

# 소형 어선용 디젤기관의 혼합연료유 연소에 관한 연구

高大權·安秀吉

釜山水産大學  
(1987년 4월 30일 접수)

## A Study on the Combustion of Blended Fuel Oil in a Diesel Engine for Small-sized Fishing Boat

Dae-Kwon Ko · Soo-Kil AHN

National Fisheries University of Pusan  
(Received April 30, 1987)

In this paper, an investigation of the property of blended fuel oil, combustion characteristics and engine performance was made, in case blended fuel oil(light oil+heavy oil) was used in a home-made precombustion diesel engine for small-sized fishing boat. The results may be summarized as follows :

1. The specific gravity was linearly increased in accordance with the increase in heavy oil ratio in blended fuel oil, and the relationship between viscosity and temperature was coincided with the formula of Walther-ASTM, and the CCAI, the ignition quality index, was increased nearly as a straight line of the gradient 1.0.

2. The ignition delay was slightly increased below 810 of CCAI (blending ratio to be 60% of heavy oil), but remarkably increased above 810 of CCAI.

Therefore, it was considered that the practicable value of CCAI, ignition quality of blended fuel oil, was more than 810.

3. The maximum combustion pressure was increased until blending ratio of heavy oil was raised up to 40%. On the contrary, it came to be decreased at that ratio, with smoke emissions remarkably increasing above 60%.

Therefore, it was found in this experiment that the best practicable limit of heavy oil blending ratio was around 50% for saving fuel costs with least smoke emissions.

### 서 론

70년대의 석유파동으로 인한 원유가격의 상승으로 어선의 경우는 전 운항비의 30%, 상선의 경우는 50% 정도가 연료비로 총당됨에 따라, 수산업계 및 해운업계는 심한 경영난에 부딪쳐 왔다. 이에 따라 연료비를 절감하는 문제가 최대의 과제로 되어, 상선의 경우 거의 대부분이 값이 싼 저질중유를 사용하게 되었다. 그러나 어선의 경우는 어로조건에 따라 기관부하의 변동이 심하므로, 거의 전부가 양질유인

경유에만 의존하고 있는 실정이며, 일부 외국의 중·대형 어선의 경우, 경유와 저질중유의 혼합사용을 시도하고 있으나,<sup>1,2)</sup> 소형 어선용 기관에 대해 시도한 예는 보기 드물다.

실제로 한국의 영세어민이 양식장이나 근해어업에 많이 사용하고 있는, 목선 및 FRP의 소형어선(7마력-60마력)의 거의 전부가 연료소비량이 많고, 경유를 사용하는 예연소실식 디젤기관을 사용하고 있다. 그러므로 영세어민의 소득증대에 조금이라도 기여할 수 있도록 기존 기관의 연료비 절감을 위하여, 저질중유와 경유의 혼합연료의 사용여부를 조사

할 필요가 있다고 생각한다.

따라서, 본 연구에서는 기존의 국산 소형어선용 예연소실식 디젤기관의 혼합연료유 사용에 따른 혼합연료유의 성질, 연소특성 및 기관성능에 대해 조사하였다.

### 실험장치 및 연료유

실험에 사용한 기관(중앙철공소에서 제작)은 소형 어선용 수냉 4행정 예연소실식 디젤기관으로, 그 제원은 Table 1과 같으며 실험장치의 개략도는 Fig. 1

Table 1. Engine specifications

|                        |                       |
|------------------------|-----------------------|
| Model                  | JAM-10                |
| Number of cylinder     | 1                     |
| Combustion chamber     | Precombustion chamber |
| Cylinder bore × stroke | 96 × 105 mm           |
| Rated output           | 5.8ps/1500 rpm        |
| Compression ratio      | 15 : 1                |
| Injection pressure     | 130kg/cm <sup>2</sup> |

1. Diesel engine
2. Electric dynamometer
3. Light oil tank
4. Slidacs
5. Thermostat
6. Blended fuel oil beaker
7. Fuel oil heater
8. Ignition timing detector
9. Cooling water inlet
10. Cooling water outlet from tank
11. Cooling water tank
12. Thermometer
13. Smoke meter
14. Piston position detector
15. Dynamic strain meter
16. Amplifier
17. Pressure differentiator
18. Signal transformer
19. Amplifier
20. Combustion analyzer
21. Digital storage oscilloscope
22. X-Y recorder
23. Fuel injection timing detector
24. Combustion pressure detector

