



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

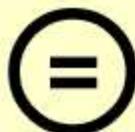
다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



**저작자표시.** 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



**비영리.** 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



**변경금지.** 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

폐식용유를 이용한 바이오디젤유  
(BDF)의 연소특성



부경대학교 대학원

제어기계공학과

김명수

공학박사 학위논문

폐식용유를 이용한 바이오디젤유(BDF)의 연소특성

지도교수 안 수 길

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함.

2008년 2월

부경대학교 대학원

제어기계공학과

김명수

김명수의 공학박사 학위논문을 인준함.

2008년 2월 26일



주	심	공학박사	배	종	욱	인
위	원	공학박사	김	시	영	인
위	원	공학박사	한	규	일	인
위	원	공학박사	고	대	권	인
위	원	공학박사	안	수	길	인

# 목 차

Table 차례 .....	iii
Photo 차례 .....	iii
Fig. 차례 .....	iv
Abstract .....	vii
기호 설명 .....	x
<b>제1장 서론</b> .....	<b>1</b>
1.1 연구 배경 .....	1
1.2 BDF의 현황 .....	3
1.2.1 국외의 생산 및 이용 현황 .....	4
1.2.2 국내의 생산 및 이용 현황 .....	6
1.3 연구의 목적 및 구성 .....	7
<b>제2장 액침법에 의한 액적분포 연구</b> .....	<b>8</b>
2.1 서언 .....	8
2.2 용어의 정의 .....	10
2.3 BDF의 특성 및 시료유의 제조 .....	13
2.3.1 BDF의 특성 .....	13
2.3.2 시료유의 제조 .....	15
2.3.3 시료유의 특성 .....	18
2.4 실험 장치 및 방법 .....	20
2.4.1 실험 장치 .....	20
2.4.2 실험 방법 .....	22
2.5 결과 및 고찰 .....	23
2.5.1 화상처리기법 적용과 목적과의 비교 .....	23
2.5.2 미립화 사진의 검토 .....	25
2.5.3 개수비, 체적비, 누적 체적의 검토 .....	26
2.5.4 SMD와 ROSIN-RAMMLER 분석 .....	36
2.5.5 Rosin - Rammler 분포식에 의한 분포 파라미터 $\delta$ 의 결정 .....	38
2.6 요약 .....	41

<b>제3장 이색법에 의한 화염연소온도와 KL 연구</b> .....	42
3.1 서언 .....	42
3.2 이색법의 기본이론 .....	43
3.3 실험 장치 및 방법 .....	46
3.3.1 광 검출 장치 .....	46
3.3.2 광 검출기의 설치 .....	52
3.3.3 실험장치 .....	54
3.3.4 실험방법 .....	57
3.4 결과 및 고찰 .....	59
3.4.1 검정곡선 및 진온도와 KL 계산 .....	59
3.4.2 화염온도 및 KL치 .....	63
3.5 요약 .....	71
<b>제4장 바이오디젤유의 연소특성</b> .....	72
4.1 서언 .....	72
4.2 계측장비의 구성 .....	73
4.2.1 PXI 시스템 .....	74
4.2.2 LabVIEW .....	79
4.2.3 PM 계측장치 .....	81
4.3 실험 장치 및 방법 .....	89
4.4 결과 및 고찰 .....	90
4.4.1 온라인 계측 .....	90
4.4.2 압력선도 스무딩 및 열발생율 검증 .....	93
4.4.3 연소특성 .....	97
4.4.4 배기특성 .....	110
4.4.5 PM 배출 농도 .....	114
4.5 요약 .....	117
<b>제5장 결 론</b> .....	118
참고문헌 .....	120

## Table 차례

Table 2-1 Properties of fuels .....	13
Table 2-2 Pollution depreciation efficiency of BDF by contrast with diesel .....	14
Table 2-3 Properties of fuels .....	19
Table 2-4 Comparison eye measurement with image processing ..	24
Table 2-5 SMD of fuels under ambient pressure .....	36
Table 2-6 Value of $\delta$ and $\bar{x}$ .....	40
Table 3-1 Specifications of test engine .....	56
Table 3-2 Voltage of wavelength by temperature .....	59
Table 4-1 Specifications of NI 8174 controller .....	76
Table 4-2 Specifications of NI 6025E DAQ board .....	77
Table 4-3 Method of measuring a PM concentration .....	83
Table 4-4 Value of PM measured before calculated .....	115

## Photo. 차례

Photo. 2-1 Surface tension measurement equipment .....	19
Photo. 2-2 Image of TVO on ambient pressure 6bar .....	24
Photo. 2-3 Image for ambient pressure change .....	25
Photo. 3-1 Comparison of optical probe after engine test .....	48

## Fig. 차례

Fig. 2-1 Combustion lifetime of drop vs. drop size .....	9
Fig. 2-2 Manufacturing progress of BO .....	15
Fig. 2-3 Manufacturing progress of TVO and Manufactured TVO	17
Fig. 2-4 Schematic diagram of experimental apparatus .....	21
Fig. 2-5 Image of TVO on ambient pressure 6var .....	24
Fig. 2-6 Image for ambient pressure change .....	25
Fig. 2-7 Size probability density function (a), volume probability density function (b) and cumulative volume fraction (c) of DF under pressure 1bar .....	27
Fig. 2-8 Size probability density function (a), volume probability density function (b) and cumulative volume fraction (c) of DF under pressure 3bar .....	28
Fig. 2-9 Size probability density function (a), volume probability density function (b) and cumulative volume fraction (c) of DF under pressure 6bar .....	29
Fig. 2-10 Size probability density function (a), volume probability density function (b) and cumulative volume fraction (c) of BO under pressure 1bar .....	30
Fig. 2-11 Size probability density function (a), volume probability density function (b) and cumulative volume fraction (c) of BO under pressure 3bar .....	31
Fig. 2-12 Size probability density function (a), volume probability density function (b) and cumulative volume fraction (c) of BO under pressure 6bar .....	32
Fig. 2-13 Size probability density function (a), volume probability density function (b) and cumulative volume fraction (c) of TVO under pressure 1bar .....	33
Fig. 2-14 Size probability density function (a), volume probability density function (b) and cumulative volume fraction (c) of TVO under pressure 3bar .....	34
Fig. 2-15 Size probability density function (a), volume probability density function (b) and cumulative volume fraction (c) of TVO under pressure 6bar .....	35
Fig. 2-16 SMD of fuels on pressures .....	37

Fig. 2-17 Rosin-Rammler analysis of DF under pressure 1bar .....	39
Fig. 3-1 Schematic of optical detection system .....	46
Fig. 3-2 Detail drawing of probe for in-cylinder sensing .....	47
Fig. 3-3 Detail drawing of optical probe .....	48
Fig. 3-4 Functional block Diagram .....	49
Fig. 3-5 Package Configuration & terminal Functions .....	49
Fig. 3-6 Photodiode spectral Responsivity .....	50
Fig. 3-7 Switching Times .....	50
Fig. 3-8 Amplifier circuit diagram .....	51
Fig. 3-9 Combustion chamber shape and sensor positions for test engine ...	53
Fig. 3-10 Schematic diagram of experimental apparatus .....	55
Fig. 3-11 LabVIEW block diagram for simultaneous 8channel data acquisition ...	57
Fig. 3-12 LabVIEW front panel for simultaneous 8channel data acquisition ...	58
Fig. 3-13 Calibration curve of 530nm .....	60
Fig. 3-14 Calibration curve of 735nm .....	60
Fig. 3-15 LabVIEW front panel for temperature data acquisition and KL .....	61
Fig. 3-16 LabVIEW block diagram for temperature data acquisition and KL ...	62
Fig. 3-17 Flame temperature and KL value for torque 0Nm at 1500 rpm ...	64
Fig. 3-18 Flame temperature and KL value for torque 0Nm at 2000 rpm ...	65
Fig. 3-19 Flame temperature and KL value for torque 0Nm at 2500 rpm ...	66
Fig. 3-20 Flame temperature and KL value for torque 60Nm at 1500 rpm ...	68
Fig. 3-21 Flame temperature and KL value for torque 60Nm at 2000 rpm ...	69
Fig. 3-22 Flame temperature and KL value for torque 60Nm at 2500 rpm ...	70
Fig. 4-1 Schematic structure of PXI system .....	74
Fig. 4-2 Block diagram of NI 8174 controller .....	76
Fig. 4-3 Block diagram of NI 6025E DAQ board .....	78

Fig. 4-4 Method of connecting signal source to DAQ board by differential mode	78
Fig. 4-5 Example of front panel	80
Fig. 4-6 Example of block diagram for front panel of Fig. 4-5	80
Fig. 4-7 Formation of PM	82
Fig. 4-8 Schematic diagram of PM concentration measurement apparatus	85
Fig. 4-9 Front panel used for experiment	91
Fig. 4-10 Block diagram used for experiment	91
Fig. 4-11 Analysis data On-line detail	92
Fig 4-12 Comparison of smoothing curve and non-smoothing curve for cylinder pressure	94
Fig 4-13 Comparison of smoothing curve and non-smoothing curve for ROHR and CHR	94
Fig. 4-14 Net R.O.H.R under motored and fired on experiment	96
Fig. 4-15 Net R.O.H.R under motored and fired on reference	96
Fig. 4-16 Comparison of cylinder pressure and injection period using DF, BO and TVO at various engine conditions	98
Fig 4-17 Comparison of ROHR using DF, BO and TVO at various engine conditions	99
Fig 4-18 Comparison of CHR using DF, BO and TVO at various engine conditions	100
Fig 4-19 Comparison of fuel consumption using DF, BO and TVO at various engine conditions	102
Fig 4-20 Comparison of excess air ratio using DF, BO and TVO at various engine conditions	103
Fig 4-21 Comparison of Volumetric efficiency using DF, BO and TVO at various engine conditions	104
Fig 4-22 Comparison of Maximum cylinder pressure using DF, BO and TVO at various engine conditions	106
Fig 4-23 Comparison of Injection period using DF, BO and TVO at various engine conditions	107
Fig 4-24 Comparison of Ignition delay using DF, BO and TVO at various engine conditions	108
Fig 4-25 Comparison of Combustion period using DF, BO and TVO at various engine conditions	109
Fig 4-26 Comparison of exhaust gas temperature using DF, BO and TVO at various engine conditions	111
Fig 4-27 Comparison of CO concentration using DF, BO and TVO at various engine conditions	112
Fig 4-28 Comparison of NO <sub>x</sub> concentration using DF, BO and TVO at various engine conditions	113
Fig. 4-29 Relationship of soot concentration and spectral absorptivity	115
Fig. 4-30 Comparison of PM concentration using DF, BO and TVO at various engine conditions	116

## Combustion Characteristics of Bio Diesel Fuel Using Waste Food Oil

Myoung Soo Kim

Department of Control and Mechanical Engineering, The Graduate School,  
Pukyong National University

### Abstract

Recently many researchers have been studying the development of alternative energy due to serious pollution and drying up of fossil energy. BDF (Bio Diesel Fuel) using from wasted vegetable oil is one of the alternative energy.

BDF must be esterified because of its high viscosity compared to diesel fuel in using as the fuel of the diesel engines. The price of the BDF grows higher 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 can be used easily.

This research analyzed combustion characteristics of the diesel engine using the diesel fuel, TVO and Blending Oil. Especially PM mass with the light absorption method was measured quantitatively. The PXI and LabVIEW was applied 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.

There were some papers for diesel engine performance tests using BDF, but the papers for droplet distributions and SMD of diesel spray and two-color method for BDF were rarely found. Droplet distributions and SMD of BDF were measured in this study. Droplet were sampled with a conventional immersion sampling method and were taken the image of droplets by optical microscope with CCD camera. The image of droplets distributions were measured using image processing program such as Sigma Scan.

The flame temperature of diesel engines is high and subject to change rapidly and an optical method for measurement is most effective. The two-color method regarding the visible wavelength radiation for the soot particles in flame was closely studied in order to establish the measuring technique of the flame temperature and the soot concentration in a diesel engine.

The results were as follows:

- 1) As the ambient pressure on every sample oil increased, the distribution of important droplets increased. BO and TVO were similar to light-oil on SMD when the ambient pressure becomes 1bar, but the ambient pressure increased over a certain level(3bar), the change of SMD was low relatively.
- 2) The Two-Color Method using chip photodiode instead of former method using expensive PMT could also get reliable data.
- 3) DF, BO, TVO in order showed the peak combustion temperature

at 1500rpm and 2000rpm and also KL value showed the same tendency.

- 4) The combustion pressure and heat release rate could be measured by on-line using PXI and LabVIEW.
- 5) The combustion pressure movements of BO and TVO using used substitute oil are similar to that of light-oil, and it means that using of BO and TVO is possible to use as an alternative fuel.
- 6) The three kinds of fuel mentioned above was almost same in NOx emission tendency, but TVO in low speed was in NOx emission. In case of the emission of CO, DF had the highest and TVO had the lowest. As far as PM concerns light oil was a little higher than BO and TVO in same rpm and same load.

## 기호 설명

$A_b$ : 레이저단면적 [ $mm^2$ ]

$C_1$ : *Plank* 정수  $3.743 \times 10^8$  [ $W \cdot um^4 / m^2$ ]

$C_2$ : *Plank* 정수  $1.4387 \times 10^4$  [ $um \cdot K$ ]

$C_{ext}$ : 흡광단면적 [ $mm^2$ ]

$D_{32}$ : *SMD, Sauter* 평균입경 [ $um$ ]

$D_j$ :  $j$ 액적의 입경 [ $um$ ]

$E_b(\lambda, T)$ : 흑체 복사휘도 (*radiation brightness*)

$F_v(D)$ : 누적 체적 분포 함수

$I_o$ : 입사광의 강도

$K$ : 흡수계수

$L$ : 광로의 길이 [ $mm$ ]

$N$ : 미립자의 밀도 수

$Q_{ext}$ : 흡광율

$T$ : 절대온도 [ $K$ ]

$T_a$ : 화염의 휘도온도 [ $K$ ]

$U_r$ : 분출 속도 [ $m/s$ ]

$d$ : *PM*의 직경 [ $mm$ ]

$Dx$ : 구간 당 입경 [ $um$ ]

$fd(D_j)$ : 입경 확률 밀도 함수

$fv(D_j)$ : 체적 확률 밀도 함수

$m_s$ : PM의 총질량[ $g/cm^3$ ]

$m$ : 복소굴절률

$n$ : 미립자의 총 수

$\Delta p$ : 분사압과 분위기 압력 차[ $bar$ ]

$v$ : 누적 체적 분율

$\alpha$ : 파장의 정수(1.38)

$k$ : 흡광율

$\rho_s$ : PM의 밀도[ $g/cm^3$ ]

$\bar{x}$ : 입경 파라미터

$\delta$ : 분포 파라미터

$\lambda$ : 파장

$\varepsilon$ : 복사율

$\tau$ : 투과율

$\rho_a$ : 공기 밀도[ $kg/cm^3$ ]



# 제 1장 서론

## 1.1 연구 배경

오늘날 세계 여러 나라에서는 에너지 소비의 절감과 에너지 보전과 안정적인 수급 및 CO<sub>2</sub> 배출 절감 등의 지구 환경 보전에 관심이 높아지고 있다. 인류 사회의 주에너지원인 석유계 연료의 수급 위기에 대한 예측을 1998년 C. J. Cambell 등이 허바드이론을 이용한 분석 결과 “부존량은 2015년까지 사용할 수 있다”고 하였으며 또 동년 국제에너지기관(IAEA)도 같은 추정 결과를 발표하였다<sup>1)</sup>. 이런 석유 고갈의 위기감과 아울러 지구온난화 대책의 한 방편으로 대체연료 개발의 필요성이 대두되고 있다. 현재 세계 각 국에서는 고갈되어 가는 지구의 화석연료에 대한 대체에너지의 연구와 환경오염에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 이러한 연구로써, 신개념의 엔진기술로 평가되고 있는 하이브리드엔진(Hybrid Engine), 연료전지엔진(Fuel Cell Engine) 등, 엔진기술 개발이 활발히 진행되고 있다. 그러나 이러한 연구들에도 불구하고 화석연료를 사용하는 엔진을 벗어나기에는 아직도 많은 시일이 걸릴 전망이다. 따라서, 여러 나라에서는 산소를 함유하는 에탄올, 메탄올, TBA(Tertiary Butyl Alcohol) 등의 알코올류와 MTBE(Methyl Tertiary Butyl Ether), ETBA(Ethyl Tertiary Butyl Ether) 등의 에테르류 및 각종 식물유를 이용한 바이오 디젤유(BDF : Bio Diesel Fuel) 등을 활용하는 방안에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이런 산소를 함유하는 연료를 디젤기관에 적용하면 연소 특성 및 배기배출 특성도 개선된다는 많은 보고들이 있다<sup>2~5)</sup>.

우리 나라는 식생활의 서구화, 가공식품의 이용 증가 및 초중고의 학교급식, 외식산업의 증가로 인하여 폐식용유의 발생량이 점점 더 많아지고 있다. 폐식용유에 대해 정리해보면

1) 폐식용유의 발생량 - 환경부의 1999년도 통계에 의하면 사업장에서의 폐식용유 발생량이 78.2 톤/일이다. 그러나 발생량이 많지 않은 가정이나 업소에서는 처리에 관한 법적 규제의 미비(300kg이하는 신고 불필요)로 처리과정에 대한 정확한 규제가 없다.

2) 폐식용유의 활용 - 사료생산과 일부는 재생비누로 재활용되고 있으나 이것도 사용시간 10시간 이상의 것은 불가능하다는 보고가 있다<sup>6)</sup>.

3) 폐식용유는 환경오염의 부하가 매우 크다<sup>7)</sup>. - 그러므로 폐식용유에 대한 재활용법에 관한 대책이 절실히 요청된다.

이에 폐식용유를 에너지원으로 활용한 사례를 살펴보면, 폐식용유는 식용유보다 점도가 다소 높고 각종 이물질이 섞인 것을 제외하면 식용유와 성상이 거의 비슷한 디젤기관의 산소를 함유한 연료로서 사용할 수 있다는 가능성을 보여 왔다. 일본의 교토(京都)시에서는 쓰레기수거차량에 적용하여 폐식용유의 재자원화로 소각 처리할 때보다 CO<sub>2</sub>배출을 줄이고 있다. 또, 가정에서 발생하는 폐식용유의 50%를 재활용할 경우 CO<sub>2</sub>배출량이 연 4000톤 절감될 것이라고 보고되고 있다<sup>8)</sup>. 석유를 전량 수입에 의존하는 우리에게 시사하는 바가 매우 크다고 할 수 있다.

그러나, BDF는 경유보다 높은 점도를 낮추기 위해 에스테르화를 하는데, 이 때 메탄올과 촉매를 사용해야 하기 때문에 비용이 많이 들고 제조공정도 복잡해지는 단점을 가지고 있다. 따라서, 이런 단점을 극복할 수 있는 방안 마련이 필요하다. 이 방안으로 에스테르화를 거치지 않고 경유와 단순 혼합하는 것에 대한 연구도 요청된다.

여러 나라에서 BDF의 활용이 이루어지고 있으며, 이에 대한 연구도 활발하지만 대부분 사용가능성 연구에 목적을 둔 것이 많다. 그러므로 지금까지 디젤기관이 개발된 이후 적용된 여러 기술연구들을 적용하여 BDF에 대한 보다 체계적인 연구가 필요하다.

## 1.2 BDF의 현황<sup>9)</sup>

BDF란 유채유, 대두유, 팜유와 같은 각종 식물유, 우지와 같은 동물성 지방, 폐식용유 등 다양한 재생가능한 자원을 촉매를 사용하여 알콜과 반응시켜 생성하는 에스테르화유(TVO : transesterified vegetable oil)를 말하며 경유와 물성이 유사하므로 경유에 대체 또는 혼합하여 디젤엔진에 사용할 수 있다.

경유에 대비한 BDF의 장점으로서는 첫째, 재생가능 식물자원에서 생산되므로 에너지자원의 고갈 문제가 없고, 폐식용유 등 폐자원을 활용할 수 있으며, 둘째, 작물의 재배에서 BDF의 생산 및 이용의 전 주기에서 볼 때 연료 사용에 따라서 배출된 이산화탄소는 작물의 생육과정에서 광합성으로 회수되므로 순 배출량이 아주 작고, 셋째, 산성비의 주범인 SOx를 전혀 배출하지 않고, 함산소연료(산소 10% 이상 함유)이므로 발암물질인 입자상 물질이나 CO, HC등 디젤엔진의 유해 배출가스를 크게 저감할 수 있다.

그리고, 넷째, 세탄가가 경유보다 높아 압축착화기관에 그대로 적용가능하며, 다섯째, 액상 연료이므로 기존의 연료 인프라를 그대로 활용할 수 있고, 여섯째, 윤활성이 좋으므로 경유의 탈황화에 따른 윤활성 저하 대책으로 유효하며, 벤젠 등을 배출하지 않아 독성이 적고, 생분해도가 높아 유출 시 환경오염이 적다는(3주 이내에 90%이상 분해) 것이다.

그러나, 단점으로는 첫째, 연료의 안정성이 경유보다 좋지 않아 적절히 제조 관리되지 않으면 산가나 수분 함량의 증가 등 연료품질의 악화에 기인하여 엔진 연료계의 금속부품의 부식 또는 손상을 유발할 수 있고, 연료 분사 인젝터의 막힘이나 실린더내의 카본 퇴적의 증가를 유발할 수 있으며, 둘째, 경유보다 유동점이 높아 한냉 시의 시동성 악화를 유발할 수 있고, 셋째, 연료계통의 일부 고무재료 등을 열화시킬 수 있으므로 고농도로 사용할 경우에는 재질 변경이 필요하다는 것을 들 수 있다.

### 1.2.1 국외의 생산 및 이용 현황

BDF의 세계적인 이용현황을 살펴보면 1988년 오스트리아의 소규모 공장(500톤/년)에서 세계 최초로 상용 생산된 이래 유럽, 북미, 중남미, 아시아, 오세아니아 등 각국에서 BDF100(순수 BDF), BDF30, BDF20, BDF5, BDF2 등 다양한 형태로 사용되고 있다. EU에서는 2003년 10월에 도입된 경유 품질규격인 EN 590에서는 경유에 BDF 5% 이내의 포함을 허용함에 따라 일반적인 경유 연료로서 전 유럽지역을 대상으로 BDF5의 판매가 가능하게 되었다. 또, 2003년 5월에 EU Directive 2003/30/EC를 발효하여 2005년에 자동차 연료의 2%, 2010년에 5.75%, 2020년에 20%를 BDF를 포함한 바이오연료로 대체하기로 함에 따라, 독일, 이탈리아, 프랑스, 영국, 오스트리아 등지에서 보급을 확대하여 2005년 6월 현재 370만톤/년의 생산용량을 구비하고 있다.

독일의 현황을 살펴보면 2006년의 생산능력이 241만톤이다. 2005년도에는 BDF5의 보급이 보다 확대되어 총 BDF 판매량의 40%가 BDF5로 혼합되고 있고, BDF100은 승용차, 플릿차량(트럭, 버스 등), 농업기계를 대상으로 각각 10%, 45%, 5% 보급되고 있다. 독일의 경우 자동차 연료에 Mineral Tax와 Ecological Tax가 부과되나 BDF의 경우에는 이들 세금이 완전 면제되고 있다. 그러나 최근에는 BDF100에 대하여 0.1€/ℓ, 혼합유에 사용되는 BDF에 대하여 0.15€/ℓ를 과세하는 것을 검토하고 있다.

이탈리아는 난방용 연료에 BDF 5%, 차량용 경유에 25%까지 혼합하여 사용하고 있다. 이탈리아에서는 1994년 이래 BDF에 대하여 쿼터제로 면제하는 제도를 시행하고 있다.

프랑스에서는 BDF의 보급 유통에 정유업체가 적극적인 역할을 하는 데에 특징이 있다. 즉 BDF 생산업체는 생산된 BDF를 정유업체 또는 운수업체에 공급하고 정유업체는 공급받은 BDF를 경유에 5%이내 혼합하여

일반 경유로서 판매하고 있다. 아울러 시내 버스 등을 대상으로 BDF30도 보급하고 있다. 프랑스의 경우에도 BDF에 대하여 면세혜택을 부여하고 있으나 그 양을 쿼터제로 제한하고 있다.

미국의 경우에는 BDF의 약 90%가 대두유를 원료로 하여 생산하고 있다. 2004년 10월 22일에는 부시대통령이 Americal Jobs Creation Act fo 2004에 서명하여 2005년 1월 1일에 발효되었으며, 이 법률에 의거하여 대두 등 식물유에서 생산되는 바이디젤은 경유의 첨가비율에 따라서 1%당 1센트, 최대 20%까지 비과세되어, BDF20은 갤런당 20센트가 비과세된다. 따라서 경유에는 갤런당 24.4센트가 부과되나 BDF20은 4.4센트만 과세된다. 이러한 정부차원의 적극적인 도입책에 따라서 BDF의 보급실적이 증가하고 있다.

캐나다에서는 1994년에 설립된 CRFA(Canadian Renewable Fuels Association) 및 퀘벡주의 협력하에 2002년 3월에 몬트리올시에서 바이오연료 시범보급사업인 BIOBUS프로젝트를 착수하는 등 시범사업을 추진하고 있다.

그 외 호주에서는 2003년 9월 BDF에 대해 비과세를 부여하고 품질규격을 설정하는 등 보급을 확대하고 있으나 아직은 시범보급단계에 있으며, 남미(브라질, 아르헨티나), 동남아시아(말레이시아, 태국 등), 일본, 중국 등 지에서도 현재 BDF의 시범 보급을 추진하고 있다.

### 1.2.2 국내의 생산 및 이용 현황

산업자원부에서 지정한 국내 BDF 생산기업은 2002년에 BDK(구 신양현미유)와 가야에너지(구 신한에너지)의 2개사 였으나, 2006년 현재에는 총 9개사로 증가하여 대략 20만톤의 생산능력을 구비하고 있다. 생산공정을 살펴보면 가야에너지와 B&D가 연속식 공정을 갖추고 있고, 그 밖의 대부분은 배치식 공정을 갖추고 있다. BDF 원료는 대두유, 현미유 정제 부산물, 폐식용유 등 다양하나 주로 대두유가 사용되고 있다.

국내에서 BDF가 공식적으로 사용된 것은 2002년 5월로서, 산업자원부에서제정한 “BDF 시범보급사업 추진에 관한 고시”에 의거하여 수도권과 전라북도의 지정주유소를 대상으로 BD20이 보급된 것이 최초이다. 그 후 BD20의 저온시동성 문제, 경유엔진의 연료계 부품제작사인 BOSCH, DELPHI 등의 BD5 이내에서의 연료계 품질보증 등에 기인하여, 2006년 7월부터 BD20은 자가 주유 및 정비시설을 갖춘 사업장 차량을 대상으로 보급이 제한되는 반면, 일반경유에는 최대 5%까지 혼합을 허용하여 일반 주유소에서 판매가 가능해졌다. 2006년 3월 2일에는 산업자원부와 정유사가 자발적 협약으로 7월부터 2007년 말까지 연간 9만킬로리터를 보급하기로 하였다. 정부는 07년 9월 7일 경제정책회의 열어 ‘바이오디젤 중장기 보급계획’을 확정했다. 그 내용으로 ‘BD5’에 함유되는 바이오디젤 원액 비율이 현재 0.5%에서 오는 2012년까지 3%로 높아진다. 또 바이오디젤 원액 20%가 포함된 BD20를 쓸 수 있는 시설기준이 완화되고 사업용 외에 관용차량도 이를 이용할 수 있도록 해 보급을 늘리는 방안이 추진된다.

### 1.3 연구의 목적 및 구성

본 연구에서는 경유, 에스테르유(: 이하 TVO), 블랜드유(경유와 폐식용유의 혼합 : 이하 BO))의 연소 특성을 체계적으로 연구하고자 한다.

이러한 목적을 달성하기 위하여 다음과 같은 실험장치를 구성하여

- 1) 분무 입경 분포와 평균 입경(SMD) 조사를 위한 액침법 장치(제 2장)
- 2) 화염온도와 KL값 측정을 위한 이색법(Two-Color Method) 장치(제 3장)
- 3) 기관의 성능 분석을 위한 장치(제 4장)

에 대한 실험을 수행하여, 최근 관심이 높아지고 있는 BDF에 관한 기초 정보를 제공한다.

본 논문은 모두 5장으로 되어 있다.

제 1장에서는 연구 배경과 BDF의 현황 및 연구 목적에 대하여 기술하고,

제 2장에서는 분무 액적 분포의 여러 가지 측정법 중 경비가 많이 들지 않고, 간헐 분무 전체의 입경 분포를 조사에 편리한 액침법에 시간을 절약할 수 있는 화상처리기법(Image processing)을 적용하여, 시료유들의 간헐 분사시 입경 분포와 평균 입경(SMD)을 조사한다.

제 3장에서는 디젤엔진의 연소실 내의 크랭크 각도에 따른 화염온도 측정은 그을음의 생성과정 파악과 저감을 위한 기초정보를 얻기 위해 그을음 입자로부터 강한 연속복사 스펙트럼을 이용하여 화염온도와 KL값이 동시에 측정할 수 있으며, 연소실 형상의 큰 변경 없이 작은 공간에 간단하게 설치가 가능한 이색법(Two-Color Method)에 다이오드를 이용한 염가의 자작 장비를 적용하여 운전조건에 따른 그을음 생성의 정보를 나타내는 KL인자와 NO<sub>x</sub> 생성에 관여되는 온도 거동을 조사한다.

제 4장에서는 기관의 성능을 분석하기 위한 계측장비를 PXI와 LabVIEW로 구축하고, PM의 발생량을 정량적으로 측정하기 위해 흡광법을 적용하는 PM 농도 측정장치를 자체 제작하여 시료유별 실험조건에 따른 PM의 배출량을 실시간으로 측정한다.

제 5장에서는 제 2, 3, 4장에서 연구 결과를 종합하여 요약하였다.

## 제 2 장 액침법에 의한 액적분포 연구

### 2.1 서언

디젤분무특성에는 미립화 정도 (SMD,  $D_{32}$ ), 도달거리, 분무각 등의 인자들이 있지만 그 중에서도 미립화는 유해물질의 생성, 연소 등을 좌우한다. 즉 고온 고압의 분위기 중에 분사되는 간헐 디젤 분무의 미립화는 액적들의 표면적이 증대되어 열전달 및 물질 전달에 의해 유증기와 주위 공기의 혼합에 의해 연소한다. 이때 액적의 크기와 그 분포는 혼합기 형성과 연소시간을 좌우한다.

예로 Fig. 2-1<sup>10)</sup>과 같이 입경의 크기와 연소시간의 관계를 보면 임의로 선택한 연소 시간을 크랭크 각도로 10도라 하고 6000rpm으로 운전되는 소형 기관의 경우 연소에 요구되는 시간은 약  $280\mu s$ 로 이 시간에 연소가 완결될 수 있는 입경은 액체 연료의 성질에 따라 달라지지만 약  $18\mu m \sim 32\mu m$ 의 직경을 갖는다. 또한 대형 저속인 경우 예로 90rpm 기관이라 하면  $10850\mu s$ (크랭크각 10도)로 이에 유추되는 입경 범위는  $140\mu m \sim 260\mu m$ 이다.

이와 같이 기관에 따라 사용연료의 분무 입경 분포 및 평균 입경을 아는 것은 매우 중요하다.

디젤분무의 경우 입경 분포 측정에는 액침법에 의한 측정<sup>11)</sup>과 프란호프(Fraunhofer) 회절이론에 의한 광학적 측정<sup>12)</sup>에 의한 해석이 있으나 본 연구의 경우는 액침법에 화상처리기법(Image processing)을 적용하여 시간을 절약하고자 하였다.

분무 액적 분포의 측정법 중 액침법은 측정 장치에 많은 경비가 들지 않았을 뿐 아니라 간헐 분무 전체의 입경 분포를 조사하는 경우 매우 편리하다. 광학적 측정법인 프란호프 회절 이론에 의한 것이나 PDPA등은 공간적인 시간적인 분포의 추이는 쉽게 측정할 수 있지만 고가의 장치가

필요하다. 그리고 광로 중의 평균 입경 및 분무의 일부 입경 측정에는 유리하지만 간헐 분무 전체의 입경 분포 및 SMD의 조사에는 액침법이 더 유리하다.

따라서 본 연구에서는 BDF의 연소 특성을 체계적으로 연구하기 위하여 경유와 바이오연료인 폐식용의 TVO(TVO : transesterified vegetable oil)와 정제 폐식용유와 경유 혼합유의 물성치를 조사하고 이들 연료유의 간헐 분사시 입경 분포와 평균 입경(SMD)을 조사하는 것이 목적이다.

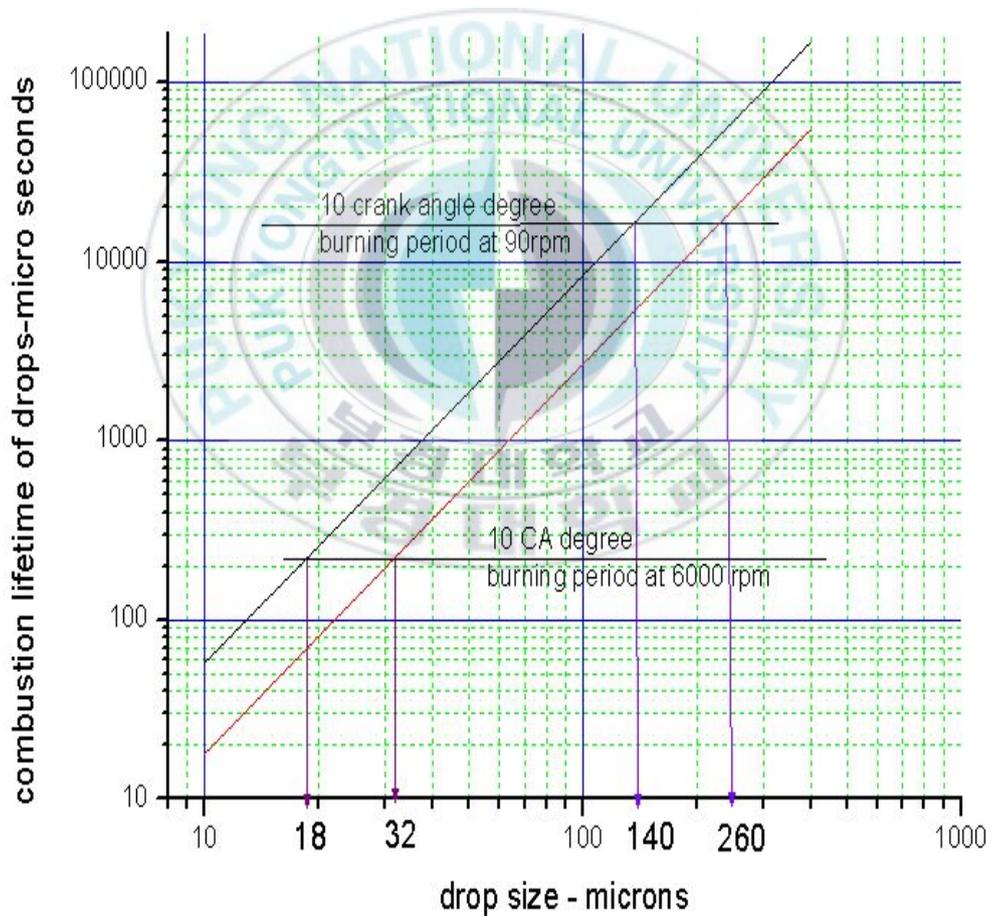


Fig. 2-1 Combustion lifetime of drop vs. drop size

## 2.2 용어의 정의

개수비, 체적비, 누적 체적을 정의하면 다음과 같다.

(1) 개수비는 입경 확률 밀도 함수 (size probability density function,  $fd(D_j)$ )에 의해 평가되며 다음 식 (2-1)와 같으며 이는 입경 분포에서 입경  $d_j$ 를 가질 수 있는 확률에 해당한다.

$$fd(D_j) = \frac{dn_j}{dx} \text{-----} (2-1)$$

여기서  $dx$ 는 입경 구간이고  $dn_j$ 는 입경  $d_j - \frac{dx}{2} < d_j < d_j + dx$  구간에 있는 입경수  $dn$ 을 총입경수  $N$ 으로 나눈 구간 당 입경비이다.

(2) 체적비는 체적 확률 밀도 함수 (volume probability density function,  $fv(d_j)$ )에 의해 평가되며 다음 식 (2)과 같으며 이는 구간 당 체적비와 같다.

$$fv(D_j) = \frac{D_j^3 fd(D_j)}{\int_0^{d_{max}} D^3 fd(D) dD} \text{-----} (2-2)$$

(3) 누적 체적은 누적분포 함수 (cumulative distribution function)중 누적 체적 분포 함수에 의해 평가된다.

여기서는 누적 입경 분포 함수,  $Fd(D)$ 와 누적 체적 분포 함수  $Fv(D)$ 가 있다. 이는 전체 액적들의 총 개수 또는 총 체적에 대해  $d$  이하의 액적들의 누적 개수 또는 누적 체적을 의미한다.

즉 개수 또는 체적의 누적 분률이 되며 다음 식 (2-3), (2-4)와 같다.

$$Fd(D_j) = dx \sum_{k=1}^j fd(D_k) \text{ ----- (2-3)}$$

$$Fv(D) = \int_0^{dmax} dfv(D)dD \text{ ----- (2-4)}$$

특별한 응용에서 입경 분포는 하나의 단일 입경에 가중치를 둔 평균 입경에 의해 대표되는 경우가 많다. Mugele 등<sup>13)</sup>은 일반적으로 평균 입경들에 다음 식 (2-5)와 같이 정의하였다.

$$D_{pq} = \left[ \frac{\int_0^{Dmax} D^p fd(D)dD}{\int_0^{Dmax} D^q fd(D)dD} \right]^{\frac{1}{p-q}} \text{ ----- (2-5)}$$

여기서 p 와 q는 정수이다.

