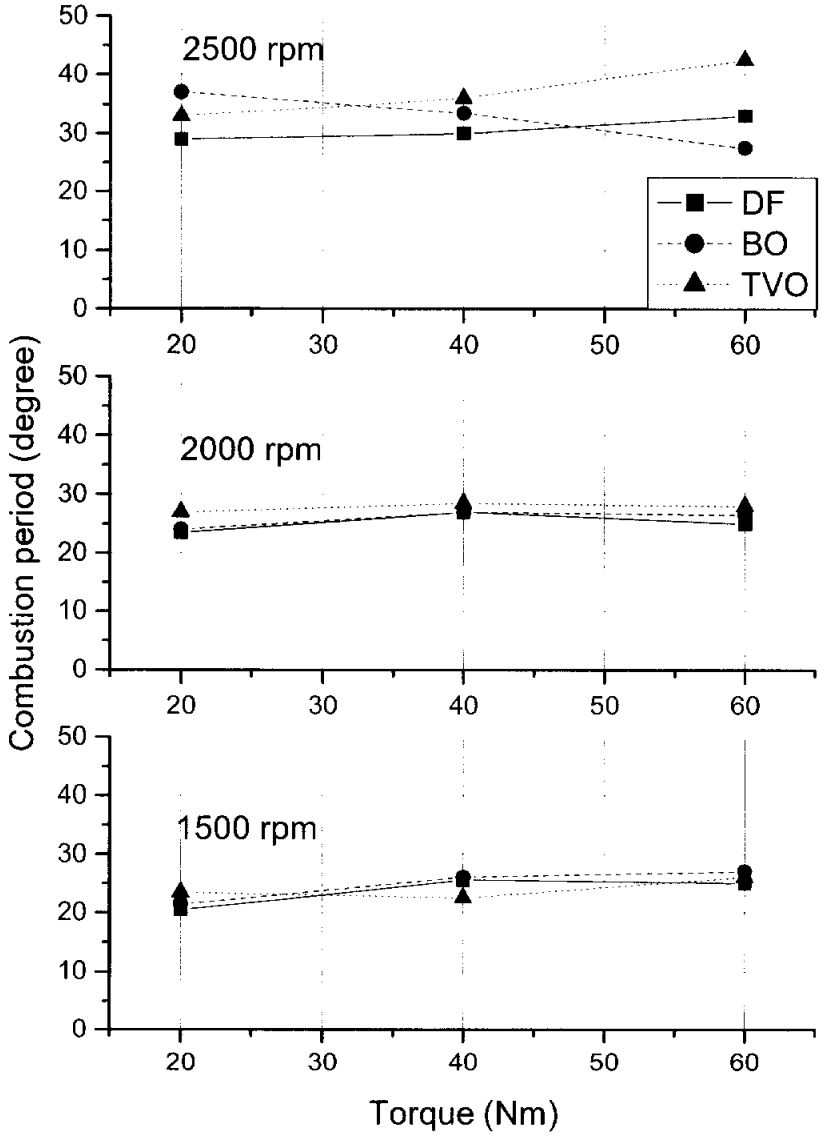



Fig. 5-17 Comparison of combustion period using DF, BO and TVO at various engine conditions

## 5.4 배기특성

Fig. 5-18에 배기가스의 온도를 나타내었다. 부하와 회전수가 증가할수록 온도가 높은 특성을 나타내고 있다. 또 각 연료들이 비슷한 경향을 보이지만 에스테르유의 온도가 약간 높게 나타나고 있다. 이는 에스테르유의 연소기간이 대체적으로 긴 것에서 기인하는 것으로 생각된다.

Fig. 5-19에 CO의 발생량을 나타내었다. 고부하에서는 연료에 따른 CO 농도의 차이가 작지만 부하가 작아질수록 CO의 농도도 같이 증가하는 것을 보인다. 이는 과희박에 의한 연소 및 화염의 퀜칭 등에 기인하는 것으로 사료된다. 특히 각 연료간의 차이는 산소의 함유량에 비례하는 특징을 보여주고 있다. 이는 에스테르유와 블렌드유에 다량 함유된 산소의 영향으로 보여진다.

