Tier 3 규제 대응을 위한 선박용 에멀전 연료 적용성 연구 A Study on the Application of Marine Emulsion Fuel for Tier 3 Regulation

이기봉 · 김문찬 · 박해경^{*,†}

Ki-Bong Lee · Moon-Chan Kim · Hea Kyung Park^{*,†}

청주대학교 환경공학과 · 한서대학교 화학공학과

Department of Environmental Engineering Cheongju University

^{*}Department of Chemical Engineering Hansoe University

(2012년 10월 18일 접수, 2012년 10월 26일 채택)

Abstract : In this study, the characteristics of emulsified fuel and engine emissions were studied with an engine dynamometer. In the results of physical property analysis, the margin of error of net calorific value and gross calorific value was $\pm 0.5\%$, were almost same theoretical calculation and results of physical property analysis test. In emulsified fuel, density and viscosity increased with increasing water contents. Emulsified fuel which is composed of water and Bunker-A was manufactured by using homogenizer and ultrasonic generator in 80°C . Phase separation did not take place in 20°C and 50°C . In the results of engine dynamometer test, NOx concentration and smoke density were reduced with increasing water contents in using emulsified fuel. Total NOx could be reduced by about 41%, 10%, 32% and 28% at 1,000 rpm, 1,200 rpm, 1,500 rpm and 2,500 rpm respectively. Total smoke density was reduced to 42%, 65%, 70%, 62%, and 82% at 1,000 rpm, 1,200 rpm, 1,500 rpm, 2,000 rpm, and 2,500 rpm respectively.

Key Words : Emulsion, Emulsion Fuel, Bunker-A, NOx, Smoke Density

요약 : 본 연구는 에멀전 연료의 특성과 배출가스에 대하여 연구하였다. 엔진 배출가스 측정은 엔진 dynamometer로 실시하였다. 실험분석 결과 emulsion 연료의 참발열량과 총발열량은 이론적 계산과 실제측정결과 오차범위인 $\pm 0.5\%$ 로 산정된다. 점도와 밀도는 물의 첨가량이 증가할수록 증가하였다. 또한 emulsion 연료는 보관온도가 높아질수록 상분리가 빠르게 진행된다. 20°C 의 경우가 가장 안정된 상태를 오래 유지하며, 그 다음은 50°C 가, 가장 불안정한 상태를 보이는 것은 80°C 인 것을 알 수 있었다. 연소실험 결과 emulsion 연료가 Bunker-A 보다 낮은 NOx, Smoke 수치를 보였으며, 총 NOx는 1,000 rpm 41%, 1,200 rpm 10%, 1,500 rpm 32%, 2,500 rpm 28%, 총 smoke는 1,000 rpm 42%, 1,200 rpm 65%, 1,500 rpm 70%, 2,000 rpm 62%, 2,500 rpm 82%의 저감이 가능하였다.

주제어 : 유화, 유화연료, 벙커, 질소화합물, 매연

1. 서론

경제발전과 산업화로 인해 전 세계적으로 화석연료의 사용량은 증가하였고, 현재에 이르러는 화석연료가 현대 사회의 생활에 중심에 있다. 화석연료는 사용함에 있어 편안함을 제공하지만, 오염물을 배출하는 원인이기도 하다.

육상 운송수단인 승용차, 트럭, 대형트럭, 버스에 대한 규제는 2006년 EURO 4에서 2011년 적용되어진 EURO 5로 인해 점점 강화되어지고 있다. 반면 선박의 경우 법적으로 배출기준이 자동차에 비해 기준이 낮은 실정이다. 선박의 배출허용기준을 자동차 배출허용 기준까지 강화하기 위하여 국제해사기구(IMO)에서는 2016년부터 Tier 3 배출가스 규제를 적용하기로 하였다. 2016년 1월 1일 이후에 건조된 선박의 경우 2010년 12월 31일 이전에 건조된 선박과 비교하였을 시 배출허용기준의 80%를 저감해야 한다.¹⁾

배출가스의 제거 방법은 크게 2가지로 분류가 된다. 연료를 사용하기 전에 일정 처리를 거쳐 황 성분이나 인체에 해로운 배출가스를 배출하는 금속분 등의 제거, 연소설비 개

선, 연료분사시기 지연, 연소실 형상 개조, 연료분사계 개선, 배기재순환, 물 분사법, 디젤유-물의 유화를 이용한 유화연료사용 등의 전처리방법과 배출 가스 중에 포함된 NOx를 제거하는 후처리방법으로서 촉매분해, 촉매환원, 흡수, 흡착 등의 후처리방법이 있다.