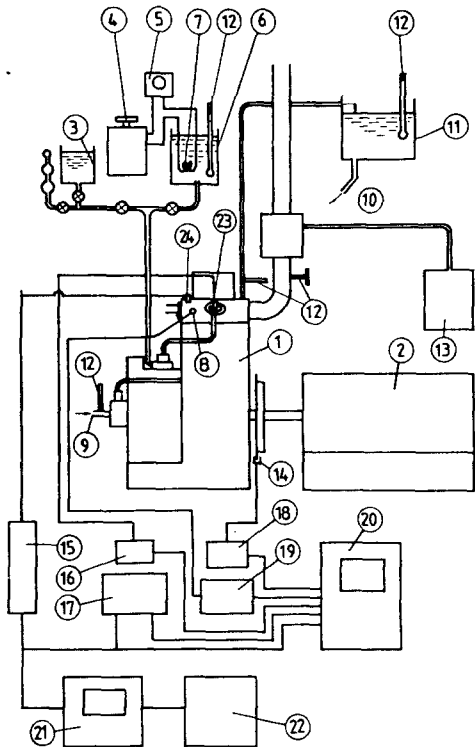


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

과 같고, 예연소실식 기관의 실린더 단면은 Fig. 2와 같다.

실험에 사용한 연료는 시판되고 있는 경유, B중유 및 이들의 혼합연료유이다. 혼합연료유는 경유에 B중유를 혼합하여 B중유의 중량비율을 20%씩 증가시킨 4종류와, 경유 및 B중유를 각각 0% 및 100% 혼합연료유로한 총 6가지이다. 이들 혼합연료유의 온도변화에 따른 비중, 점도특성을 조사한 결과는 Fig. 3, 4, 5와 같다.

### 실험 방법

Table 2와 같은 운전조건하의 연소특성 및 기관성능을 조사하기 위하여, 기관회전수와 출력은 속도조절 손잡이와 전기동력계로 조절하고, 혼합연료의 온도 및 냉각수 온도는 온도조절 heater에 의해 조절하였으며, 실험 및 계측방법은 다음과 같다.

먼저 기관을 경유로 시동하여, 경유탱크와 혼합연료유 비이커 사이에 설치된 밸브를 사용하여 혼합연료유로 전환한 후, 연료소비량을 계측하였다. 기관의 출력은 전기동력계로 측정하였고, 배기가스중의 그을음농도는 smoke meter로 측정하였다.

한편 Fig. 2에서와 같이, 예연소실에서의 연소압력은 strain gauge식 전기저압기, 연소압력의 차분

Table 2. Operating parameters of the engine

|   |  |
|---|--|
| Rate of blending(wt.)                           | 0% (light oil), 20%, 40%<br>60%, 80%, 100% (heavy oil) |
| Load  | 1500rpm/5.0ps<br>1500rpm/1.3ps<br>950rpm/1.3ps         |
| Fuel temperature at fuel beaker                 | 60°C(±2°C)   |
| Intake air temperature                          | 17°C(±2°C)   |
| Cooling water temperature at cooling water tank | 30°C(±2°C)   |

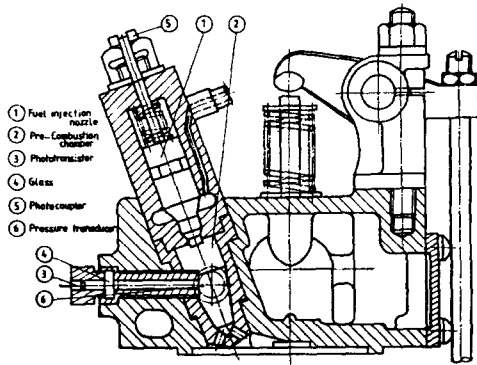


Fig. 2. Cross section of cylinder head.

값( $dp/d\theta$ )은 압력미분기로 검출하였으며, 연료분사 시기는 연료분사밸브의 needle valve 동작을 photocoupler로 검출하고, 착화시기는 예연소실에 부착한 관찰창에 의해 착화시 불꽃의 복사강도를 phototransistor로 검출하였다. 또한, 크랭크각도는 플라이휘일에 부착한 알루미늄판에 5도 간격으로 슬릿을 만들어 phototransistor로 검출하였다.