Fig. 5-20에 NOx의 발생량을 나타내었다. 부하가 증가함에 따라 NOx의 농도도 따라서 증가하고 있고, 특히 회전수 2000rpm에서 가장 낮은 값을 나타내고 있다. 또 각 연료간의 정량적인 큰 차이는 없으나 대체로 에스테르유가 적게 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 다른 연료에 비해 연소상태가 좋기 때문인 것[3]과 NOx의 발생량은 경유와 비슷하거나 낮은 것으로 발표되어 있는 것[10]으로 보아 정상인 것으로 판단된다. 저속(1500rpm) 60Nm에서 NOx가 많이 생성되는 것은 연소기간이 길기 때문으로 생각되나 어느 경우나 일반적인 DI 디젤기관의 경우보다 적게 나타났다. 이는 앞의 압력 및 니들리프트 선도에서 지적한 바와 같이 본 실험에 사용한 기관의 연소는 예혼합연소에 지배되기 때문이라고 생각된다.

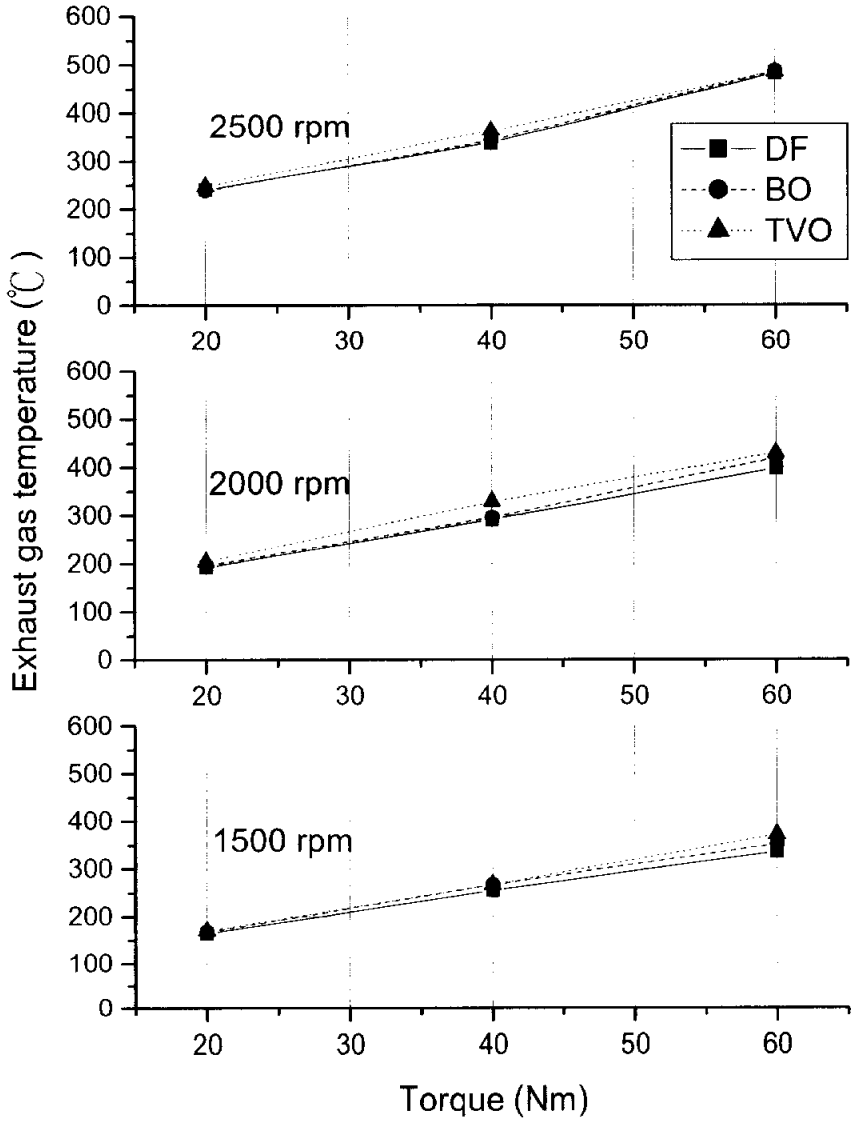



Fig. 5-18 Comparison of exhaust gas temperature using DF, BO and TVO at various engine conditions