충분히 많은 액적들의 직접 측정에서 평균 입경들은 다음 식(2-6)과 같이 계산된다.

$$D_{pq} = \left[ \frac{\sum_{j=1}^N D_j^p}{\sum_{j=1}^N D_j^q} \right]^{\frac{1}{p-q}} \text{ ----- (2-6)}$$

입경 분포 중 산술적 평균 입경 (D<sub>10</sub>)은 보통 미량적인 비교에 유용하며

Sauter 평균입경 (SMD),  $D_{32}$ 는 가장 일반적인 것으로 운동량, 열 및 물질 전달 등에 응용된다. 또한 분포의 특성을 나타내는데 주로 사용되는 체적 중심 입경(volume median diameter) $D_{vm}(D_{0.5})$ 가 있는, 즉 체적 누적 분포의 50%에 해당하는  $F_v(D_{vm})=0.5$ 일때의 입경을 나타낸다. 일반적으로 평균 입경들과 중심 입경과는 다음과 같은 관계가 있다.

$$D_{10} < D_{32} < D_{vm}$$



## 2.3 BDF의 특성 및 시료유의 제조

### 2.3.1 BDF의 특성

BDF는 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<sup>14)</sup>을 참조한 바이오 디젤유의 성상을 Table 2-1에 나타내었다. Blend 50은 폐식용유를 경유와 체적비 50%로 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 NO<sub>x</sub>의 저감도 기대할 수 있다. 이러한 특성들은 BDF에 특화된 엔진에서 더 좋은 효과를 기대할 수 있을 것으로 추측된다.

Table 2-1 Properties of fuels

Fuel	Diesel fuel	Blend 50	TVO
Flash point °C	68	80	80
Density(30°C) (kg/m <sup>3</sup> )	836	883	885
Viscosity(35°C) (mm <sup>2</sup> /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 2-2에 나타내었다, 여기서 BD100은 BDF가 100%일 때이고, BD20은 BDF가 20%, 경유가 80%로 혼합된 것이다. Table 2-2의 내용에 따르면 NO<sub>x</sub>를 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**

Item	BD100	BD20
THC	-36.7	-7.3
SO <sub>x</sub>	-100	-17.6
NO <sub>x</sub>	+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 <sub>2</sub>	-78.45	-15.33

### 2.3.2 시료유의 제조

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

바이오 디젤유는 경유보다 높은 점도를 낮추기 위해 에스테르화를 하는데, 이 때 메탄올과 촉매를 사용해야 하기 때문에 비용이 많이 들고 제조 공정도 복잡해지는 단점을 가지고 있다. 에스테르화 한 BDF는 폐식용유나 식용유를 원료로 생산하는 경우, 세금을 붙이지 않았을 때 경유보다 1.5~3.0배 정도 높은 것으로 알려져 있다.

따라서 경제성을 올리기 위한 방안이 모색되어야 하며, 이러한 단점을 극복하기 위해 폐식용유를 경유와 단순히 혼합한 BO를 선택하였다.

먼저 BO는 학교식당에서 튀김용으로 사용한 폐식용유를 수거하였고, 여기에 함유된 동물성 지방은 저온에서 응고, 침전시켜 필터를 사용하여 고형물과 함께 제거하였다. 이것을 경유와 중량비 7:3으로 혼합하였다. 그리고 충분히 교반하여 하루 정도 두었다가 가솔린자동차용 연료 필터를 통과시켜 사용하였다. 그 공정을 Fig. 2-2에 나타내었다.

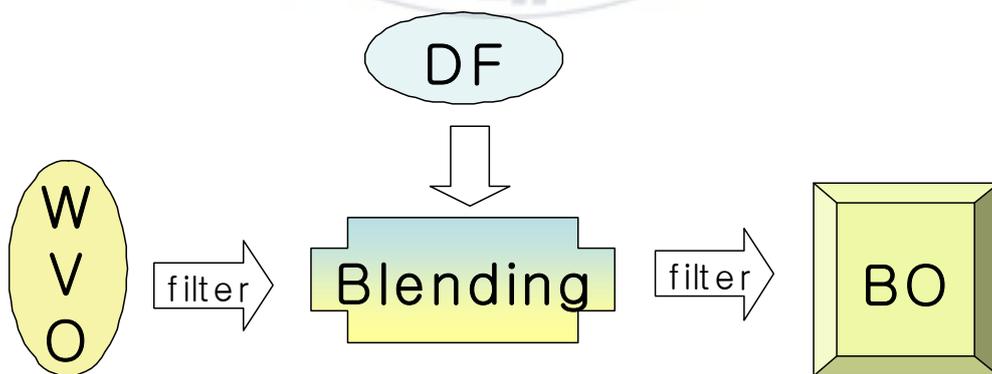


Fig. 2-2 Manufacturing progress of BO

TVO의 제조과정은 BO에 비해 상당히 많은 공정이 필요하고 그 비용도 많이 소요된다. TVO의 제조과정은 Fig. 2-3과 같다.

에스테르화를 시키기 위해서는 메탄올을 사용하여야 하며 반응에는 촉매가 필요하다. 또한 수율을 높이기 위해서는 약 70℃로 유지하면 좋다. 이렇게 하여 수 시간을 교반시키면 TVO가 생성된다. 반응 후에는 남은 메탄올, TVO, 글리세롤이 층상을 이룬다.

본 실험에 사용된 시료유는 먼저 폐식용유를 메탄올과 체적비 2:1로 혼합하고 여기에 촉매로 폐식용유 1ℓ당 수산화칼륨(KOH) 5g을 첨가하여 상온에서 약 2시간을 교반하였다. 교반 후에는 Fig. 2-4와 같이 층상 분리가 나타났지만 메탄올 층상은 뚜렷이 보이지 않았다. 이는 첨가한 메탄올의 양이 적었기 때문인 것으로 생각되어진다. 실험에는 메탄올에 의한 발열량 저하를 염려하여 TVO의 중간 부분만을 분리하였다. 수율을 높이기 위해 70℃ 정도로 유지하는 것이 좋으나 충분한 시료량이 확보되었기 때문에 상온에서 교반하였다. 추출량은 폐식용유 1ℓ당 TVO도 약 1ℓ로 거의 같았다.

Fig. 2-4는 제조된 TVO로 아랫부분의 검은 층이 글리세롤층이다. 그리고 윗부분이 반응 후 남은 메탄올층이다. 남은 메탄올을 손으로 만져보면 알코올의 특성인 시원함을 알 수 있었다. 따라서 메탄올의 혼입을 방지하기 위해 중간층 부분만을 분리하여 사용하였다.

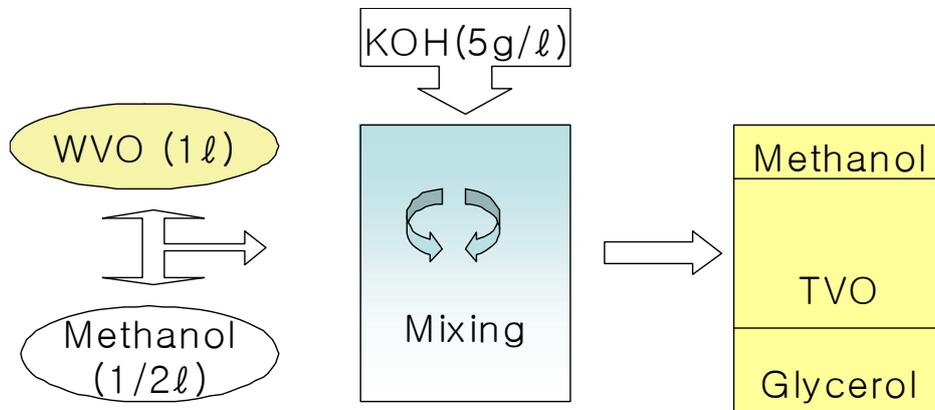


Fig. 2-3 Manufacturing progress of TVO and Manufactured TVO

### 2.3.3 시료유의 특성

시료유의 동점도와 비중 및 표면장력을 측정하여 Table 1-4에 나타내었다. 측정값들은 Table 1-2는 물론이고, 다른 문헌과도 비슷함을 확인하였다.

비중의 측정은 액체비중계를 이용하여 측정하였다. 동점도계는 BROOKFIELD DV-I+ 디지털 점도계를 사용하여 측정하였다. 샘플 컨테이너 바깥에 항온조를 직접 제작하여 40°C를 유지하면서 측정하였다.

표면 장력의 측정은 직접 구성한 장치(Photo 1)를 이용하였다. 측정원리는 양팔 저울을 이용하여 저울의 한쪽에 뷰렛(burette)에서 물이 공급되면 저울의 원리에 따라 저울의 반대편의 링이 올라간다. 이때 링에 달려 올라간 액주가 파괴되기 직전까지의 높이를 측정하고 다음 식 (2-7)로 표면장력을 구할 수 있다. 저울 한쪽 뷰렛에서 공급된 물의 무게와 저울 반대편에서 들어 올려지는 액주의 무게가 링의 표면장력과 같다고 볼 수 있다.

$$2\pi(r_1+r_2)\sigma + \pi(r_1^2-r_2^2)h\rho g = W$$

$$\sigma = \frac{W}{2\pi(r_1+r_2)} - \frac{r_1-r_2}{2} \times h\rho g \quad (2-7)$$

$r_1$  : 링의 외경(m),                       $r_2$  : 링의 내경(m)                      ,                       $h$  : 액주의 높이(m),  
 $\rho$  : 물의 밀도(kg/m<sup>3</sup>),                       $W$  : 뷰렛에서 공급된 물의 무게(N),  
 $g$  : 중력 가속도(m/s<sup>2</sup>),                      1N/m=103dyne/cm                       $\sigma$  : 표면장력(N/m)

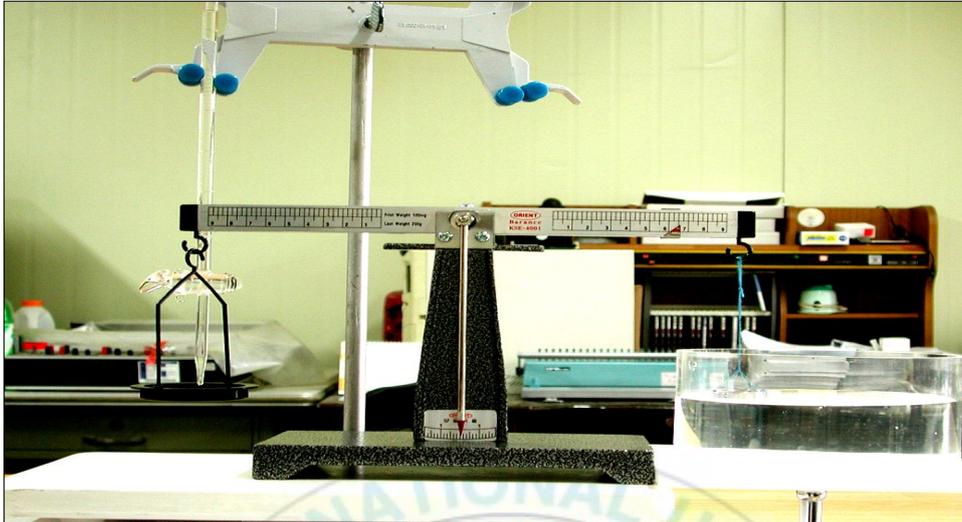


Photo · 2-1 Surface tension measurement equipment

본 장치로 물의 표면장력을 12회 측정한 평균값이 알려진 물의 표면장력과 근접함을 확인하여 장치에 대한 신뢰도를 확보하였다. 시료의 표면장력을 20회 이상 측정한 평균값으로 Table 2-3에 나타내었다.

Table 2-3 Properties of fuels

Properties \ Fuel	DF	BO	TVO
Surface tension(dyne/cm, at 25°C)	32	39	40
Kinematic viscosity(cSt, at 40°C)	2.843	9.4725	4.115
Gravity(at 40°C)	0.81	0.872	0.887

## 2.4 실험 장치 및 방법

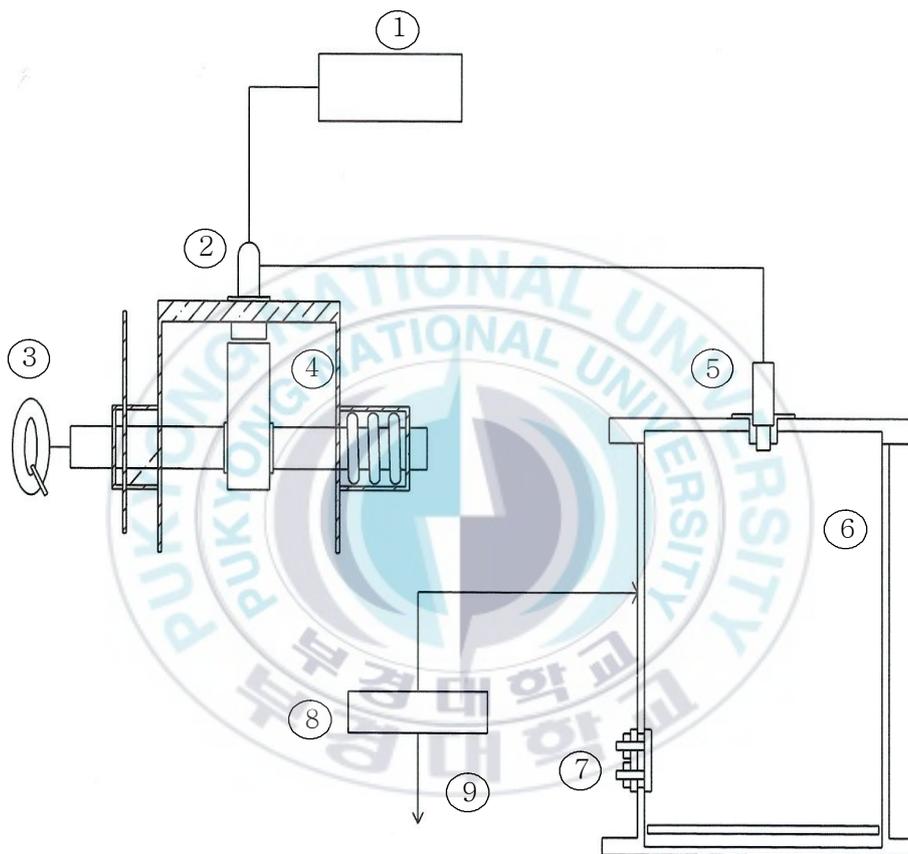
### 2.4.1 실험 장치

Fig. 2-4에 디젤 분무의 입경과 입경분포를 측정하기 위하여 본 실험에서 사용한 실험장치도를 나타내었다.

이 장치는 연료 공급호스와 연료 분사 펌프 그리고 단발 분사를 위하여 스프링의 장력에 의한 캠 구동장치와 분위기 압력에 따른 분무 입경을 측정하기 위한 압력 용기 및 공기 압축기로 구성되어 있고 용기 하단부에 관찰 공을 마련하였다.

이 장치의 작동원리는 캠축의 우측 단에 스프링력을 작용시킨 상태에서 좌측 단의 스톱퍼(stopper)를 개방시키게 된다. 그러면 캠축의 회전으로 연료 분사펌프의 플런저가 상승 하게 되고, 연료가 가압되어 노즐을 통해 분사하게 된다. 그리고 노즐은 압력 용기 상단 중앙에 부착하여 직각으로 분사되도록 하였다.

사용 노즐은 0.7mm의 선박용 핀틀 노즐을 사용하였으며 분위기 압력을 1, 3, 6bar으로 변화시켰다. 그리고 압력 용기는 분무 액적들이 하부와 벽면에 충돌하지 않도록 크게 제작하였으며 그 크기는  $\Phi = 2,500mm$ ,  $H = 10,000mm$ 이다. 압력용기 측면 하단부의 구멍을 통해 포집 셀(cell)을 넣고 분무 액적을 수집하였다. 그리고 광학 현미경을 이용하여 액적 사진(640×480의 화소)을 얻었다.



- |                    |                   |
|--------------------|-------------------|
| ① Fuel tank        | ② Fuel pump       |
| ③ Cam drive        | ④ Fuel cam        |
| ⑤ Injection nozzle | ⑥ pressure vessel |
| ⑦ Inspection hole  | ⑧ Air compressor  |
| ⑨ Air vent line    |                   |

**Fig. 2-4 Schematic diagram of experimental apparatus**

## 2.4.2 실험 방법

실험방법은 먼저 포집액을 용기에 넣고 압력 용기의 실험 조건에 따라 용기에 압력을 공기 압축기로 충전 후 시료를 단발 분사한다. 단발 분사하고 충분한 시간이 지난 다음 포집액에 포집된 액적들을 CCD카메라가 장착된 광학 현미경에서 40배로 확대하여 컴퓨터에 저장하였다.

다른 연구들<sup>15~18)</sup>에서는 포집액의 비중을 시료보다 낮게하여 액적이 침전되도록 하였으나 본 실험에서는 실험장치의 특성상 포집셀을 현미경으로 움직여야 하므로 포집액의 비중이 낮을수록 유동성이 증가하여 포집셀을 광학 현미경으로 옮길 때 액적의 유동에 의한 입경의 변화(영김 및 융합)가 많아 포집액의 비중을 0.9로 고정하여 실험하였다. 포집셀의 현미경 관찰에서 비중에 따른 액적의 변형이 거의 보이지 않았다.

컴퓨터에 저장된 액적 사진(640×480의 화소)들은 “Sigma scan”이라는 화상처리 프로그램(Image processing program)을 이용하여 액적의 지름을 구하였다. 프로그램을 통해 얻어진 액적의 원넓이로부터 지름을 구하고 이를 픽셀수로 환산하여 여기에 0.2mm 강철침을 같은 배율의 광학 현미경에서 얻어진 이미지의 픽셀수로 나눈 값에 픽셀의 실제 길이를 곱하여 액적의 지름을 측정하였다.<sup>19)</sup>

그리고 이때 사용된 시료는 경유, BO, TVO이고 분위기 압력은 1, 3, 6bar 이었다. 이에 해당하는 분위기 밀도는 이상기체의 상태 방정식에서 계산하면  $2.33\text{kg/m}^3$ ,  $4.63\text{kg/m}^3$ ,  $8.07\text{kg/m}^3$ 이었다.

## 2.5 결과 및 고찰

### 2.5.1 화상처리기법 적용과 목측과의 비교

Fig. 2-5는 분위기 압력 6bar일때의 TVO의 액적 사진이다. 목측과 이미지 프로세싱을 이용하여 계산되어진 값을 Table 2-4에 나타내었다.

Table 2-4에서 나타난 것과 같이 목측의 경우가 약 10%정도 커진 것으로 나타났다. 이러한 결과는 측정자의 기준에 따라 오차가 발생할 수 있고, 이미지 프로세싱의 경우 한 픽셀당 길이가  $4.8\mu\text{m}$ 정도이므로 측정 픽셀의 선정 기준에 따라 값이 달라질 수 있다. 이미지프로세싱 프로그램은 콘트라스트를 조절하여 이미지의 윤곽을 동일하게 조정할 수 있고, 동일한 기준의 인텐시티 스레숀딩(Intensity thresholding)으로 액적 이미지의 윤곽을 확실히 할 수 있다. 목측으로는 주관적으로 액적 이미지의 윤곽이 정해지지만 이미지 프로세싱은 객관적인 기준에서 이미지의 윤곽이 정해지므로 목측의 오차가 이미지 프로세싱의 오차보다 확연히 크다고 보여진다.

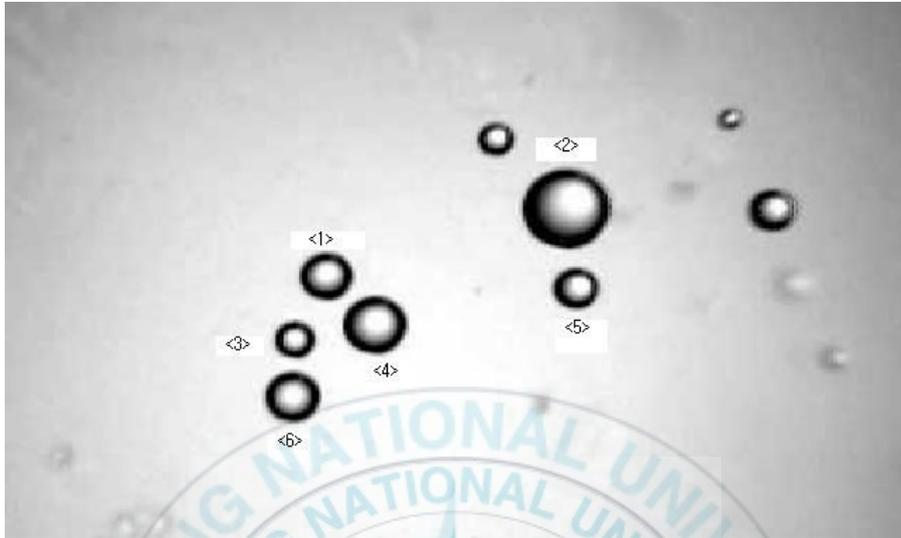


Fig. 2-5 Image of TVO on ambient pressure 6bar

Table 2-4 Comparison eye measurement with image processing  
(Unit :  $\mu\text{m}$ )

Number	1	2	3	4	5	6
Eye measurement	82	145	55	100	73	91
Image processing	73	130	47	90	66	79

### 2.5.2 미립화 사진의 검토

시료에 따른 액적의 형상은 육안으로도 그 경향을 알 수 있었다. 모든 시료에서 분위기 압력이 증가함에 따라 액적의 크기가 증가함을 정성적으로 알 수 있었다. 다음은 시료별 분위기 압력에 따른 액적 사진들을 Fig. 2-6에 나타내었다.

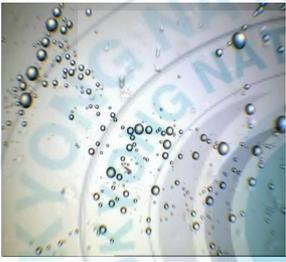
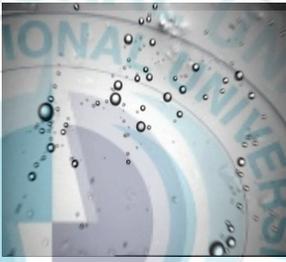
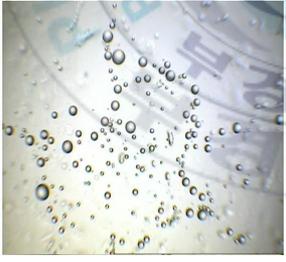
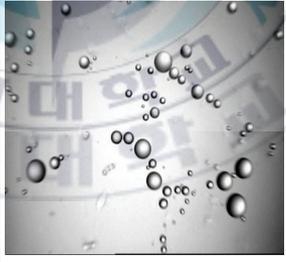
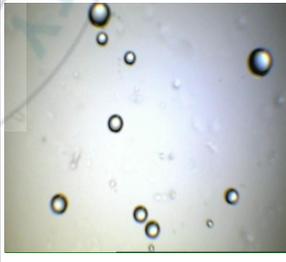
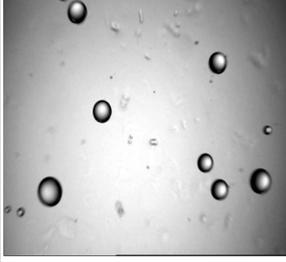
Fuels Pamb. (bar)	DF	BO	TVO
1			
3			
6			

Fig. 2-6 Image for ambient pressure change

### 2.5.3 개수비, 체적비, 누적 체적의 검토

Fig. 2-7에서 Fig. 2-9까지는 분위기 압력 1, 3, 6bar에 따른 경유의 액적 분포를 나타낸다. 분위기 압력이 증가함에 따라 액적 크기가 커지는 것을 보여주고 있다. 이는 분출속도의 감소로 액적이 커짐을 짐작할 수 있다.

Fig. 2-10에서 Fig. 2-12까지는 분위기 압력에 따른 BO의 액적 분포를 나타내었다. BO 역시 경유와 같은 경향을 보이고 있으며 분위기 압력 3bar에서 체적분포가 우측 개수분포에 비해서 크게 나타난다. 그 이유는 체적분포는 액적 지름 3승에 비례하므로 작은 액적과 큰 액적의 체적차가 크게 나기 때문에 상대적으로 크게 나타나게 된다고 생각된다.

Fig. 2-13에서 Fig. 2-15까지는 분위기 압력에 따른 TVO의 액적 분포를 나타내었다. TVO 역시 다른 시료와 유사한 경향을 보이고 있으며 다른 연료유에 비해 액적 크기가 큼을 알 수 있다. 이는 TVO가 다른 연료유에 비해 점성이 크기 때문이라고 생각된다.

경유, BO, TVO 모두 거의 비슷한 개수비의 분포를 보이고 있으며 체적비 또한 유사한 분포를 보인다. 그리고 분위기 압력 3bar일 때, 1bar에 비해 경유와 TVO의 체적비가 BO에 비해 액적 크기가 큰쪽으로 이동해 간 것을 보면, 이는 경유와 TVO가 다른 시료에 비해 표면장력이 작아서 분위기 압력에 변화에 따른 체적분포비 변화가 커진 것 같다. 분위기 압력 6bar일 때는 다른 연료에 비해 TVO는 전구간에 걸쳐 넓게 퍼져있는데 이는 수백 장의 액적 이미지 중에서 좋은 이미지를 뽑아서 사용하는데 사용된 이미지들의 액적크기가 고른 분포에서 뽑혀 온 것으로 사료된다.

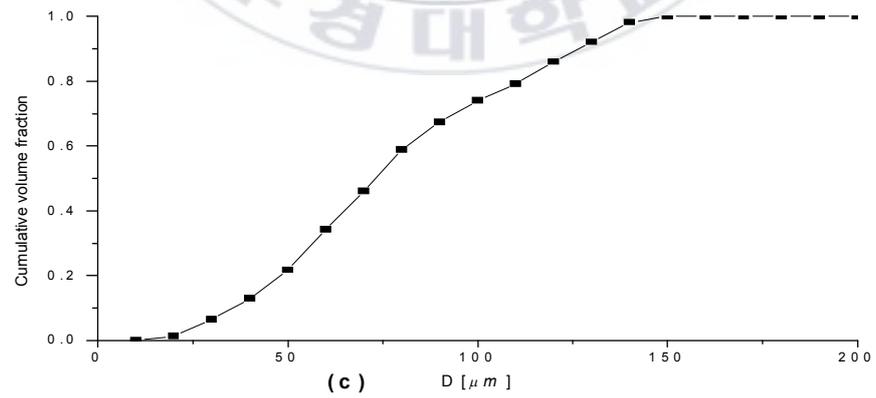
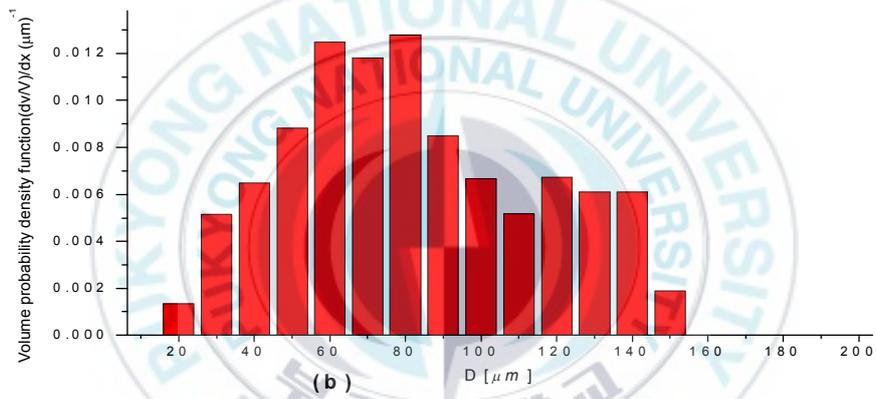
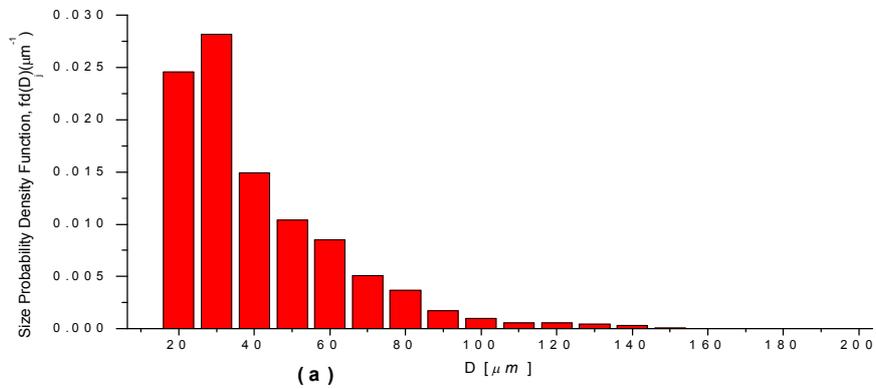


Fig. 2-7 Size probability density function(a), volume probability density function(b) and cumulative volume fraction(c) of DF under pressure 1bar

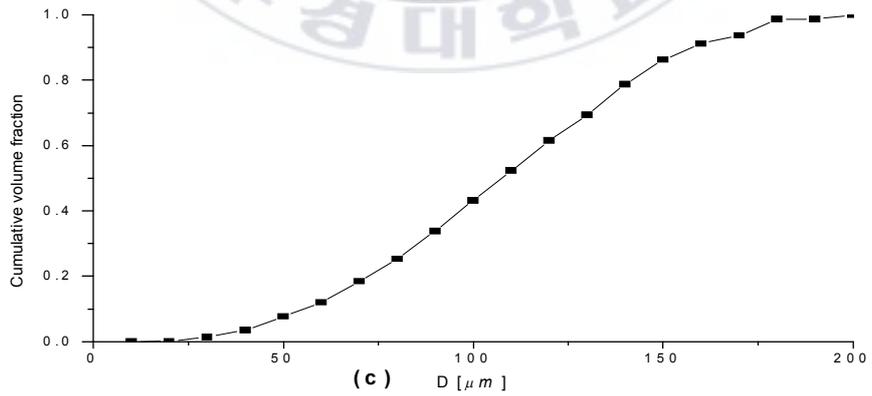
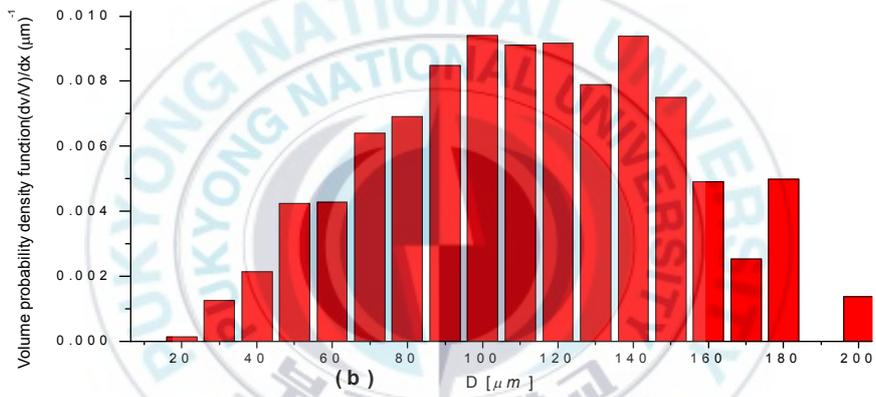
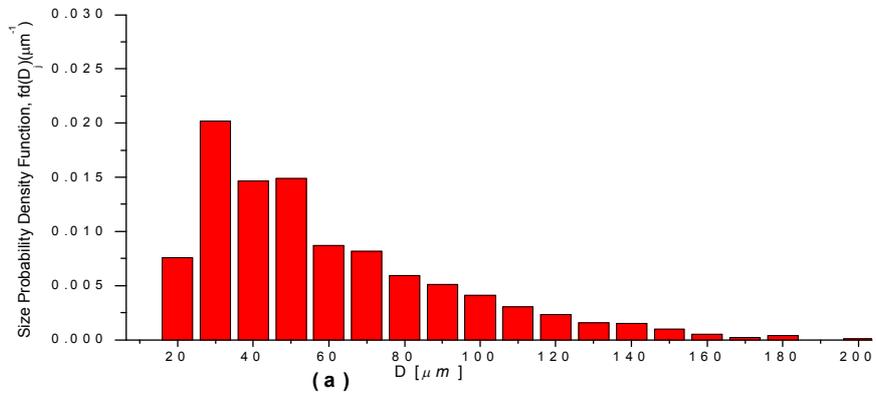


Fig. 2-8 Size probability density function(a), volume probability density function(b) and cumulative volume fraction(c) of DF under pressure 3bar

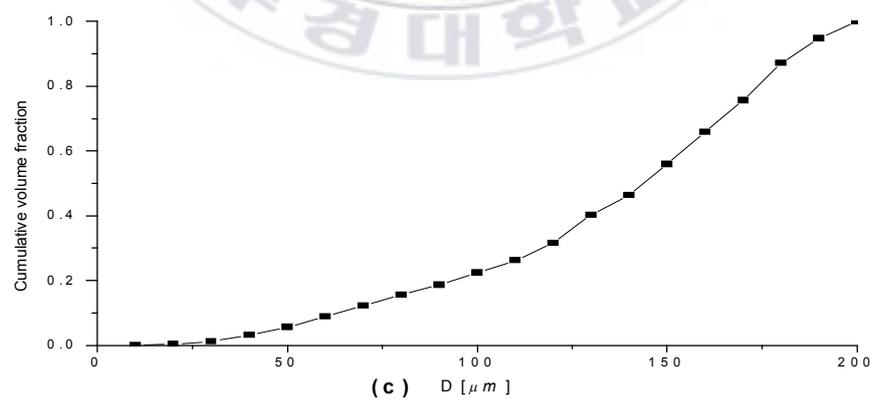
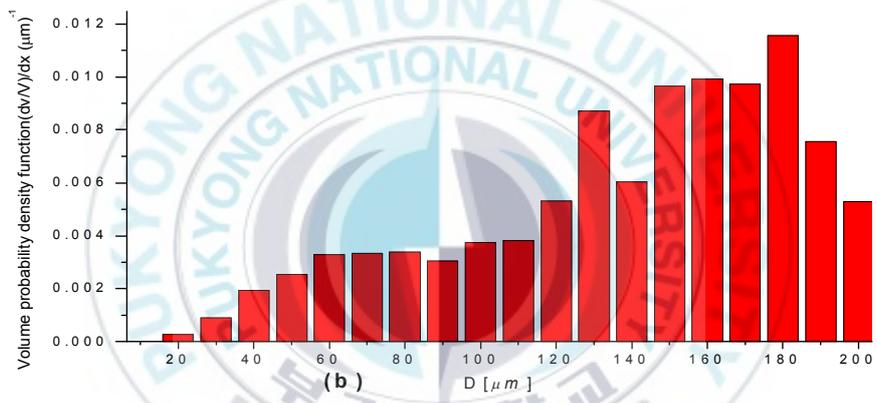
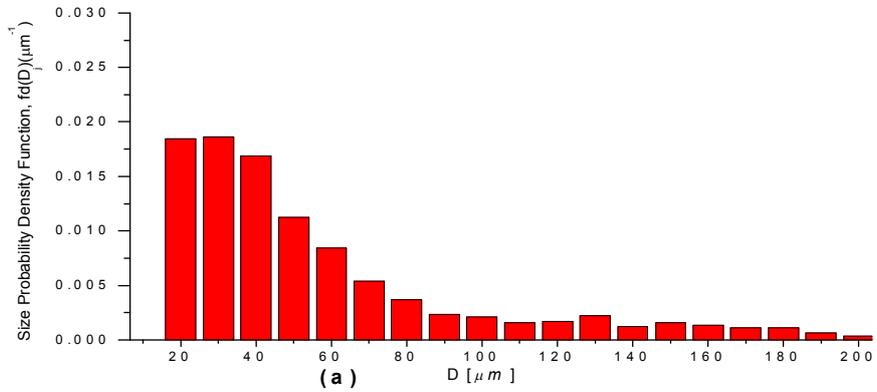


Fig. 2-9 Size probability density function(a), volume probability density function(b) and cumulative volume fraction(c) of DF under pressure 6bar

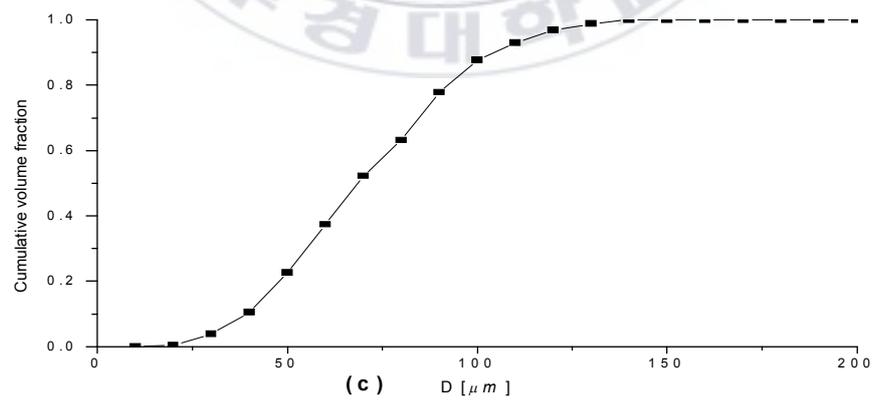
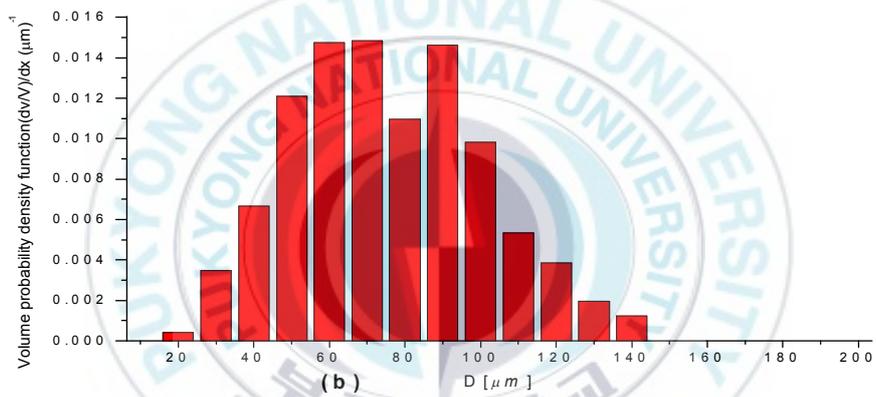
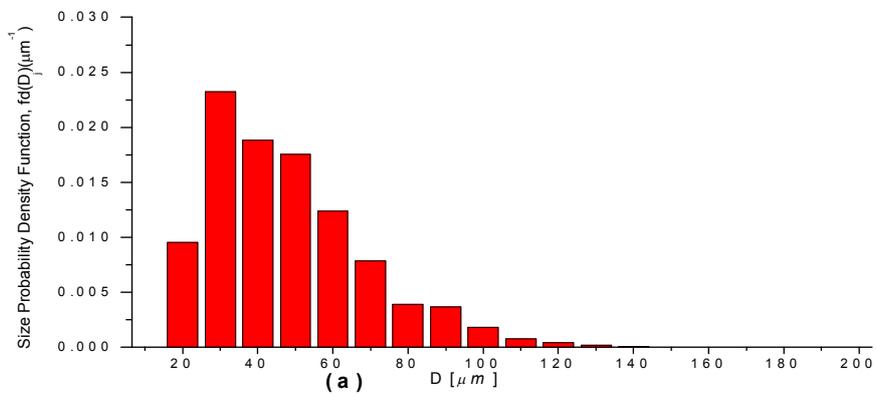