이와 같이 검출된 모든 신호들의 출력을 오실로스코프상에 나타내어 촬영하고, 예연소실에서의 연소 최고압력을 정확하게 측정하기 위하여, strain gauge 식 전기저압기로 검출한 신호를 digital storage oscilloscope에 입력시켜 X-Y recorder로 기록하였다.

### 실험결과 및 고찰

#### 1. 혼합연료유의 물리적 성질

연료유의 물리적 성질을 sensor에 의해 감지하여 최적운전이 되도록 연료분사제 및 흡기계를 전기적

으로 제어할 수 있는 유용한 수단이 되리라 생각되므로, 이하 혼합연료유의 물리적 성질에 대해 고찰한다.

#### (1) 비중: $r$

Fig.3은 혼합연료유의 혼합비율 및 온도변화에 따른 비중변화를 나타낸다. 혼합비율이 증가함에 따라 비중은 온도변화와 관계 없이 거의 같은 비율로 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

이는 혼합연료유의 비중( $r$ )은 다음과 같이 나타낼 수 있으므로,

$$r = (1-x)r_a + xr_b$$

$$= (r_b - r_a)x + r_a \quad (1)$$

단,  $r_a$ : 경유의 비중(15/4°C)

$r_b$ : B중유의 비중(15/4°C)

$x$ : 혼합연료유중의 B중유의 중량비율

식(1)에서와 같이 혼합연료유의 비중은, 혼합연료유중의 B중유의 중량비율이 증가함에 따라 선형적으로 증가하기 때문이다. 또한 B중유의 비중과 경유의 비중의 차( $r_b - r_a$ )는, 본 측정온도 범위에서는 경유 및 B중유의 온도변화에 따른 팽창계수변화의 차가 극히 작기 때문에 거의 같은 값을 갖는 것을 알 수 있다.

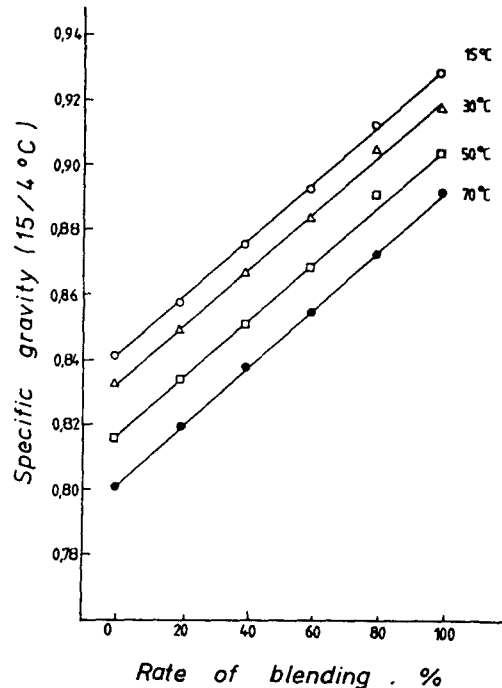


Fig. 3. Specific gravity versus blending ratio.

(2) 동점도:  $\nu$

Fig. 4는 혼합연료유의 혼합비율 및 온도변화에 따른 동점도의 변화를 나타낸다. 혼합비율이 증가함에 따라 동점도의 증가비율은 더욱더 증가하는 것을 알 수 있다.

혼합연료유의 동점도  $\nu$ 는 식(2)와 같이 나타낸다.<sup>3)</sup>

$$\log \nu = (1-n) \log \nu_a + n \log \nu_b \quad (2)$$

단,  $\nu_a$ : 경유의 동점도(cSt)

$\nu_b$ : B 중유의 동점도(cSt)

$n$ : 혼합연료유중의 B 중유의 체적비율

따라서, 식(2)와 같이 혼합비율이 증가함에 따라 B 중유의 점도가 혼합연료유의 점도에 미치는 영향이 크기 때문이다.

