

<논 문> SAE NO. 943733

디젤기관에서의 어유의 연소특성과 기관성능에 관한 연구

A Study on the Engine Performance and Combustion Characteristics of Fish Oil in a Diesel Engine

서 정 주,* 왕 우 경,* 안 수 길**
J. J. Suh, W. K. Wang, S. K. Ahn

ABSTRACT

The engine performance and combustion characteristics of diesel oil and fish oil blended with diesel oils were investigated at various blending rate of fish oil in a diesel engine. The maximum pressure showed no significant difference among test fuels at low load, but it was higher as the blending rate of fish oil increases at high load. Increasing the blending rate of fish oil, the rate of heat release and burned fraction were higher than those of diesel oil. The ignition delay became longer than that of diesel oil as the blending rate of fish oil increases, and its difference were larger at different loads. The combustion duration and density of smoke were shorter and lower as the blending rate of fish oil increases. The rate of fuel consumption showed no significant difference between diesel oil and fish oil blended with diesel oils.

주요기술용어 : Fish Oil Blanded with Diesel Oils(어유혼합유), Rate of Heat Release(열발생율), Ignition Delay(착화지연), Pre-mixed Burned Fraction(예혼합연소분율), Smoke Density in Exhaust Gas(배기연농도), Pre-combustion Chamber(예연소실)

1. 서 론

최근 에너지자원 고갈의 위기와 함께 대기오염이 심각한 문제로 대두됨에 따라 대체에너지 및 에너지 절약기술개발에 대한 연구가 국내외적으로 활발하게 진행되고 있다. 내연기관용 대체연료에 대한 연구로는 알콜,¹⁻³⁾ 천연가스, 수소 및 식물유⁴⁻⁶⁾ 등이 있으나 매탄올이나 식물유를 제외하면 거의 자동차용 가솔린의 대체연료를

중심으로 이루어지고 있다.

본 연구에서 시험대상으로 하는 어유(fish oil)는 어류 가공시에 부산물로 생산되는 것으로서 종래에는 어선에서 보일러의 중유대체연료⁷⁾로 사용이 되어 왔다. 최근에는 디젤기관용 대체연료로 이용하려는 움직임이 있으며 실제 어선용 디젤기관에 사용하여 그 연소가능성을 시험한 예⁷⁻⁹⁾가 있다. 어유의 주요 구성원소는 석유계 연료와는 달리 탄소, 수소외에 산소를 다소 함유한

* 정회원, 여수수산대학교 기관공학과, 실습선

** 정회원, 부산수산대학교, 공과대학 기관공학과

20여종의 지방산으로 구성되어 있고 이중 분자량이 적고 비교적 연소하기 쉬운 포화지방산이 약 30%, 이중결합을 포함한 불포화지방산이 약 70% 정도로 되어 있다. 경유에 비해 비중, 동점도 및 인화점이 높고 발열량이 낮은 것이 특징이다.⁽⁶⁾ 또한 어유는 어류의 자원이 고갈되지 않는 한 생산이 계속 가능하므로 장기적으로 공급될 수 있고 발열량도 중유와 비슷하므로 대젤기관용 대체연료로서 그 이용 가치가 충분히 있다고 생각된다. 그러나 디젤기관의 연소특성이나 기관 성능에 관한 연구는 지금까지 주로 석유계 연료를 중심으로 연구되어 왔으며 어유에 대해서는 아직 미흡하고 불명확한 점이 많기 때문에 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다고 본다. 따라서 본 연구에서는 디젤기관용 대체연료로서 정어리유(sardine oil)를 경유와 혼합한 어유혼합유(fish oil blended with diesel oils)를 소형선박용 예연소실식 디젤기관에 사용하여 어유의 혼합비율에 따른 기관성능과 연소특성을 기존의 경유와 비교 검토 하였다.

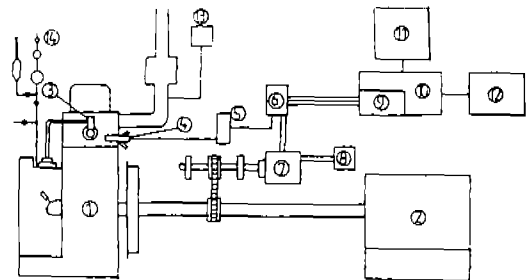
2. 실험장치 및 방법

Fig.1은 실험장치의 개략도로서 그 주요부분은 실험기관, 전기동력계, 데이터 수집장치, 연료소비율측정장치 및 스모크미터로 구성되어 있다. 본 실험에 사용된 기관은 소형 선박용 예연소실식 4행정 디젤기관으로 Table 1은 기관의 제원을 나타낸다.