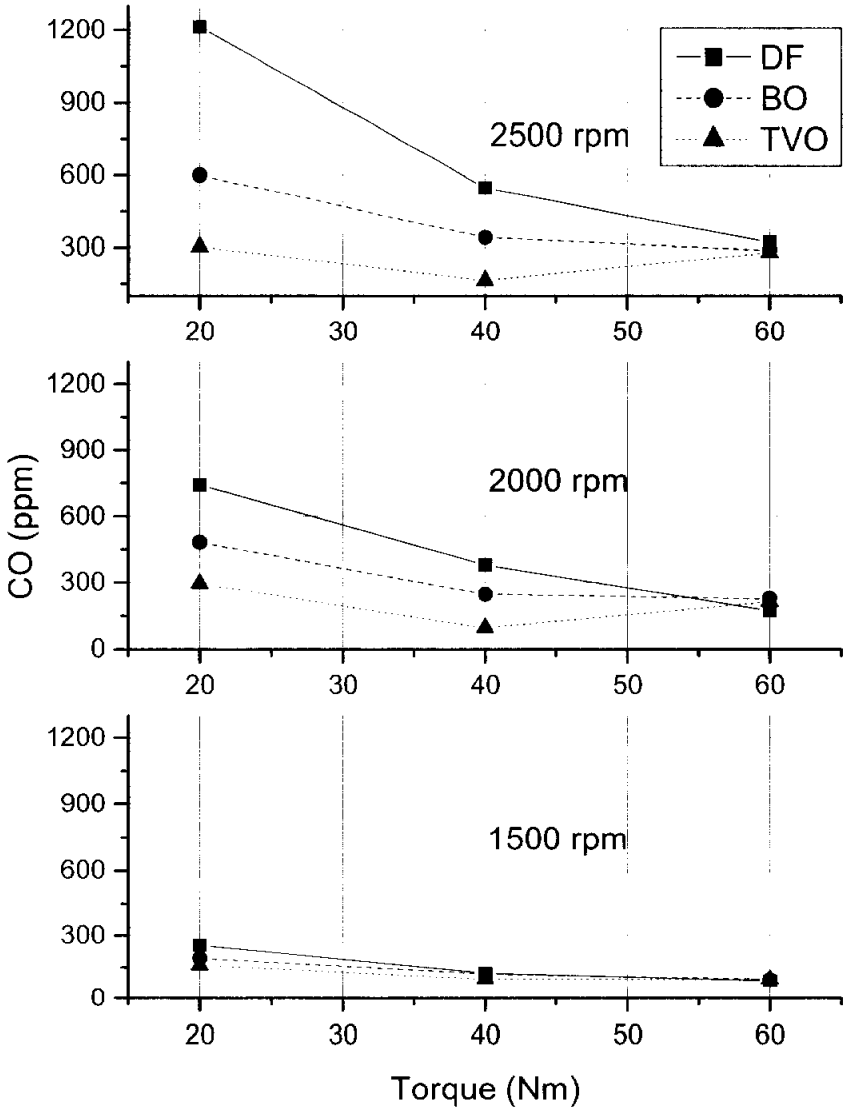



Fig. 5-19 Comparison of CO concentration using DF, BO and TVO at various engine conditions