후처리방법 중 가장 많이 사용되어지고 있는 SCR과 같은 후처리장치를 사용하여 질소산화물을 줄이고자 하여도 bunker의 경우 황화합물이 4% 정도로 많이 포함되어 있으며, 배출가스중에 매연과 황산화물, 질소산화물이 다량 배출되고 있기 때문에 SCR의 내구성이 현저히 떨어지게 되므로 연료의 전처리 과정이 필요하다.²⁾

본 연구는 선박유로 사용되는 Bunker-A를 유화제를 이용하여 유화연료로 개선하여 사용하였을 경우, 유화연료의 성능을 알아보았다. 연소시 발열량과 제조한 유화연료가 품질기준에 적합한지에 대한 적합성 여부를 확인하였으며, 엔진 적용성 test를 실시하여, 연소시 발생하는 NOx, smoke density의 저감효과, 연소 안정성을 측정하였다.

[†] Corresponding author E-mail: jhkp@hanseo.ac.kr Tel: 041-660-4606 Fax: 041-688-4608

2. 이론적 배경

2.1. 유화(乳化)

어떤 액체 속에 그것과 잘 섞이지 않는 다른 액체를 작은 낱알로 분산시켜 젖 모양의 액체로 만드는 일, 또는 분산된 그 상태를 유화(乳化, emulsion)라 한다.³⁾

일반적으로 유화를 큰 분류로 나누게 되면 2가지 형태로 분류가 되며, 유화의 형을 결정하는 것은 유화제의 종류로서, 친수성 유화제는 수상이 분산매가 되는 O/W 에멀전이며, 친유성 유화제는 유상이 분산매가 되는 W/O 에멀전이 만들어진다. 또한 이 2분류의 유화 이외에 유상형태가 존재하는데 W/O/W 에멀전과 O/W/O 에멀전이다. W/O/W 에멀전은 수상이 분매가 됐지만 수상 안에 다시 작은 유상이 분매가 되어진 형태이다. 또한 O/W/O 에멀전은 반대로 유상이 분매가 되지만 그 유상 안에 다시 작은 수상이 분매가 되어진 형태이다.⁴⁻⁶⁾

기본적으로 연료의 경우 저장안전성이 평가되어지는데 이는 상온, 고온에서 30, 60, 90일 방치하였을 경우 상분리 유·무에 의해 결정되어진다. 화석연료의 경우 일반적으로 크래킹이나 촉매 또는 증류법으로 인해 연료를 나누게 되는데 나누어진 연료의 경우 탈황공정을 거치게 된다. 탈황 공정 후 연료의 옥탄가 및 세탄가를 조정하게 되고 이후 사용으로 이어지게 되는데 전체 공정을 봤을 때, 화석연료 이외의 물질들이 많이 포함되게 되어진다. 포함되어진 물질들이 상분리를 일으키게 될 경우 연료로써의 가치가 상실되는 점을 볼 때, 유화연료의 경우 물이 포함되어져 상분리가 훨씬 잘 이루어져 상용화에 어려움이 많다.

2.2. 유화연료 제조방법

일반적인 유화의 제조방법은 2분류로 나누어지며, 일반적으로 안정화를 위하여 2가지 방법을 병행하는 방법을 많이 사용하고 있다.

유화의 제조 방법으로 물리적 방법은 제조 당시에 계면활성제를 사용하지 않은 상태에서 제조가 가능하기 때문에 저렴하고, 쉽게 제조가 가능하다는 장점이 있다. 이로 인해 대량제조에 용이하나, 쉽게 응집되어 분리가 일어난다. 제조 방법으로는 교반, 난류혼합, 진동, 초음파, 분사, 충격 등의 방법이 있다. 화학적 방법의 경우 계면활성제를 사용하는 방법으로 HLB가 맞을 경우 쉽게 유화가 가능하지만 적당한 계면활성제 제조와 대량제조에 어려움이 많다.⁷⁻⁹⁾