실린더내 변동압력은 예연소실에 설치된 스트레인 게이지식 압력변환기(PE-200KS)에서 전기적 신호로 바뀌어 증폭기에서 증폭된 후 A/D 변환기(A/D conversion time : 5ms, 12bit resolu-

tion)에서 디지털신호로 변환되어 컴퓨터에 저장된다. 데이터 수집은 1사이클에 720개의 압력데이터를 20회 연속 수집하여, 이들 압력데이터를 평균하였다. 기관의 토크는 전기동력계로 측정하였고, 기관회전수는 디지털 타코미터를 이용하여 측정하였으며, 그을음(Soot) 농도는 보쉬(Bosch)식 스모크미터로 측정하여 그 오염 정도를 %로 표시하였다. 연료소비율은 뷰렛에 들어 있는 35cc의 연료가 모두 소모되는에 요하는 시간을 측정하여 계산하였다.

운전조건은 본 실험기관의 연속최대출력(1500 rpm, 20ft-lbs, 5.8ps)을 4/4 부하로 하고, 박용부하 특성식에 의해 각 부하에서의 회전수를 구한 다음, 각각의 부하에 맞게 토크를 결정하였다. Table 2는 실험조건을 나타내며, 연료분사밸브의 분사압력은 11.76MPa, 분사시작점은 상사점전 16도, 냉각수 출구온도는 60±2°C로 유지하였다. 또 피



- ① Diesel engine
- ② Dynamometer
- ③ Fuel injection valve
- ④ Pressure transducer
- ⑤ Strain amplifier
- ⑥ Terminal
- ⑦ Rotary encoder
- ⑧ D.C power regulator
- ⑨ A.D converter
- ⑩ Computer
- ⑪ Monitor
- ⑫ Printer
- ⑬ Soot analyzer
- ⑭ Burette

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Test engine specifications

Model	Jam-10
Number of cylinder	1
Combustion chamber	Pre-combustion chamber
Bore × Stroke	96 × 105mm
Rated output	5.8ps/1500rpm
Compression ratio	18 : 1

Table 2 Experimental condition of engine

Load	1/4	1/2	3/4	4/4
RPM	939	1202	1363	1500
Torque(ft-lb)	8	12.5	16.5	20
Output(Ps)	1.45	2.9	4.35	5.8

Table 3 Specification of diesel oil and sardine oil

Specification	Diesel Oil	Sardine Oil
Specific gravity(15/4°C)	0.8585	0.9042
Flash point(°C)	73	232
Kinematic viscosity(30°C, cSt)	3.8	27.3
Residual carbon(wt, %)	0.81	1.51
Pour point(°C)	-7.5	2.5
Net calorific value(J/g)	42,776	36,288

Table 4 Results of proximate and ultimate analysis for diesel oil and sardine oil

Test fuels	Proximate analysis(wt%)				Ultimate analysis(wt%)				
	Moisture	Volatile matter	Fixed carbon	Ash	C	H	N	S	O
Diesel oil	0.008	21.13	78.31	0.56	85.1	13.1	0.2	0.3	0.592
Sardine oil	Trace	1.31	98.61	0.08	76.2	11.7	0.428	Trace	11.48

스턴 상사점과 로터리 엔코더(TRD-S360-RE)의 "Z" 펄스(TDC 감지용)를 일치시키기 위하여 기관을 모터링 상태로 운전하여 최고압축압력이 "Z" 펄스 상에 나타나도록 하여 데이터 수집의 시작점으로 하였다. 시료유는 순수 경유와 경유에 정어리유를 중량비로 20, 40, 60 및 80%로 혼합한 혼합유를 사용하였으며, Table 3, 4는 경유와 정어리유의 물성치와 공업 및 원소분석치의 결과를 각각 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1 연소특성

3.1.1 연소압력

Fig 2는 저부하(1/4) 및 고부하(4/4)에 있어서 경유와 혼합유의 예연소실내의 크랭크각도에 대한 연소압력(P-θ)변화를 나타낸다. Fig 2(a)의 저부하에서는 경유와 혼합유의 최고압력은 큰 차이

가 없으나 그 위치는 어유의 혼합비율이 증가함에 따라 순수 경유에 비해 혼합유가 크랭크 각도로 약간 늦게 나타나고 있다.