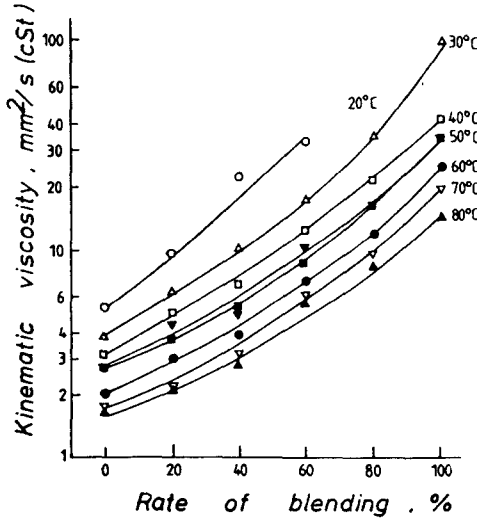


Fig. 4. Kinematic viscosity versus blending ratio.

Fig. 5는 혼합연료유의 점도와 온도관계를 나타낸다.

연료유의 점도와 온도관계는, 기관에 적합한 분사 점도를 조절하기 위한 연료유의 온도를 결정하거나, 적당한 연료유 이송점도를 조절하기 위한 온도 결정에 필요한 것으로, 일반적으로 Walther-ASTM의 식이 많이 이용된다.

$$\log \log(\nu + a) = b - m \log T \quad (3)$$

단,  $\nu$ : 연료유의 동점도(cSt)

$a, b, m$ : 상수

$T$ : 절대온도(°K)

식(3)에서 혼합연료유의 점도와 온도의 관계는,  $\log(\nu + a)$ 와  $\log T$ 의 좌표상에 직선으로 표시되며,

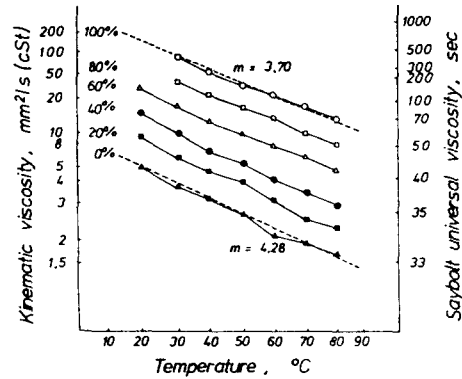


Fig. 5. Viscosity-temperature relationship of blended fuel oil.

상수  $m$ 은 직선의 기울기를 나타낸다. 그리고 상수  $a$ 는 1.5 cSt 이상에서는 0.6이므로, 본 실험에 사용한 혼합연료유는 위의 조건을 만족하므로 0.6으로 정하였다.

한편, 본 실험에서 구한 B 중유의  $m$  값은 3.70으로 이는 일본의 三菱技術에서 여러가지 중유의 측정 결과인  $m=3.77^{(4)}$ 과 거의 일치하였다. 또 경유의 경우는,  $m=4.28$ 로 온도의 변화에 따른 점도의 변화가 B 중유보다 큰 것을 알 수 있다.

(3) 착화성

연료유의 착화성은 기관의 시동성과 저부하 운전에 크게 영향을 끼칠 뿐 아니라, 착화지연에도 영향을 끼친다. 또한, 착화지연은 연소과정과 기계적 응력, 소음 및 배기성분에 영향을 준다.

디젤기관에 사용되는 연료유의 착화성을 나타내는 것에는 세탄가, 발화지수, 애닐린점, 디젤지수, 세탄지수 등 여러가지가 있지만, 이 지수들은 주로 경유에 관한 것이며, 착화성이 매우 낮은 중유의 착화성을 나타내기에는 적합하지 않다. 따라서 중유의 착화성을 나타내는 것으로, 최근 수정세탄가(MCN: Modified Cetane Number)와 계산탄소방향족지수(CCAI: Calculated Carbon Aromaticity Index)의 사용을 제안하고 있다.<sup>2)</sup>

수정세탄가(modified ASTM D613)방법은 측정장치가 고가이고 측정방법이 복잡하나, CCAI는 연료유의 밀도와 동점도만 측정하면 간단히 계산할 수 있는 편리한 방법으로, 연료유의 착화성은 방향족성과 반비례 관계가 있다는 것에 착안하여 다음 식으로 구한다.

$$CCAI = \rho - 141 \log \log(\nu + 0.85) - 81 \quad (4)$$

단,  $\rho$ : 밀도(비중)  $15/4^\circ\text{C}$ ,  $\text{kg}/\text{m}^3$   
 $\nu$ : 동점도  $50^\circ\text{C}$ ,  $\text{cSt}$ .