이러한 측면으로 인하여 보통 물리적인 방법과 화학적인 방법을 병행하는 경우가 많은데, 오일류와 물을 넣은 뒤 계면활성제를 넣어 물리적 방법인 shaking, 교반, 난류혼합, 진동, 초음파, 분사, 충격 등을 이용하여 유화연료의 전체적인 미립화와 안정을 도모하는 방법이 많이 사용되어진다.^{10,11)}

3. 실험

3.1. 유화연료의 제조

본 연구에서의 유화연료의 제조방법은 물리·화학적 방법을 이용하여 연료를 제조하였다. Bunker-A에 유화제를 첨가하여 용해시킨 후 물을 첨가하여, 교반기를 통하여 3~5분 동안 교반을 실시하였다. 그 후 homogenizer를 통하여 균일 혼합을 이룬 후에 ultrasonic generator를 이용하여 유화연료를 제조하였다.

제조 시 사용되어진 원료로는 Bunker-A, H₂O 외에 유화제가 사용되어졌다. 사용되어진 유화제의 경우 3600 (Sorbitan monostearate), SP80 (Sorbitan monooleate, Dongnam Chemical Ind. Ltd), SP85 (Sorbitan trioleate, Dongnam Chemical Ind. Ltd, IC Chemical), LA2~LA7 (Polyoxyrthylen (2, 3, 5, 7) lauryl ether, IC Chemical), TW61, 80 (Polyoxyethylene sorbitan ester, IC Chemical), NP~NP4 (Polyoxyethylene nonylphenol ether, ether derivatives, derivatives, IC Chemical)를 사용하였으며 단일 또는 2가지 이상의 유화제를 혼합하여 유화제를 사용하였다.

사용되어진 기기로는 가열식 교반기, homogenizer (model; IKA Ultra-Turrax® T 18 basic)와 ultrasonic generator (model; Jeil Ultrasonic Co. Ltd JIW-1500T)이다.

제조방법은 Fig. 1에 과정보를 나타내었다.

3.2. 유화연료의 연소 장비 및 분석기기

연소 장비로는 자동차용 엔진에 Bunker-A와 Bunker-A로부터 제조한 유화연료를 연소하였으며, 자동차용 diesel 엔진에 실시하였으며, 사용되어진 엔진 제원은 Table 1과 같다.

연소 장비의 제어장치는 engine dynamometer로 하였으며, 유화연료의 연소 시 배출되는 배기가스의 경우 HORIBA Ltd.사의 exhaust gas analyzer MEXA-8120D를 사용하여 분석하였다.

Fig. 1. Process of emulsified fuel manufacture.

Table 1. Specification of test engine

Description	Specification
Engine type	4-stroke turbo-charged DI diesel engine
Number of cylinder	4
Bore x stroke (mm)	83 x 92
Displacement volume (cc)	1991cc
Fuel injection system	Common rail (Max. 1,600 bar)
Valve type	DOHC 4 valves per cylinder
Max. power (ps/rpm)	146 / 4,000
Max. torque(kg · m/rpm)	32 / 1,800~2,500

4. 결과 및 고찰

4.1. 유화연료의 분석결과

유화연료의 분석은 국가 지정기관인 한국석유품질관리원에서 실시하였으며, 분석항목은 참발열량, 총발열량, 원소 분석, 수분, 황분, 회분, 밀도, 침전물, 동판부식, 인화점으로 총 10개 항목이다. 또한 안정성 test는 별도로 진행을 하였으며 30, 60, 90일로 진행되었고, 유화연료 bunker A-20을 각각 20℃, 50℃, 80℃의 수욕조에서 관찰하였다. 관찰하는 도중 상분리가 일어나면, 그 시점에서 시간경과를 확인한 후 유화연료를 수욕조에서 꺼낸 후 나머지는 계속 관찰하였다. Table 2는 석유품질원에서 실시한 분석결과이다.