이것은 저부하에서 경유에 비해 혼합유의 착화 지연이 크게됨에 따라 착화시기가 늦게될 뿐 아니라 점도가 높고 휘발성이 떨어지므로 착화 지연이 큰 만큼 혼합기 형성량이 증가하지 않는 것으로 생각된다. 또한 압축행정중의 주연소실에서 예연소실로 유입하는 공기의 속도는 상사점전 10-20도에서 최대가 된다⁽¹⁰⁾는 점으로 볼때 상사점전 20도 이후는 주연소실내의 압력은 점차 저하하는 반면 예연소실에서는 상승하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 경유에 비해 혼합유의 어유 혼합비율이 높을수록 착화지연이 크기 때문에 예연소실에서 착화가 개시된 이후는 주연소실과 예연소실과의 압력차가 크게 되어 주연소실로 유입하는 가스량이 증가하기 때문으로 생각된다.

Fig 2(b)의 고부하에서는 어유의 혼합비율이

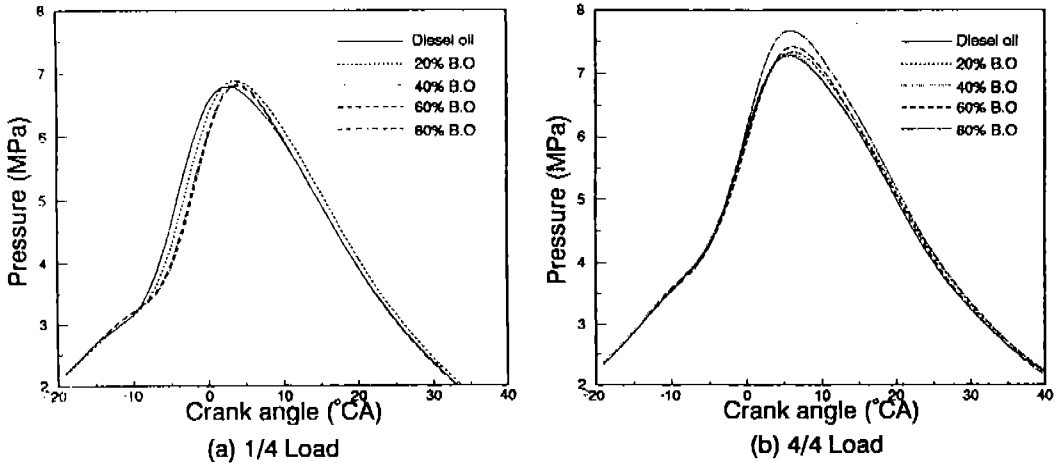


Fig.2 P-θ diagram of test fuel oils at low and high loads

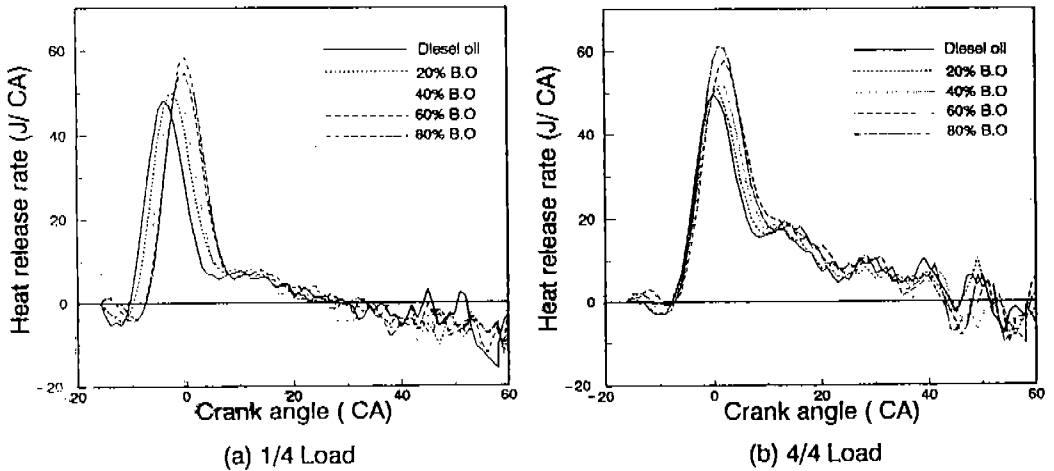


Fig.3 Rate of heat release diagram of test fuel oils at low and high loads

증가할 수록 최고압력은 다소 높아지나 그 위치와 연소압력선은 크랭크 각도상 비슷하게 나타났다. 大八木⁽¹¹⁾에 의하면 고부하에서는 착화지연기간 중의 분사유량이 많고 연소실내의 온도가 높기 때문에 착화시의 혼합기량과 착화점에서 최고압력점까지에 형성되는 혼합기량과의 전체혼합기량이 증가하여 최고압력점까지의 연소량이 증가한다고 하였다.