Fig. 2-10 Size probability density function(a), volume probability density function(b) and cumulative volume fraction(c) of BO under pressure 1bar

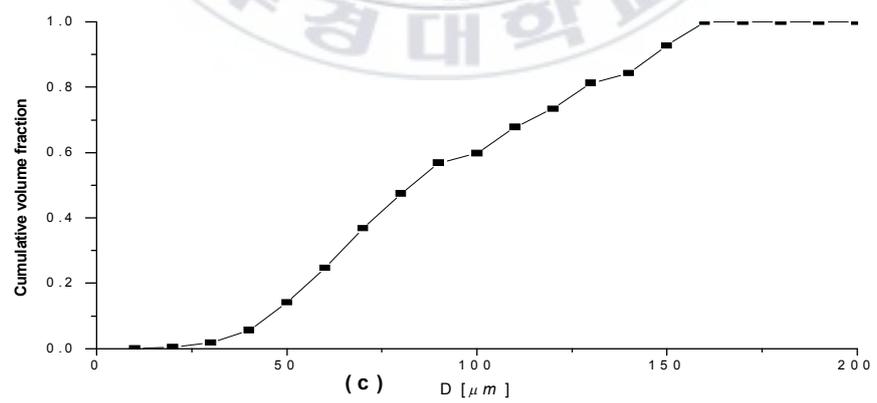
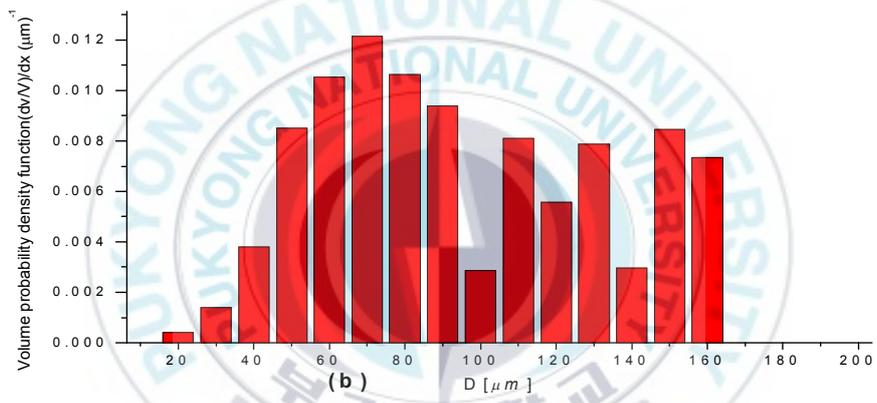
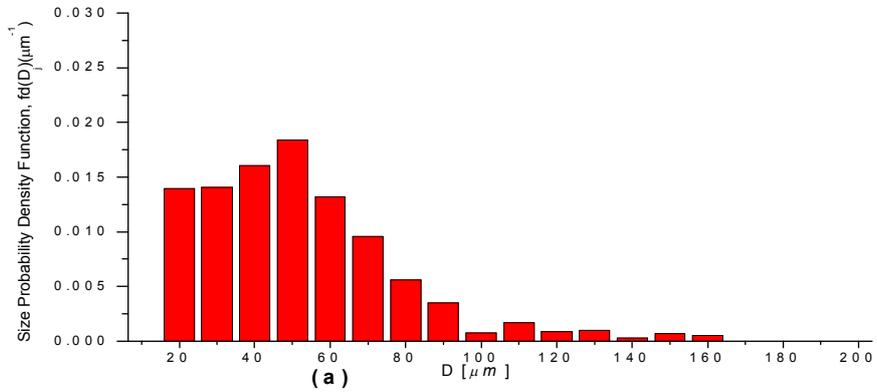


Fig. 2-11 Size probability density function(a), volume probability density function(b) and cumulative volume fraction(c) of BO under pressure 3bar

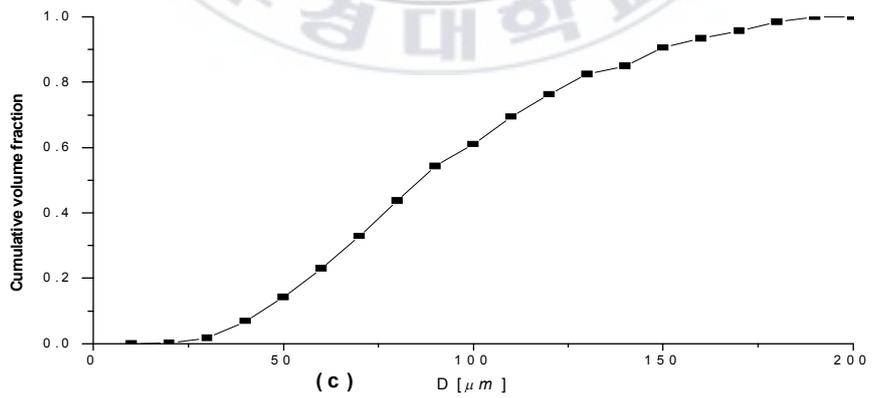
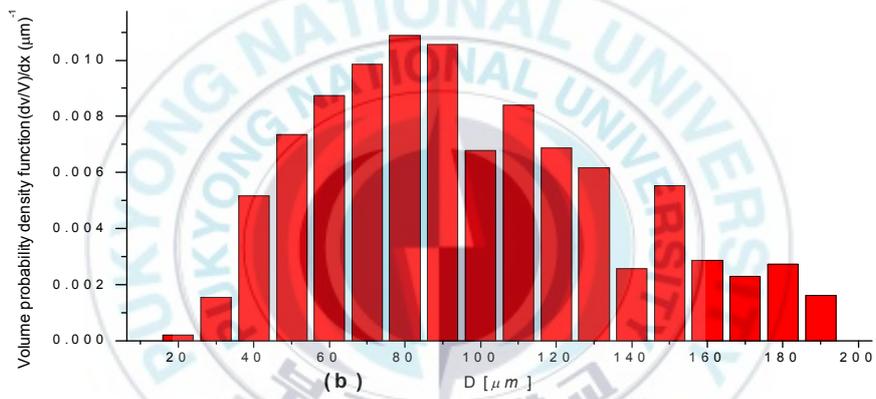
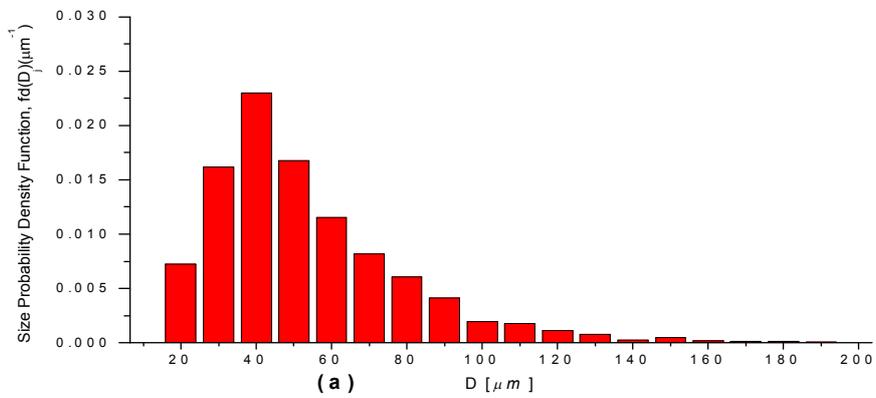


Fig. 2-12 Size probability density function(a), volume probability density function(b) and cumulative volume fraction(c) of BO under pressure 6bar

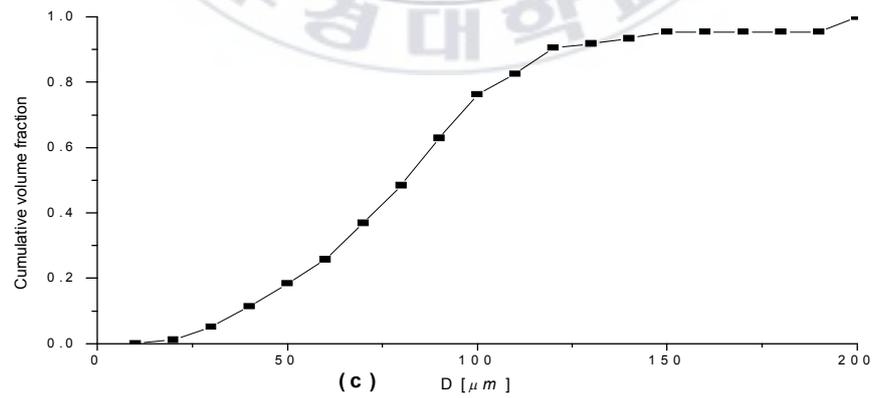
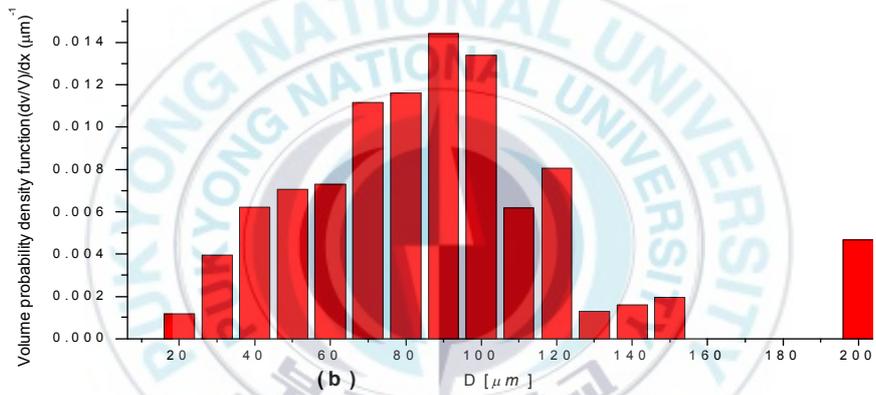
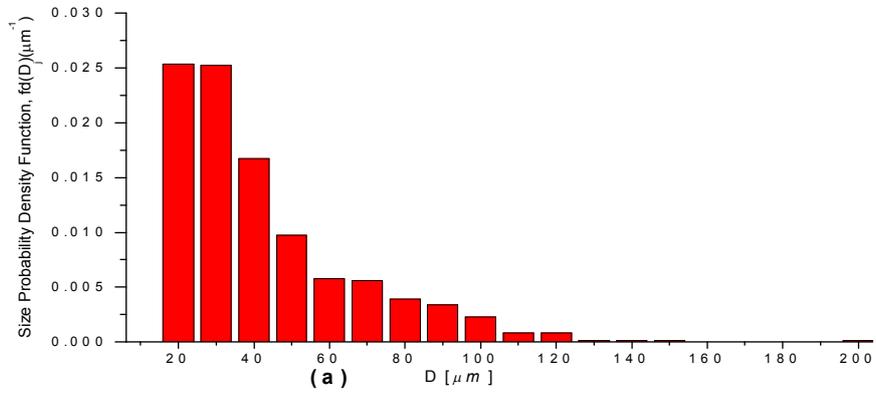


Fig. 2-13 Size probability density function(a), volume probability density function(b) and cumulative volume fraction(c) of TVO under pressure 1bar

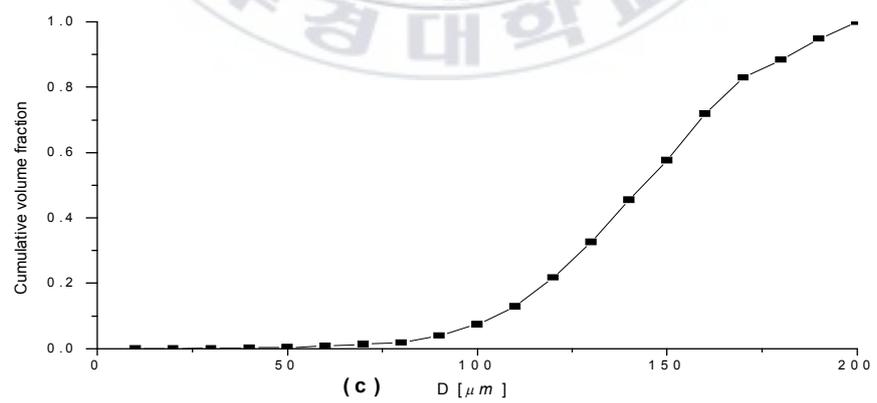
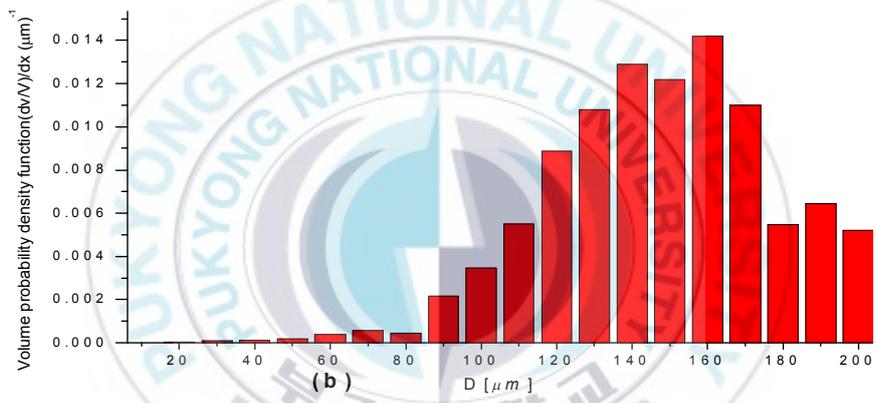
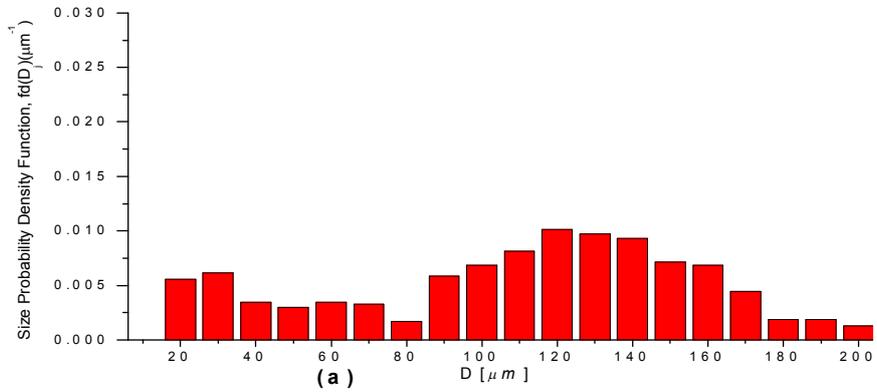


Fig. 2-14 Size probability density function(a), volume probability density function(b) and cumulative volume fraction(c) of TVO under pressure 3bar

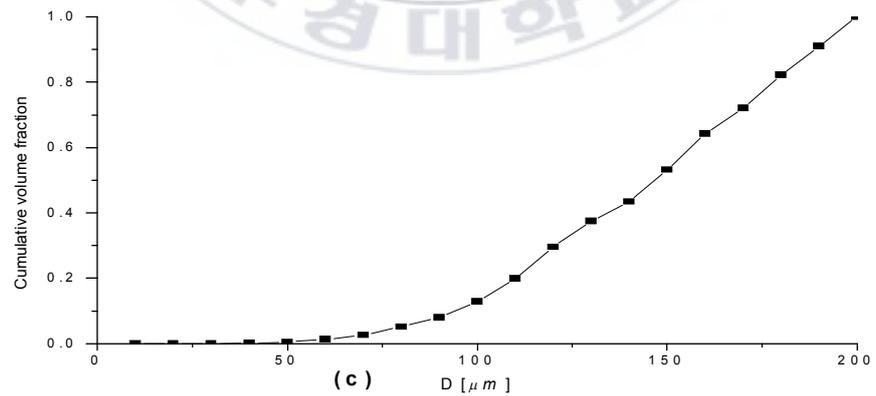
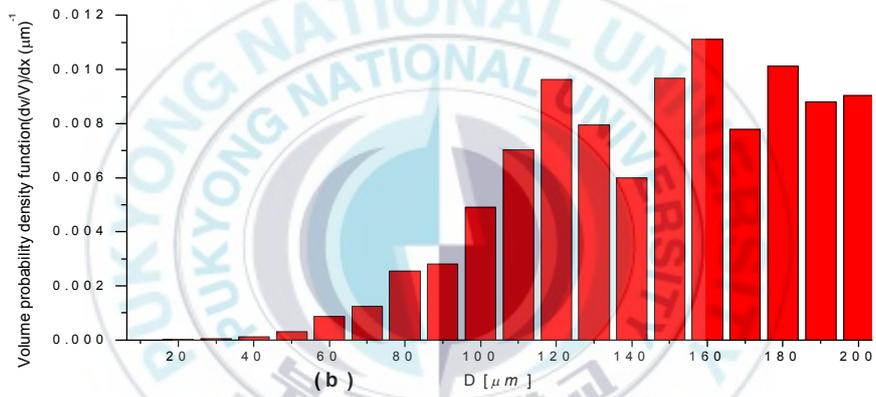
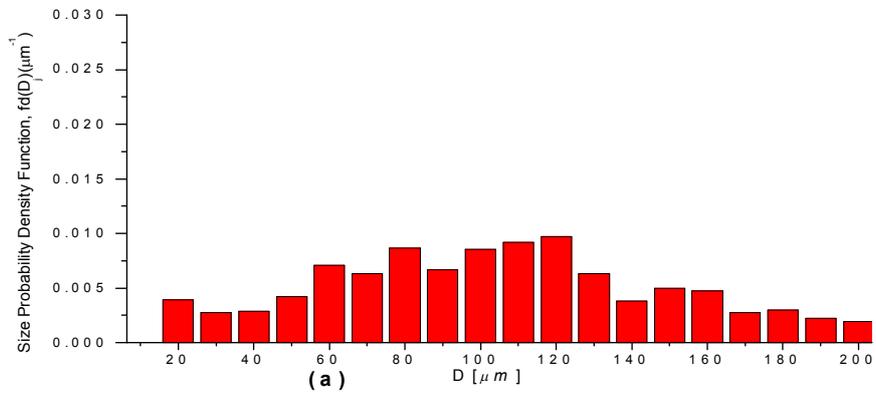


Fig. 2-15 Size probability density function(a), volume probability density function(b) and cumulative volume fraction(c) of TVO under pressure 6bar

## 2.5.4 SMD와 ROSIN-RAMMLER 분석

(2-6)식에 의해 분위기 압력에 따른 시료의 SMD를 Table 2-5에 나타내었다. 분위기 압력이 증가함에 따라 SMD가 증가함을 보여주고 있다. 이것은 분위기 압력이 증가함에 따라 노즐 출구 측과의 압력 차가 작아져 액적의 SMD가 크게 나타난 것으로 생각되어진다. 그리고 일정 분위기 압력(3bar) 이상에서의 SMD의 변화를 보면 모든 시료유에서 변화가 작게 나타나는 경향을 보인다.

Table 2-5 SMD of fuels under ambient pressure

(단위 :  $\mu\text{m}$ )

Fuels \ P(bar)	1	3	6
DF	67	96	117
BO	66	79	80
TVO	72	140	142

시료별 분위기 압력에 따른 SMD는 Fig. 2-16에 나타내었다.

그림에서 보면 분위기 압력이 증가함에 따라 분출속도와 분무 도달거리의 감소에 의해 모든 시료에서 SMD가 증가하였다고 생각되어진다

분위기 압력의 증가에 따른 SMD의 변화<sup>20)</sup>를 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 분출속도( $U_r = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$ )는 분위기 압력이 증가하면  $\Delta p$ 의 값이 작아져 감소하므로 입경이 크게 되며,

둘째, We수( $We = \frac{\rho_a U_r^2 d}{\sigma}$ )는 주위 분위기 밀도 즉, 공기밀도( $\rho_a$ )에 비례하여 증가한다. 이는 액적의 불안정을 가중시켜 쉽게 분열되게 함으로 입경이 작아지게 되고,

셋째, 분무 도달거리의 감소로 액적들의 수 밀도가 증가하므로 충돌과 합체의 확률이 증가하여 입경은 커진다.

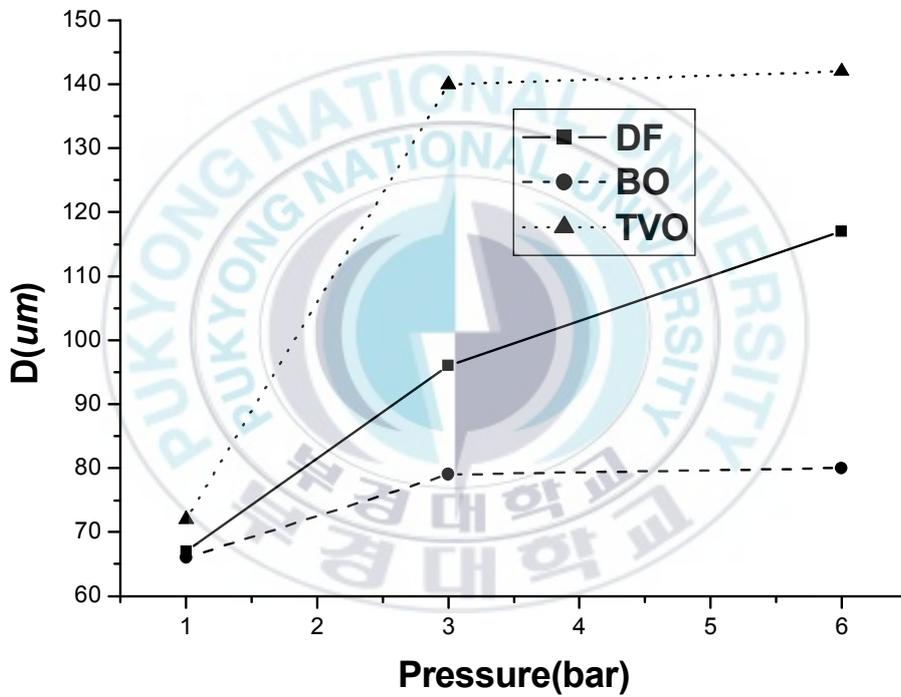


Fig. 2-16 SMD of fuels on pressures

### 2.5.5 Rosin - Rammler 분포식에 의한 분포 파라미터 $\delta$ 의 결정

Rosin - Rammler 분포함수는 누적 체적 분포함수로서 다음 식(2-7)로 나타낸다.

$$1-v = e^{-\left(\frac{x}{\bar{x}}\right)^\delta} \text{-----}(2-7)$$

여기서  $1-v$ 는  $x$ 보다 큰 직경의 입경이 있을 수 있는 체적 분율이고  $\bar{x}$ 는 입경 파라미터이며  $\delta$ 가 분포 파라미터이다.

Data를 적용하기 위해 위에 식을  $\ln$ 을 취해 정리 하면 다음 식(2-8), (2-9)와 같다.

$$\text{즉 } \ln(1-v) = -\left(\frac{x}{\bar{x}}\right)^\delta \text{-----}(2-8)$$

$$\ln\left(\frac{1}{1-v}\right) = \left(\frac{x}{\bar{x}}\right)^\delta$$

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-v}\right)\right] = \delta(\ln x - \ln \bar{x}) \text{-----}(2-9)$$

이 식은  $\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-v}\right)\right]$ 이  $\ln x$ 에 선형적임을 나타낸다.

Fig. 2-17에는 입경에 대한 누적 체적분률 데이터를 로그 스케일로 나타내었다. 누적체적분률은 거의 직선을 이룬다. 분포파라미터  $\delta$ 는 이 직선의 기울기이다. 분포 파라미터  $\delta$ 가 크면 클수록 분포는 균일함을 나타낸다. 한편 입경 파라미터  $\bar{x}$ 의 의미는  $x = \bar{x}$  이면  $1-v = e^{-1}$  이므로

$$\log\left(\frac{1}{1-v}\right) = \log_{10}e = 0.434 \text{ 이다.}$$

로그 좌표에서 x축을  $\log\left(\frac{1}{1-v}\right)$ 로 두고 y축을 입경 크기로 두고 x축의 0.434되는 지점을 찾으려면  $\bar{x}$ 는 약  $87\mu\text{m}$ 이다.

$\log\left(\frac{1}{1-v}\right) = 0.434$  에서  $\frac{1}{1-v} = 2.7$ 이므로  $v \approx 0.63$  이고 누적 체적 분율 63%에 해당하는 입경이 된다.

Fig. 2-7의 누적 체적분율의 63% 지점을 찾아보면 입경은 약  $83\mu\text{m}$ 이다. 이는 로그좌표에서 얻은 값  $\bar{x}$ 와 거의 일치한다.

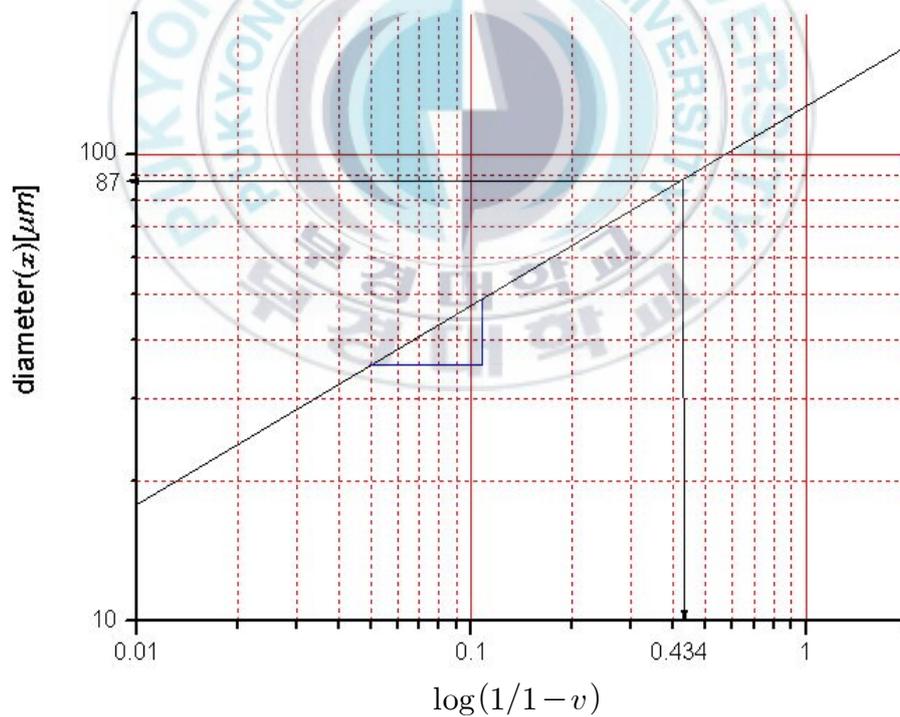


Fig. 2-17 Rosin-Rammler analysis of DF under pressure 1bar

연료와 배압에 따른  $\delta$ 와  $\bar{x}$ 의 값을 Table 2-6에 나타내었다.

Table 2-6 Value of  $\delta$  and  $\bar{x}$

Fuels	Pressure(bar)	$\delta$	$\bar{x}(\mu\text{m})$
DF	1	3.719	87
	3	2.91	121
	6	2.42	161
BO	1	3.13	80
	3	2.50	102
	6	2.56	104
TVO	1	2.53	93
	3	5.80	155
	6	4.18	160

BO는 분위기 압력이 증가하여도 거의 비슷한 값을 나타내고 있으나 TVO의 경우에는  $\delta$  값의 차이가 다른 연료에 비해 크게 나타나고 있다. 이는 동점도가 다른 시료에 비해 크기 때문에 분위기 압력 변화에 따른 시료의 미립화가 감소되기 때문으로 보여진다.

## 2.6 요약

본 연구에서는 바이오 대체연료에 대해 연소에 중요 요소가 되는 입경 분포와 SMD를 분위기 압력 변화에 따라 조사하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 화상처리기법을 이용하여 측정된 액적 지름과 목측에 의한 액적 지름은 약 10%의 오차를 갖고 있다.
- 2) 모든 시료유에서 분위기 압력이 증가함에 따라 큰 액적들의 분포가 증가하였다.
- 3) 분위기 압력 1bar 일 때 BO, TVO는 경유와 유사한 SMD를 가졌다.
- 4) 모든 시료유에서 일정 분위기 압력(3bar) 이상으로 증가하면 SMD의 변화가 작게 나타났다.

## 제 3 장 이색법에 의한 화염온도와 KL 연구

### 3.1 서언

디젤엔진의 연소실 내의 크랭크 각도에 따른 화염온도 및 KL측정은 NO<sub>x</sub> 및 그을음의 생성과정 파악과 저감을 위한 기초정보를 얻기 위해 필요하다<sup>21~22)</sup>.

내연기관의 화염온도 측정은 연소실 내의 상태가 비정상류이므로 연소실 내의 온도측정법<sup>23)</sup>으로 열전대를 이용하는 방법, 음의 전파에 의한 방법, 압력과 밀도를 이용하는 방법, 광을 이용하는 방법<sup>24~25)</sup> 등이 있다.

디젤화염은 휘염이므로, 그을음 입자로부터 강한 연속복사 에너지 중 2 파장( $\lambda_1, \lambda_2$ )만의 에너지에 의한 휘염온도로부터 화염진온도 T를 계산하고 이어 광로 중의 그을음 농도 KL을 계산하는 이색법(two-color method)은 실린더 내의 각도당 순간적인 그을음 생성 농도를 예측하는데 유효하게 이용된다.

국내의 연구로는 박정규 등<sup>26)</sup>이 직분식 디젤기관의 경유화염에 대해, 가솔린기관에 대해서는 서울대 석사 논문<sup>27)</sup>에 적용 가능성에 대해 언급하였다. 국외에서는 Matusi 등<sup>28)</sup>은 이색법이 가시영역에 주로 사용되는 것을 적외선 영역까지 확장하여 직분식 디젤기관에 적용한 바 있다. 또한 Ahn 등<sup>7)</sup>은 고속도 사진에 이색법을 적용하여 공간적 시간적 그을음 농도 분포인 KL인자와 온도 분포를 측정법을 확립하여 디젤 경유 화염에 적용하였다. 그러나 경유 대체 연료인 BDF에 적용한 예는 없었다.

본 장에서는 기존의 고가의 완성된 장비가 아닌 염가로 자작한 장비로 이색법을 적용하여 연료별, 회전수와 부하 변동 등의 운전조건에 의한 그을음 생성의 정보를 나타내는 KL인자와 NO<sub>x</sub> 생성에 관여되는 온도 거동을 측정하여 그 배출 경향을 예측할 수 있는 기초 자료를 제공함에 그 목적이 있다.

### 3.2 이색법의 기본이론

그을음 입자의 복사를 이용하는 이색법은 서로 다른 두 파장의 복사를 에너지를 검출하고, 화염방사율에서 미지수를 소거하는 방법으로 화염온도를 구한다<sup>30~38)</sup>.

절대온도  $T$ , 임의 파장  $\lambda$ 에 있어 흑체의 복사휘도(radiation brightness)  $E_b(\lambda, T)$ 는 가시역의 파장에서는 Wien의 식 (1)과 근사할 수 있다.

$$E_b(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T) \text{-----}(2-1)$$

여기서  $C_1, C_2$ 는 Planck의 정수로  $C_1=3.743 \times 10^8 \text{W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$ ,  $C_2=1.4387 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 이다.

Wien의 식은 흑체 (복사율 :  $\epsilon=1$ )일 때이므로 비흑체( $\epsilon < 1$ )일 경우의  $E(\lambda, T)$ 는

$$\begin{aligned} E(\lambda, T) &= \epsilon_\lambda E_b(\lambda, T) \\ &= \epsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T) \\ &= E_b(\lambda, T_a) \\ &= C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T_a) \text{-----}(2-2) \end{aligned}$$

단,  $T_a$ 는 비흑체를 흑체로 간주했을 때의 화염의 휘도온도이다.

식 (2-2)를  $\epsilon_\lambda$ 에 관해 정리하면 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{\lambda} = \exp\left[\frac{C_2}{\lambda}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_a}\right)\right] \text{-----}(2-3)$$

한편, 디젤화염의 그을음 단색복사율은 Hottel-Broughton에 의해 식 (2-4)로 정의된다.

$$\epsilon_{\lambda} = 1 - \exp(-KL/\lambda^{\alpha}) \text{-----}(2-4)$$

식(2-4)는 작은 입자의 산란이론에서 얻어진 엄격한 해의 근사적인 값이며, K는 그을음의 크기가 작으므로 산란율은 무시되고 흡수율로 간주된 계수이며, L은 관찰된 화염 축방향의 기하학적 화염두께이다. KL이 근사적인 입자수 밀도와 화염두께를 나타내고,  $\lambda^{\alpha}$ 는 파장의 영향을 근사적으로 나타내기 때문에 지수 $\alpha$ 는 한정된 파장의 입자 직경의 함수로 그을음의 굴절 지수이다. 가시역의 파장에서는  $\alpha=1.38$ 로 정해진 상수이다. 위의 식 (2-3)과 식 (2-4)로부터 KL에 관해 정리하면 다음과 같다.

$$KL = -\lambda \ln\left[1 - \exp\left\{\frac{C_2}{\lambda}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_a}\right)\right\}\right] \text{-----}(2-5)$$

여기서, KL은 미립자의 농도에 비례하는 정성적인 값이다.

이 식을 이색법을 적용하는 두 파장의 식으로 나누어 쓰면 식 (2-6)과 식 (2-7)과 같다.

$$KL = -\lambda_1^{\alpha} \ln\left[1 - \exp\left\{\frac{C_2}{\lambda}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{a1}}\right)\right\}\right] \text{-----}(2-6)$$

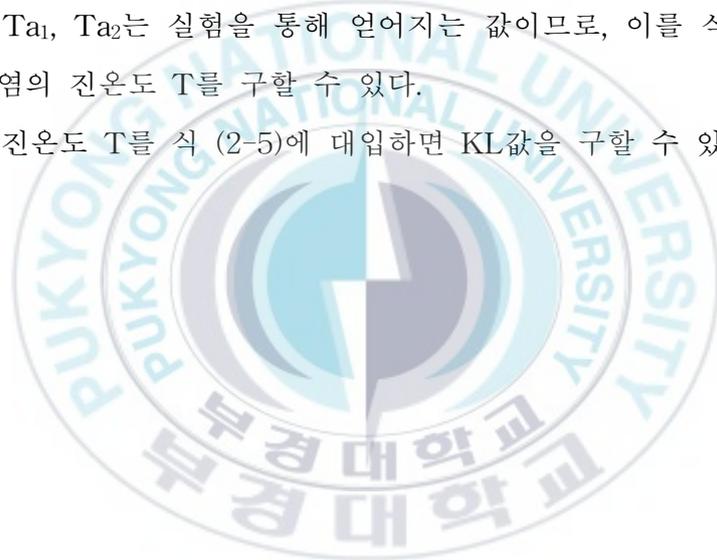
$$KL = -\lambda_2^\alpha \ln \left[ 1 - \exp \left\{ \frac{C_2}{\lambda} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{a2}} \right) \right\} \right] \text{-----(2-7)}$$

식 (2-6)과 식 (2-7)에서 KL을 소거하면

$$\lambda_1^\alpha \ln \left[ 1 - \exp \left\{ \frac{C_2}{\lambda_1} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{a1}} \right) \right\} \right] = \lambda_2^\alpha \ln \left[ 1 - \exp \left\{ \frac{C_2}{\lambda_2} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{a2}} \right) \right\} \right] \text{-----(2-8)}$$

여기서  $T_{a1}$ ,  $T_{a2}$ 는 실험을 통해 얻어지는 값이므로, 이를 식(2-8)에 대입하면 화염의 진온도 T를 구할 수 있다.

구해진 진온도 T를 식 (2-5)에 대입하면 KL값을 구할 수 있다.



### 3.3 실험 장치 및 방법

#### 3.3.1 광 검출 장치

Fig. 3-1은 광 검출 장치도이다. 연소실 속을 관찰하는 광프로부는 실린더 내 유동장을 교란하지 않고, 외부에 설치되어 있는 밸브기구 및 분사노즐 등으로부터 공간상 자유로우려면 작을수록 유리하나, 연소실 속의 연소 화염의 수광율을 높이려면 클수록 좋다.