유화연료의 품질기준은 현행 법적으로 아직 정해진 바가 없다. 이에 중유에 대한 법적 품질기준을 적용하여 유화연료의 품질기준을 비교한 결과 황분, 회분, 인화점만이 비교가 가능하다. 비교결과를 보면, 인화점의 기준은 60℃ 이상이며, 회분의 경우 0.05 wt% 이하, 그리고 황분의 경우 2.0 wt% 이하로 전체적으로 황분, 회분, 인화점은 기준에 적합한 것을 알 수 있다. Table 3은 중유의 품질기준과 분석결

Table 3. Quality standard of heavy oil and analysis result of Bunker A

Test Item	Unit	Bunker A	Bunker A - 20
Flash point	℃	> 60	86
Ash	Weight %	< 0.05	0.007
Sulfur	Weight %	< 2.0	0.10

Table 4. Measurement result of viscosity

Emulsion fuels	cP (centipoise)	rpm	effective %
Bunker A	21.7	20	86
Bunker A - 20	34.3	12	72.4

과를 비교하여 나타내었다.

참발열량의 오차 허용범위는 ± 200 J로써 이는 반복실험 검증법에 의한 오차허용범위로 bunker A의 발열량을 기준으로 하였을 시 오차허용범위는 $\pm 0.5\%$ 이다. 또한 bunker A의 참발열량을 기준으로 하였을 시 $\pm 0.5\%$ 로 오차허용범위는 상당히 작은 것을 알 수 있었다.

수분의 경우 이론적 수분함량은 16.6%이나, 실제 분석결과를 보면 16.8%로서 소량 높은 것을 알 수 있다.

점도의 측정결과는 Table 4에 나타내었다. 측정결과 bunker A에 비해 물이 함유된 유화연료의 경우 점도가 bunker A 보다 높은 것을 알 수 있는데, 이는 homogenizer와 ultrasonic generator의 사용으로 인하여 물과 함께 bunker도 점차 미립자로 분해되어 점도가 높아지는 것으로 판단된다.

저장안정성의 경우 실험결과는 Table 5에 나타내었다. 20℃의 경우 저장 안정성 실험결과 90일이 지나도 안정된 상태를 유지하였다. 또한 50℃의 경우에도 80℃에 비하면, 안정된 상태를 유지하였지만, 20℃보다는 안정성이 많이 떨어지는 것을 알 수 있었다. 80℃의 경우는 36 h를 기점으로 완벽한 상분리가 일어났으며, 이는 상온보다는 높은 온

Table 2. Analysis result of bunker A

Test item	Unit	Bunker A	Bunker A-20	Method
Net calorific value	J/g	41,060	32,990	KS M 2057:2006
Gross calorific value	J/g	43,670	36,050	KS M 2057:2006
Element analysis (H)	Weight %	11.51	11.66	ASTM D 5291:2010
Water (Distillation method)	Volume %	0.5	16.8	KS M ISO 3733:2008
Sulfur (High temperature method)	Weight %	0.15	0.10	KS M 2414:2006
Ash	Weight %	0.012	0.007	KS M ISO 6245:2003
Density (15℃)	Kg/m ³	923.6	929.7	KS M 2002:2006
Sediment	Weight %	0.06	0.07	KS M ISO 3755:2003
Copper plate corrosion (100℃, 3 h)	-	1	1	KS M 2018:2007
Flash point (Cleveland Open Cup Tester)	℃	104	86	KS M ISO 2592:2007

Table 5. Experiment result of storage stabilization

Emulsion fuels	6 H	12 H	18 H	36 H	1 W	2 W	3 W	4 W	5 W	6 W	7 W	8 W	12 W
20℃ Bunker A-20	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
50℃ Bunker A-20	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
80℃ Bunker A-20	3 mL	9 mL	18 mL	segregation									

도에 의해 수분이 증력과 함께 브라운 운동으로 인해 수분이 응집되어져 윗부분 보다는 수분의 분포가 밀집되어 H₂O로 분리된 것을 알 수 있었다. H₂O의 분리는 6 h을 기점으로 하여 분리가 시작되었으며, 80℃에서 3 h까지는 제조된 연료로써 안정성을 유지하지만, 3 h 이후로는 수분이 밑으로 응집되어 색이 벌어지는 것을 볼 수 있었다.

4.2. 유화연료의 연소실험 결과

유화연료의 연소실험 시 rpm은 1,000 rpm, 1,200 rpm, 1,500 rpm, 2,000 rpm, 2,500 rpm으로 하였으며, 부하는 1,000 rpm, 1,200 rpm, 1,500 rpm 별 10%, 25%, 50%, 75%로 진행하였으며, 1,500 rpm, 2,000 rpm, 2,500 rpm은 bar 부하로 적용하였다. 일반적으로 2 bar는 저부하이며, 10 bar는 고부하이다. Bar에서 부하는 3 bar, 6 bar, 9 bar, 12 bar로 부하를 걸어서 실험을 진행하였다.