고온의 고부하에서 경유는 착화지연기간중에 형성된 혼합기가 대부분을 차지하는 반면 혼합유는 어유혼합비율이 높을 수록 착화점에서 최고압력점까지에 어유의 증발로 형성되는 혼합기

량이 증가되고, 예연소실에서 착화가 일어날 때의 주연소실과 예연소시로가의 압력차가 거의 없기 때문에 최고압력이 높게 나타나는 것으로 생각된다.

경유와 혼합유간에 최고압력의 위치와 연소압력선이 비슷하게 나타나는 것은 고부하에서는 연소실내의 온도와 압력이 높으므로 착화지연의 차이가 거의 없기 때문으로 생각된다.

3.1.2 열발생을 및 연소분율

저부하 및 고부하에 있어서 경유와 혼합유의 예연소실내에서의 크랭크 각도에 대한 열발생율 ($dQ/d\theta$) 선도를 Fig.3에 각각 나타낸다. 그림에

의하면 (a)의 저부하에서 분사직후의 흡열반응 유형을 보면 경유에 비해 혼합유는 어유혼합비율이 높을수록 흡열량이 적고 그 시기도 크랭크 각도로 늦게 나타나고, 착화이후의 열발생시기도 어유혼합비율이 높을수록 늦고 최고열발생율은 크게 나타났다.

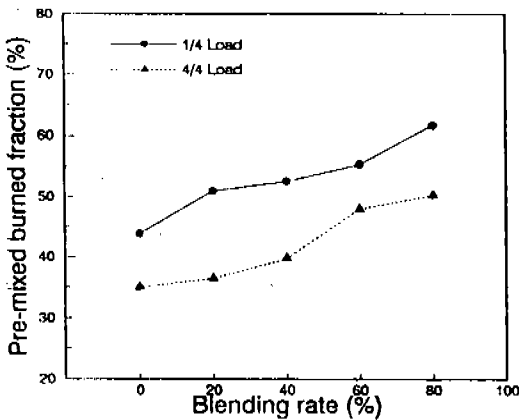
이것은 경유에 비해 혼합유는 점도가 높고 휘발분의 함량이 적기 때문에 증발량이 적고, 착화지연기간이 길어 착화시기가 늦어지기 때문으로 생각된다. 착화이후의 최고열발생율이 경유보다 어유혼합비율이 높은 혼합유일수록 크게 나타나는 것은 3.1.1의 연소압력에서 언급한 바와 같이 최고압력점까지에 형성되는 혼합기량이 경유보다 어유혼합비율이 높은 혼합유가 많은 데에 기인한다고 생각된다. 또 저부하에서 경유의 착화지연은 혼합유에 비하여 크게 짧기 때문에 착화후의 유립은 화염속으로 분사되므로 산소농도가 부족하여⁽¹⁰⁾ 연소가 억제되는 반면 혼합유는 어유중의 산소작용으로 연소가 촉진되는 것으로 생각된다.

(b)의 고부하의 경우 60% 및 80% 혼합유는 분사초기부터 발열반응을 보이다가 뒤늦게 미소한 흡열반응을 나타내고, 착화이후의 열발생시기는 각 시료간에 비슷한 경향을 나타내는 반면 어유의 혼합비율이 증가함에 따라 초기연소기간이 크랭크각도상 늦게 되고 최고열발생율은 역

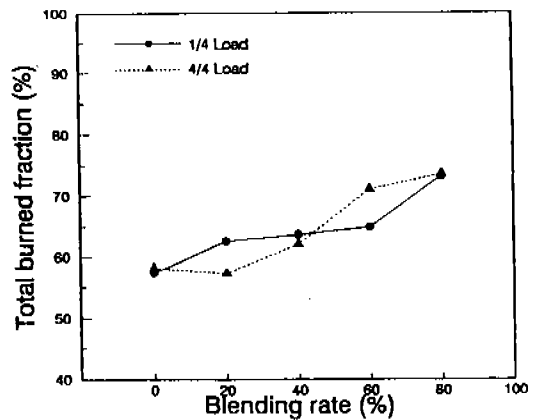
시 크게 나타났다.