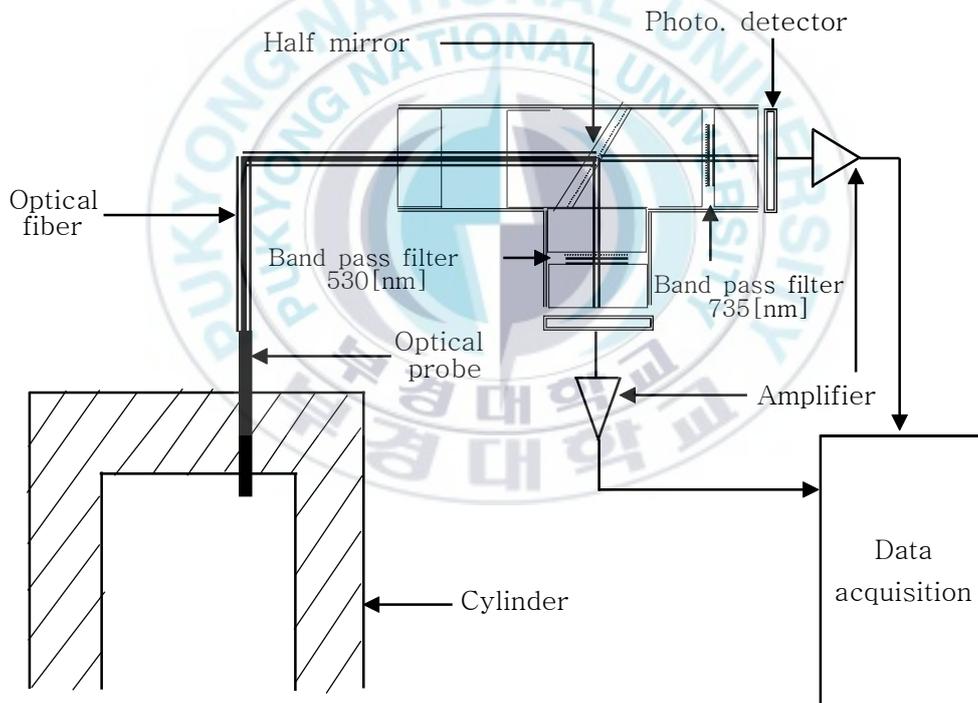


Fig. 3-1 Schematic of optical detection system

Fig. 3-2에는 이들을 고려하여 설계 제작한 광프로부를 나타내었다. 프로부의 몸체는 M5나사로 실린더 헤드면에 고정되며, 프로부 몸체 속에  $\phi 3$ , L57mm의 석영봉 관찰창을 심었다. 석영봉의 양면을 평면으로 가공하고 광 전달을 양호하게 하기 위하여 폴리싱 마무리를 하였다.

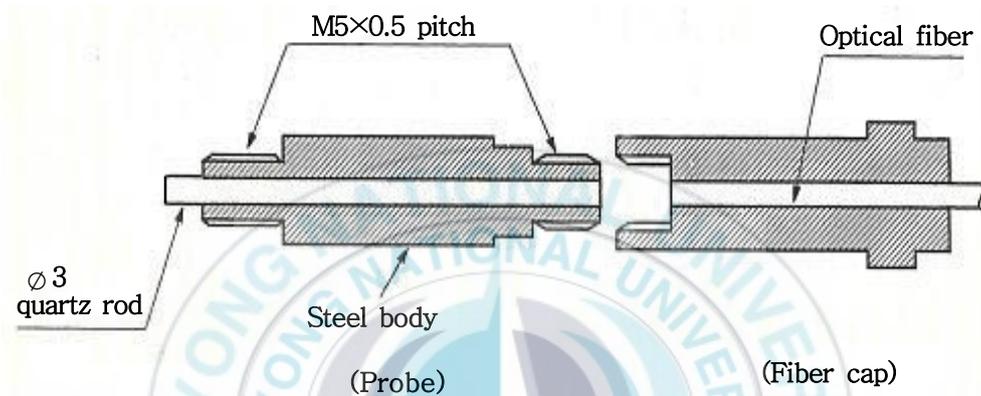


Fig. 3-2 Detail drawing of probe for in-cylinder sensing

Fig. 3-3에는 연소실 내 석영봉의 삽입 형상을 나타내었다. (a)의 경우는 석영봉을 실린더 헤드 안쪽 끝단보다 2mm 길게 노출하였고, (b)는 2mm 함몰, (c)는 끝단과 같게 하였다. 예비실험을 한 다음 석영봉에 부착된 그을음의 상태를 비교하였더니 그림의 (a)의 경우가 가장 양호하였다. 본 실험에서는 석영봉이 연소실 내에 2mm 돌출되게 설치하여 관찰면이 화염면에 노출되도록 함으로써 그을음 부착을 최소화 할 수 있었다. 이는 광<sup>39)</sup>의 실험에서와 같았음을 확인하였다.

Photo. 3-1에 예비실험 후의 석영봉의 상태를 아래쪽에서 레이저 빔을 비추어 그을음 부착의 정도를 사진으로 촬영 비교하여 나타내었다.

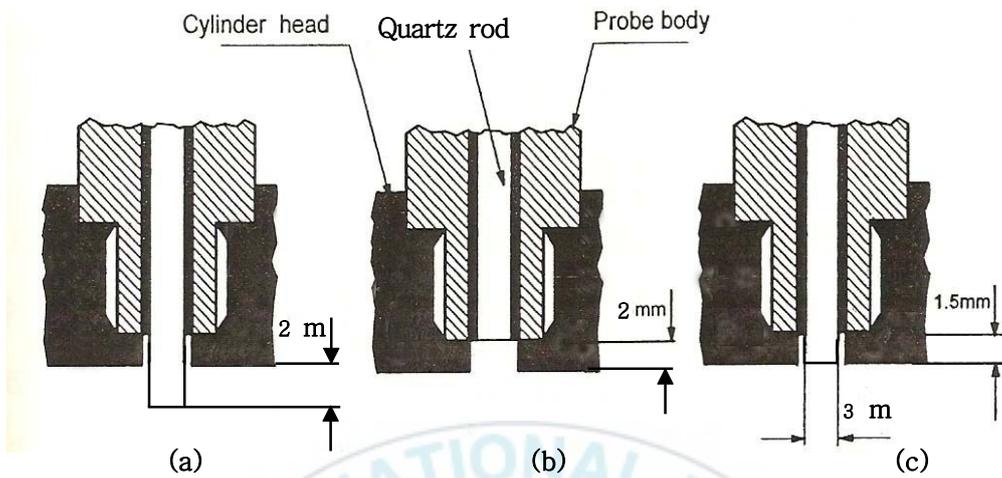


Fig. 3-3 Detail drawing of optical probe

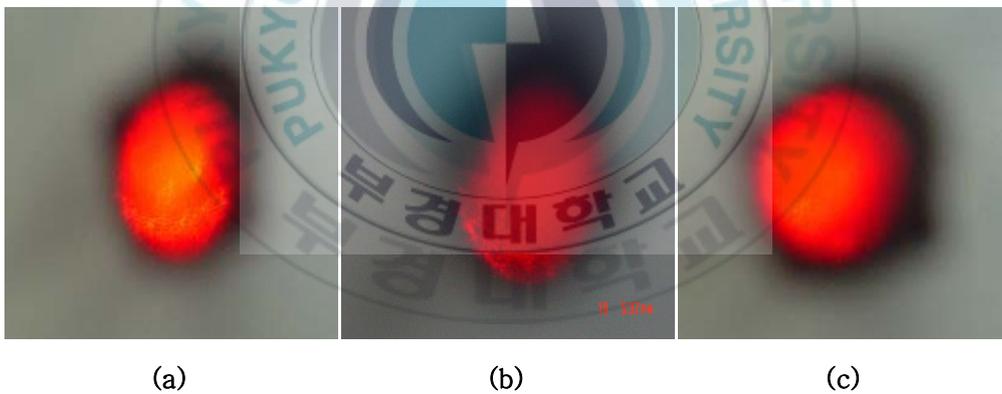


Photo. 3-1 Comparison of optical probe after engine test

광섬유는 관찰석영 창에서 받아들인 화염광을 광검출기로 전송하는 것으로,  $\varnothing 3\text{mm}$ 의 플라스틱계의 광 파이버 케이블(Optical Fiber Cable = OFC)을 사용하였으며, 양 끝단은 폴리싱 마무리를 하였다.

광검출 센서는 TAOS사의 OP Amp가 내장된 포토다이오드(TSL250R)를 사용하였다. Fig. 3-4에 다이오드의 기능 블록 다이어그램(Functional block Diagram), Fig. 3-5에 패키지 구성과 터미널 기능(Package Configuration & terminal Functions)을 나타내었다.

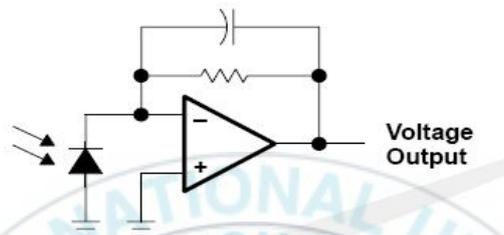


Fig. 3-4 Functional block Diagram

PACKAGE (FRONT VIEW)	Terminal name & no		Description
		GND	1
OUT		2	Output voltage
V <sub>DD</sub>		3	Supply voltage

Fig. 3-5 Package Configuration & terminal Functions

이 센서의 반응 파장영역과 반응율을 Fig. 3-6에 나타내었다. 본 실험에 사용될 파장대의 반응율이 약 0.7과 0.9로 우수하므로 적합하다고 판단하였다.

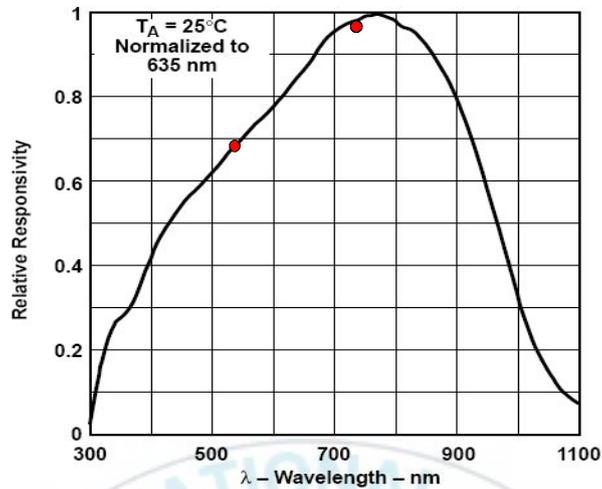
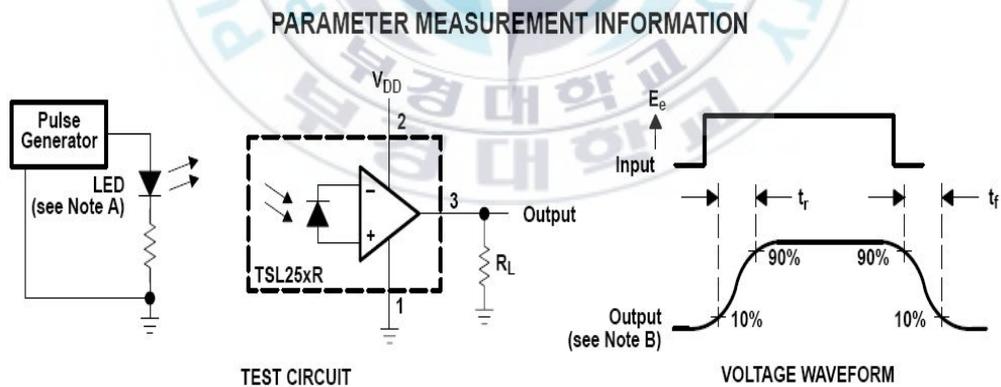


Fig. 3-6 Photodiode spectral Responsivity

Fig. 3-7에는 이 센서의 반응시간(Switching Times)을 나타내었다. Rise & fall time이  $250\mu\text{s}$  이내로 본 실험에 적합하였다.



- NOTES: A. The input irradiance is supplied by a pulsed AlInGaP light-emitting diode with the following characteristics:  $\lambda_p = 635 \text{ nm}$ ,  $t_r < 1 \mu\text{s}$ ,  $t_f < 1 \mu\text{s}$ .
- B. The output waveform is monitored on an oscilloscope with the following characteristics:  $t_r < 100 \text{ ns}$ ,  $Z_i \geq 1 \text{ M}\Omega$ ,  $C_i \leq 20 \text{ pF}$ .

Fig. 3-7 Switching Times

Fig. 3-8에는 포토다이오드에서 검출된 광 신호를 증폭하는 OP Amp를 이용한 비반전 증폭 회로를 나타내었다.

오실로스코프와 LabVIEW로 코딩한 오실로스코프 프로그램으로 검증곡선을 구하였을 때 두 경우 모두 노이즈의 최대 진폭이 2 mV로 나타났으므로 이 회로는 신뢰성이 있음을 확인하였다.

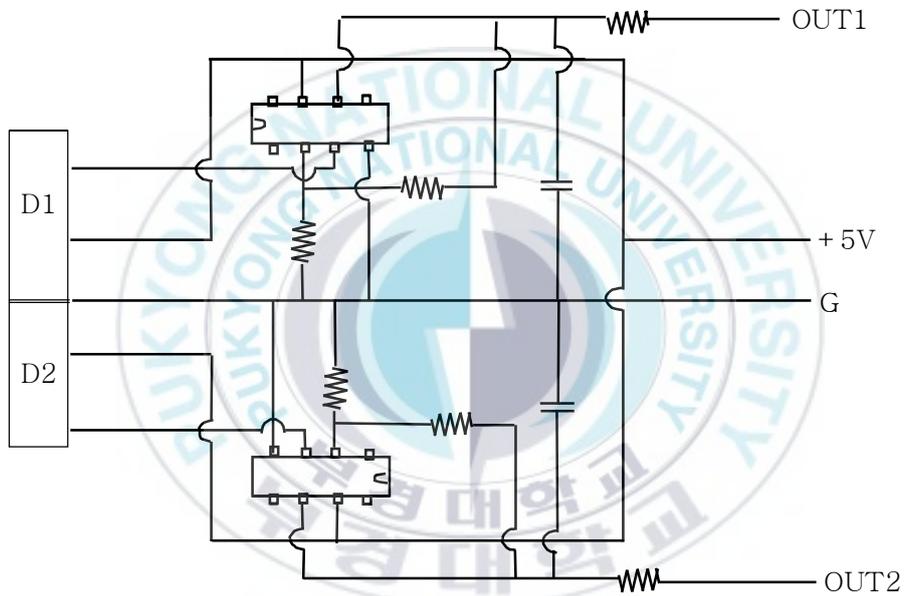


Fig. 3-8 Amplifier circuit diagram

### 3.3.2 광 검출기의 설치

실험에 사용된 기관의 연소실 내부 구조형상이 복잡한 성형의 깊은 접시형 직분식 디젤기관이며, 실린더 헤드 및 피스톤 형상은 Fig. 3-9와 같다. 피스톤 크라운의 단면 형상은 분사 방향으로 홈이 파인 성형(star shape)이다. 그리고 노즐의 위치는 피스톤 중심으로부터 4mm 오프셋(off-set)되어 있으며, 깊이 방향으로 분사되는 분사각은 실린더 헤드면으로부터 하방 15°이다. 연소 화염을 검출하기 위한 광프로부의 설치 위치는 bowl 속의 화염을 수광할 수 있는 위치이며, 노즐 중심으로부터 22.5mm의 거리에, 그리고 분무 중심으로부터 11.2mm 떨어진 곳이다.



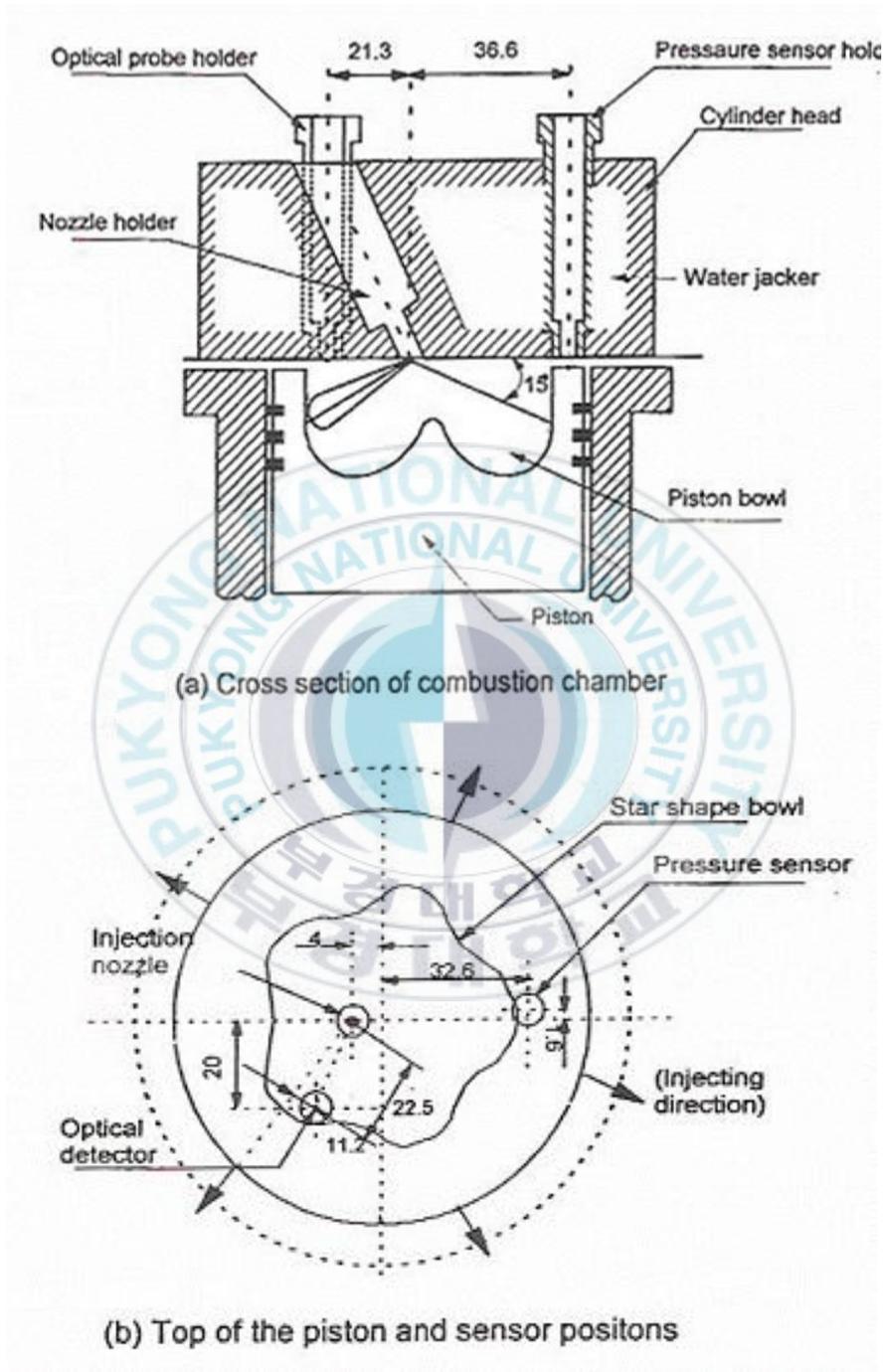
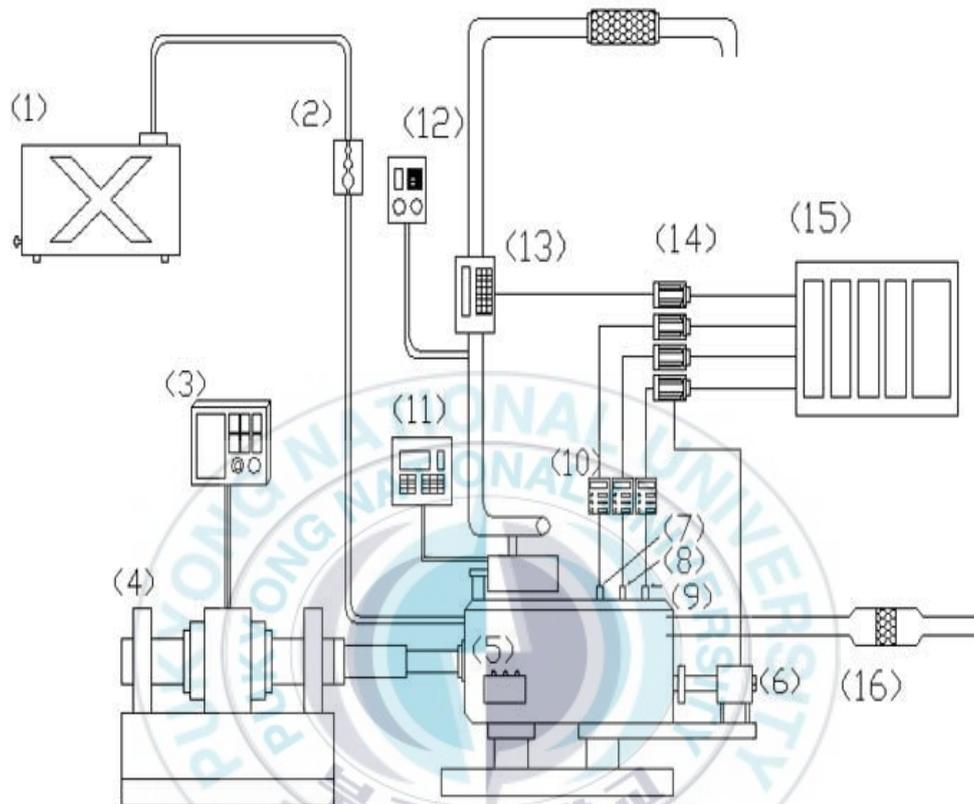


Fig. 3-9 (a) Combustion chamber shape and (b) sensor positions for test engine

### 3.3.3 실험장치

Fig. 3-10에 실험장치도를 나타내었다. 실험장치는 실험기관의 회전수와 부하를 제어하는 와전류식 전기동력계, 흡입공기량을 측정하는 층류유량계, 배기분석기, 연료소비량계 및 PM농도측정장치 등으로 구성되어 있다. 트리거 신호와 데이터 취득신호는 크랭크축 풀리에 장착되어 있는 720 ppr 엔코더를 사용하였다. 즉, 크랭크 각 0.5°마다 데이터를 취득하였다. 석영 관찰창(∅3, L57)에 광화이버를 연결한 광푸루버를 엔진 헤드에 장착하고 하프미러(half mirror)를 거쳐 2과장대(531, 735nm)의 간섭필터를 통한 빛을 포토다이오드(TSL250R)와 증폭회로를 이용하여 측정된 신호들은 터미널 블럭을 통해 PXI에 내장된 DAQ 보드와 컨트롤러에 의해 처리되었고, LabVIEW로 코딩한 프로그램에 의해 화염 온도와 KL값을 수집하였다.



- |                                   |                             |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| (1) Fuel tank                     | (2) Fuel flow meter         |
| (3) Dynamometer controller        | (4) Dynamometer             |
| (5) Test engine                   | (6) Rotary encoder          |
| (7) Cylinder pressure sensor      | (8) Optical probe           |
| (9) Needle lift(gap sensor)       | (10) Amplifier              |
| (11) Exhaust gas analyzer         | (12) Bosh smoke meter       |
| (13) PM concentration measurement | (14) Terminal block         |
| (15) PC                           | (16) Laminar air flow meter |

**Fig. 3-10 Schematic diagram of experimental apparatus**

실험에 사용된 기관은 3기통 수냉식 4행정 직접 분사식 디젤기관(국제 트랙터 3D 100-AT)으로 기관 사양은 Table 3-1에 나타내었다.

**Table 3-1 Specifications of test engine**

Engine model	F455DN-K
Bore ×stroke(mm)	100×110
Displacement( $\text{cm}^3$ )	2591
Number of the cylinder	3
Type	4 stroke DI diesel engine
Injection pressure(MPa)	18.62
Compressin ratio	17.6
Combustion chamber	Star shape deep bowl type

### 3.3.4 실험 방법

실험에 사용된 연료는 여과된 폐식용유30%와 경유70%를 혼합한 혼합유(BO)와 폐식용유를 에스테르화한 TVO(Transesterified vegetables oil)와 시중의 경유를 사용하여 회전속도는 1500, 2000, 2500rpm, 부하는 0, 20, 40, 60(Nm)로 하였다. 실험은 위의 각 운전 조건에서 Fig. 3-11과 같이 LabVIEW로 코딩한 프로그램을 이용해서 데이터를 취득, 온라인으로 100사이클씩 평균한 계측전압을 프론트 패널에 나타내면 Fig. 3-12와 같다.

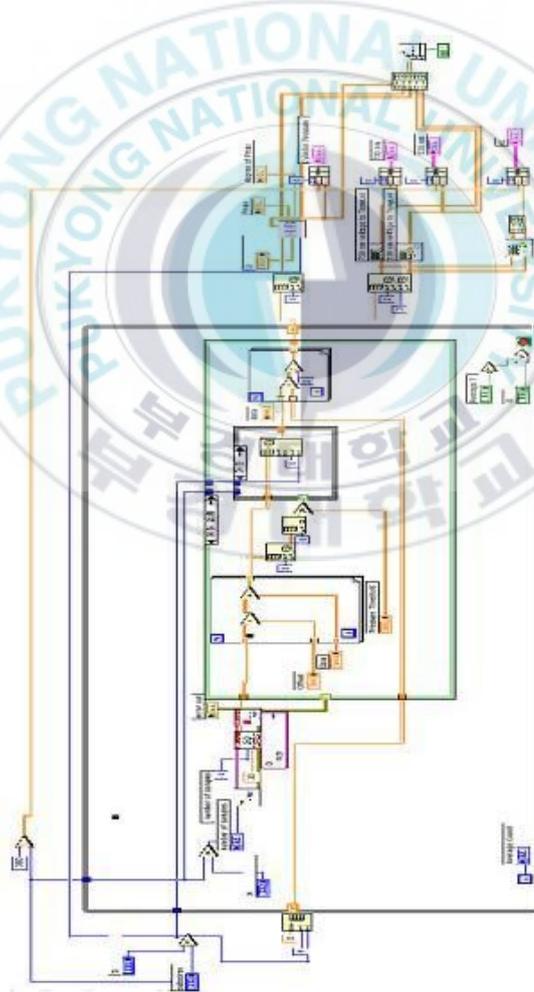


Fig. 3-11 LabVIEW block diagram for simultaneous 8channel data acquisition

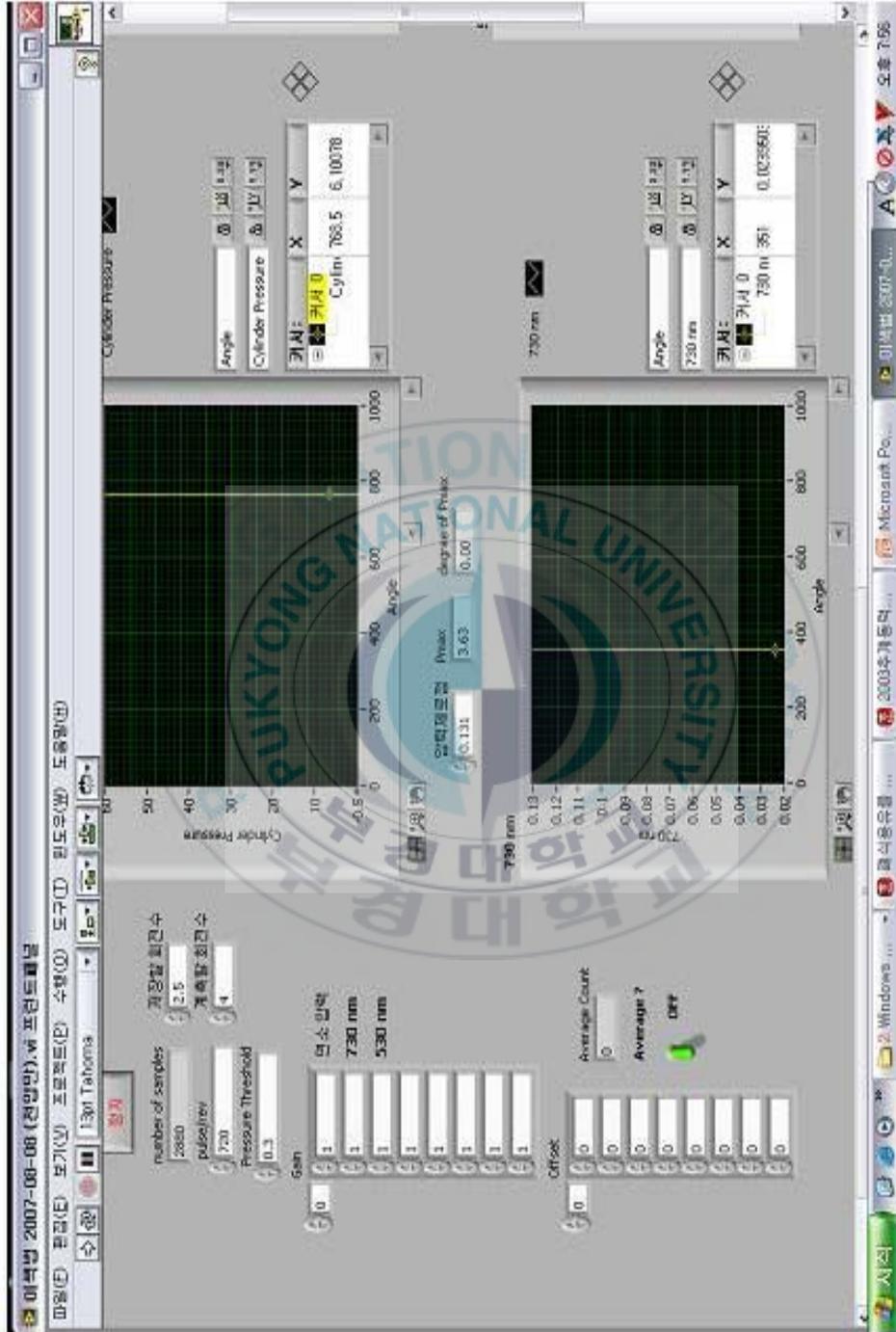


Fig. 3-12 LabVIEW front panel for simultaneous 8 channel data acquisition

### 3.4 결과 및 고찰

#### 3.4.1 검정곡선 및 진온도와 KL 계산

장치의 검정곡선은 다음과 같이 구하였다. 정격 250[V], 300[W]의 백열등을 변압기로 전압을 조정하여 밝기 즉, 필라멘트의 온도를 변화시키고, 이 온도를 광온계를 이용하여 측정하였다. 이 때 온도에 따른 각 파장의 전압을 다음 Table 3-2와 같이 구하였다. 이 전압들을 오리진프로그램으로 그래프를 그리고 이를 피팅하여 2차함수식으로 검정곡선식을 Fig. 3-13, 14와 같이 구하였다.

Table 3-2 Voltage of wavelength by temperature

1/T	735nm(mV)	530nm(mV)
0.47326	2460	432
0.48008	2080	352
0.49188	1780	288
0.50942	1580	256
0.52002	1360	216
0.5339	1120	176
0.54855	980	152
0.56402	860	132
0.58377	696	108
0.60132	523	90
0.61996	418	77.6
0.63573	370	71.6
0.6566	309	64.4
0.67889	176	51.2
0.70274	124	46.8
0.72833	98	45.2
0.78555	88	44.8
0.89047	73	44

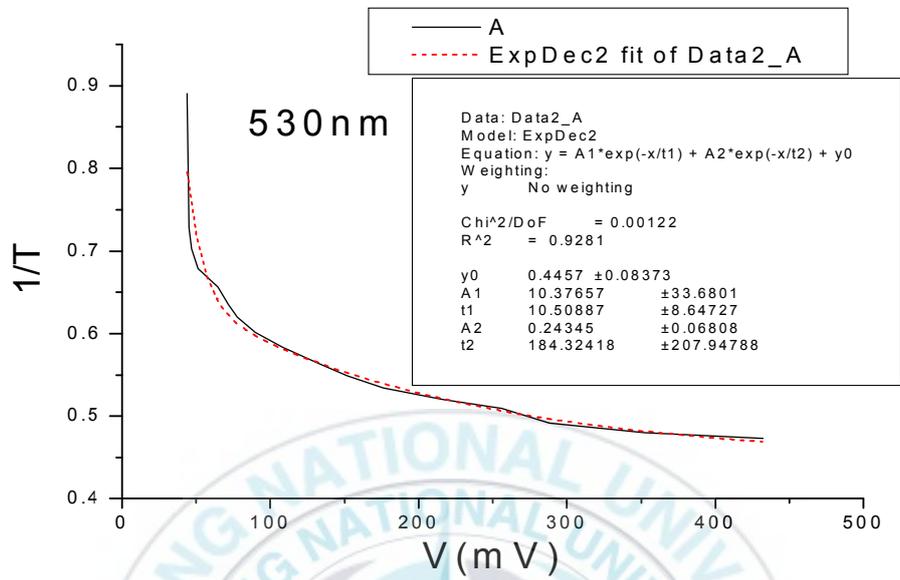


Fig. 3-13 Calibration curve of 530nm

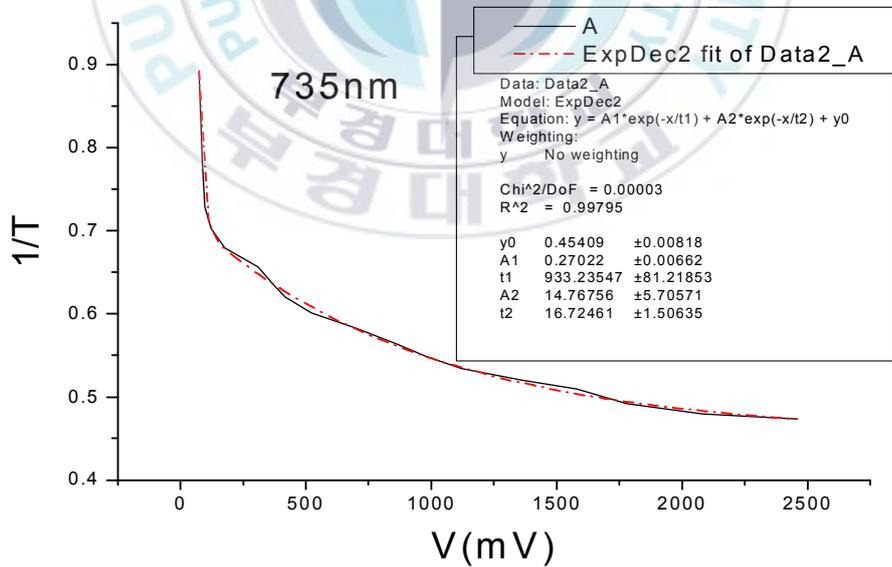


Fig. 3-14 Calibration curve of 735nm

이 곡선식을 이용하여 실험에서 얻어진 100사이클 평균 전압으로 파장에 따른 화염의 휘도온도  $T_{a1}$ 과  $T_{a2}$ 를 LabVIEW로 코딩한 프로그램을 이용해서 화염의 진온도를 구하였다. Fig. 3-15에 화염 진온도와 KL 구하기용 프론트 패널을 나타내었다. 그림에서 오차범위지정은 식(3-8)에서 양변의 일치값의 오차범위를 나타내며 패널에서 그래프로 확인할 수 있도록 하였다. Fig. 3-16에는 그 블록다이어그램을 나타내었다.

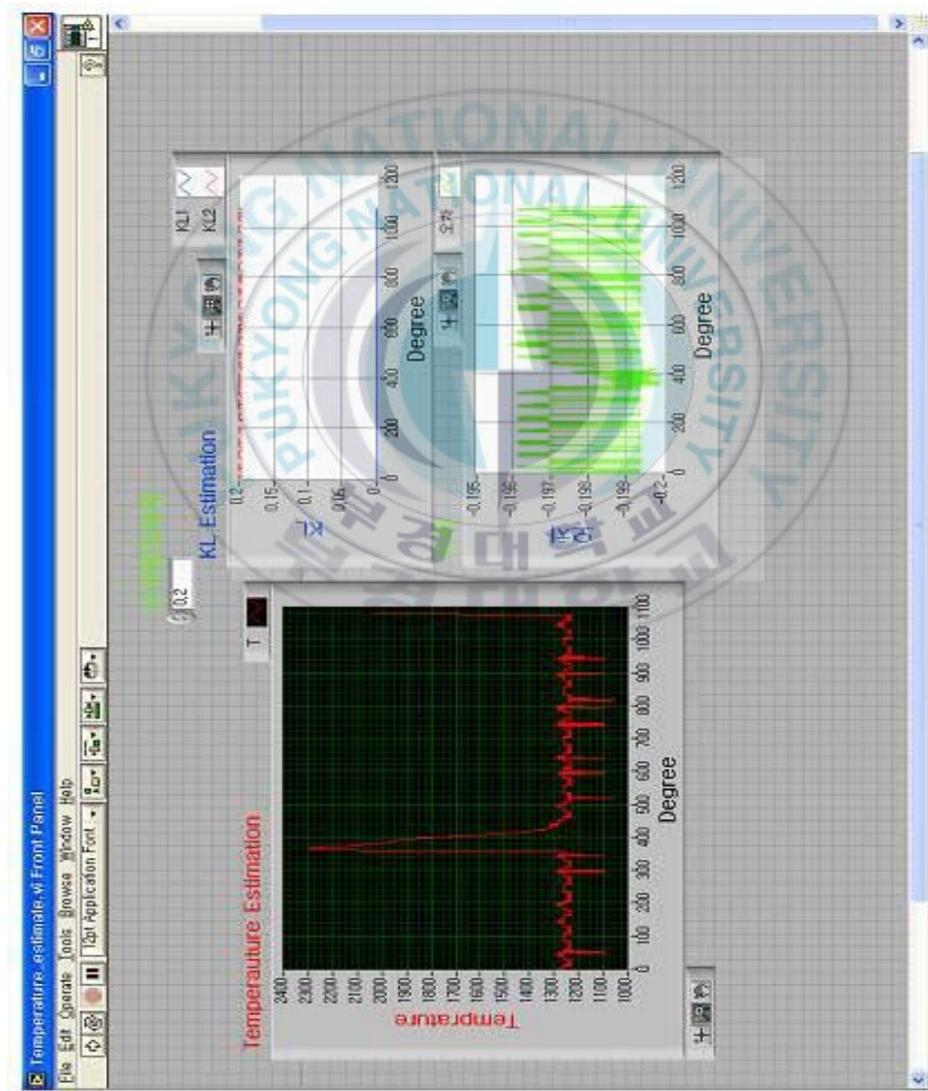


Fig. 3-15 LabVIEW front panel for temperature data acquisition and KL

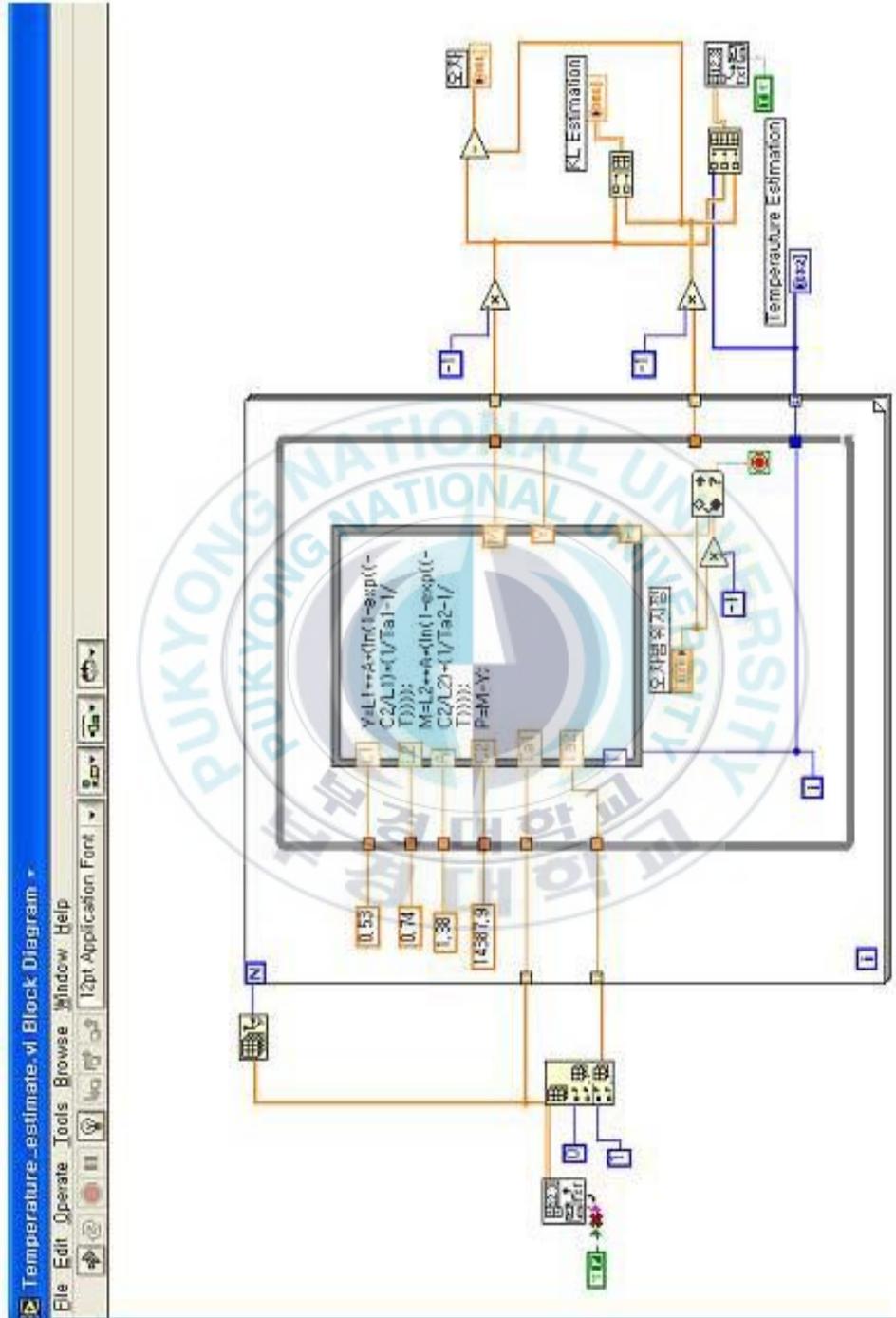


Fig. 3-16 LabVIEW block diagram for temperature data acquisition and KL

### 3.4.2 화염온도 및 KL치

각 실험조건에서 측정된 100회 사이클의 평균치를 크랭크 각도에 따라 화염온도와 KL치를 나타내었다.