실험을 진행함에 있어 일반적인 load와 bar Load 2개를 진행한 이유는 일반 Load의 경우, rpm에 따라 최대 토크가 달라지게 된다. 이에 기준을 bar로 잡고 rpm을 올리는 식의 bar load를 같이 진행하였다.

4.2.1. NO_x 측정결과

Fig. 2. Variation of NO_x concentration on each load (1,000 rpm).

Fig. 4. Variation of NO_x concentration on each load (1,500 rpm).

Fig. 2-5의 그래프는 NO_x를 측정된 결과이다. NO_x의 경우 1,000 rpm의 저부하에서 46.15%의 큰 감소를 보이고 있으나, 나머지 저부하에서의 감소는 0%~2%의 작은 감소를 보인다. 하지만 고부하로 갈수록 NO_x의 감소폭이 점점 커짐을 알 수 있다. 고부하의 경우 17.78~49.53%의 감소를 보였다.

실험에 사용되어진 유화연료는 bunker A와 수분의 비율이 100 : 20으로, 수분의 함량은 16.8%로 20%에 미치지 못한다. 이론상으로 수분의 함유량 만큼인 16.8%의 감소가 이루어져야 하지만, 실제의 연소실험 결과 NO_x의 감소는 최대 49.53%로 큰 감소를 보였다.

W/O형 유화연료는 물이 분산질로써 기름이 물을 감싸고 있는 형태인데, 이러한 W/O형 유화연료는 연소실내에서 미세폭발을 일으켜 연료를 잘게 쪼개어 주어 완전연소에 가깝게 이끌어 주어 물이 연소실내의 기화열을 빼앗아 연소실 내부의 온도를 낮추어 NO_x 생성을 억제하는 효과를 갖는 것으로 판단된다.

4.2.2. Smoke

Fig. 6~11의 그래프는 smoke를 측정된 결과이다. 유화연료는 함수율이 증가할수록 smoke가 감소하였다. 2,000 rpm

Fig. 3. Variation of NO_x concentration on each load (1,200 rpm).

Fig. 5. Variation of NO_x concentration on each load (2,500 rpm).

을 제외한 나머지의 경우 NOx와 동일하게 저부하보다, 고 부하에서 저감률이 더 높은 것을 알 수 있다.

수분함량이 증가함에 따라 smoke가 줄어드는 것은 연소 온도의 저하, 유화연료의 미세폭발로 인한 액적의 표면적 증가로 인해 공기와 연료의 혼합 촉진, 수증기 농도의 증가, 물

과 탄소의 수성반응에 의한 효과 때문으로 판단된다.

4.2.3. 연소안정성

Fig. 12~16의 그래프는 연소안정성을 측정한 결과이다. 연소안정성의 경우 저부하인 10%, 25%일 때 유화연료의 고

Fig. 6. Variation of smoke concentration on each load (1,000 rpm).

Fig. 9. Variation of smoke concentration on each load (1,500 rpm).

Fig. 7. Variation of smoke concentration on each load (1,200 rpm).

Fig. 10. Variation of smoke concentration on each load (2,000 rpm).

Fig. 8. Variation of smoke concentration on each load (1,500 rpm).

Fig. 11. Variation of smoke concentration on each load (2,500 rpm).

Fig. 12. Variation of COVimep on each load (1,000 rpm).

Fig. 15. Variation of COVimep on each load (2,000 rpm).

Fig. 13. Variation of COVimep on each load (1,200 rpm).

Fig. 16. Variation of COVimep on each load (2,500 rpm).

Fig. 14. Variation of COVimep on each load (1,500 rpm).

점도와 연소실 내부의 연소온도가 낮아 bunker A보다 연소 안정성이 떨어지나, 50% 이상 부하가 증가함에 따라 bunker A와 유화연료의 연소안정성이 비슷해지거나 구간에 따라서는 더 좋은 것을 알 수 있었다.