이것은 저부하에 비해 고부하에서는 착화지연기간이 극히 짧아 60% 및 80% 혼합유중의 경유분의 증발에 의한 흡열량보다 압축열에 의한 영향이 크기 때문으로 생각된다. 착화이후는 고부하에서의 착화지연기간이 경유와 혼합유간에 큰 차이가 없고, 어유분의 계속적인 증발과 동시에 연소가 일어나는 소위 확산연소가 일부 이루어 짐으로서 연소가 지연되기 때문이라 생각된다.

Fig.4는 예연소실내에서의 저부하 및 고부하 상태에서 어유의 혼합비율에 따른 예혼합연소분율(Pre-mixed burned fraction)과 전연소분율(Total burned fraction)의 변화를 각각 나타낸다. 그림에서와 같이 저부하와 고부하 모두 경유에 비해 어유혼합비율이 증가할수록 예혼합연소분율과 전연소분율이 증가하고, 예혼합연소분율은 고부하시보다 저부하때가 크게 되고 어유혼합비율에 대한 전연소분율의 변화율은 저부하시보다 고부하때가 크게 나타나는데 이러한 현상은 열발생율에서 나타난 유형의 원인으로부터 기인되고, 고부하시보다 저부하에서 예혼합연소분율이 크게 나타나는 이유는 저부하시는 분사유량이 적고 착화지연기간이 길기 때문에 최고압력점까지에 형성되는 혼합기가 분사유량의 대부분을 차지하고 있음을 열발생율선도에서 알 수가 있다.



(a) Pre-mixed burned fraction



(b) Total burned fraction

Fig.4 Variation of pre-mixed and total burned fraction with blending rate of fish oil at low and high loads

3.1.3 착화지연

착화지연을 정의하는 방법에는 여러가지가 있으나 본 연구에서는 Fig.3의 열발생율선도에서 분사시작점의 열발생율이 0이 되는 지점부터 분사후 분무의 증발로 인해 흡열반응을 거쳐 열발생율이 다시 0으로 회복되는 지점(착화점)까지의 시간으로 정의하였다.

Fig.5는 각 부하에 있어서 경유와 혼합유의 착화지연기간의 변화를 나타낸 것으로, 동일부하에서는 어유의 혼합비율이 증가할 수록 착화지연이 크게되고 부하가 증가함에 따라 혼합비율에 따른 착화지연의 차이는 작게 나타났다.

이것은 경유에 비하여 어유는 점도가 높고 휘발성이 떨어지므로 혼합기 형성에 필요한 가열과 증발에 요하는 시간이 길어지고 어유의 고분자구조가 화학적으로 분해되는 시간도 함께 길어지기 때문이다.⁽⁴⁾ 특히 저부하의 저온저압분위기 중에서 어유의 혼합비율이 증가되면 어유의 물리적 및 화학적 성질이 강하게 작용하여 착화지연에 미치는 영향은 더욱 크게될 것으로 본다.

서⁽¹²⁾등의 정용연소장치에 의한 어유의 착화지연에 관한 보고에 의하면 일정압력하에서 온도를 변화시켰을때 773K를 경계로 하여 저온 및 고온부로 나누어 지고, 고온부에 비하여 저온부에서 착화지연의 온도의존성이 크게 나타난 것으로 보아 저온의 저부하에서의 어유의 혼합비율이 증가할 수록 착화지연의 변화율이 크게 됨을 알 수 있다.

그러나 藤本⁽¹³⁾과 池上⁽¹⁴⁾등의 정용연소장치 및 급속압축장치를 이용한 연구에서는 온도와 압력이 어느 일정치를 초월하면 착화지연은 거의 변화하지 않는다고 지적하였으며, 이것은 결국 고부하의 고온고압하에서의 착화지연은 주로 물리적 과정에서 지배되고 온도와 압력의존성이 모두 작게 된다고 볼 수 있다. 본 실험의 결과에서도 고부하에서는 어유의 혼합비율에 크게 영향을 받지 않고 경유와 혼합유의 착화지연에는 큰 차이가 없었다.