Fig. 6은 본 실험에 사용한 혼합연료유의 혼합비율에 따른 CCAI의 값을 나타낸다.

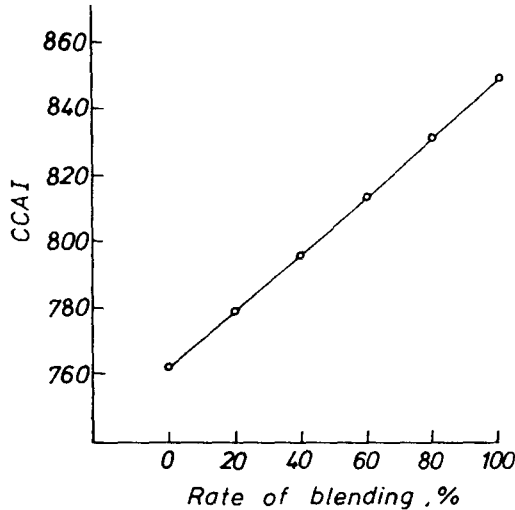


Fig. 6. Calculated carbon aromaticity index (CCAI) versus blending ratio.

## 2. 연소특성

### (1) 착화지연

디젤기관에서의 착화지연은 연소시작점을 결정하는 방법에 따라 압력상승 착화지연, 발광 착화지연, 온도상승 착화지연 등 여러가지로 정의할 수 있으나, 압력상승 착화지연 및 발광 착화지연이 많이 사용된다.<sup>5)</sup> 압력상승 착화지연은 연료의 연소실 분사 시작부터 (needle valve 상승시작점) 연소실의 연소 압력이 급상승하는 점까지의 시간 또는 크랭크 각도로 나타내며, 발광 착화지연은 연료분사 시작에서부터 연소에 의한 발광 시작점까지 걸린 시간으로 정의된다. 따라서 동일 조건에서 착화지연이 짧은 연료는 착화성이 양호한 연료로 생각할 수 있다.

Fig. 7은 운전조건과 혼합비율의 변화에 따른 압력상승 착화지연 및 발광 착화지연을, Fig. 8은 CCAI와 착화지연 관계를 나타낸다. Fig. 7에 의하면, 착화지연은 운전조건에 관계 없이 발광 착화지연 기간이 압력상승 착화지연 기간보다 짧아짐을 나타낸다. 이는 연소실내의 분무의 착화는 착화가능한 부분의 극소 연소에 의해 발광하지만, 압력상승이 일어날

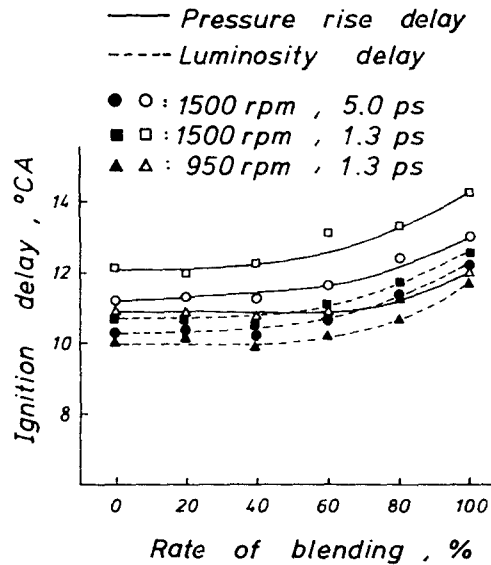


Fig. 7. Ignition delay of pressure rise and luminosity versus blending ratio.

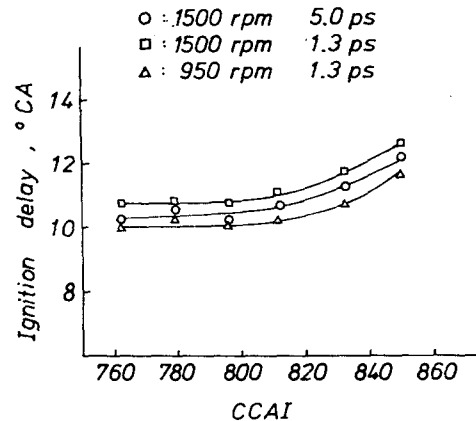


Fig. 8. Ignition delay versus calculated carbon aromaticity index (CCAI) of blended fuel oil.