5. 결론

유화연료의 제조의 경우 유화제는 Sorbitan monostearate, Sorbitan trioleate, Polyoxyrthylene (2,3,5,7) lauryl ether, Polyoxyethylene sorbitan ester, Polyoxyethylene nonylphenol ether의 조성을 혼합하여 HLB를 변화시켜 사용하였고, bunker A와 water를 사용하여 W/O형 유화연료를 제조하였다. 제조된 유화연료의 특성, 연소 실험을 통한 배출가스 측정을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 유화연료의 참발열량과 총발열량은 이론적 계산과 KSM 2057방법에 의한 실제측정결과 오차범위인 200 J 내이며, bunker A를 기준으로 하였을 시 $\pm 0.5\%$ 로 산정된다.
- 2) 유화연료의 품질기준은 현행법상 아직 기준이 없으나, 중유의 품질기준을 적용하여 보았을 경우, 중유의 품질기준인 인화점 60°C 이상, 회분 0.05 wt% 이하, 그리고 황분 2.0 wt% 이하의 기준에 전체적으로 적합한 것을 알 수 있었다.

3) 연소실험 결과 유화연료가 bunker A보다 낮은 NOx 수치를 보였으며, 부하가 증가함에 따라 연소안정성이 향상되어 idle 상태를 제외한 총 NOx는 1,000 rpm 39.4%, 1,200 rpm 13.8%, 1,500 rpm 42.2%, 2,500 rpm 37.3%로 저감률이 증가함을 알 수 있었다.

4) 연소실험 결과 bunker A보다 유화연료가 낮은 smoke 수치를 보였으며, 부하가 증가함에 따라 연소안정성이 향상되어 idle 상태를 제외한 총 smoke는 1,000 rpm 51.7%, 1,200 rpm 64.8%, 1,500 rpm 73.5%, 2,000 rpm 64%, 2,500 rpm 84%로 저감률이 증가함을 알 수 있었다.

5) 연소실험 결과 연소안정성의 경우 저부하인 10%, 25% 일 때 유화연료의 고점도와 연소실 내부의 연소온도가 낮아 bunker A보다 연소안정성이 떨어지나, 50% 이상 부하가 증가함에 따라 bunker A와 유화연료의 연소안정성이 비슷해지거나 구간에 따라서는 더 좋은 것을 알 수 있었다.

위의 결과로부터 유화연료 기술은 연료의 전처리 면에서 높은 효율을 나타내었으며, 연료의 장기간 저장성에 대한 문제가 남아있으나, 상용화하였을 경우 배출물 저감과 동시에 경제성을 높여줄 수 있는 기술로 사료된다.

KSEE

참고문헌

1. 환경부, 대기오염방지시설(연소보조장치)의 성능기준 및 검사방법, 환경부고시, **2001(35)**, 1(2001).
2. 박정규, 박태인, 최준섭, “디젤엔진의 초저NOx화 기술,” 한국자동차공학회 1992년 기관, 공해, 연료 및 윤활유부문 학술강연 초록집, pp. 5~12(1992).
3. Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. and Tanabe, K., “2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories,” Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, IPCC, IGES, Japan, (2006).
4. 이화순, “물혼합 에멀전 연료의 연소특성과 버너 및 엔진 성능에 미치는 영향,” 한국해양대학교 박사논문, 7~17(2004).
5. Davies, J. T. and Rideal, E. K., “Interfacial Phenomena,” 2nd. J. Chem. Ed., **41(7)**, 371(1964).
6. 조춘구, 이강연, 김동남, “고급알코올과 고급지방산이 O/W 유화의 유동특성에 미치는 영향,” 대한화장품학회지, **35(2)**, 103~104(2009).
7. 오승목, “에멀전 연료를 이용한 저공해 디젤엔진 기술,” 기계와 재료, **12(2)**, 40~47(2000).
8. Paul Becher, “Emulsions : Theory and Practice,” Reinhold, New York, p. 267(1965).
9. Paul Becher, “Encyclopedia of emulsion technology, Vol. 1,” Marcel Dekker Inc, pp. 94~127(1983).
10. 권철홍 등, 압축착화기관용 유화연료 기술개발연구(I), 한국에너지기술연구소, pp. 1~106(1993).
11. 조진호, 김형섭, 박정률 “디젤 기관의 연소와 배출물에 관한 연구: 경유-물의 유화연료 사용시,” 대한기계학회지, **16(1)**, 180~188(1992).