Fig. 3-17, 18, 19에 무부하인 경우의 연료별, 회전수별 화염온도와 KL치를 나타내었다.

모든 연료에서 회전수가 증가할수록 화염온도는 낮아지는 경향을 보이고 있다. 이는 회전수 증가에 따라 크랭크 각도에 따른 착화시기의 늦음으로 인한 팽창 행정의 연소에 기인하는 것으로 사료된다. 또한, 회전수가 빠를수록 연료에 따른 온도변화는 거의 없었고, KL치는 거의 나타나지 않았다. 이는 보쉬식 펌프의 고속에 의한 고압분사로 소량 분사에 의한 양호한 무화와 예혼합 연소에 기인하는 것으로 사료된다.

최고 연소 온도는 1500, 2000 rpm의 경우 DF, BO, TVO 순으로 나타났으며, KL치는 DF, BO, TVO 순으로 높게 나타났다. 이는 연료에 포함된 함산소와 탄소함량의 영향에 따른 것으로 생각되어진다.

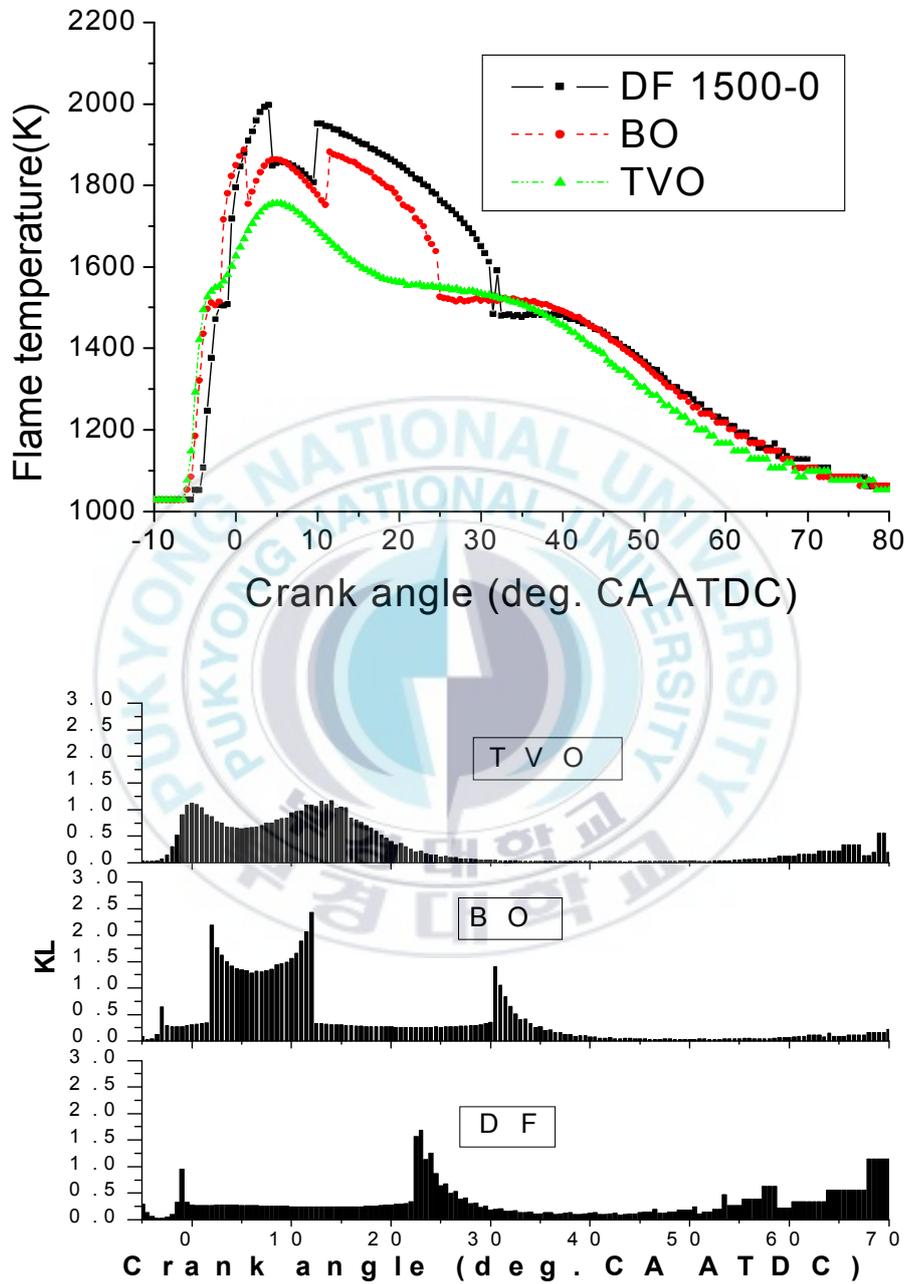


Fig. 3-17 Flame temperature and KL value for torque 0Nm at 1500 rpm

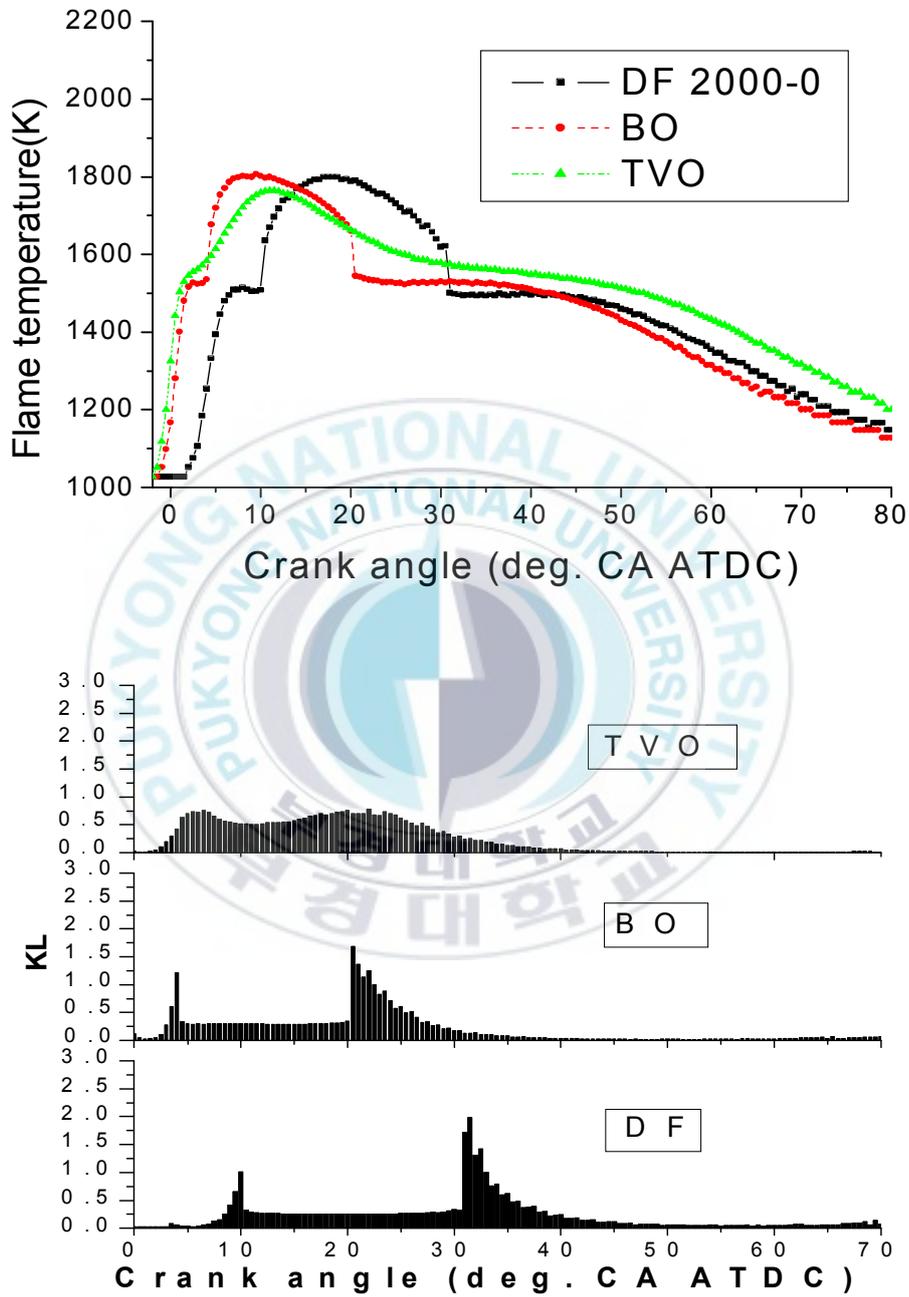


Fig. 3-18 Flame temperature and KL value for torque 0Nm at 2000 rpm

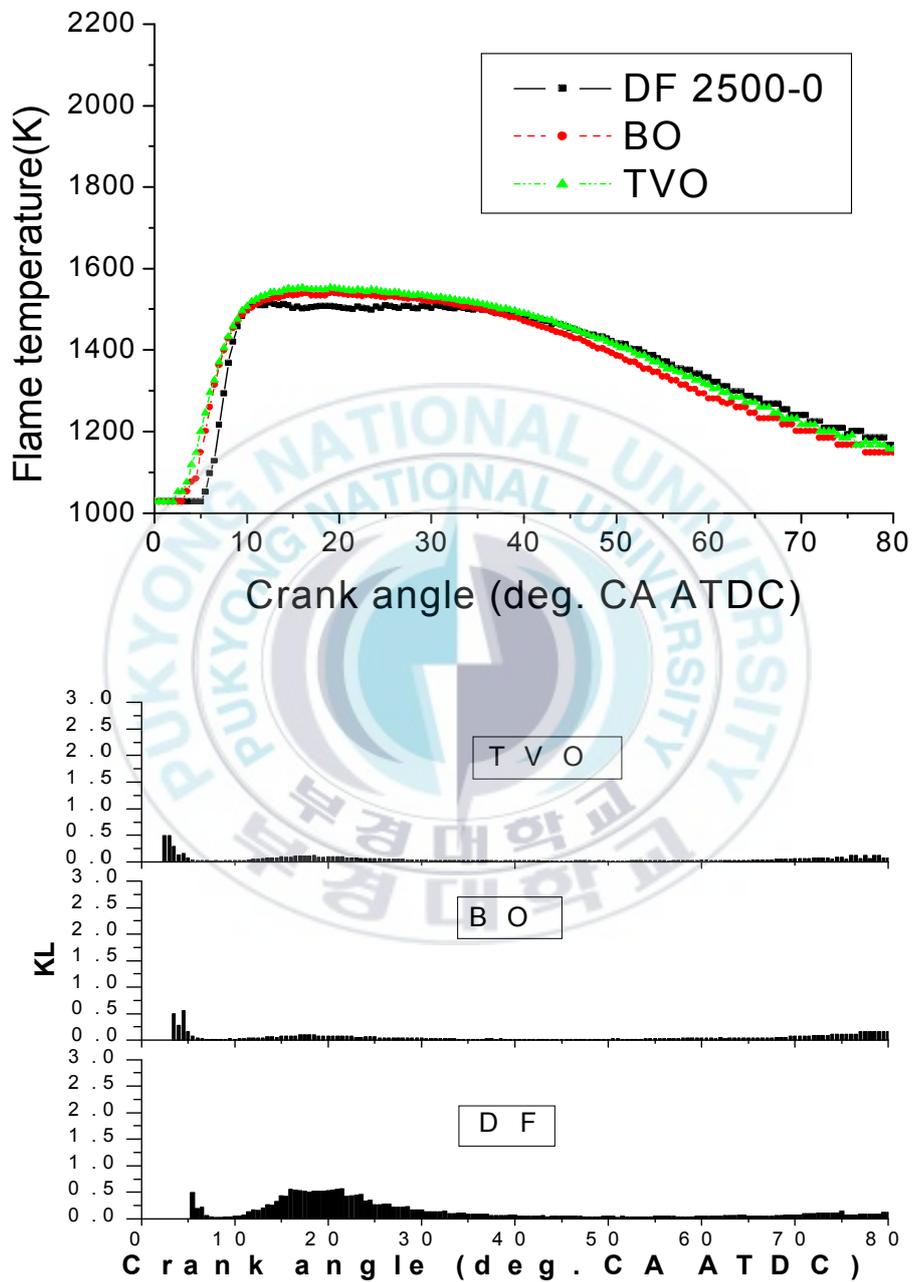


Fig. 3-19 Flame temperature and KL value for torque 0Nm at 2500 rpm

Fig. 3-20, 21, 22에 부하 60Nm인 경우의 연료별, 회전수별 화염온도와 KL치를 나타내었다. 무부하의 경우에 비해 화염온도는 DF의 경우 2600°K 가까이 상승하 것도 있으나 연료별, 회전수별 변화는 크지 않았으나 TVO와 BO는 약간 낮은 경향을 나타내었다. 이는 본기관의 정격 운전 에 가까운 운전조건으로 운전될 때는 분위기 조건 즉, 온도와 압력이 디젤연소에 충분하기 때문이라 생각된다. 화염온도가 크랭크 각도에 따라 일정한 변화를 보이지 않는 것은 팽프로부의 설치 위치가 Fig 3-10에서 보는 것처럼 실린더 중심에서 벽면쪽에 가까우므로 화염의 스왈현상과 퀘칭에 기인한 것으로 보여진다.

그러나, KL치의 경우 다른 연구에 따르면 확산 연소시에 다량 생성된 그을음이 연소 후기에 재연소하여 산화하므로 KL치가 점차 감소하는 경향을 보인다고 한다. 그러나, 본 연구에서는 캐비티(Cavity) 내의 화염 유동이 활발하여 KL치의 변화가 심하며 연료별, 회전수별 특이점이 보이지 않고 있다. 이는 다음 제 4 장의 Fig. 4-30에서 보는 것처럼 실험조건에서 그을음의 생성량이 많지 않은 것에 기인하는 것으로 생각되어진다.

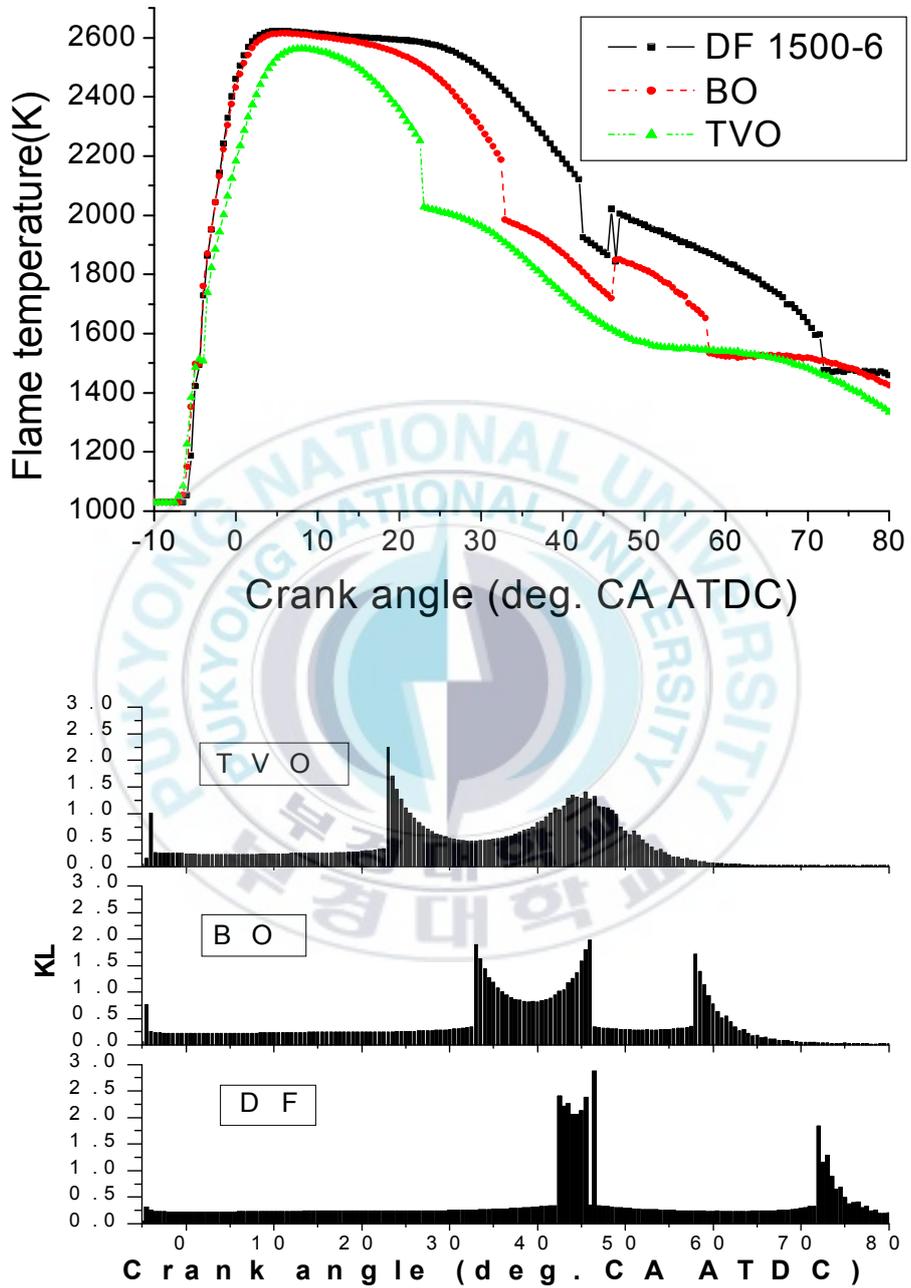


Fig. 3-20 Flame temperature and KL value for torque 60Nm at 1500 rpm

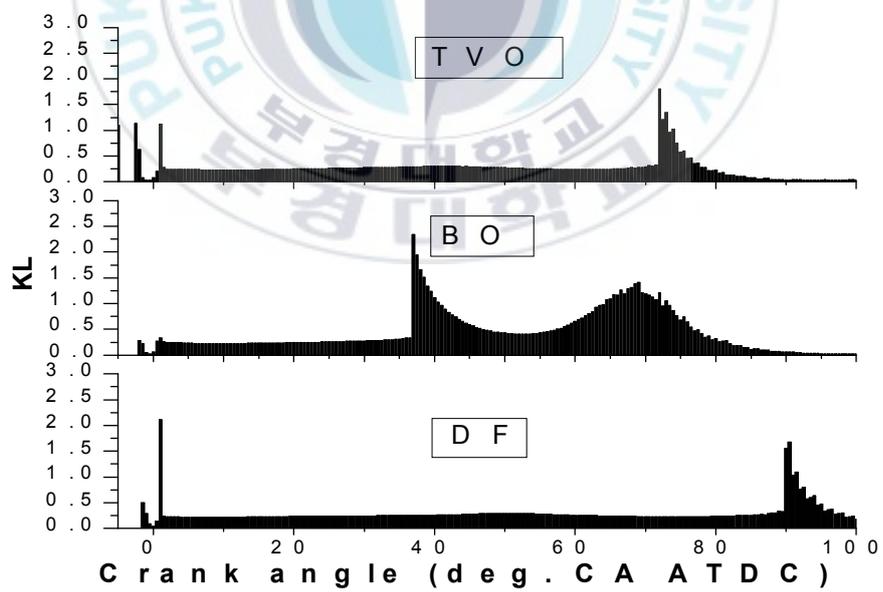
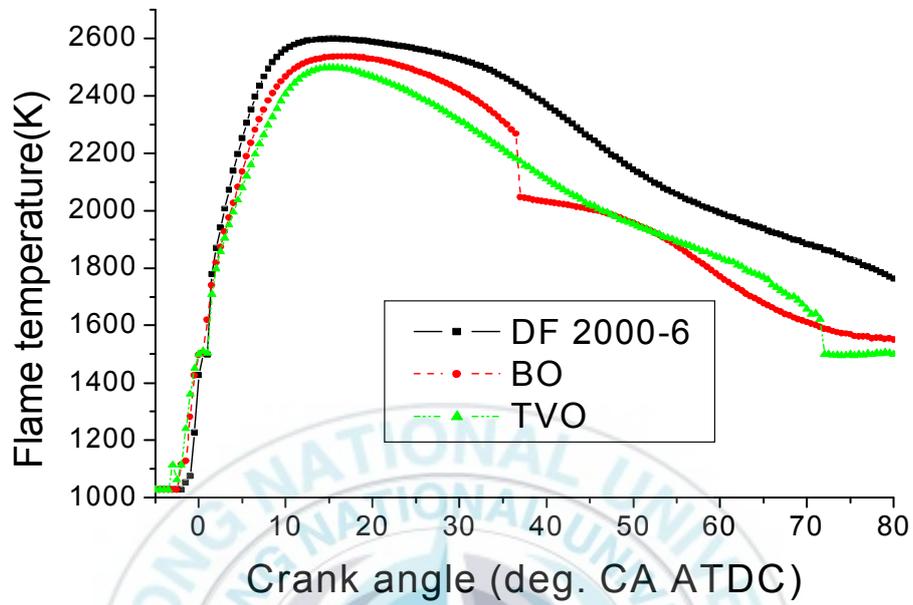


Fig. 3-21 Flame temperature and KL value for torque 60Nm at 2000 rpm

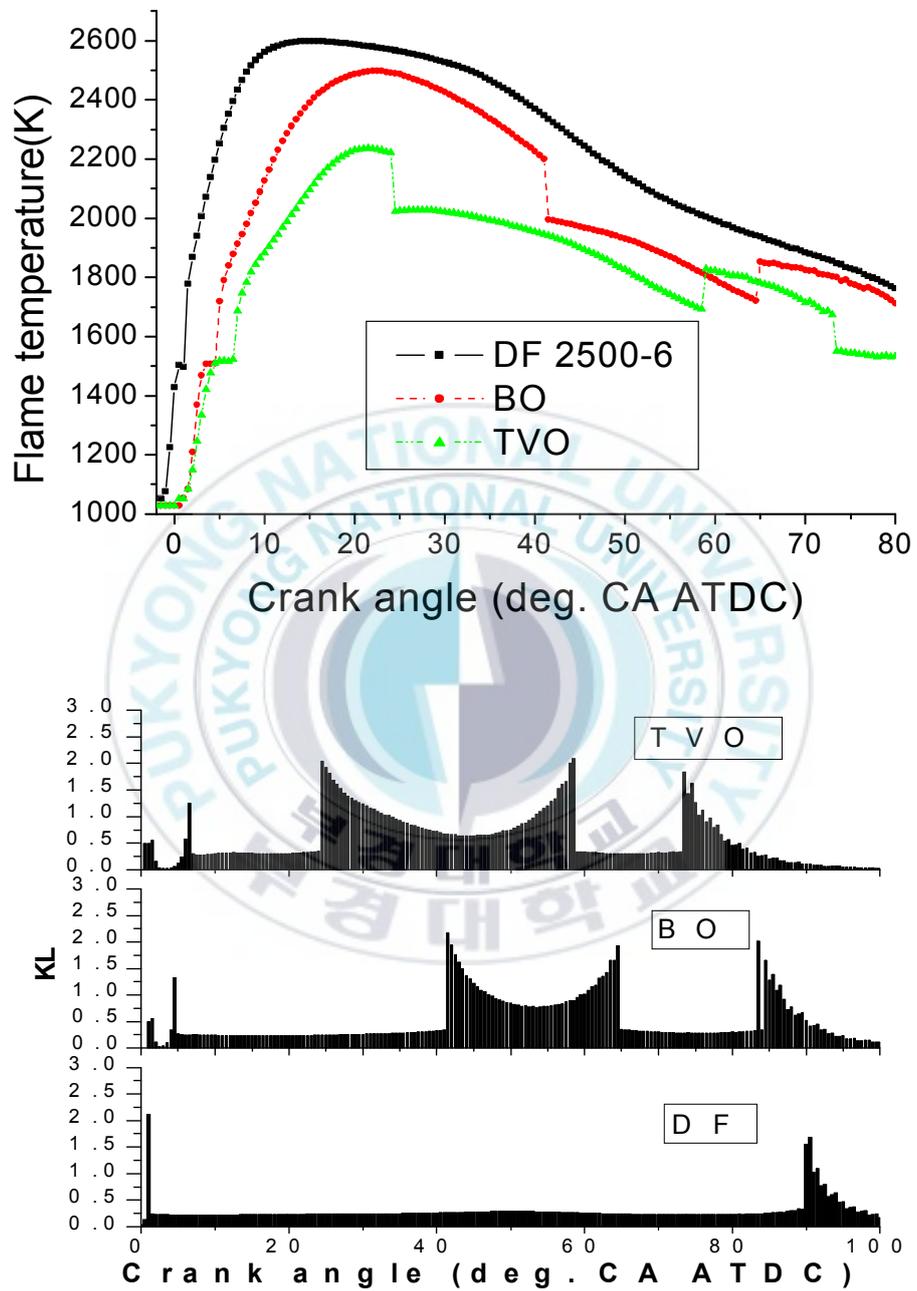


Fig. 3-22 Flame temperature and KL value for torque 60Nm at 2500 rpm

### 3.5 요약

폐식용유를 활용한 BDF를 소형 고속 직분식 디젤기관에 사용했을 때, 작한 실험장치를 적용하여 이색법으로 화염온도와 KL특성을 살펴보았다. 석영봉의 크기가 작으므로 실린더 내의 화염 전체를 관찰할 수 없었고, 특정 부위의 정성적 경향만을 확인할 수 있었다.

- 1) 종래에 사용한 고가의 PMT(광증배관) 대신 염가의 포토다이오드를 사용하여 이색법을 적용할 수 있었다.
- 2) 모든 연료에서 회전수가 증가할수록 화염온도는 낮아지는 경향을 보이고 있다.
- 3) 최고 연소 온도는 1500, 2000 rpm의 경우 DF, BO, TVO 순으로 나타났다으며, KL치는 모든 연료에서 DF, BO, TVO 순으로 높게 나타났다. 이는 연료에 포함된 함산소와 탄소함량의 영향에 따른 것으로 생각되어진다.
- 4) 캐비티 내의 화염 유동이 활발하여 KL치의 변화가 심하며 연료별, 회전수별 특이점이 보이지 않고 있다.

## 제 4 장 바이오디젤유의 연소특성

### 4.1 서언

본 장에서는 BDF를 실험기관에 적용했을 때 연소특성을 분석하기 위하여 연소해석장치를 PXI와 LabVIEW를 사용하여 온라인(On-line)분석하는 시스템을 구축하여 연소압력과 열발생율을 비교 분석하고 동력계와 배기 거스분석에 의해 BDF에 의한 기관 성능을 조사하도록 한다.

내연기관의 열발생율이란 크랭크 각도당 연료의 연소에 의해 발생하는 열로 이에 순열발생율(Net Heat release)과 총열발생율 즉, 열손실을 고려하지 않는 열발생율이 있으나 본장의 열발생율은 열손실을 고려한 실린더 내의 압력 거동에서 분석되는 것으로 이의 거동 해석은 디젤기관의 연소 해석 수단으로 유효하게 이용된다.

호흡기 질환을 일으키고 발암물질이 함유된 것으로 알려진 PM을 흡광법을 적용하는 PM 농도 측정장치를 자체 제작하여 본 실험기관의 특성상 배출량이 매우 적어 보쉬 스모크미터로 측정 불가능한 BDF의 PM 배출량을 실험조건에 따른 실시간 배출 특성 조사한다.

## 4.2 계측장비의 구성

각종 센서에서 계측되는 아날로그 신호를 컴퓨터에 저장하고 편집하기 위해서는 디지털 신호로 바꾸어 주어야 한다. 이러한 기능을 가진 장비를 A/D 컨버트(analog to digital converter)라고 한다. 본 연구에서는 A/D 컨버트 기능 외에 다른 몇 가지 기능들을 한 보드에 집합한 DAQ 보드(data acquisition board)를 사용하였다. 또 DAQ 보드를 동기화시켜 4채널의 신호를 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 사용한 프로그램으로 온라인 계측하고 분석하였다.

PM 농도 측정장치는 직접 제작한 것을 사용하였다. 이 장치의 원리는 Laser 광이 배기가스를 통과할 때 PM에 흡수되므로 강도가 감쇄된다. 이때 초기 값과 감쇄된 값의 비, 즉 투과율을 이용하여 PM을 계측한다.

## 4.2.1 PXI 시스템

### 1) PXI 새시(chassis)

일반적으로 계측을 할 때는 신호원이 아날로그이므로 이를 컴퓨터가 인식할 수 있도록 하기 위해서 A/D 컨버터를 이용한다. 이 때 A/D 컨버터는 컴퓨터의 PCI(Peripheral Component Interconnect) 버스(Bus)에 연결된다. 그러나 PCI 버스는 여러 개의 채널로 데이터를 취득하는 것이 매우 어렵다는 단점이 있다.

그러므로 여러 개의 데이터를 동시에 취득하기 위해서 PXI(PXI eXtensions for Instrumentation)를 사용한다. 이 장비는 프로그래밍에 능숙하지 않아도 쉽게 동시 계측할 수 있는 장점이 있다.

PXI의 구조를 Fig. 4-1에 나타내었다. PXI는 컴퓨터와 여러 개의 DAQ 보드를 한 새시에 장착할 수 있도록 한 장비이다.

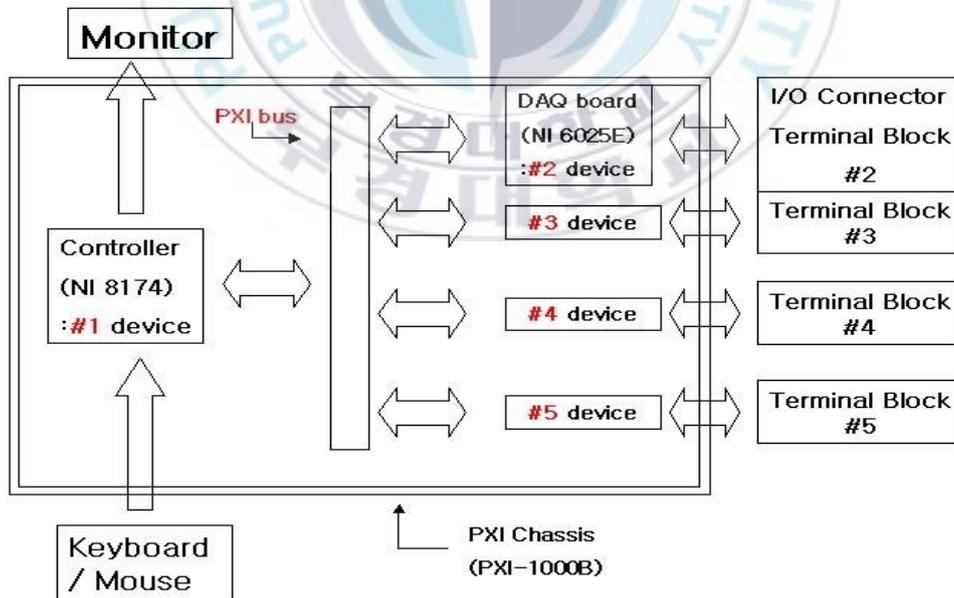


Fig. 4-1 Schematic structure of PXI system

일반적으로 PCI를 이용할 때는 컴퓨터 본체의 머드보드에 있는 PCI 버스 슬롯(slot)에 DAQ 보드를 장착하여 사용하지만 PXI는 Fig. 4-1과 같이 PXI 버스를 통하여 여러 개의 DAQ 보드와 시스템 컨트롤러가 연결되어 있고, 이 PXI 버스를 통해 각 보드는 동기화된다.

PCI를 이용하여 여러 개의 보드를 사용할 경우, 일반적으로 각 보드에서 데이터가 취득되는 시각이 다르게 나타난다. 만일 이를 동기화 또는 같은 시각에 데이터를 취득할 수 있도록 하기 위해서는 고도의 기술이 필요하므로 비전공자에게는 매우 어렵다. 그러나 PXI를 이용하면 PCI를 사용하는 것보다 훨씬 간편하므로 비전공자들도 쉽게 여러 채널을 동시에 사용할 수 있다. 현재 고가의 엔진 성능 분석 장비들은 엔진의 특정된 곳을 측정하도록 되어있지만, 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 실시간(Real Time) 모드가 있어 일반 컴퓨터의 O/S로 계측할 때 발생하는 지터(Jitter)라는 시간 오차를 감소시킬 수 있다. 지터는 정확한 루프타임을 벗어나는 시간을 의미하는 것으로, 일반 O/S 환경인 Windows 등은 여러 개의 작업을 병행하기 때문에 CPU의 속도보다 빠른 루프에서는 정확한 루프 타임을 맞출 수 없어 지터가 발생할 수 밖에 없다. 그러나 실시간 환경에서는 실행한 작업에 우선권을 주므로 다른 작업을 하더라도 정확한 루프를 맞출 수 있어 지터의 발생이 적어진다. 그러나 정확한 루프를 맞춘다고 하지만 수 ns 정도의 오차는 가지고 있다.

PXI-1000B에 탑재된 시스템 컨트롤러 NI 8174의 사양을 Table 4-1에 나타내었으며, 그 블록 선도(Block diagram)를 Fig. 4-2에 나타내었다.

Table 4-1 Specifications of NI 8174 controller

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

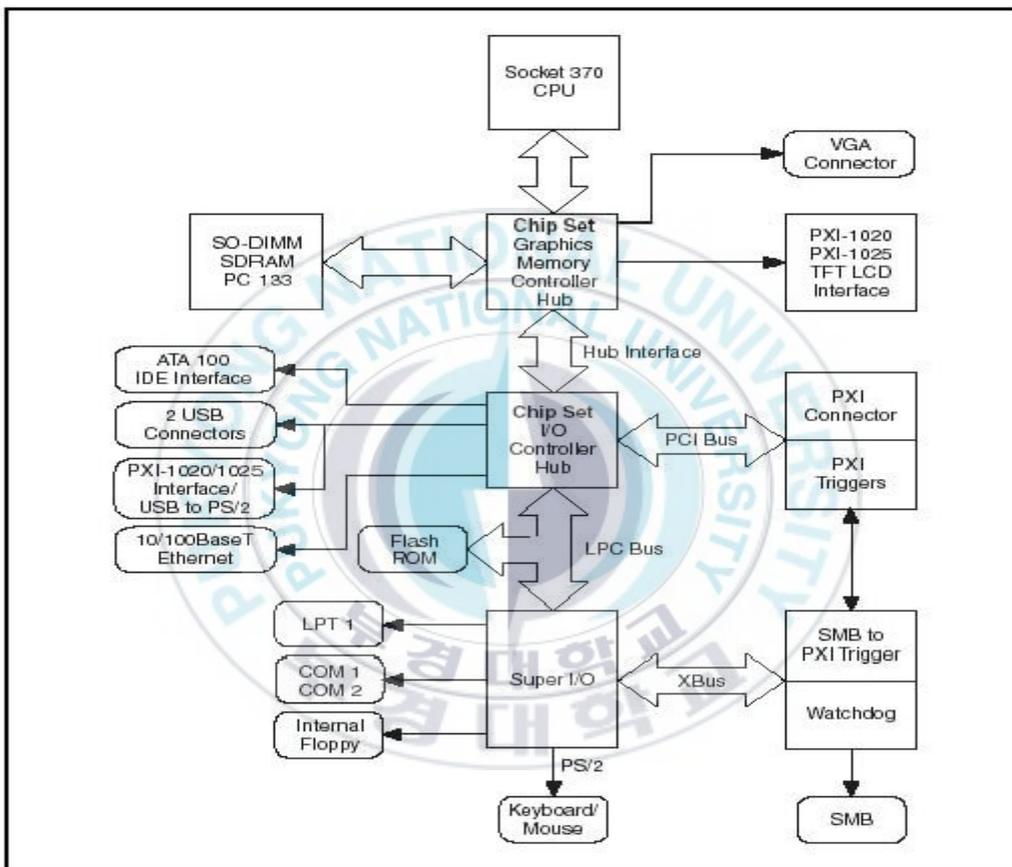


Fig. 4-2 Block diagram of NI 8174 controller

## 2) DAQ 보드

DAQ 보드는 센서로부터 오는 아날로그 신호를 컨트롤러가 처리할 수 있도록 전처리하는 단계이다. PGLA, A/D 컨버터, 버퍼(Buffer-ADC FIFO), RTSI 컨넥터 등을 내장하고 있다. 실제 디젤기관의 성능 측정에 사용한 DAQ 6025E의 순서도(Flowchart)를 Fig. 4-3에 나타내었다.