3.1.4 연소기간

각 부하에 있어서 어유의 혼합비율에 따른 연소기간의 변화를 Fig.6에 나타내며, 여기서 연소

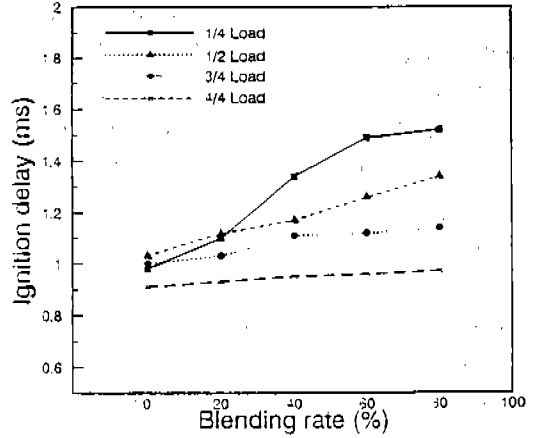


Fig.5 Variation of ignition delay with blending rate of fish oil at different loads

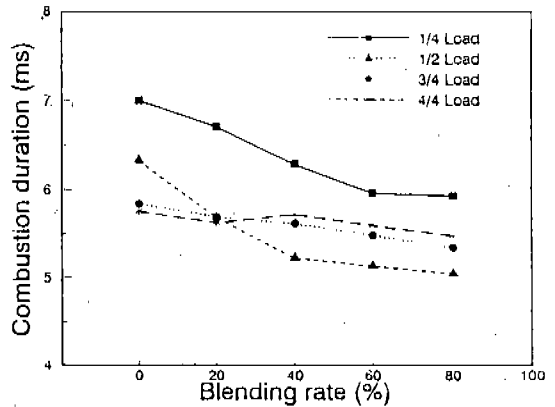


Fig.6 Variation of combustion duration with blending rate of fish oil at different loads

기간이란 Fig.3의 열발생율선도에서 정의된 착화점으로부터 착화후의 발열과정을 거쳐 열발생율이 다시 0으로 되는 지점(연소끝점)까지의 시간으로 정의 하였다.

그림에 의하면 각 부하에서 어유의 혼합비율이 증가할 수록 연소기간이 짧아지는 경향이고 특히 저부하에서 그 영향이 현저하며, 고부하에서는 각 시료간의 차이는 크지 않았다. 이러한 원인은 원소분석에 의하여 계산한 경유의 이론적 공기량이 약 11Nm³/kg에 비하여 정어리유의 경우는 약 9.5Nm³/kg으로서, 일정 흡기량에 대하여 이

론적 공기량은 경유에 비해 어유가 적기 때문에 결과적으로 공기과잉율은 어유가 크고, 또한 착화후의 연소과정중 어유중의 산소의 작용으로 연소가 촉진되는 것으로 생각된다.

그러나 경유는 어유에 비하여 착화지연이 짧기 때문에 유압이 노즐을 나오는 즉시 착화하여 노즐근처에서 연소하고 후속의 유압은 화염속으로 분사되므로 산소의 농도 부족으로 연소가 억제되기 때문이다.

저부하에서 연소기간이 길게 나타나는 것은 저온저압의 분위기 중에서는 공기과잉율이 크게 증가하여 사이클중의 연소온도가 저하됨으로서 연소반응속도가 지연되고, 특히 저부하에서의 경유의 착화지연이 혼합유에 비해 크게 짧기 때문으로 생각된다.

3.2 기관성능

3.2.1 그을음(Soot) 농도

Fig.7은 각 부하에 있어서 어유혼합비율에 따른 배기가스중의 그을음 농도변화를 나타낸 것이며, 고부하에서 저부하로 갈수록, 또한 동일 부하에서는 어유의 혼합비율이 증가함에 따라 그을음 농도는 낮게 나타났다.

디젤기관의 그을음 생성원인은 아직 정확히 규명된 바는 없으나, 長尾⁽¹⁰⁾와 大八木⁽¹¹⁾에 의하

면 공기량이 부족할 때나 공기량이 충분하더라도 연소실내의 공간적 및 시간적으로 산소가 부족한 부분이 있을때 또는 화염의 온도를 저하시키는 요인에서는 탄소립을 증가시킨다고 보고 하였다.