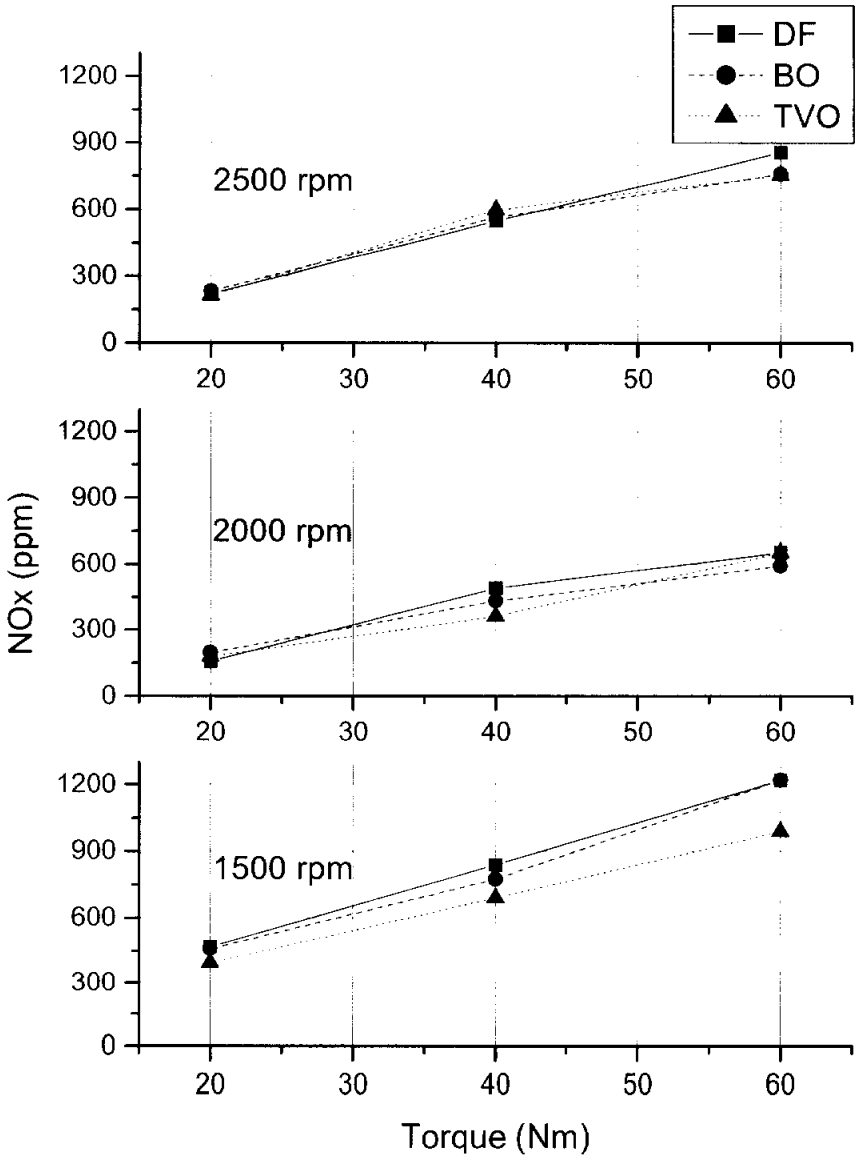



Fig. 5-20 Comparison of NOx concentration using DF, BO and TVO at various engine conditions

## 5.5 PM 배출 농도

Fig. 5 21에 배기가스의 흡수율과 질량농도와의 관계에 대해서 나타내었다. 본 실험에서 산출된 최고의 PM질량은 0.016 g/㎥이었다. Fig. 5-21에 서 볼 수 있듯이 이 값은 Bosch spot number의 1에도 미치지 못하는 양이다. 보쉬 스모크미터로는 측정이 불가능한 영역이어서, 10000 cc의 배기가스를 포집하여 질량을 계측하였으나 그 양이 적어서 1 ㎎을 계측할 수 있는 전자저울로도 측정이 되지 않았다. 따라서 좀 더 과부하의 상황이나 자동차의 스모크 검사와 같은 방법으로 측정을 한다면 보정도 가능할 것으로 보인다. 앞으로 이 방법에 대해 좀 더 연구한다면 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

PMT에서 계측된 전압값을 Table 5-1에 나타내었다. 배기가스가 흐르지 않을 때의 값, 즉 초기값($I_0$)은 -0.19였다. 이 값들을 바탕으로 PM의 질량농도를 나타낸 것이 Fig. 5-22이다. 대략 측정된 양은 EURO-Ⅲ의 규제치 0.01 g/㎥에 크게 벗어나지 않는 것으로 나타났다. 그리고 PM 농도는 경유, 블렌드유, 에스테르유 순으로 많이 나타났다. 이는 블렌드유와 에스테르유가 산소를 많이 함유하고 있는 이유도 있지만 바이오 디젤유는 soot가 연소실 내부와 배기관에 많이 퇴적된다는 결과도 있기 때문에 PM의 양이 적을 수도 있다[3],[11].