정도의 연소가 시작될 때까지는 시간이 걸리기 때문이라고 생각한다. 또한, 혼합비율에 따른 착화지연은 혼합비율 60%까지는 미소한 증가현상을 보이나 60%를 넘으면 현저하게 증가함을 알 수 있다.

이와 같은 현상은 혼합비율의 60%까지는 혼합유 중의 저분자, 고휘발성인 경질유의 물리적·화학적 성질에 좌우되나, 혼합비율이 60%를 넘으면 중유의 물리적인 성질인 가연혼합기 형성에 필요한 증발시간이 증유합량에 따라 더욱 길어질 뿐 아니라 증유의 고분자 분자구조에 의한 화학적 발화지연이 더욱

갈어지기 때문이라 생각된다.

한편, Fig. 8의 CCAI 와 착화지연의 관계를 살펴 보면, CCAI 는 혼합비율의 증가에 따라 기울기 1.0 인 직선으로 증가하나, 착화지연은 CCAI 가 약 810 (혼합비율 : 60%)까지는 완만한 증가 현상을 보이고 CCAI 가 810이상에서는 급격한 증가 현상을 보이는 것을 보아, CCAI로 착화성을 나타내는 지표로서는 양질유보다 중질유의 착화성을 나타내는데 사용하는 것이 바람직한 것으로 생각된다.

(2) 연소최고압력 및 연소압력상승율

Fig. 9는 혼합비율의 변화에 따른 연소최고압력과 연소압력상승율 및 최고압력점과의 관계를 나타낸다. 연소최고압력은 혼합비율 40%까지는 증가하다가 그 이상이면 감소하는 현상을 나타내며, 연소최고압력 점은 저속·저부하(950rpm, 1.3ps)를 제외하고는 혼합비율 60%이상에서 급격히 증가함을 나타낸다. 이는 혼합비율 40%까지는 착화지연 및 연소최고압력 점이 일정이나, 연료온도 일정한 경우 혼합비율 40% 근방이 최적 점도에 의한 분무의 양호한 가연혼합기 형성으로 일정 분사량이 순간적으로 완전연소

하기 때문이라 생각된다. 이는 배기가스의 그을음농도에서 설명된다.

40%이후 혼합비율의 증가에 따라 연소최고압력이 감소하는 것은 착화지연과 연소지연이 따른 연소최고압력점이 늦게 나타나기 때문이라 생각된다.

한편, 압력상승율은 1500 rpm, 5.0 ps 에서는 혼합비율 40%까지는 증가하다가 감소하는 현상을 나타내나, 저속·저부하인 950 rpm, 1.3 ps 에서는 혼합비율에 따른 압력상승율의 변화가 거의 없으며, 1500 rpm, 1.3 ps 에서는 혼합비율의 증가에 따라 크게 감소함을 나타낸다. 이는 고속·고부하(1500 rpm, 5.0 ps)의 경우는 최고압력의 경우와 같이 설명되나, 저속·저부하(950 rpm, 1.3 ps)의 경우는 최고압력점이 나타내는 바와 같이 최고압력점의 변화가 작기 때문이라 생각되며, 고속·저부하(1500 rpm, 1.3 ps)의 경우는 혼합비율의 증가에 따라 최고압력점이 늦어져 착화지연이 크더라도 소량 분사에 대한 실린더 용적의 증가 때문에 압력상승율이 감소된 것으로 생각된다.