Fig. 4-3의 왼쪽이 터미널 블록에서 들어오거나 터미널 블록으로 나가는 신호들과 연결되는 곳이다. 센서에 의해 측정된 신호들은 보드 내에서 컨트롤러가 읽어내고 제어할 수 있도록 처리되어서 Fig. 4-3 오른쪽의 PXI버스를 통하여 컨트롤러로 전해진다.

DAQ 6025E의 사양을 Table 4-2에 나타내었다. 아날로그 입력 채널 수는 16개이다. 또, 해상도는 12bit이고 샘플링 속도는 200k[Sampling/s], 인가 전압은 최대  $\pm 10V$ 이고 최저  $\pm 0.05V$ 의 작은 전압도 측정할 수가 있다. 여기서 신호원을 터미널 블록에 연결하는 방법을 입력방식(input mode)은 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 디프렌셜 모드(differential mode)로써, 노이즈에 강한 장점이 있기 때문에 이를 많이 사용한다. Fig. 4-4에 디프렌셜 모드인 경우의 신호원 연결방법을 나타내었다.

Table 4-2 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	$\pm 0.05 \sim \pm 10$
Analog output	2	12	10	
Digital I/O	32			
Counter/ Timer	2	24		

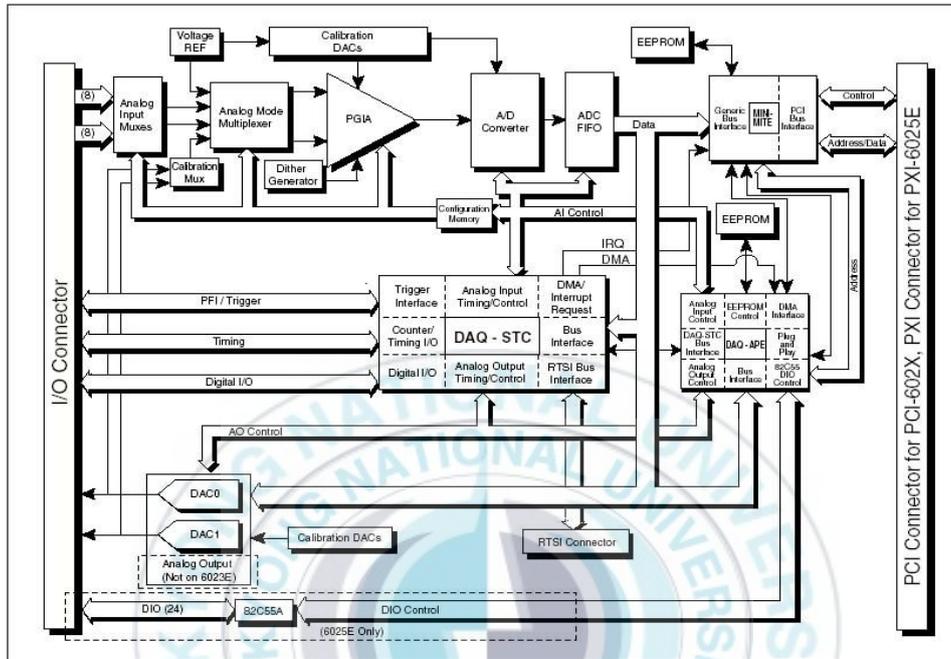


Fig. 4-3 Block diagram of NI 6025E DAQ board

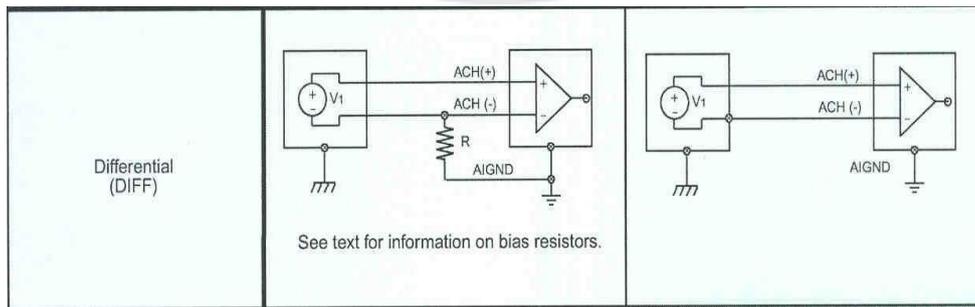


Fig. 4-4 Method of connecting signal source to DAQ board by differential mode

## 4.2.2 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 이루어져있다.<sup>40)</sup> LabVIEW는 순서도를 그리듯이 만드는 프로그램이므로 텍스트 기반의 언어들보다 쉽게 접근할 수가 있다. 또, 전체 프로그램을 한 눈에 쉽게 알아 볼 수 있으며 다른 텍스트 기반의 언어를 사용하는 것보다 완성하는데 소요되는 시간이 1/3 정도로 짧다.

LabVIEW는 프론트 패널(Front panel)과 블록 선도로 나뉜다. Fig. 4-5는 프론트 패널을 나타낸 것으로 회색바탕의 창으로 데이터를 취득하거나 제어하기 위해 필요한 설정 값을 지정하고, 취득한 데이터를 모니터링하는 창이다. Fig. 4-5는 아날로그 신호를 바로 볼 수 있도록 되어 있다. 스캔율(Scan rate)과 샘플링율(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. 4-6은 블록 다이어그램이다. 이는 Fig. 4-5의 프론트 패널을 코딩한 것으로 텍스트 기반의 언어들과는 다르다. 블록 다이어그램 창에서는 코딩한 프로그램의 디버깅이 가능하며, 프로그램이 실행되는 순서를 선으로 연결하여 나타내므로 쉽게 알아볼 수 있다. 실제로 Fig. 4-6과 같이 아이콘으로 된 함수들을 찾아서 위치를 정하고 서로 선으로 연결만 하면 되는 아주 간단한 프로그램 언어이다.



Fig. 4-5 Example of front panel

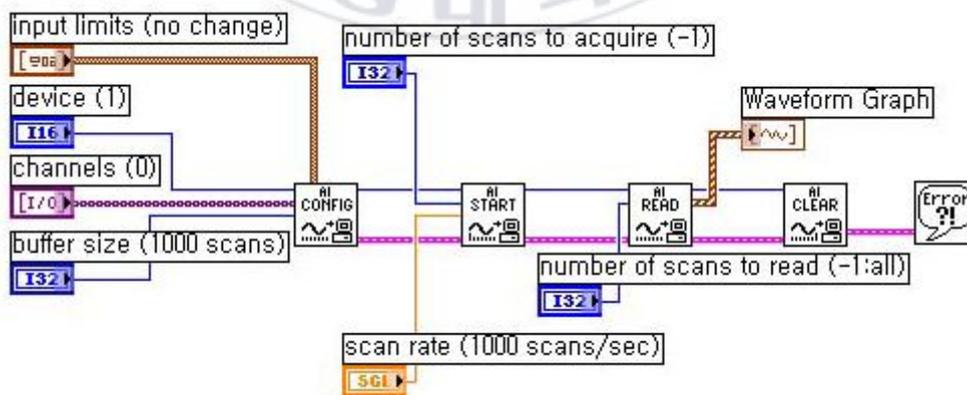


Fig. 4-6 Example of block diagram for front panel of Fig. 4-5

### 4.2.3 PM 계측장치

#### 1) PM(Particulate Matter)

부유입자상 물질(SPM : Suspended Particulate Matter)은 대기 중에 부유하는 입자상 물질 중에서 입경이  $10\mu\text{m}$  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 보고<sup>41)</sup>고 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 대기 중에서 입자화하는 2차 생성입자로 구성된다. 다시 말해 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 100ppm 정도가 PM이 된다. PM의 화학적 성상은 엔진의 운전조건과 연료의 성상, 연소상태에 의해서 크게 다르지만 일반적으로 디젤 PM은 탄소로부터 생성되는 그을음 주위에 비교적 높은 비점의 유기물과 황산염 등이 Fig. 4-7과 같이 흡착하고 있는 것으로 알려져 있다. PM의 주원소는 탄소로 60%전후를 차지한다. 그 외에 P, B, Al, Fe, Mg, Zn, Ca 등 금속성분도 미량이지만 함유한다. 또 PM의 형상은 입경이 약  $0.02\mu\text{m}$  정도인 각각의 입자가 다수의 쇄상(사슬형)으로 늘어서 있는 것이 전자현미경에 의해서 관찰되고 있다.

디젤 PM은 미소입자에 포함된다. 디젤 배출가스는 발암성(發癌性)), 만성기관지염(慢性氣管支炎), 화분증(花粉症), 내분비 교란성(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.<sup>20)</sup>

PM<sub>10</sub> (PM의 입경이 10 $\mu$ m 이하인 것)과 PM<sub>2.5</sub>(PM의 입경이 2.5 $\mu$ m 이하인 미소 입자) 및 그 외의 조대입자는 발생원과 특성에 큰 차이점이 있기 때문에 별개의 구성으로 보는 것이 타당하다. 예전에는 PM<sub>10</sub>에 대해서 규제를 해오고 있었지만, 선진국에서 PM<sub>2.5</sub>가 인체에 미치는 영향 등을 조사하면서 2.5 $\mu$ m 이하의 미립자에 대해서도 규제가 시작되었다. 앞으로 DPF(Diesel Particulate Filter)등 PM의 배출을 줄이기 위한 연구가 계속 되겠지만, PM의 양을 감소시키는 것은 앞으로 디젤엔진의 기술개발에 중요한 관건이 될 것으로 생각된다.

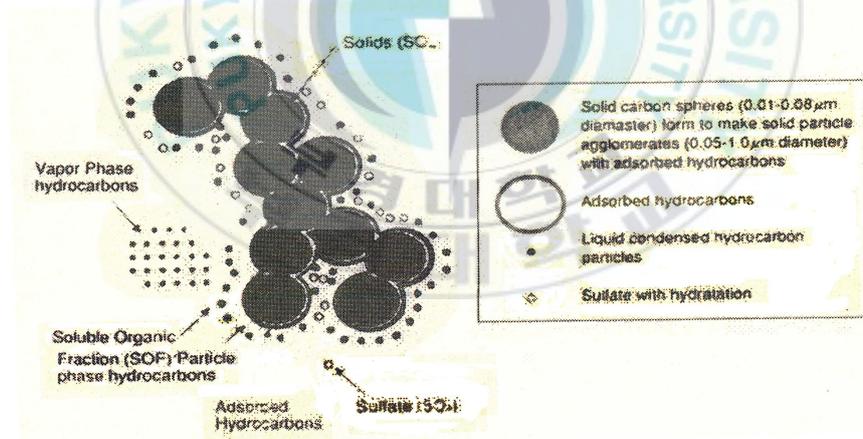


Fig. 4-7 Formation of PM<sup>42)</sup>

## 2) PM의 계측 방법

디젤엔진에서 배출되는 배기배출물을 측정하는데 있어 광의 투과율로써 평가하는 방법은 스모크 농도 측정법이고, 입자로서 평가하는 방법은 PM

측정법이다.<sup>43)</sup>

스모크 농도 측정법은 크게 필터식과 오퍼시티(opacity : 불투명도)식이 있다. 필터식은 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 4-3에 PM 측정<sup>43)</sup>에 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 설명한다.

Table 4-3 Method 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 wavelength NDIR method	Continuos
FID PM analyzer	FID method	Continuos
Filter oxidization & deoxidization analyzer	Filter oxidization & deoxidization method	Filter method
Dofferential CO <sub>2</sub> analyzer	Differential CO <sub>2</sub> method	Continuos

### 3) PM 농도 측정장치

PM 농도 측정장치도를 Fig. 4-8에 나타내었다. PM 농도 측정장치는 배기가스 라인의 중간에 레이저 광을 입사할 수 있는 광 프루브와 광전자 증배관(PMT :Photo Multiplier Tube)을 설치하여 배기가스가 통과할 때 감쇄되는 빛의 강도를 계측하는 장치이다.

광원으로는 정격용량은 5 $\mu$ W이며, 파장이 632.5nm인 He-Ne 레이저를 사용하였다. 레이저에서 배기관까지는 광프루브를 사용하였으며, 프루브 끝에는 4개의 개구부(Aperture)를 설치하여 광이 퍼져 나가는 것을 최대한 억제하였다. 이 때 구멍의 크기는 0.7mm로 하였다. 자세한 치수 등은 Fig. 4-8에 나타내었다. 레이저광의 강도를 측정하는 PMT는 350~650nm의 파장을 감지하는 것으로 -1100V에서 전류를 10<sup>7</sup>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 배기관 입구(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.

레이저광은  $\phi$ 0.7mm의 개구부를 설치하였으나 실제로 배기관의 광프루브측 입구에서는  $\phi$ 8mm였고, PMT가 있는 출구 쪽에서는  $\phi$ 22mm였다. 따라서 광로 단면적  $A_b$ 의 지름은 15mm로 하였다. 그리고 광로의 길이  $L_m$ 은 Fig. 4-8에 표시된 바와 같이 66.8mm이다.

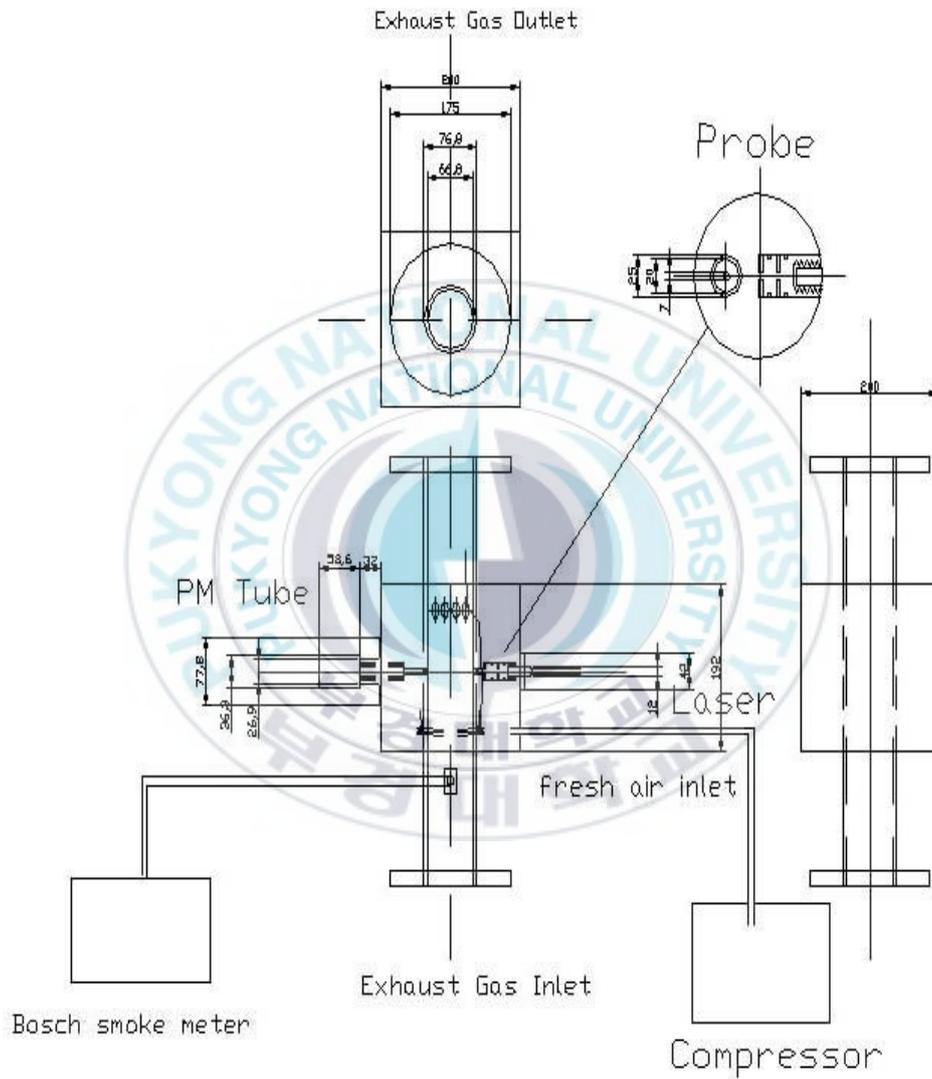


Fig. 4-8 Schematic diagram of PM concentration measurement apparatus

#### 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 (4-1)로 주어진다.

$$I = I_0 \exp(-KL) \text{-----(4-1)}$$

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

식 (4-1)은 흡광률  $K$ 를 흡광단면적  $C_{ext}$ 와 경로 중의 미립자의 밀도 수  $N$ 의 곱으로 대체하여 식 (4-2)로 나타낼 수 있다.

$$\tau = \frac{I}{I_0} = \exp(-KL) = \exp(-NC_{ext}L) \text{-----(4-2)}$$

다음으로 흡광단면적  $C_{ext}$ 는 식 (4-3)과 같이 정의한다.

$$C_{exp} = Q_{ext} \frac{\pi d^2}{4} \text{-----(4-3)}$$

여기서  $Q_{ext}$ 는 흡광률이고,  $d$ 는 PM의 직경이다.

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

$$n = NLA_b \text{ -----(4-4)}$$

여기서  $A_b$ 는 레이저 단면적이다.

마지막으로 PM의 총질량  $m_s$ 를 정의하면 식 (4-5)와 같다.

$$m_s = \frac{1}{6} \pi d^3 \rho_s n \text{ -----(4-5)}$$

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

$$\tau = \exp\left(\frac{-3Q_{ext}m_s}{2A_b d \rho_s}\right) \text{ -----(4-6)}$$

여기서  $Q_{ext}$ 는 Raleigh limit, 즉  $\alpha = \pi d / \lambda < 0.3$  ( $\lambda$ 는 입사광의 파장)일 때 산란률을 무시하면 흡수률과 같다고 볼 수 있다. 따라서 식 (4-7)과 같이 된다.

$$Q_{ext} = Q_{abs} + Q_{scat} = Q_{abs} = -4alm \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \text{ -----(4-7)}$$

여기서 PM에 대한 복소 굴절률  $m$ 은  $m = n - ki$ 로 나타내며 많은 연구자들에 의해서  $n$ 과  $k$ 값들이 나와 있는데, 여기서는 Tree와 Tien<sup>44)</sup>의 연구에 의한 값인  $n=1.9$ 와  $k=0.55$ 를 선택했다.

식 (4-6)을 질량에 관한 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{m_s}{A_b} = -\frac{2 \ln(\tau) \rho_s d}{3Q_{ext}} \text{ -----(4-8)}$$

식 (4-8)에 식 (4-7)을 대입하면.

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

와 같이 된다.

여기서 식 (4-9)의 허수부를 계산하면,

$$\begin{aligned} \operatorname{Im} \left[ \frac{m^2-1}{m^2+2} \right] &= \operatorname{Im} \left[ \frac{(n-ki)^2-1}{(n-ki)^2+2} \right] = \operatorname{Im} \left[ \frac{(n^2-k^2-1)-2nki}{(n^2-k^2+2nki)} \right] \\ &= \frac{-6nk}{n^4+2n^2k^2+k^4-4k^2+4} \quad \text{-----(4-10)} \end{aligned}$$

식 (4-10)을 식 (4-9)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻는다.

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

식 (4-11)은 광의 단면적 당 발생 질량이므로 여기에 광로의 길이를 곱하면 체적 당 발생 질량을 구할 수가 있다. 따라서 식 (4-12)와 같이 된다.

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

여기서, PM의 밀도  $\rho_s$ 는 Park and Appleton<sup>45)</sup>에 의해  $1.8[g/cm^3]$ 으로 결정했다. 최종적으로 식 (4-12)에 의해서 PM의 질량을 산출하였다. 산출된 값의 단위는  $[g/m^3]$ 으로 하였다.

### 4.3 실험 장치 및 방법

실험장치는 Fig. 3-11과 동일하며, 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. 흡입공기량을 측정하기 위한 증류유량계는 흡입관에 연결되어 있고, 차압을 측정하여 유량을 산출하는 방식이다. 그리고, 연료유량계는 10cc 소모되는데 걸리는 시간을 측정하는 방식이다. 마지막으로 연소가스분석기는 Eurotron사의 GreenLine MK2를 사용하였다.

실험은 세 가지의 시료유(DF, BO, TVO)를 각각 1500, 2000, 2500rpm에서 20, 40, 60Nm의 토크로 부하의 변화를 주며 수행하였다. 각 시료유를 교환할 때는 기관 내부에 있는 이전 시료유를 제거하고 새 시료유로 교환할 수 있도록 고부하에서 충분한 운전시간을 주었다. 데이터의 취득은 연소 압력, 니들리프트, 분사압력, PM 농도 등을 PXI로 계측하였다. 이 때, 크랭크 각도는 크랭크 축에 연결된 엔코더(720ppr)를 사용하였고, 크랭크 각도로 0.50마다 한 번 씩 펄스가 생성되는 B펄스를 외부클럭으로 사용하여 데이터를 크랭크 각 0.50마다 취득하였다.

배기가스 분석기로는 O<sub>2</sub>, 공기과잉률, CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, 배기가스 온도를 계측하였다. 또 자체 제작한 PM 농도를 정량적으로 분석·비교하고, 보정을 하고자 하였다.

## 4.4 결과 및 고찰

### 4.4.1 온라인 계측

Fig. 4-9는 1500ppm의 회전수, 60Nm토크의 부하 상태일 때, 경유로 운전한 경우의 온라인 분석 결과이다. LabVIEW 프로그램의 프론트 패널로 연소압력, 니들리프트, 분사압력, PM 농도, 열발생을 그래프만을 나타내었다. 이 외에, 압력변화율, 누적열발생을 및 최고압력과 최고압력점 등도 나타낼 수가 있다. PXI에는 Voltage 값으로 모든 데이터가 수집되지만 온라인 분석을 위해 코딩된 LabVIEW 프로그램에 따라 연소압력은 MPa 단위로 환산되고 압력변화율, 열발생율, 누적 열발생율 및 최고압력과 최고 압력점 등이 온라인으로 산출된다.<sup>46-48)</sup> PM 농도도 빛의 강도 비를 측정하여  $g/m^3$ 의 단위로 환산되어 컴퓨터에 저장이 된다. 니들 리프트와 분사압력은 수집된 전압값으로 나타내었다. 그리고, Fig. 4-10은 실험에 사용된 프로그램의 블록 다이어그램이다.

Fig. 4-11에 압력, 열발생율, 누적열발생율, 니들리프트의 온라인 분석을 확대하여 나타내었다. 압력선도의 원 안에 있는 부분이 최소압력값을 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 쉽지 않다. 연소시작점은 연소시작 부근에서 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 분사 끝점을 프로그램으로 찾기는 쉽지 않다.

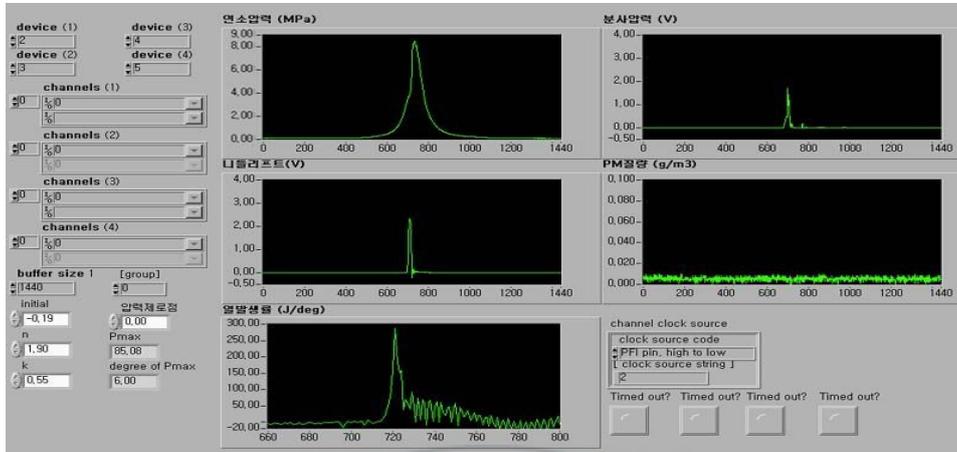


Fig. 4-9 Front panel used for experiment

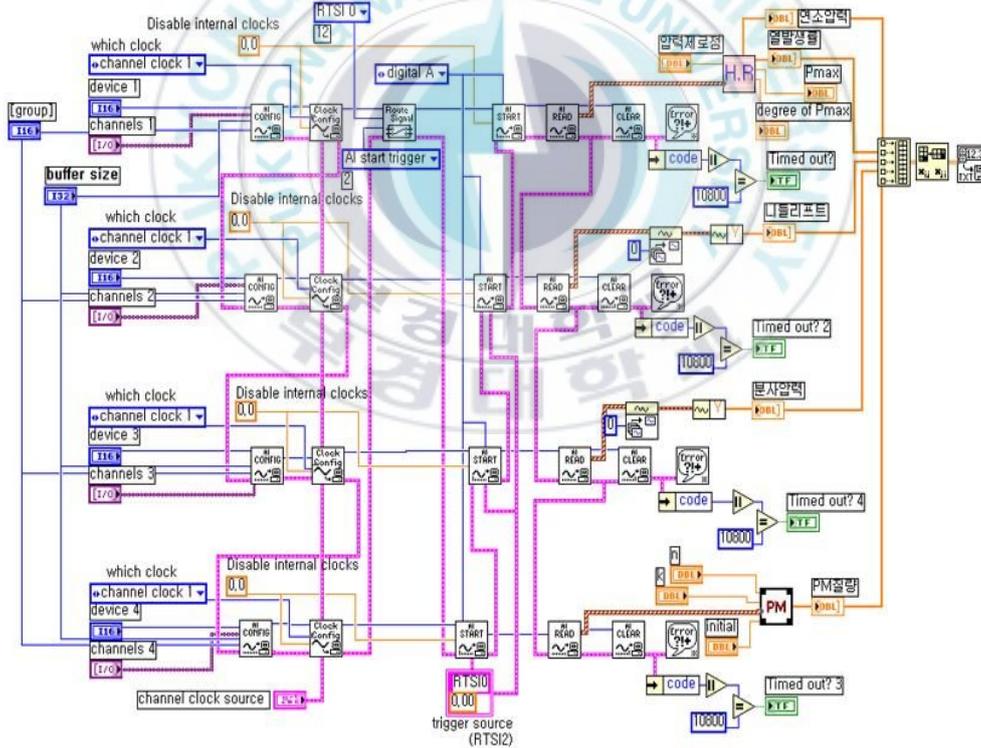


Fig. 4-10 Block diagram used for experiment

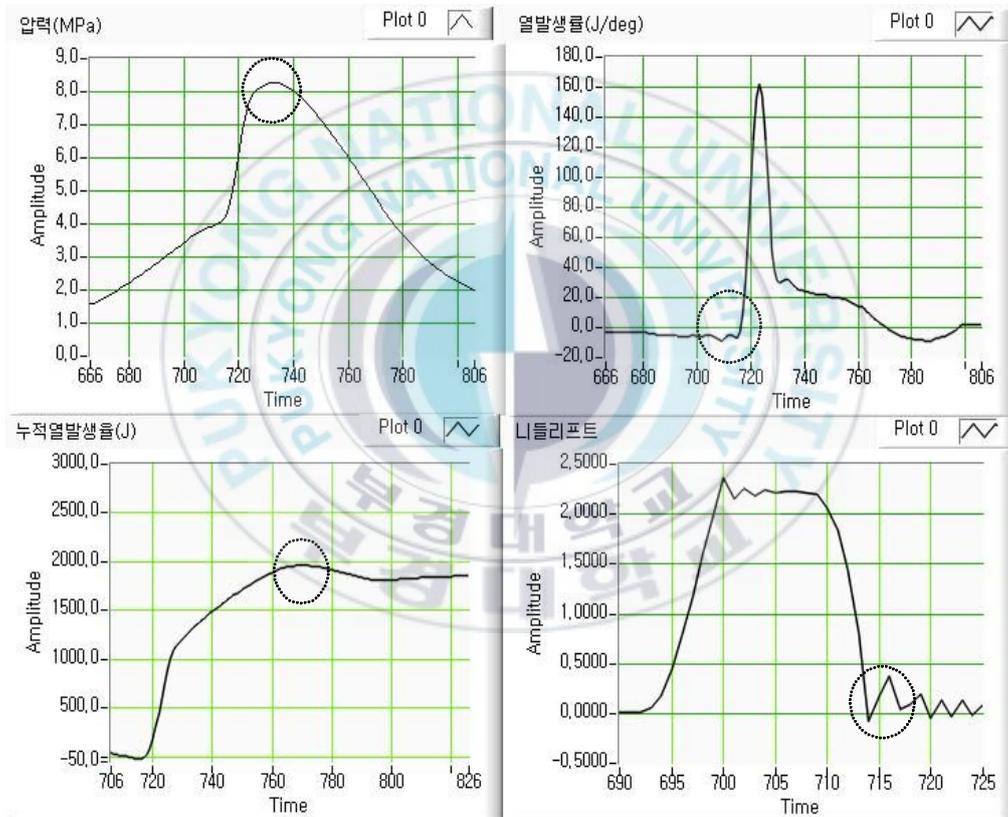


Fig. 4-11 Analysis data On-line detail

## 4.4.2 압력선도 스무딩 및 열발생율 검증

### 1) 압력선도 스무딩

연소실에서의 연소압력은 혼합기의 폭발적 연소에 의해 압력의 동적현상을 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. 4-12는 오리진(Origin) 프로그램에서 5포인트 FFT 필터링한 압력거동과 스무딩하지 않은 압력거동의 예를 니들리프트와 동시에 나타내었다. Fig. 4-12를 살펴 보면, 스무딩함으로써 압력의 피크치와 급상승 시의 기울기에 약간의 차이를 나타내었지만 그 외에는 별다른 차이없이 진동을 잡아주는 역할을 하였다. 따라서 압력선도를 스무딩한 결과를 이용하여 열발생율과 누적열발생율 및 연소압력거동을 분석하였다.

Fig. 4-13은 동일 운전조건에서 스무딩에 의한 압력선도로 산출한 열발생율과 누적열발생율을 비교하였다. Fig. 4-13에서 보면 스무딩에 의한 열발생율은 매끄러운 변화를 나타내고 있다. 그러나 그 형태는 별 차이가 없고, 특히 누적열발생율의 피크치나 그 형태는 약간의 진동을 제외하면 거의 비슷하다.

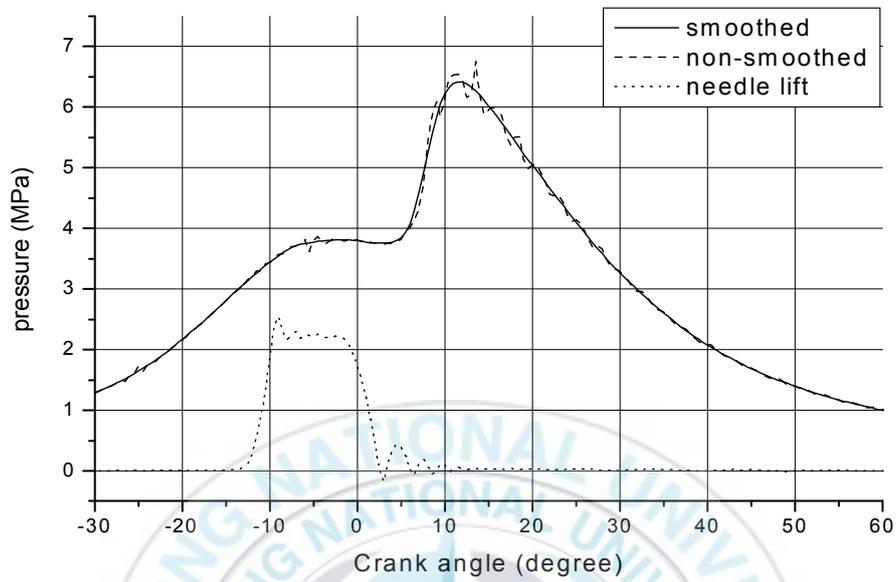


Fig. 4-12 Comparison of smoothing curve and non-smoothing curve for cylinder pressure

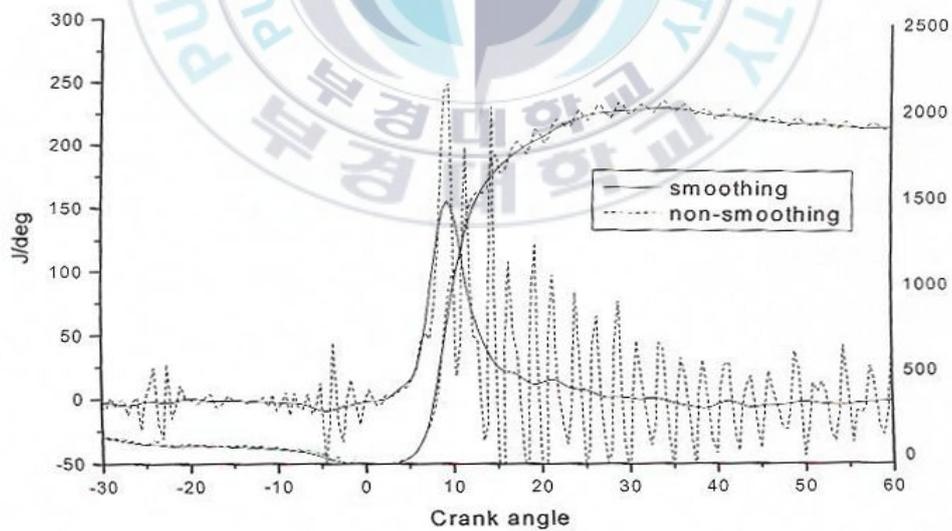


Fig. 4-13 Comparison of smoothing curve and non-smoothing curve for R.O.H.R and C.H.R

## 2) 열발생율 검증

순열발생율  $dQ/d\theta$ 는 열역학 제1법칙에서 유도된 식 (4-13)을 사용하여 산출하였다.

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{\kappa}{\kappa-1} p \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\kappa-1} V \frac{dP}{d\theta} \quad \text{-----(4-13)}$$

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

비열비  $k$ 값을 변수로 생각하고 열발생율을 구하면 피크치가 좀 더 상승하지만 경유와 같은 연료의 연소에는 큰 영향을 미치지 않으므로 식 (4-13)에서  $k$ 의 값을 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(motoring)을 했을 때의 열발생율과 연소가 일어났을 때의 열발생율을 비교해 볼 필요가 있다.

Fig. 4-14에서 점선은 모터링만의 결과이고 실선은 연료가 공급된 실제 연소가 일어났을 때(1500 rpm, 20 Nm)의 열발생율로 모터링 시의 최고 열발생율은 4 J/deg로 이는 연소가 이루어졌을 때 최고치의 약 5% 정도에 불과하여 무시할 수 있다. 또한 이 결과는 Fig. 4-15의 Paul 등<sup>49)</sup>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<sup>0</sup>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.

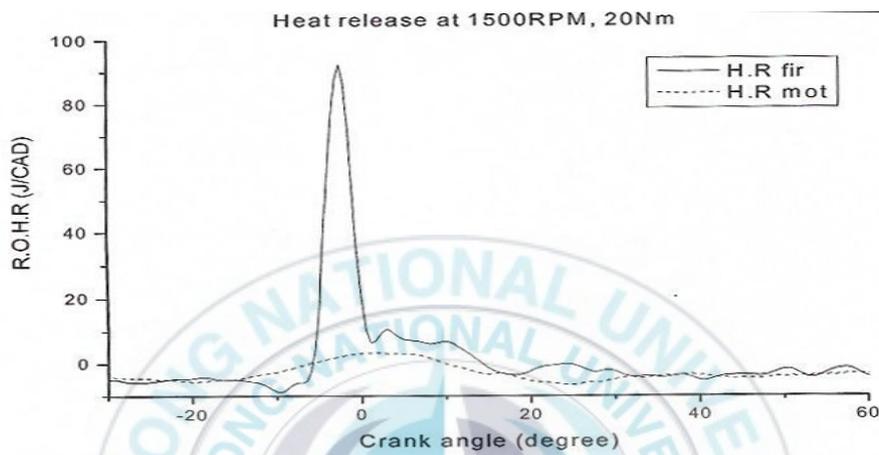


Fig. 4-14 Net R.O.H.R under motored and fired on experiment

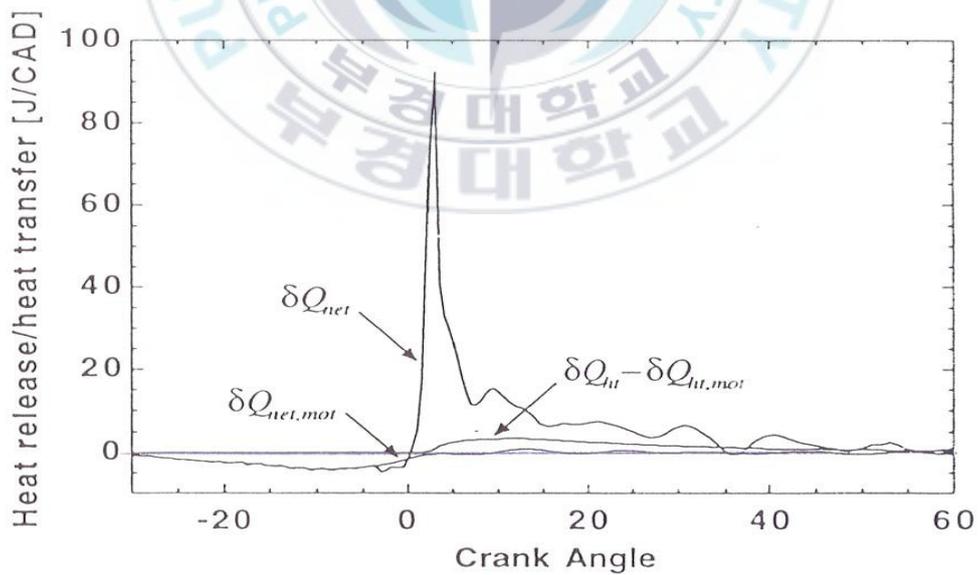


Fig. 4-15 Net R.O.H.R under motored and fired on reference<sup>50)</sup>

### 4.4.3 연소특성

#### 1) 압력거동과 열발생율

Fig. 4-16에 부하가 60Nm일 때 회전수에 따른 연료들의 연소압력거동과 니들리프트를 나타내었다. 회전수가 1500rpm일 때는 각 연료별로 차이가 크게 나타나지 않지만 회전수가 증가함에 따라 연료별 연소압력 거동이 달라지고 있다. 이는 회전수가 증가함에 따라 각 연료가 가지는 물성치 중에서 특히 점도의 영향이 크게 미친 것으로 사료된다. 이러한 경향은 Fig. 4-17, 4-18의 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, TVO, BO의 순으로 늦게 열리는 것이 나타났다. 이는 각 연료의 점도와 관계가 있는 것으로 생각되며 특히 보쉬식 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 NO<sub>x</sub>와 그을음의 생성이 감소할 것으로 고려된다.