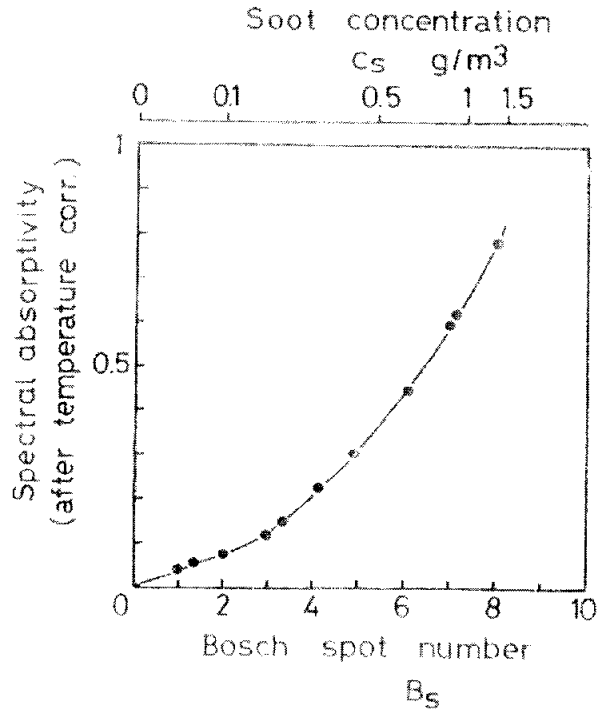



Fig. 5-21 Relationship of soot concentration and spectral absorptivity

Table 5-1 Value of PM measured before calculated

| rpm | Load (Nm) | DF | BO | TVO |
|---|---|---|---|---|
| 1500 | 20 | -0.162 | -0.156 | -0.161 |
| | 40 | -0.146 | -0.161 | -0.157 |
| | 60 | -0.132 | -0.127 | -0.134 |
| 2000 | 20 | -0.137 | -0.159 | -0.154 |
| | 40 | -0.132 | -0.142 | -0.145 |
| | 60 | -0.122 | -0.128 | -0.130 |
| 2500 | 20 | -0.132 | -0.137 | -0.141 |
| | 40 | -0.103 | -0.103 | -0.109 |
| | 60 | -0.122 | -0.123 | -0.124 |