고부하가 될수록 연료의 매회 분사유량은 증가하는 반면 공기과잉율은 감소하고, 압축행정중 주연소실에서 예연소실로 유입하는 공기의 속도가 최대가 되는 상사점전 10-20도에서 연료가 분사됨으로서 결국 고부하의 경우, 예연소실내에서는 공기가 부족한 상태로 되어 그을음이 증가하는 것으로 생각된다. 또한 고부하는 착화지연이 짧기 때문에 착화후의 유압에 의한 화염의 냉각작용이 크게 되므로 탄소립의 연소를 저해시키는 것도 하나의 요인이라 생각된다.

동일부하에서는 일정한 흡기량에 대하여 경유에 비하여 어유의 혼합비율이 높을수록 공기과잉율이 크게 되는 이유와 어유중의 산소가 완전연소에 기여하는 것으로 생각할 수 있다.

3.2.2 연료소비율

각 부하에 있어서 어유혼합비율에 따른 연료소비율의 변화를 Fig.8에 나타 냈으며, 그림에서 연료소비율은 동일부하에서는 어유혼합비율에 관계없이 거의 비슷한 경향이고 고부하로 갈수록 연료소비율은 현저히 감소함을 알 수 있다.

동일부하에서 각 시료유가 비슷한 소비율을

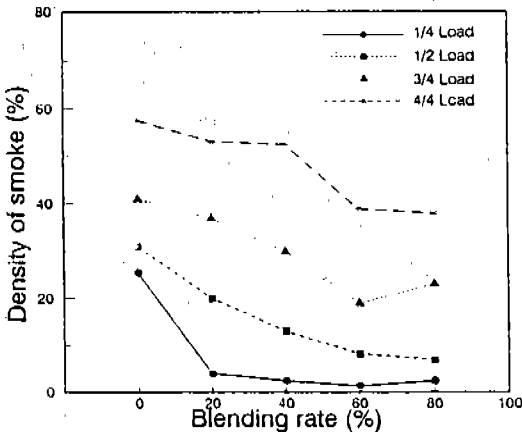


Fig.7 Variation of smoke density in exhaust gas with blending rate of fish oil at different loads

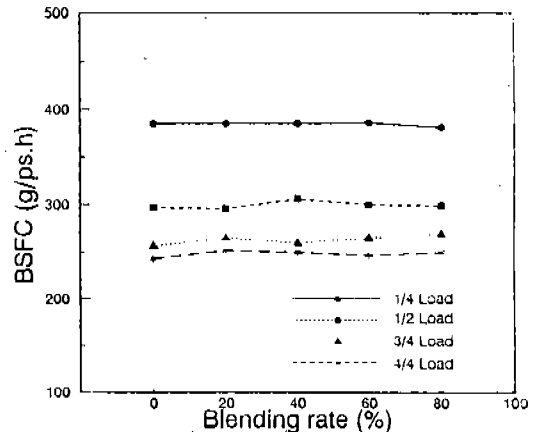


Fig.8 Variation of fuel consumption rate with blending rate of fish oil at different loads

보이는 것은 어유의 발열량이 경유보다 낮음에도 소비율이 비슷하다는 것은 결과적으로 어유혼합비율이 증가할수록 열효율이 좋다는 의미가 된다. 이러한 원인은 어유혼합비율이 증가할수록 연소기간이 짧고 또 합산소량의 증가로 연소율이 높아지기 때문이라 생각되며, 飯本⁽⁴⁾의 채종유 실험에 대한 연구 결과와도 일치한다.

3.2.3 배기가스온도

Fig.9는 각 부하에 있어서 어유혼합비율에 따른 배기가스의 온도변화를 나타낸 것으로, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 저부하에서 고부하로 됨에 따라 배기가스온도가 상승하고, 또한 동일부하 조건에서는 어유의 혼합비율이 증가함에 따라 다소 감소 하였다.

일반적으로 고부하에서는 연료의 분사량이 많고 분사기간도 길어지는 반면 공기과잉율이 감소하여 사이클 전체의 연소가스온도가 높게 된다. 또한 고부하에서는 저부하시 보다 기관회전수가 고속이므로 연소속도도 크게 되지만, 기관회전수에 비례하여 증가하지 않기 때문에 상대적으로 연소기간은 단축되지 않는 점과 연소가스와 냉각수의 접촉시간 단축으로 인한 연소실벽으로의 냉각손실율이 감소되는 것도 배기온도의 상승요인이 된다고 생각된다.