Fig. 4-17에 나타낸 열발생율에서 TVO의 피크치 발생 경향은 경유와 BO에 비해 다른 경향을 보이고 있다.

Fig. 4-18에는 누적열발생율을 나타내었다. 연소압력에서 설명한 것처럼 고회전수에서 각 연료별 특성이 확연히 달라짐을 알 수 있다. 한편 TVO의 변곡점을 살펴보면 다른 연료들보다 변곡점이 오른쪽으로 치우쳐 있다. 이는 TVO의 배기가스 온도(Fig. 4-26 참조)를 높이는 원인인 것으로 사료된다.

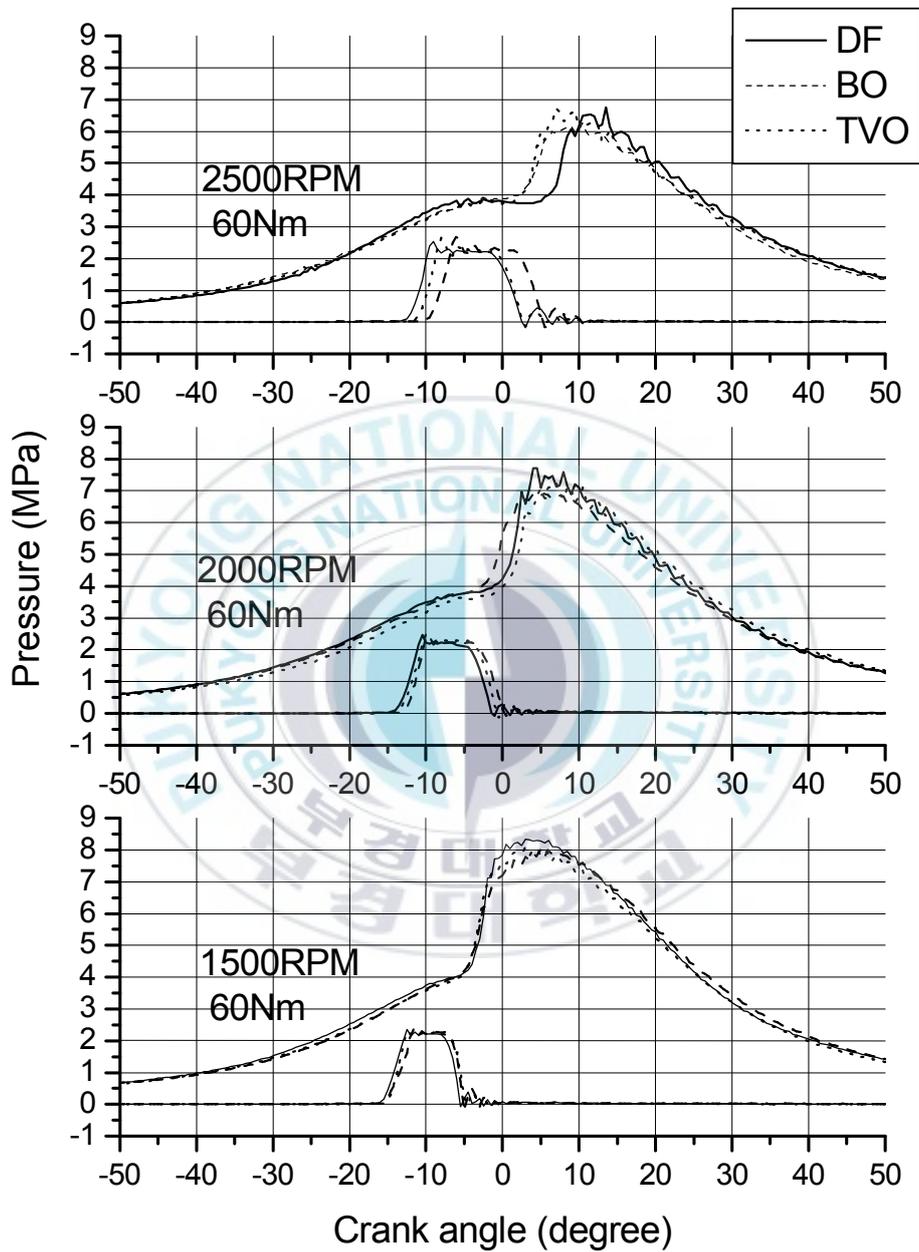


Fig. 4-16 Comparison of cylinder pressure and injection period using DF, BO and TVO at various engine conditions

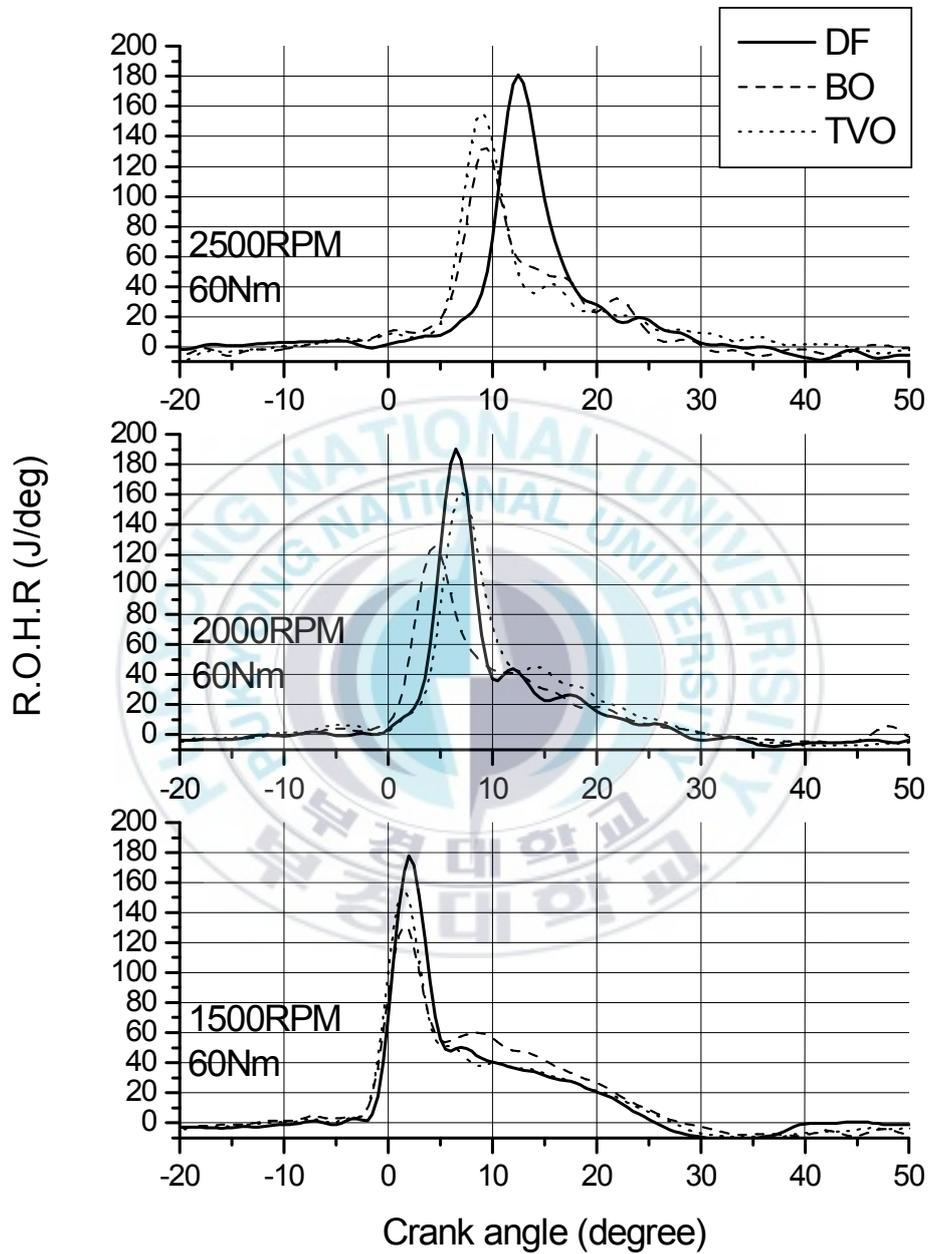


Fig. 4-17 Comparison of R.O.H.R using DF, BO and TVO at various engine conditions

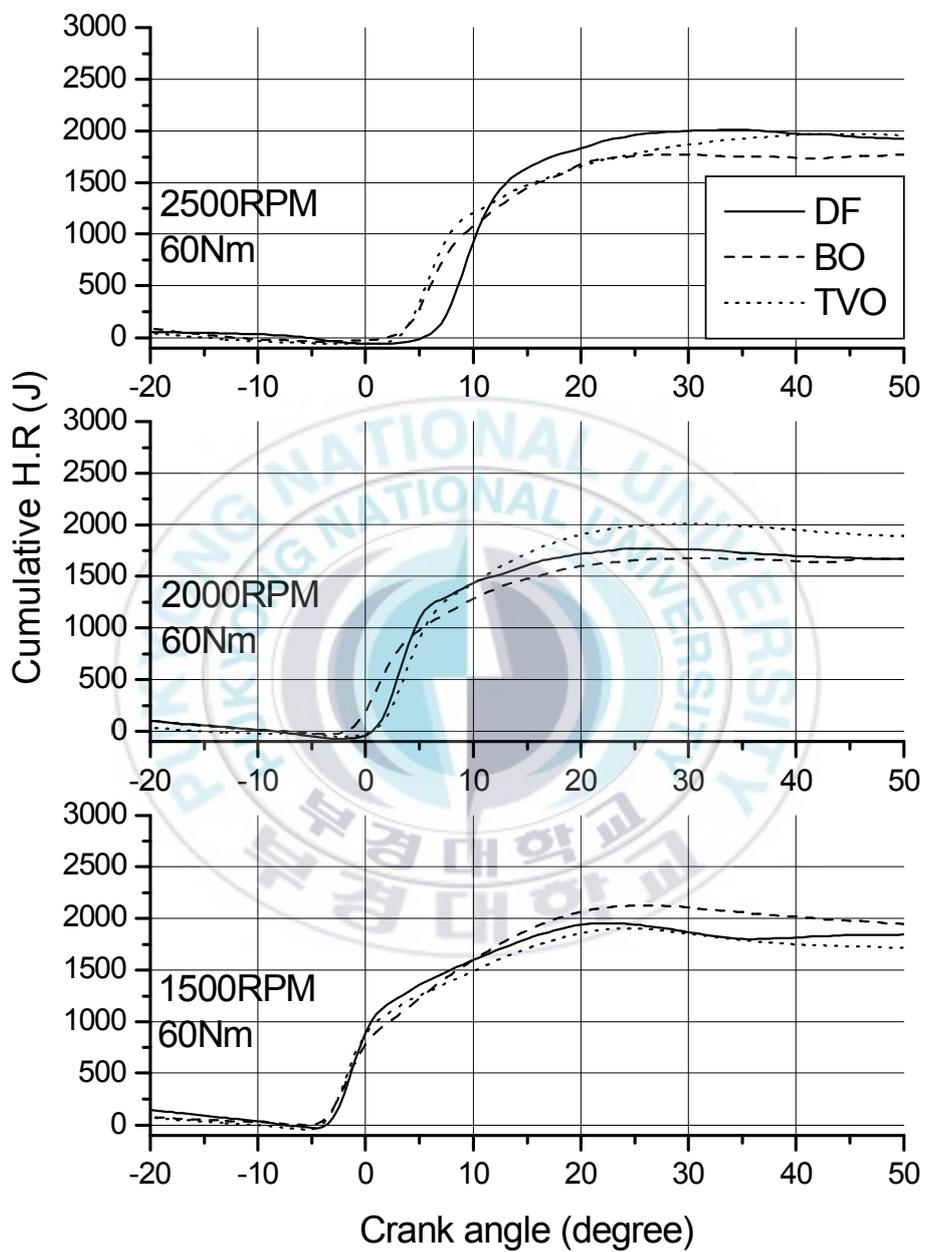


Fig. 4-18 Comparison of C.H.R using DF, BO and TVO at various engine conditions

## 2) 연료소비율, 공기과잉률과 체적효율

연료소비율을 Fig. 4-19에 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 BO가 TVO보다 낮은 값을 나타내고 있다. 이는 각 연료의 발열량 차이와 잘 일치한다.

Fig. 4-20에는 공기과잉률을 나타내었다. 경유와 BO는 모든 영역에서 거의 같은 값을 나타내고 있고, TVO는 부하가 작을수록 다른 연료들과 많은 차이를 나타내고 있다. 이는 TVO가 다른 연료들에 비해 탄소와 수소의 비가 작고 상대적으로 산소를 많이 함유하기 때문인 것으로 고려된다.

Fig. 4-21에 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 때 차이가 나는 것은 측정상의 오차인 것으로 사료된다.

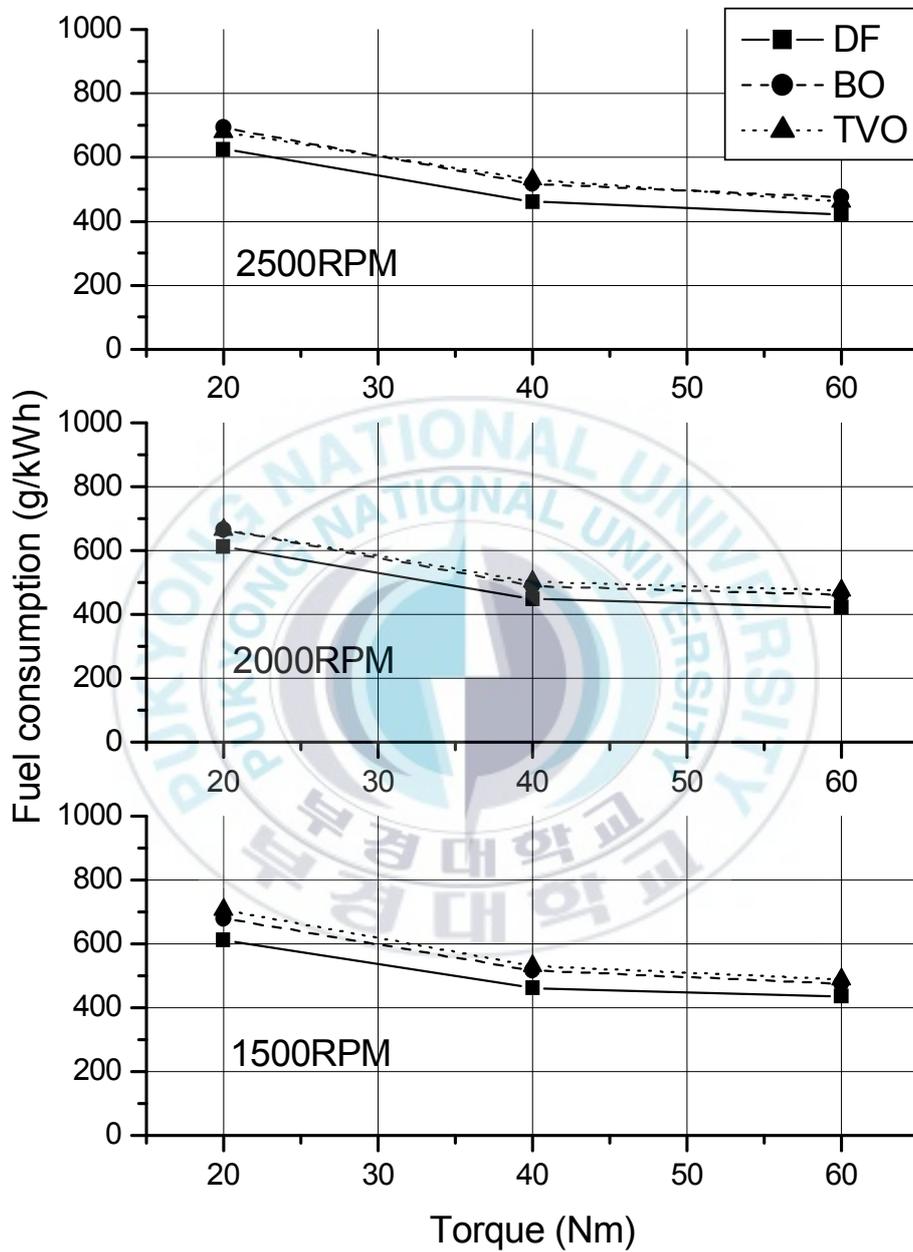


Fig. 4-19 Comparison of fuel consumption using DF, BO and TVO at various engine conditions

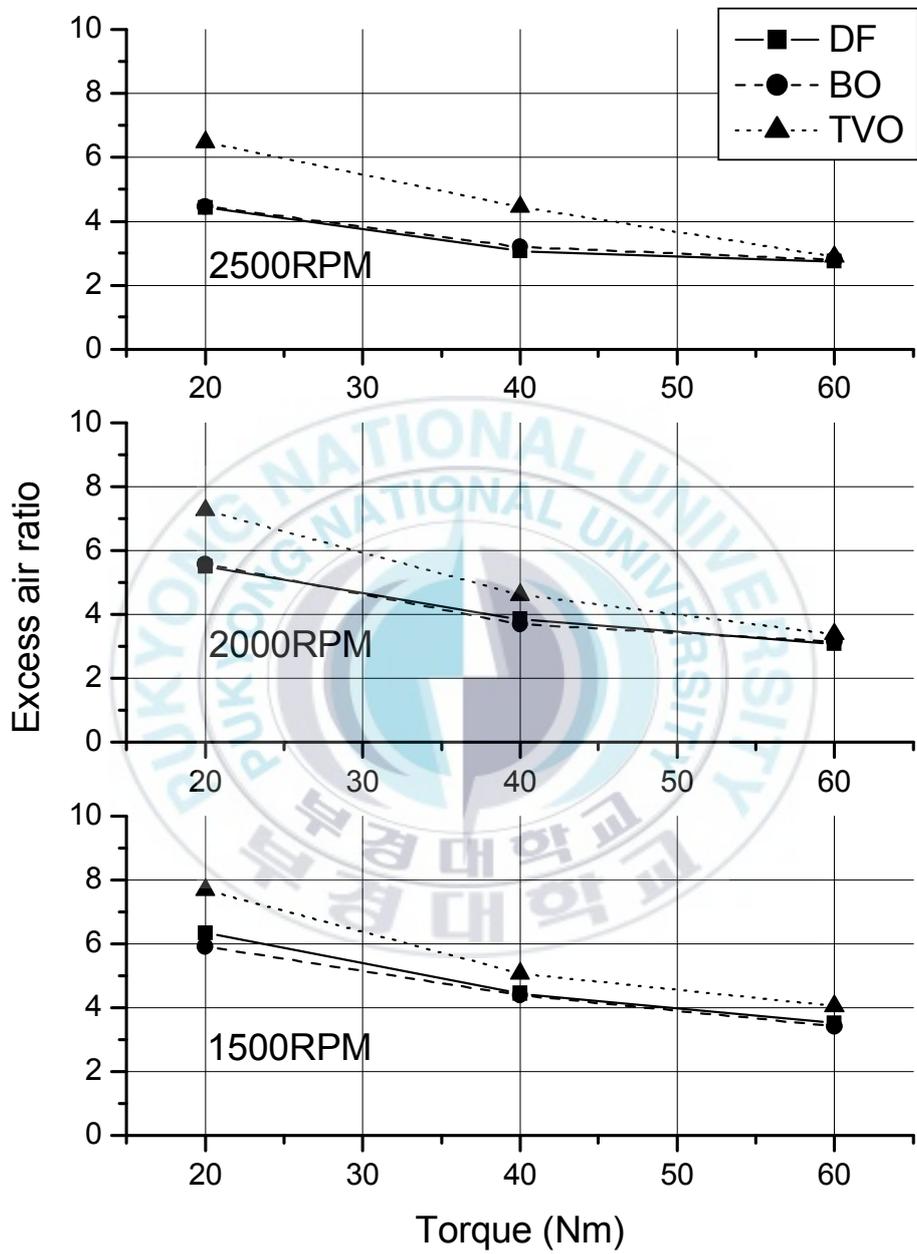


Fig. 4-20 Comparison of excess air ratio using DF, BO and TVO at various engine conditions

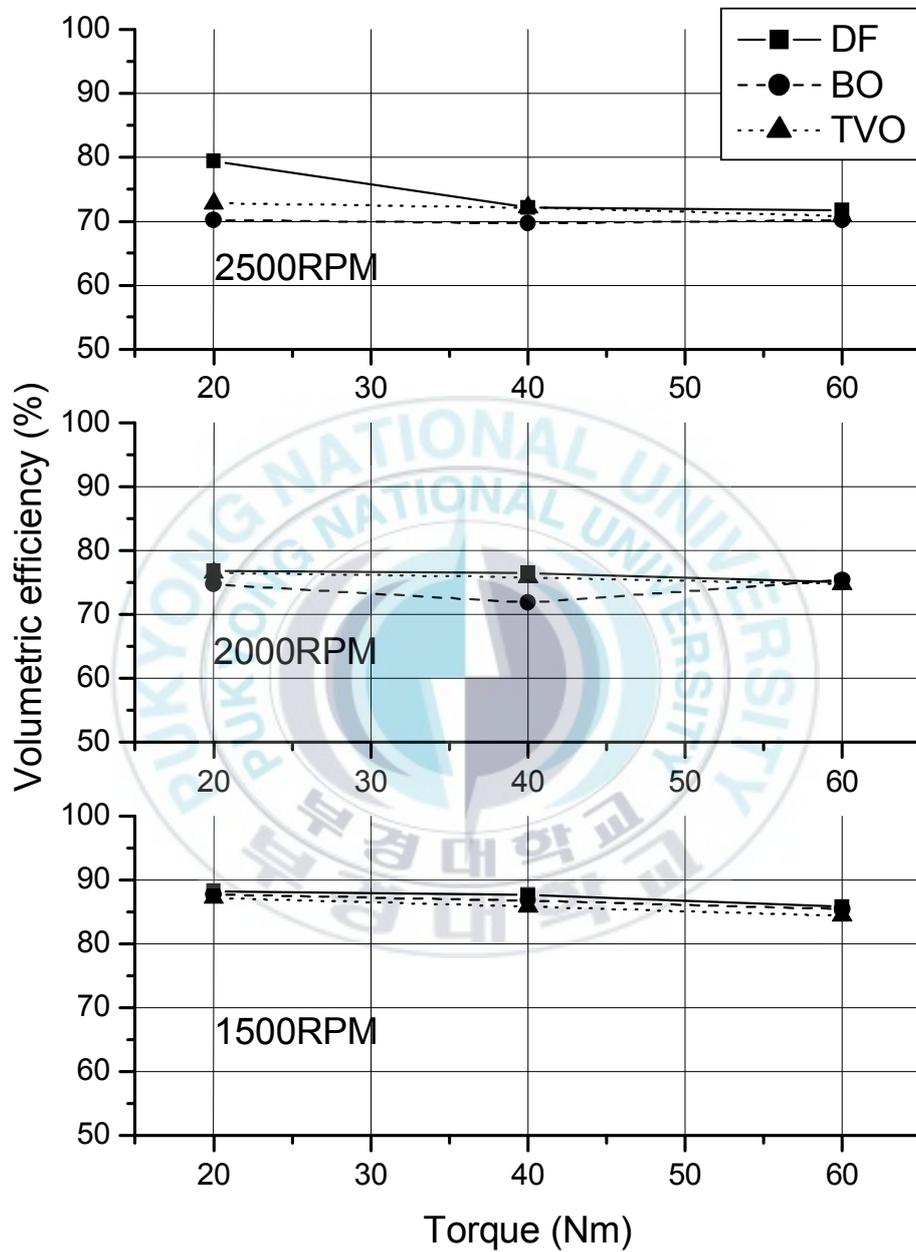


Fig. 4-21 Comparison of Volumetric efficiency using DF, BO and TVO at various engine conditions

### 3) 최고압력, 분사기간, 착화지연과 연소기간

Fig. 4-22에 최고압력값을 나타내었다. 부하가 증가함에 따라 최고압력값이 높아지고 있다. 그러나 회전수가 증가함에 따라서는 최고압력값이 떨어지고 있다. 각각의 연료들이 이와 비슷한 경향을 보이고 있지만, TVO의 경우 회전수와 부하의 변동에 따른 최고압력값의 변동이 다른 연료들에 비해 크게 나타나고 있다. 이러한 경향은 다른 특성에서도 나타나고 있다.

분사기간을 Fig. 4-23에 나타내었다. 분사기간은 회전수와 부하가 증가함에 따라 길어지는 경향을 나타내고 있다. 이는 당연히 회전수와 부하의 증가에 따라 연료의 분사량도 증가해야하기 때문이다.<sup>51)</sup> 또 분사기간도 최고압력값과 마찬가지로 TVO의 변동이 다른 연료들에 비해 큰 편이다.

Fig. 4-24에는 착화지연, Fig. 4-25에는 연소기간을 나타내었다. Fig. 4-24에서 BO의 경우, 착화지연이 각 회전수에서 부하에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 경우도 그 변동이 TVO에 비해 작은 편이다. 그리고 연소기간을 살펴보면, 각 연료에 관계없이 회전수 1500 rpm에서는 거의 비슷한 경향을 보이지만 회전수가 올라갈수록 약간 다른 경향들을 나타내고 있다. 특히 TVO의 경우 2500 rpm에서는 부하에 관계없이 다른 연료들에 비해 연소기간이 길어지고 있다. 이는 앞서 누적열발생율에서 피크치가 다른 연료들에 비해 크랭크 각도로 늦게 나타난 것에 기인한다.

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

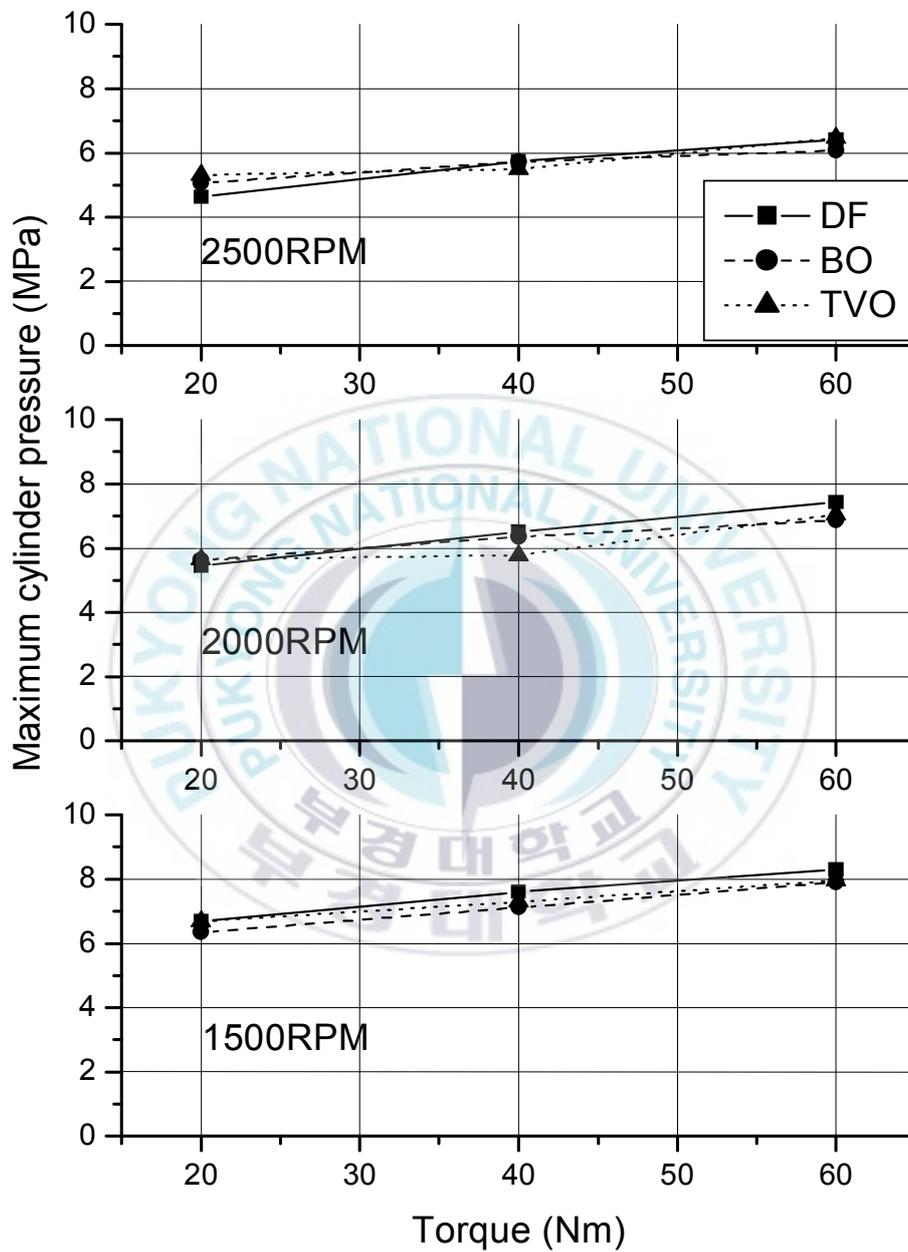


Fig. 4-22 Comparison of Maximum cylinder pressure using DF, BO and TVO at various engine conditions

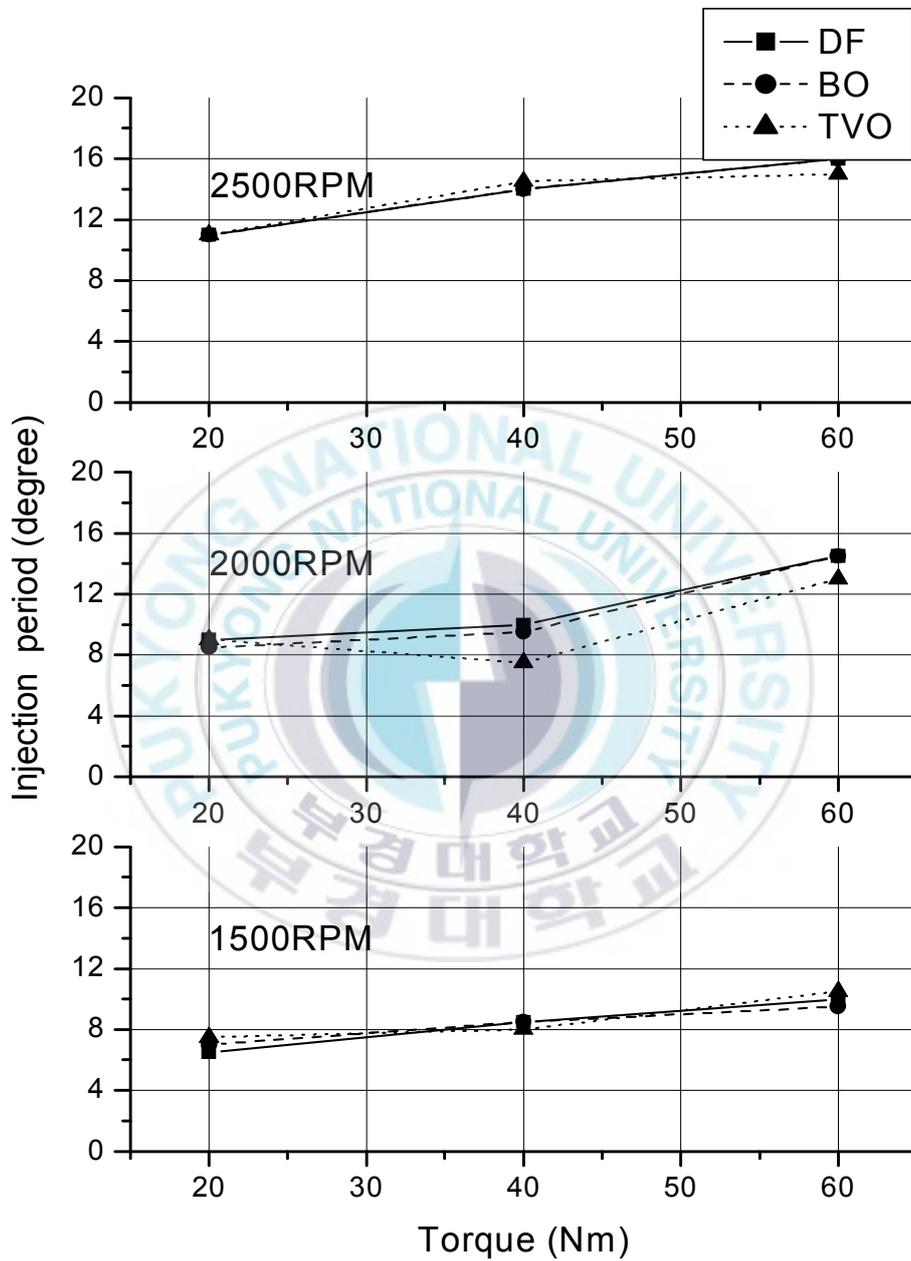


Fig. 4-23 Comparison of Injection period using DF, BO and TVO at various engine conditions

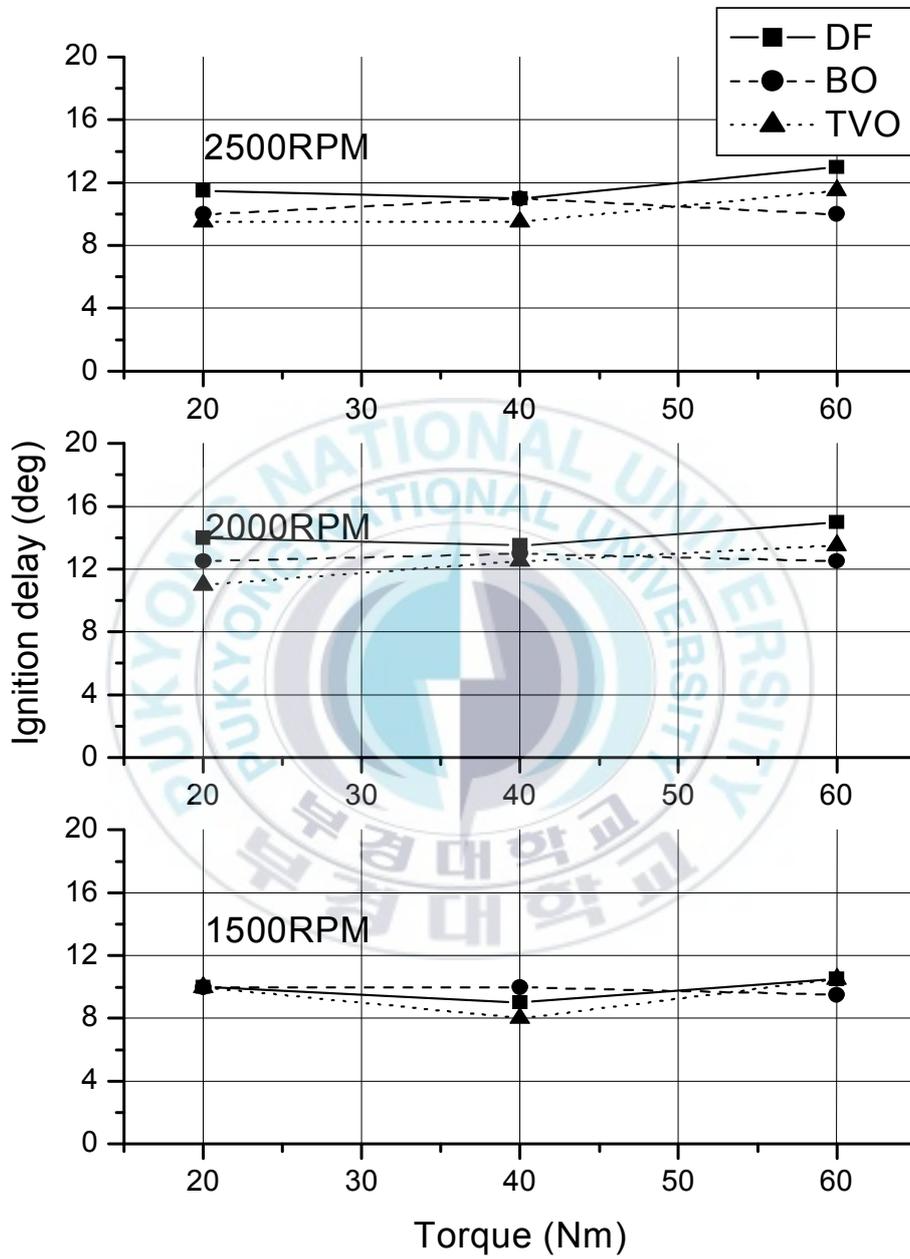


Fig. 4-24 Comparison of Ignition delay using DF, BO and TVO at various engine conditions

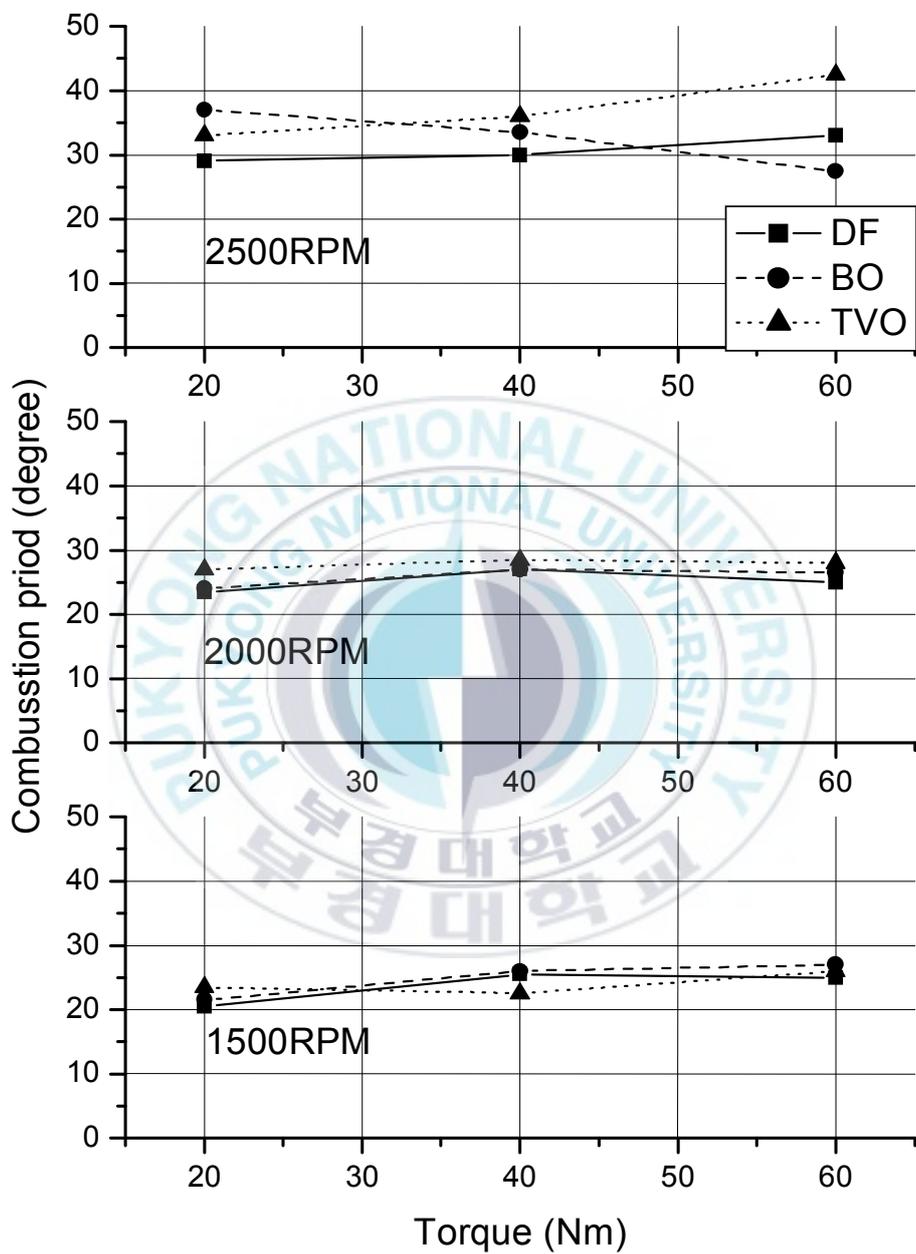


Fig. 4-25 Comparison of Combustion period using DF, BO and TVO at various engine conditions

#### 4.4.4 배기특성

Fig. 4-26에 배기가스의 온도를 나타내었다. 부하와 회전수가 증가할수록 온도가 높은 특성을 나타내고 있다. 또 각 연료들이 비슷한 경향을 보이지만 TVO의 온도가 약간 높게 나타나고 있다. 이는 TVO의 연소기간이 대체적으로 긴 것에서 기인하는 것으로 생각된다.