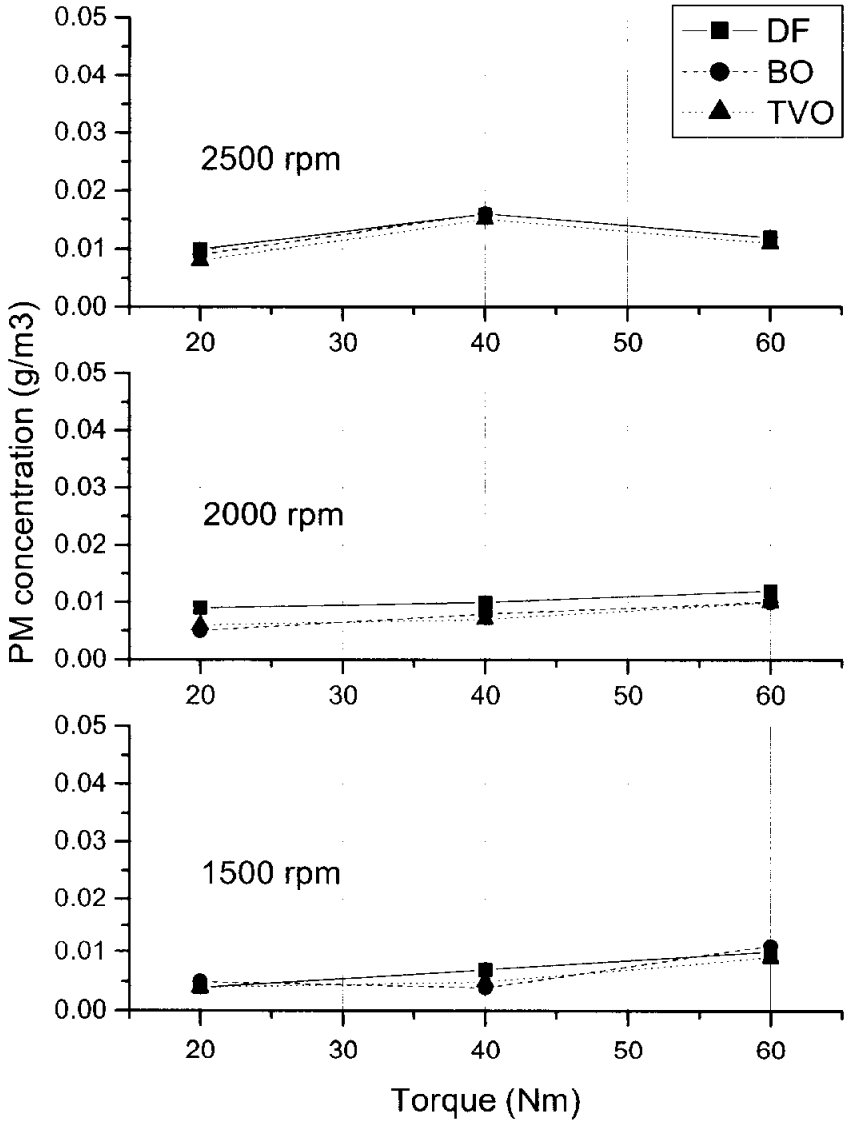



Fig. 5-22 Comparison of PM concentration using DF, BO and TVO at various engine conditions

# 6. 결론

본 연구에서는 폐식용유를 이용한 바이오 디젤유를 소형 고속 직분식 디젤기관에 사용했을 때 기관성능 및 연소특성에 미치는 영향을 조사하였으며, 또한 디젤기관의 성능 및 연소분석 시스템을 새롭게 구성하였다. 바이오 디젤유의 실험결과와 연소분석 시스템의 특징을 요약하면 다음과 같다.

1) 폐식용유를 이용한 블렌드유(BO) 및 에스테르유(TVO)의 연소압력거동은 경유와 유사하였으며, 대체 연료로 사용이 가능하였다.

2) 연료소비율은 부하의 증가에 따라 감소하였으나 동일 부하의 경우 저속에서는 에스테르유, 블렌드유, 경유의 순으로 감소하였다.

3) NOx의 배출경향은 3 종류의 연료유가 거의 비슷하였지만 저회전수에서 에스테르유가 낮게 배출되었다. 또 CO의 배출경향은 경유가 가장 많이 배출하였고, 에스테르유가 가장 적게 배출되었다. 또 PM은 동일 회전수, 동일 부하에서 경유가 블렌드유 및 에스테르유보다 약간 더 배출되었다.

4) PXI와 LabVIEW를 이용하여 디젤기관의 연소실 압력 및 열발생율을 온라인으로 계측 및 계산할 수 있었다.

5) 보쉬 스모크미터로는 PM 농도를 판별할 수 없었지만, 직접 제작한 PM 농도 측정 장치에 의해서는 PM의 농도를 측정할 수 있었다.

# 참고 문헌


1) 이영재, "바이오디젤유의 현황", 자동차공학회지, 제24권, 제2호, pp. 53~55, 2002

2) 岩井邦夫, "植物油のエステル化技術の動向", Engine Technology, Vol.3 No.3, pp. 41~44, 2001

3) 森棟 隆昭, 山口 元, 小西 奎二, "廢食用油燃料 ディーゼル機關の特性に關する研究", 日本機械論文集, 第66卷, 641號, pp.294~299, 2000

4) 곽두영, "LabVIEW 컴퓨터기반의 제어와 계측 Solution", OHM사, 2002

5) 中島 徹, "自動車からのPM排出の實態", エンジンテクノロジー, Vol.2, No.5, pp. 13~18, 2000

6) 福島 宏和 외 2명, "黑煙(スモーク)濃度および粒子狀物質(PM)測定方法", エンジンテクノロジー, Vol.2, No.5, pp. 34~39, 2000

7) Dale R. Tree, John E. Dec, " Extinction Measurements of In-Cylinder Soot Deposition in a Heavy-Duty DI Diesel Engine", SAE, 2001-01 1296

