1722 대한기계학회논문집 B권, 제 26권 제 12호, pp. 1722~1728, 2002

중질유-물 유화연료의 연소특성 평가

이 용 일*

(2002년 4월 26일 접수, 2002년 10월 24일 심사완료)

An Evaluation on the Combustion Characteristics of Heavy Oil-Water Emulsions

Yong Il Lee

Key Words : Emulsified Fuel(유화 연료), Heavy Fuel Oil(중질유), Combustion Characteristics(연소특성), Emission(배기), Boiler Efficiency(보일러 효율)

Abstract

Most researches regarding emulsified fuel were in the areas of emulsifier, emulsified fuel manufacturing and emulsified fuel droplet combustion, but there were little papers published regarding emulsified fuel combustion and boiler efficiency in an industrial boiler. The main purpose of this study is to clarify whether improvements in the boiler efficiency and the reduction of pollutants such as CO, NOx, SOx and smoke exist or not when emulsified fuels are combusted in the commercial boiler. Main experimental parameters were water content in heavy oil , excess O_2, and boiler load. The fuels used in this experiment were 0.5 B-C, and 5 kinds of 0.5 B-C/water emulsified fuels. The combustion characteristics of heavy oil and its emulsions with water were investigated in an industrial boiler. The combustion stability was monitored and exhaust gases such as CO, NOx, SOx and smoke were measured with excess O_2 and combustion load. In case of emulsified fuel combustion, flame stability was poor and boiler efficiency was lowered by 1.6~5.7%, but emission levels of CO and smoke were improved.

기호설명

BC : 벙커씨 유
EF : 유화연료
P_{stm} : 스팀 압력
Q_{fuel} : 연료 유량
Q_{water} : 냉각수 유량
T_{fuel} : 연료 온도
T_{gas} : 배기 가스 온도
T_{stm} : 스팀 온도

1. 서 론

단일 액적 연소에 대한 연구 및 보고는 많으나 다성분 연료의 연소, 특히 상업적 규모의 보일러에서의 연구는 극히 제한적이다. 특히 잔사유와 물을 혼합하여 분무 연소기에서 연소시키는 연구는 공해저감의 관점에서 오랫동안 관심을 끌어왔다.[1~5]

고온의 연소장에서 연료액적이 유지되는 시간이 증가하면 수트(soot) 및 NOx 발생을 증가시키는 경향이 있다는 것은 잘 알려져 왔다. Law 등은 실용 연소기에서 분무연료를 더 효율적으로 연소시키기 위한 방안으로 연료분무 전에 액체연료와 물을 유화시키는 방법을 제안하였다.[2~3] 이러한 유화연료 연소시의 장점은 고상의 미연탄소분을 상당부분 저감시킬 수 있다는 데 있다. 특히 중질유 연소에서 유화연료가 활용되는 몇 가지 이유로는, 중질유의 높은 비점 범위(Boiling Range)로 인한 불완전 연소특성이 유화연료의 이차미립화(2nd Atomization)로 개선되고 Cenosphere 등의 형성을 줄일 수 있다는 데 있다. 이는 물의 끓는점은 대

* 회원, SK㈜ 석유제품기술팀
E-mail : yilee@skcorp.com
TEL : (042)866-7722 FAX : (042)866-7502

부분의 액체연료의 비점보다 낮기 때문에 액적표면에서의 기화과정에 대한 물의 참여는 액적의 온도를 낮추고, 온도에 민감하고 수트의 생성에 기여하는 액상의 열분해 과정의 강도를 줄여주기 때문이다. 또한 유화연료의 Micro-Explosion 또는 이차미립화는 혼합을 증진시키고, 액적의 직경을 작게 하여 단일 액적의 연소시간을 줄여준다.[6~8]

유화연료 연소시, CO, Smoke 및 분진 등의 배출특성이 개선된다는 사실은 대부분의 연구결과에 반영되어 있으나 NOx 배출특성은 연구자들 간에 이견이 분분하다. 초창기 연구에서는 NOx 저감을 기정사실로 받아들였으나, Gallahalli 등은 물이나 유화제 등의 함량에 따라 NOx 배출량이 오히려 증가할 수 있음을 보고하였다.

본 연구에서는 중질유를 연료로 사용하는 산업용보일러에서 Bunker-C 유와 동일한 연소조건에서 유화연료 연소시, 연소부하 및 산소 농도를 변수로 할 경우 보일러 효율, 화염 안정화 및 배기가스 배출특성을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 1 에 본 실험에 사용된 연소시험설비의 개략도를 나타내었다.