3. 기관성능

Fig. 10은 연료의 혼합비율의 변화에 따른 배기가스중의 그을음농도, 배기가스온도 및 연료소비율의 변화를 나타낸다. 배기가스온도와 연료소비율은 혼

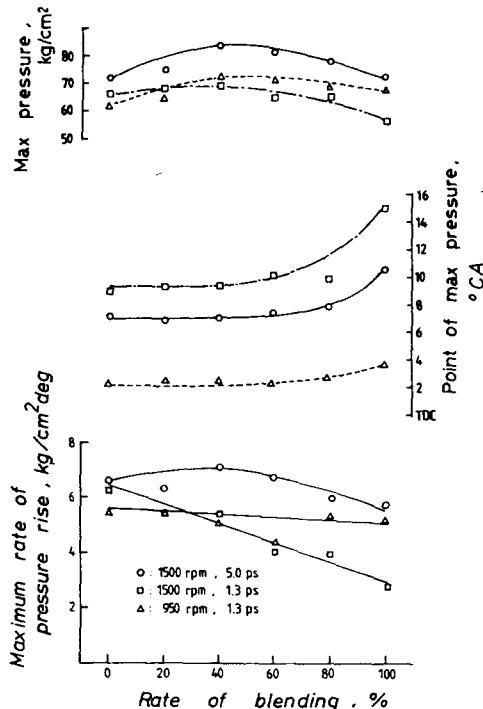


Fig. 9. Maximum combustion pressure, point of maximum pressure and maximum rate of pressure rise versus blending ratio.

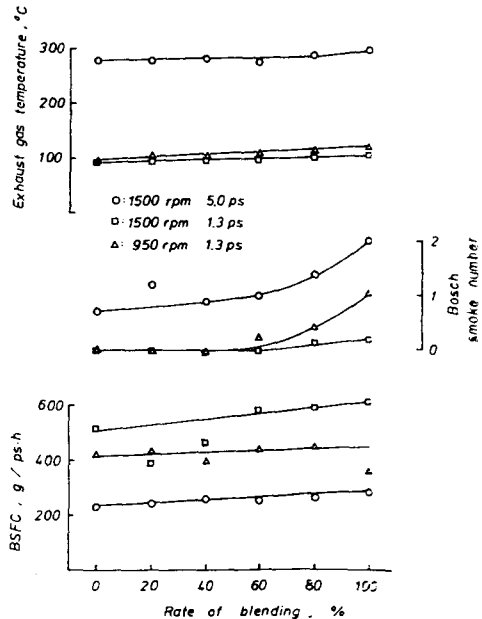


Fig. 10. Exhaust gas temperature, Bosch smoke number and BSFC versus blending ratio.

합비율의 증가에 따라 완만하게 선형적으로 증가하고 있으나, 배기가스 중의 그을음농도는 60%까지는 완만하게 증가하다가 60%를 초과하면 급작스럽게 증가함을 나타낸다.

부하에 따른 연료소비율은 1500rpm, 5.0ps에서 최소이나, 이때 그을음농도와 배기가스온도는 최대를 나타내고 있다. 이는 연료분사량의 증가로 연소실온도의 증가에 따른 착화지연이 짧아져 상사점 부근의 연소량이 많기 때문이며, 저속 저부하의 경우에도 착화점이 상사점 부근에서 일어나기 때문이라 생각된다.

혼합연료유 사용에 의한 연료비 절감 효과를 고찰해보면, 혼합연료유의 가격  $C_B$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.<sup>1)</sup>

$$C_b = C_A \left( 1 - \beta_b \left( 1 - \frac{C_B}{C_A} \right) \right) + Z \quad (5)$$

단,  $C_A$ : 경유의 리터당 가격  
 $C_B$ : B중유의 리터당 가격  
 $\beta_b$ : 체적 혼합비율  
 $Z$ : 혼합비용

가령, 혼합비율이 50%이고 경유 가격이 215.16원/l, B중유가격이 157.73원/l (물가자료 1987년 4월호 참조)이라면, 경유만을 사용할 때보다 57.43원/l의 연료비절감이 된다. 이는 5.0ps의 경우 50%혼합연료유 사용으로 인한 연료소비율 7% 증가에 의한 연료비 증가는 28.26원/l 이므로, 순수연료비 감소는 29.17원/l이 된다. 따라서 1년에 100kl의 연료를 사용한다면 2,917,000원의 절감 효과가 있다.

한편, 그을음농도는 혼합비율 60%이상에서 급상승하는 현상을 나타내므로, 무그을음 연료비 절감의 운전 혼합비율은, 본 실험에서 50%근방의 혼합비율이 타당한 것으로 생각된다.