8) Park, C. and Appleton, J.P., "Shock Tube Measurements of Soot Oxidation Rates", Combustion and Flame, Vol.20, pp. 396~379, 1973

9) Paul C. Miles, "The Influence of Swirl on HSDI Diesel Combustion at Moderate Speed and Load", SAE, 2000-01-1829

10) 山根 洗二 외 2명, "直接噴射式バイオディーゼル燃料機關の燃燒および排氣特性に及ぼす植物油種類と高壓噴射の影響", 日本自動車技術會論文集, Vol.32, No.2, pp. 25~30, 2001

11) 김명수 외 4명, "폐식용유와 경유의 혼합유 사용에 의한 농업용 디젤기관의 성능", 한국동력기계공학회, 2002년 춘계학술대회논문집, pp. 27~32, 2002

12) Takeyuki kamimoto 외 2명, "Temporal Measurement of size and Concentration of Soot Aggregates in Diesel Exhaust", Proceedings of Busan Engine International Symposium 2001, pp. 19~24, 2001

13) 고대권 외 2명, "PXI와 LabVIEW를 이용한 디젤기관 연소압력의 계측 및 분석", 한국동력기계공학회지, 제7권, 제3호, pp. 5~11, 2003

14) 안수길 외 3명, "PXI와 LabVIEW를 이용한 디젤기관 연소압력의 온라인 분석", 한국동력기계공학회, 2003년 춘계학술대회논문집, pp. 74~79, 2003

15) John B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill Book Company, pp. 497~514, 1988

16) 佐藤 洋子, "自動車用燃料としての含酸素基材", エンジンテクノロジー, Vol.2, No.3, pp. 46~50, 2000

17) 牧野 英治, "SPM規制の動向", エンジンテクノロジー, Vol.2, No.5, pp. 8~12, 2000

18) 유경현 외 2명, "디젤기관에서 바이오디젤유 사용 시 기관성능 및 배기배출물 특성에 미치는 분사시기의 영향", 한국자동차공학회, 2002년 추계학술대회논문집, pp. 216~221, 2002

19) 고대권, "부경대학교 기계공학부 기계시스템공학전공 단기기술강좌 LabVIEW를 이용한 내연기관 연소압력 계측", BK21 지역선도형 기계산업인력육성사업단 기계시스템산업인력육성사업팀, 2003

20) 松岡 信, "噴霧燃燒における微粒子の生成・消滅過程の體系的研究", 東京工業大學工學部, pp. 73~90, 1983

# 감사의 글

처음엔 길게만 느껴지던 2년이란 세월을 보내고 나니 너무나도 짧고 아쉬운 것 같습니다. 이 짧은 시간이 다른 사람들이 보낸 시간보다 더 좋은 시간이 되고자 노력했지만 그럴수록 더욱 아쉬움이 남습니다.

지난 2년 동안 공부하면서 항상 자식처럼 따뜻하게 지도해주신 안수길 교수님께 먼저 깊은 감사의 말씀을 올립니다. 실습실에서 함께 장비를 설치하고 노하우에 대해 조언해주신 고대권 교수님과 많은 관심으로 지켜봐주신 학과 교수님께도 심심한 감사의 말씀을 올립니다.

내연기관 연구실 생활 내내 물심양면 도움을 주신 조규학 선배님과 장치를 직접 고안하고 제작해주신 라진홍 선배님, 늦은 시간 학교까지 찾아오셔서 논문완성에 도움을 주신 김명수 선생님, 그리고 많은 배려와 칭찬을 아끼지 않으신 연구실 선·후배님들께 정말 감사드립니다.

어려운 물질적 여건을 이해하고 안주거리가 되어준 친구 영춘이에게도 감사의 말을 전하며, 먼저 학위를 마쳤던 동기들과 학과 선·후배님께도 감사의 뜻을 전합니다.

마지막으로 못난 자식을 위해 많은 희생을 감수하신 부모님과 누님 내외분, 그리고 항상 기둥처럼 제 뒤를 지켜준 형님 내외분에게 감사의 말씀을 올립니다. 지난 몇 년 동안 항상 옆에서 따뜻한 목욕물처럼 자리를 지켜준 연인 주영이에게도 고마움을 전하고 싶습니다.