동일부하에서 어유의 혼합비율이 증가함에 따

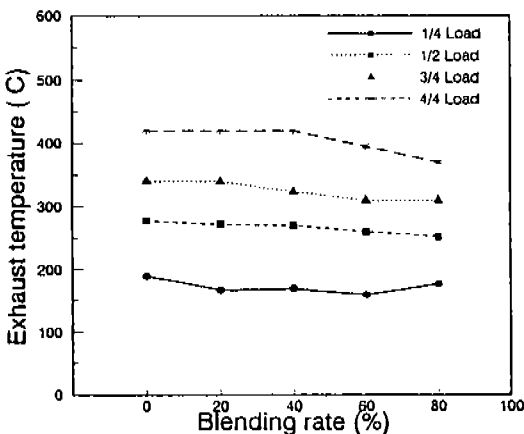


Fig.9 Variation of exhaust temperature with blending rate of fish oil at different loads

라 배기가스온도가 저하하는 것은 공기과잉율의 증가원인과 더불어 연소기간이 짧게 됨에 따라 팽창기간은 길게 되어 연소가스가 충분히 팽창한 결과라 생각된다.

4. 결 론

경유와 어유혼합유를 디젤기관에 사용하여 어유의 혼합비율에 따른 연소특성과 기관성능을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 최고압력은 저부하에서 거의 비슷하고 고부하에서는 어유의 혼합비율이 증가할수록 높게 나타났다.
- 2) 최고열발생율과 연소분율은 경유에 비해 어유의 혼합비율이 증가함에 따라 크게 나타났다.
- 3) 착화지연기간은 경유에 비해 어유혼합비율이 증가함에 따라 길고 각 부하간의 차이도 크게 나타났다.
- 4) 어유의 혼합비율의 증가함에 따라 연소기간이 짧게 되고 그을음농도는 낮으며 연료소비율은 경유와 혼합유가 비슷하게 나타났다.

참 고 문 헌

1. T. Murayama, N. Miyamoto and T. Yamada, "A Method to Improve the Solubility and Combustion Characteristics of Alcohol-Diesel Fuel Blends", SAE Paper, No.821113, 1982.
2. Dennis L. Siebers and C.F. Edwards, "Autoignition of Methanol Sprays under Diesel Engine Conditions", SAE Paper, No.870588, 1987.
3. 山田貴延 外 3名, "アルコール駆動ディーゼル機関に関する研究", 日本機械學會論文集, Vol. 49, No.441, pp.1087-1094, 1983.
4. 飯本光雄, "ナタネ油を燃料とした農用小型ディーゼル機関の運轉(III)", 日本農業機械學會誌, Vol.41, No.2, pp.201-206, 1976.
5. M. Ziejewski and H. Goettler, "Influence of Vegetable Oil Based Alternate Fuels Residue De-

- posits and Components Wear in a Diesel Engine", SAE Paper, No.860302, 1986.
6. M. Ziejewski and H. Goettler, "Comparative Analysis of the Long-Term Performance of a Diesel Engine on Vegetable Oil Based Alternate Fuels", SAE Paper, No.860301, 1986.
 7. 水沼達夫, "ディーゼル機関の魚油燃焼試験について", 漁船, No.271, pp.389-399, 1987.
 8. 長谷川 勝男 外 2名, "小型高速機関における魚油の燃焼", 日本舶用機関學會誌, Vol.25, No. 4, pp.29-35, 1990.
 9. 原 盡造 外 1名, "トルール漁船主機関における魚油とA重油の混合燃焼運轉について", 日本舶用機関學會誌, Vol.19, No.3, pp.50-61, 1984.
 10. 長尾不二夫, "内燃機關講義", 養賢堂, pp.229, 232, 292-296, 1986.
 11. 大八木 外 4名, "小形ディーゼル機関の性能特性 (I)", 内燃機関, Vol.29, No.370, pp.9-21, 1990.
 12. 서정주, 왕우경, 안수길, "정용연소장치에 의한 어유의 착화지연에 관한 연구", 한국자동차공학회논문집, 제1권, 1호, pp.50-58, 1993.
 13. 藤本 元 外 2名, "定容燃焼装置によるディーゼル機関の燃焼に関する研究", 日本機械學會論文集, Vol.45, No.392, pp.599-606, 1979.
 14. 池上 詢 外 3名, "急速壓縮装置によるディーゼル噴霧の着火漏れに関する研究", 日本機械學會論文集, Vol.53, No.485, pp.274-281, 1987.