Fig. 4-27에 CO의 발생량을 나타내었다. 고부하에서는 연료에 따른 CO 농도의 차이가 작지만 부하가 작아질수록 CO의 농도도 같이 증가하는 것을 보인다. 이는 과희박에 의한 연소 및 화염의 켄칭 등에 기인하는 것으로 사료된다. 특히 각 연료간의 차이는 산소의 함유량에 비례하는 특징을 보여주고 있다. 이는 TVO와 BO에 다량 함유된 산소의 영향으로 보여진다.<sup>52)</sup>

Fig. 4-28에 NOx의 발생량을 나타내었다. 부하가 증가함에 따라 NOx의 농도도 따라서 증가하고 있고, 특히 회전수 2500rpm에서 가장 낮은 값을 나타내고 있다. 이는 제 3장의 요약에서 언급한 것처럼 회전수가 증가할수록 화염온도가 낮아지는 경향과도 일치하고 있다. 또 각 연료간의 정량적인 큰 차이는 없으나 대체로 TVO가 적게 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 다른 연료에 비해 연소상태가 좋기 때문인 것<sup>22)</sup>과 NOx의 발생량은 경유와 비슷하거나 낮은 것으로 발표되어 있는 것<sup>52)</sup>으로 보아 정상인 것으로 판단된다. 저속(1500rpm) 60Nm에서 NOx가 많이 생성되는 것은 연소기간이 길기 때문으로 생각되나 어느 경우나 일반적인 디젤기관의 경우보다 적게 나타났다. 이는 앞의 압력 및 니들리프트 선도에서 지적한 바와 같이 본 실험에 사용한 기관의 연소는 예혼합연소에 지배되기 때문이라고 생각된다.

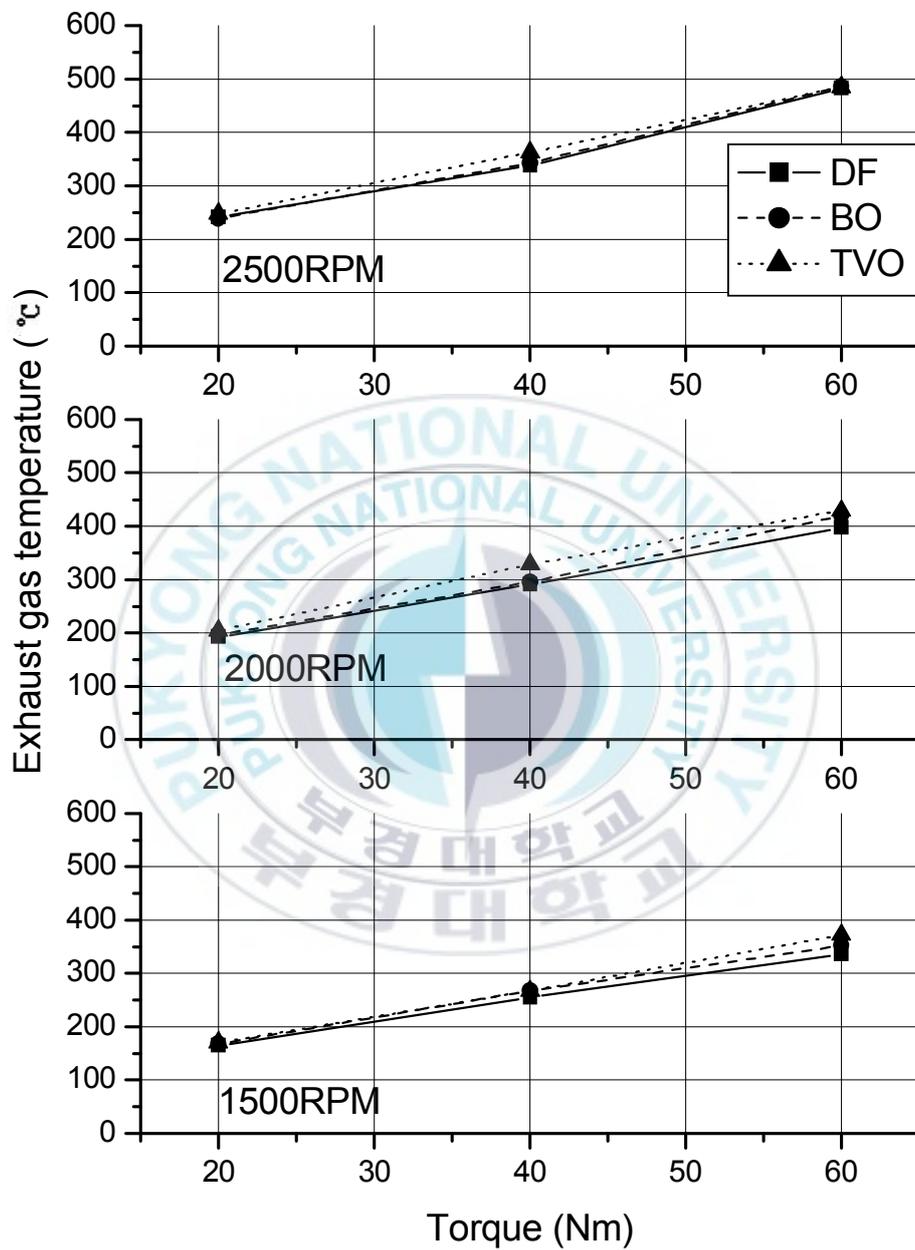


Fig. 4-26 Comparison of exhaust gas temperature using DF, BO and TVO at various engine conditions

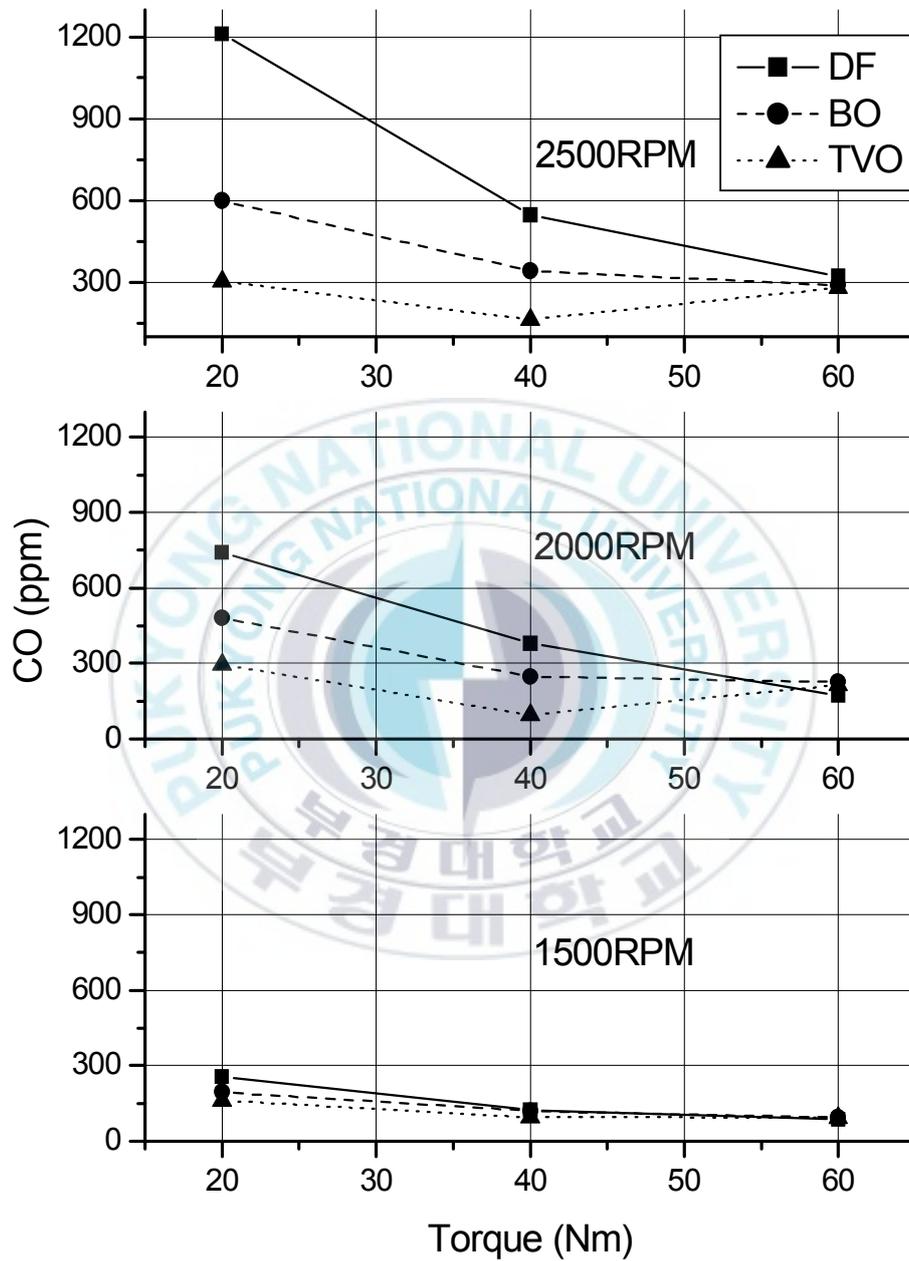


Fig. 4-27 Comparison of CO concentration using DF, BO and TVO at various engine conditions

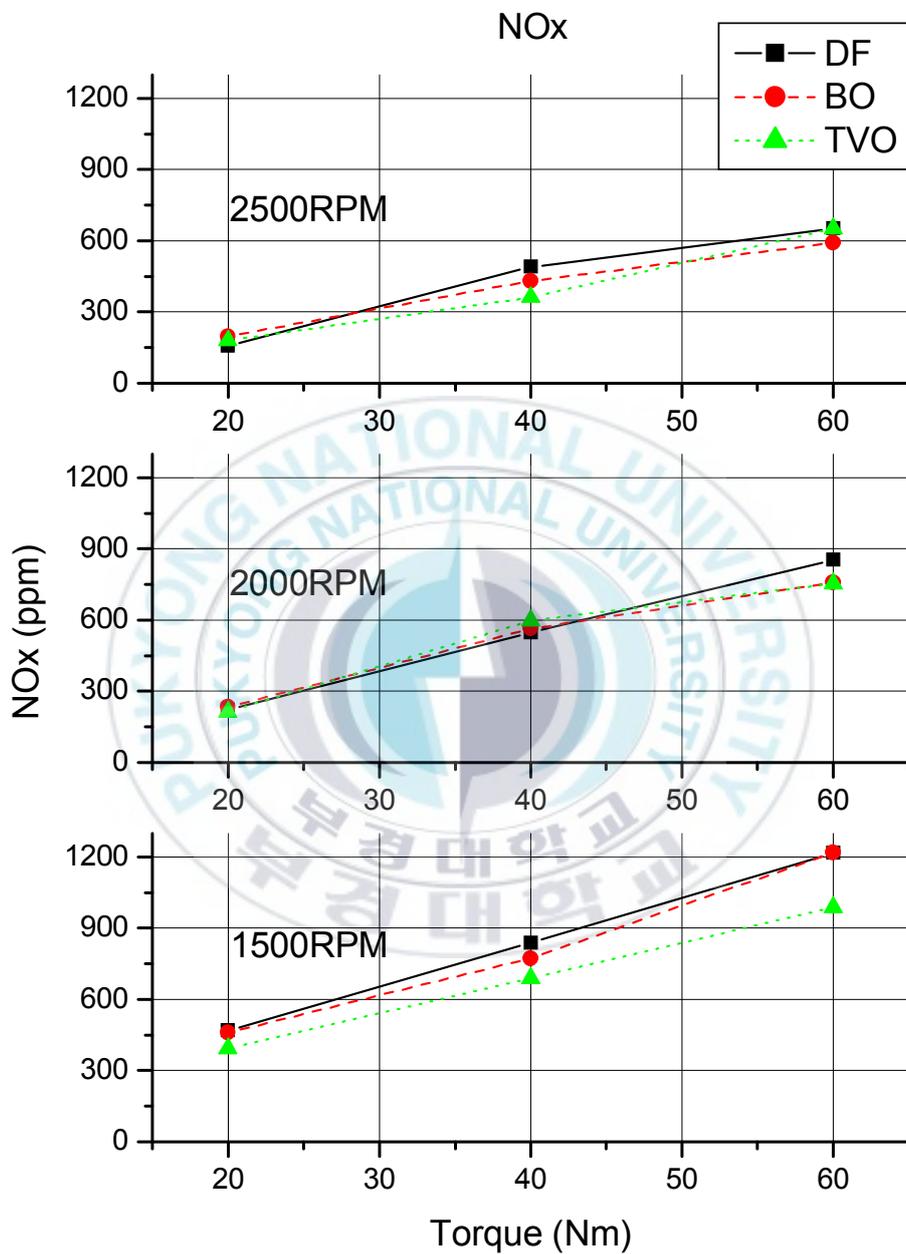


Fig. 4-28 Comparison of NOx concentration using DF, BO and TVO at various engine conditions

#### 4.4.5 PM 배출 농도

Fig. 4-29에 배기가스의 흡수율과 질량농도와의 관계에 대해서 나타내었다. 본 실험에서 산출된 최고의 PM질량은  $0.016[g/m^3]$ 이었다. Fig. 4-29에서 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  $1[mg]$ 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 4-4에 나타내었다. 배기가스가 흐르지 않을 때의 값, 즉 초기값( $I_0$ )은  $-0.19$ 였다. 이 값들을 바탕으로 PM의 질량농도를 나타낸 것이 Fig. 4-30이다. 대략 측정된 양은 EURO-III의 규제치  $0.01[g/m^3]$ 에 크게 벗어나지 않는 것으로 나타났다. 그리고 PM 농도는 경유, BO, TVO 순으로 많이 나타났다. 이는 BO와 TVO가 산소를 많이 함유하고 있는 이유도 있지만 바이오 디젤유는 그을음이 연소실 내부와 배기관에 많이 퇴적된다는 결과도 있기 때문에 PM의 양이 적을 수도 있다.<sup>53)</sup>

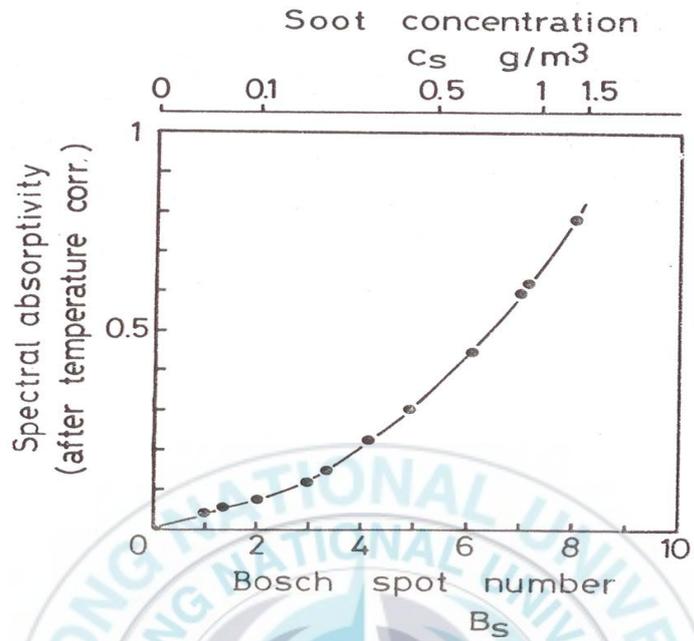


Fig. 4-29 Relationship of soot concentration and spectral absorptivity<sup>54)</sup>

Table 4-4 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

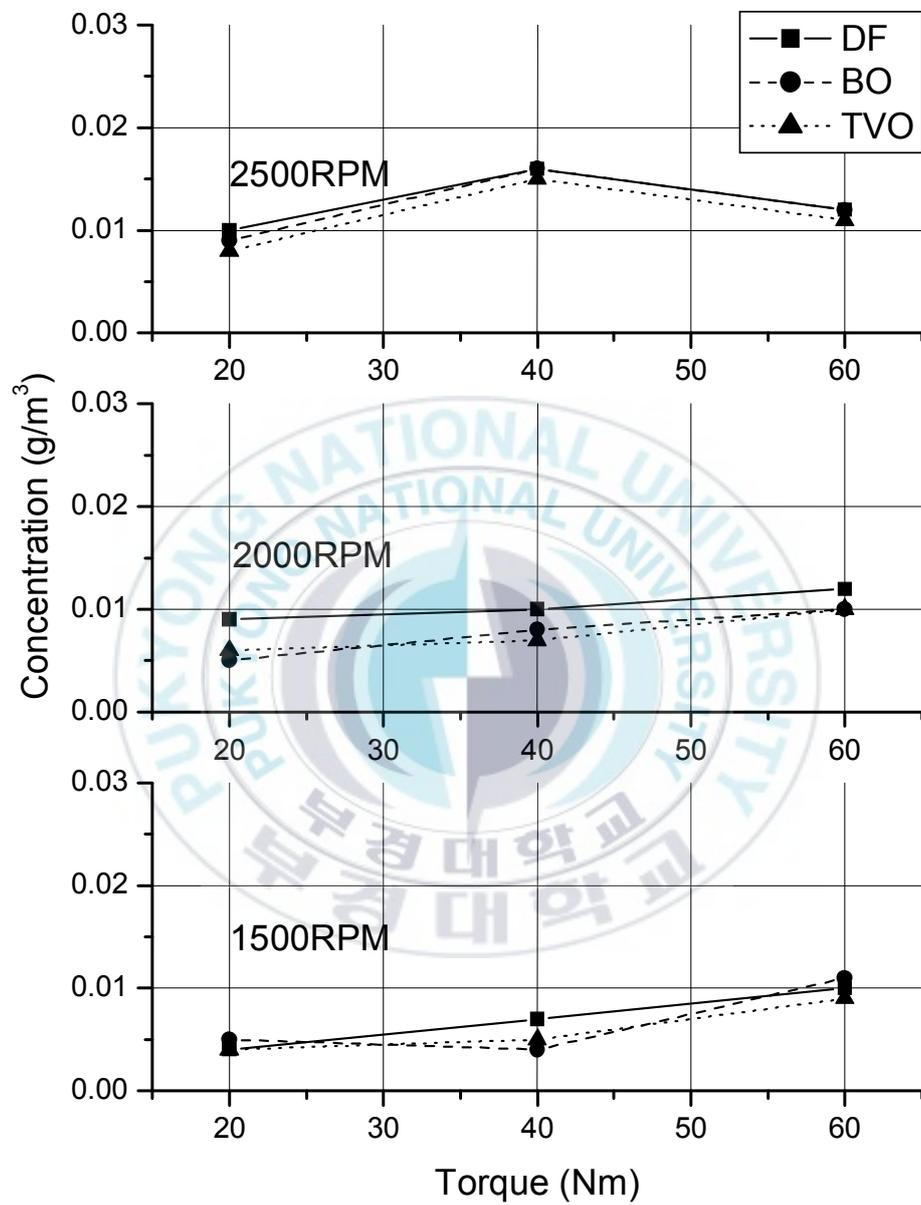


Fig. 4-30 Comparison of PM concentration using DF, BO and TVO at various engine conditions

## 4.5 요약

본 연구에서는 디젤기관의 성능 및 연소분석 시스템을 새롭게 구성하여 폐식용유를 이용한 바이오 디젤유를 소형 고속 직분식 디젤기관에 사용했을 때, 그에 의한 기관 성능 및 연소특성에 미치는 영향을 조사한 결과, 다음 사항을 알 수 있었다.

- 1) 폐식용유를 이용한 블랜드유(BO) 및 에스테르유(TVO)의 연소압력거동 및 열발생율거동은 경유와 유사하였으며, 대체 연료로 사용이 가능하였다.
- 2) 연료소비율은 부하의 증가에 따라 감소하였으나 동일 부하의 경우, 저속에서는 TVO, BO, 경유의 순으로 감소하였다.
- 3) NO<sub>x</sub>의 배출경향은 3 종류의 연료유가 거의 비슷하였지만 저회전수에서 TVO가 낮게 배출되었다. 또 CO의 배출경향은 경유가 가장 많이 배출하였고, TVO가 가장 적게 배출되었다. 또 PM은 동일 회전수, 동일 부하에서 경유가 BO 및 TVO보다 약간 더 배출되었다.
- 4) PXI와 LabVIEW를 이용하여 디젤기관의 연소실 압력 및 열발생율을 온라인으로 계측 및 계산할 수 있었다.
- 5) 직접 제작한 투과흡광식 PM 농도 측정 장치에 의해서는 보쉬 그모크 미터로는 충분한 분해능을 가지지 못하는 저농도 범위의 PM 농도를 측정 가능하였다.

## 제 5 장 결 론

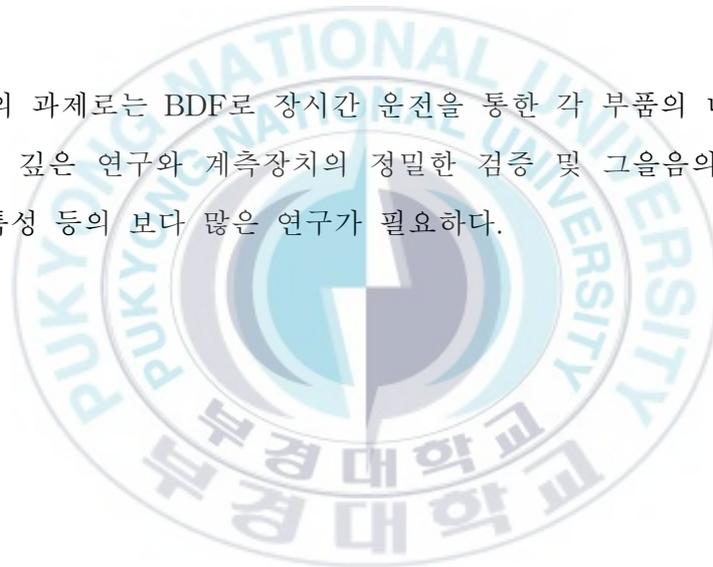
본 연구에서는 디젤기관의 성능 및 연소분석 시스템을 새롭게 구성하여 폐식용유를 이용한 BO(혼합유), TVO(에스테르유)를 소형 고속 직분식 디젤기관에 사용했을 때, 기관 성능 및 연소특성에 미치는 영향을 조사하였으며, 연소 분석의 중요 요인인 입경분포와 SMD를 분위기 압력 변화에 따라 조사하고 화염온도와 KL치를 이색법으로 조사한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 모든 시료유에서 분위기 압력이 증가함에 따라 큰 액적들의 분포가 증가하였으며, 분위기 압력 1bar 일 때 BO, TVO는 경유와 유사한 SMD를 가졌으나 일정 분위기 압력(3bar) 이상으로 증가하면 SMD의 변화가 작게 나타났다.
- 2) 종래에 사용한 고가의 PMT(광증배관) 대신 염가의 포토다이오드를 사용한 이색법으로도 신뢰할만한 데이터를 얻을 수 있었다.
- 3) 최고 연소 온도는 1500, 2000 rpm의 경우 DF, BO, TVO 순으로 높게 나타났으며, KL치는 모든 연료에서 DF, BO, TVO 순으로 높게 나타났다.
- 4) PXI와 LabVIEW를 이용하여 디젤기관의 연소실 압력 및 열발생율을 온라인으로 계측 및 계산할 수 있었다.
- 5) 폐식용유를 이용한 BO 및 TVO의 연소압력거동은 경유와 유사하였으

며, 대체 연료로 사용이 가능하였다.

- 6) NO<sub>x</sub>의 배출경향은 3 종류의 연료유가 거의 비슷하였지만 저속에서 TVO를 사용한 경우에 낮게 배출되었다. 또 CO의 배출경향은 DF에서 가장 많이 배출하였고, TVO에서 가장 적게 배출되었다. 또 PM은 동일 회전수, 동일 부하일 때 경유가 BO 및 TVO에서 보다 약간 더 배출되었다.

앞으로의 과제로는 BDF로 장시간 운전을 통한 각 부품의 내구성, 장해 등의 심도 깊은 연구와 계측장치의 정밀한 검증 및 그을음의 성분 분석 및 산화 특성 등의 보다 많은 연구가 필요하다.



## 참고 문헌

- 1) 신춘환, 김희숙, 허근태, “폐식용유로 제조된 재생비누의 생분해 속도”, 한국환경과학회지 제5권(제1호) pp 83~91, 1996.
- 2) Tosiro SAKURAI, “廢食用油の發生量と生活排水への汚濁負荷量”, 環境技術, Vol.26, No.3, 1997
- 3) “京都市環境局の バイオ・ディーゼル 燃料化事業”, ENGINE TECHNOLOGY Vol.2 No.3, 1999.
- 4) Osamu KOBAYASHI, “燃料サイクルから見た 原動機燃料の 将来展望”, ENGINE TECHNOLOGY Vol.2 No6, 2000.
- 5) Noboru MIYAMOTO, etc. “含酸素燃料による ディーゼル 燃焼의 低エミッション・高效率化とその 特性”, 日本機械學會論文集(B編) 64卷 620号(1998-4)
- 6) Masanori FUKUDA, “含酸素燃料による直接噴射式 ディーゼル機關의 排氣淨化”, 日本機械學會論文集(B編) 63卷 607号(1997-3).
- 7) Takaaki KITAMURA , etc., “含酸素燃料의 すす生成抑制効果에 關する 化學反應論的解析”, 日本自動車技術論文集 Vol.32, No.1, 2001.
- 8) Hiroaki WATANABE, etc., “含酸素燃料による 디젤엔진의 排氣低減의 研究”, 自動車技術, Vol.24, No.5, 2000.
- 9) 이영재, “바이오디젤유의 현황”, 자동차공학회지, 제24권, 제2호, pp. 53~55, 2002.
- 10) Otto A. Uyehara ; Factors that Affect BSFC and Emissions for Diesel engine , SAE870343, 1987.
- 11) H. Hiroyasu, T. Kadota; Fuel Droplet Size Distribution in Diesel combustion chambers ,SAE Trans., paper 740715, 1974.
- 12) Yohan Chi, Eungseo Kim ; Measurement of Droplet Size Distribution of transient Diesel Spray, SAE paper 931949.
- 13) R. A. Mugele ,H. D. Evans ; Droplet Size Distribution in Sprays , Industrial and Engineering Chemistry vol. 43 No. 6, June 1951.

- 14) 森棟 降昭, 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券, 641號, pp.294~299, 2000.
- 15) Kyunghyun Ryu, Youngtaig Oh ; Combustion characteristics of an agricultural diesel engine using biodiesel fuel, KASME international journal vol.18, No 4, P 709, 2004.
- 16) Hoang Xuan Quoc ,Maurice Brun ; Study on Atomisation and Fuel Drop Size Distrubution in Direct Injection Diesel Spray, SAE paper 94019, 1994.
- 17) Sung Wool Park, Hyung Jun Kim and Chang Sik Lee ; Investigation of Atomization Characteristics and Prediction Accuracy of Hybrid Models for High-Speed Diesel Fuel Sprays ,SAE paper 2003-01-1045, 2003.
- 18) W. TATE ; Immersion Sampling of Spray Droplets , A. I. Ch. E. Journal , vol. 7 ,no. 4, pp. 574~577, 1961.
- 19) In Goo Kim ,Sang Yong Lee ; A Simple Technique for sizing and Counting Spray Drops Using Digital Image processing, Experimental Thermal and Fluid Science vol. 3, pp. 214~221, 1990.
- 20) 김경현 ; 노즐 형상이 초고압 디젤분무의 미립화에 미치는 영향, 부경대 석사 학위논문, 1996.
- 21) 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.
- 22) 森棟 降昭, 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券, 641號, pp. 294~299, 2000.
- 23) 곽두영, “LabVIEW 컴퓨터기반의 제어와 계측 Solution”, OHM사, 2002
- 24) 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.
- 25) 福島 宏和 외 2명, “黑煙(스모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.
- 26) 박정규 외 2명, “이색법을 이용한 직접 분사식 디젤 엔진 실린더 내 화염 온도 및 soot 측정에 관한 연구”, 자동차공학회 논문집,7-7, pp. 42-53, 1999.
  - 27) 박성진, “전기점화 기관에서 방사율에 의한 가스온도의 측정”, 서울대 석사학위 논문, 1998.
  - 28) Y. Matsui 외 2명, “A Study on the application of the two-color method of flame temperature and soot concentration in diesel engines”, SAE paper NO 800970. 1980.
  - 29) S.K. Ahn 외 3명, “Measurement of flame temperature distribution in a DI diesel engine by means of image analysis of mega-color photographs”, SAE paper NO 810183 , 1981.
  - 30) 한용택, 이기형 ; “이색법을 이용한 직분식 디젤 가시화 엔진내의 확산 화염 온도 및 매연 측정에 관한 연구”, Transactions of KSAE, Vol. 15, No. 1, pp. 177-185, 2007.
  - 31) 하종률 외 2명 ; “디젤엔진에서 이색법을 이용한 화염온도와 Soot의 계측기술에 관한 연구”, 대한기계학회논문집(B) 제 20권 제 9호, pp. 3007-3014, 1996.
  - 32) 조성용 외 3명 ; “이색법을 이용한 직접 분사식 디젤엔진의 화염 온도 및 Soot 분포 측정에 관한 실험적 연구”, 한국자동차공학회 1997년도 춘계학술대회, 97380050, 1997.
  - 33) 정수훈 외 2명 ; “이색법을 이용한 직접 분사식 디젤엔진의 화염 온도 및 Soot 분포 측정에 관한 실험적 연구(II)”, 한국자동차공학회 1999년도 춘계학술대회, 99380045, 1999.
  - 34) 정용일, 이경태 ; “디젤엔진 연소 해석을 위한 이색법의 특성해석”, 한국자동차공학회 1993년도 추계학술대회, 933890, 1993.
  - 35) 이태원 외 2명 ; “이색법을 이용한 화염온도와 soot 생성과의 관계 연구”, 대한기계학회, 95년도 추계학술대회논문집(II) pp. 728-732, KSME

- 95F304, 1995.
- 36) 이원남 ; “매연 및 온도 분포에 따른 이색법 확산화염 온도의 오차”, 단국대 산업기술연구, 제 3권, pp. 63-74
  - 37) 권남진 외 3명 ; “이색법을 이용한 직분식 디젤엔진의 화염온도분포 측정”, 한국자동차공학회 1996년도 춘계학술대회, 96380107, 1996.
  - 38) 한용택, 이기형 ; “고속카메라를 이용한 디젤엔진내의 화염 가시화, 화염의 온도 및 매연 측정에 관한 연구”, 대한기계학회논문집 B권, 제 31권 제2호, pp. 132-140, 2007.
  - 39) 광상모 : “직분식 디젤기관의 전자 분사계의 광검출기 이용에 관한 연구”부경대 석사 학위논문, 1999.
  - 40) 광두영, “LabVIEW 컴퓨터기반의 제어와 계측 Solution”, OHM사, 2002.
  - 41) 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.
  - 42) 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.
  - 43) 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.
  - 44) Dale R. Tree, John E. Dec, “Extinction Measurements of In-Cylinder Soot Deposition in a Heavy-Duty DI Diesel Engine”, SAE, 2001-01-1296.
  - 45) Park, C. and Appleton, J.P., “Shock Tube Measurements of Soot Oxidation Rates”, Combustion and Flame, Vol.20, pp. 396~379, 1973.
  - 46) 고대권, “부경대학교 기계공학부 기계시스템공학전공 단기기술강좌 -LabVIEW를 이용한 내연기관 연소압력 계측”, BK21 지역선도형 기계산업인력육성사업단 기계시스템산업인력육성사업팀, 2003.
  - 47) 고대권 외 2명, “PXI와 LabVIEW를 이용한 디젤기관 연소압력의 계측 및 분석”, 한국동력기계공학회지, 제7권, 제3호, pp. 5~11, 2003

- 48) 안수길 외 3명, “PXI와 LabVIEW를 이용한 디젤기관 연소압력의 온라인 분석”, 한국동력기계공학회, 2003년 춘계학술대회논문집, pp. 74~79, 2003.
- 49) Paul C. Miles, “The Influence of Swirl on HSDI Diesel Combustion at Moderate Speed and Load”, SAE, 2000-01-1829.
- 50) Paul C. Miles, “The Influence of Swirl on HSDI Diesel Combustion at Moderate Speed and Load”, SAE, 2000-01-1829.
- 51) 유경현 외 2명, “디젤기관에서 바이오디젤유 사용 시 기관성능 및 배기배출물 특성에 미치는 분사시기의 영향”, 한국자동차공학회, 2002년 추계학술대회논문집, pp. 216~221, 2002.
- 52) 山根 洗二 외 2명, “直接噴射式バイオディーゼル燃料機関の燃焼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.
- 53) 김명수 외 4명, “폐식용유와 경유의 혼합유 사용에 의한 농업용 디젤기관의 성능”, 한국동력기계공학회, 2002년 춘계학술대회논문집, pp. 27~32, 2002.
- 54) 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.

## 감 사 의 글

본 논문의 완성이 있기까지 나 혼자만의 노력으로 이루어진 것은 아닌 것 같다. 한 과정을 완성한 성취감보다 감사해야겠다는 생각이 먼저 든다.

남들보다 늦은 나이에 시작할 수 있도록 용기를 주시고, 이끌어 주신 안수길 교수님, 그리고 학과의 여러 교수님들께 감사의 말씀을 드립니다.

퇴근 후의 늦은 시간과 휴일의 실험에 많은 도움을 준 강희영, 김경현, 정석호, 조규학, 도현철, 지상원 등의 후배님들께도 감사의 말씀을 드립니다.

내 몫을 다 할 수 없었음에도 배려해주고 격려해준 동료들에게도 감사합니다.

열심히 노력할 수 있도록 힘을 준 내 주변 가족들과 친지들에게도 감사합니다.

끝으로, 모자란 아들, 남편, 아빠를 참아주고 기다려준, 내 사랑하는 어머니, 아내 이덕희씨와 두 딸들 김아롱, 누리에게 이 논문을 바친다.