디젤기관의 그을음 생성기구는 복잡하여 아직 확실하지 않으나, 일반적으로 산소가 부족한 고온·고압의 분위기 중에 탄화수소연료가 연소할 때 연료의 탈수소탄소의 중화반응에 의해 생성되나, 고온 분위기 중에 재연소되지 않고 배출되는 것을 그을음이라 정의하고 있다.

따라서, 혼합비율의 증가에 따른 고분자 탄화수소가 많을수록 또는 후연소 기간이 길수록 그을음 배출량이 많아진다. 또한 저속의 경우는 분사압력 저하에 의한 분무의 가연성 혼합기 형성 불량으로 국소적 혼합기 연소에 의해 동일마력의 고속시보다 그을음농도 및 배기가스온도가 높게 나타나는 것으로 생각된다.

일반적으로 배기가스에 포함된 그을음의 농도는, 일정량의 배기가스를 필터에 통과시킬 때 오염된 필터를 흡수반사식 smoke meter 로 측정한다. 필터에 흡수된 그을음에는 carbon 즉 soot 외에 미연 응축된 탄화수소도 일부 포함하므로 이를 particulate 그을음과 휘발분을 포함하지 않은 순수 carbon 인 soot 그을음으로 대별할 수 있다.

Bosch 그을음 농도와 질량농도와의 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.<sup>6)</sup>

$$\text{soot-smoke, } C = 581.4 \left[ \ln \left( \frac{10}{10 - B_n} \right) \right]^{1.413} \quad (6)$$

$$\text{particulate-smoke, } p = 565.0 \left[ \ln \left( \frac{10}{10 - B_n} \right) \right]^{1.206} \quad (7)$$

단,  $B_n$ : Bosch smoke number

따라서,  $B_n=2.0$ 일때  $C=69.827\text{mg/m}^3$ ,  $p=92.563\text{mg/m}^3$ ,  $B_n=1.0$ 이면  $C=24.183\text{mg/m}^3$ ,  $p=37.445\text{mg/m}^3$ 이므로,  $B_n$ 의 값이 작을수록 상대적으로 미연의 탄화수소 응축량이 많이 포함된 것으로 보아,  $B_n$  값이 낮으면 비교적 저온의 연소온도에서 생성된 그을음 배출물이라 생각된다.

## 요 약

국산 소형어선용 예연소실식 디젤기관에 혼합연료유(정유+중유)를 사용할 경우 혼합연료유의 성질, 연소특성 및 기관성능에 관하여 실험한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 혼합연료유의 혼합비율(중량비율)이 증가함에 따라 비중은 선형적으로 증가하였고, 점도-온도 곡선은 Walther-ASTM 식과 일치하였으며, 착화성지수인 CCAI의 값은 기율기 1.0에 가까운 직선으로 증가하였다.

2) 동일운전조건에서 착화지연은 CCAI의 값이 810(혼합비율 60%)까지는 미소하게 증가하였으나, 그 이상의 값에서는 현저하게 증가하였다.

따라서, 혼합연료유의 착화성을 나타내는 CCAI의 값은 810 이상에서 적용하는 것이 타당하다.

3) 연소최고압력은 혼합비율 40%까지 증가하다가 감소하였으며, 그을음농도는 60%부터 현저하게 증가하였으므로, 본 실험에서 무그을음 연료비절감의 안전운전 혼합비율은 50%가 적당하다.

문 헌

1. 小田健一(1985) : 漁船エンジンにおける低質燃料の使用について, 日本船用機関學會誌, 20卷 1號, p.40-45.
2. F.J.Thomas et al. (1984) : Medium-speed Diesel Engines : Part I -Design Trends and the Use of Residual/Blended Fuels, Trans. ASME, vol 106, p.860-878.
3. 村山 正 等 (1986) : ディーゼル機関における植  
物油の利用に関する研究, 内燃機関, 25卷 1號,  
p.9-15.
4. 田大熙(1982) : 燃料과 燃燒의 管理, 韓國海洋大學 海事圖書出版部, p.37.
5. Naeim A. Henein(1976) : Analysis of Pollutant Formation and Control and Fuel Economy in Diesel Engines, Prog. Energy Combust. Sci., vol.1, p.165-207.
6. A.C. Alkidas(1984) : Relationships Between Smoke Measurements and Particulate Measurements, SAE Paper 820082.