연소시험설비는 크게 연료공급계통, 버너, 보일러수 공급계통, 연소실 및 프로브와 분석기로 구성되어 있다. 실험에 사용된 연료는 B-C 유와 유화연료로, 유화연료는 중질유와 물을 일정비율로 혼합하고 1% 정도의 유화제를 첨가한 후 정밀한 혼합단계를 거쳐서 제조하였으며 중질유와 물이 잘 혼합될 수 있도록 연료온도와 물의 온도를 80℃ 내외로 유지하였다. 제조된 유화연료는 유화연료 저장탱크에 저장되며 저장탱크의 연료 토출부를 버너 노즐보다 1m 이상의 높이를 유지하도록 하여 연료공급시 장애가 발생하지 않도록 하였다. 연료탱크에서 나온 연료는 고압의 연료펌프에서 압력이 상승되어 버너로 이송되며 중간에 연료의 온도를 조절할 수 있도록 연료예열기를 설치하였다. 또한 중유예열기 전단에 디지털 유량계를 설치하여 연료의 유량을 측정하였다. 연료펌프에서 압력이 상승된 연료배관은 보일러 노즐 전단에서 연료예열기로 회수되는 라인을 설치하여 노즐로 분무되는 연료의 압력 및 유량 제어가 용이하도록 구성되어 있다.

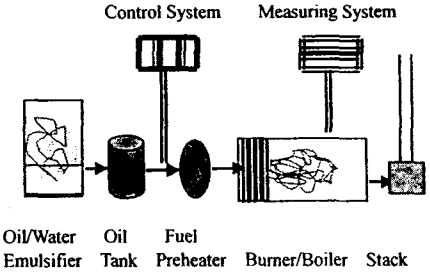


Fig. 1 Schematic of boiler system used for emulsified oil combustion

블로어로부터 공급되는 연소용 공기는 직접 버너로 공급되며 연료공급부와 링크로 연결되어 보일러 부하변동시 공기량도 같이 변할 수 있게 하였다. 또한 동일한 부하에서 연소공기량 제어를 위해서 링크의 길이를 제어하였다.

연소실의 과열을 방지하기 위하여 연소실 주위에 냉각수가 흐를 수 있는 수관이 설치되어 있으며 이 수관에 항상 일정량의 물이 흐를 수 있도록 물드럼이 설치되어 있다. 또한 수관에 공급되는 물의 양을 제어하기 위하여 물펌프, 디지털 수량계 및 밸브로 수로계를 구성하였다.

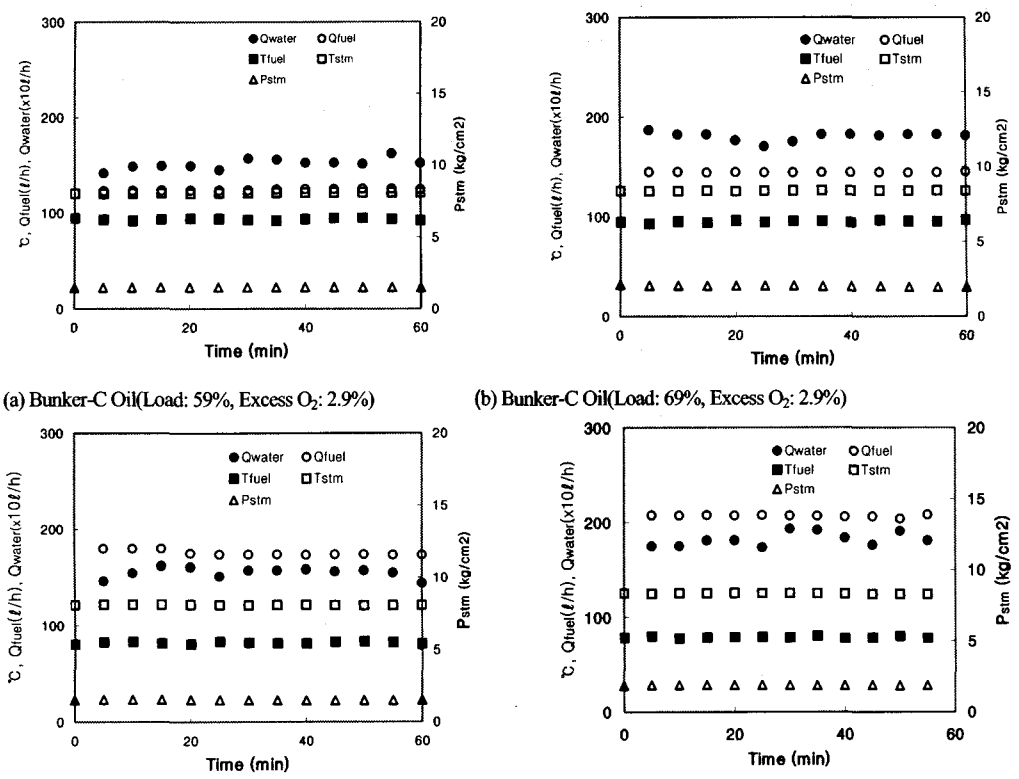
버너 노즐에서 분무된 연료는 보일러 연소실에서 연소가 진행된다. 연소기 하류로 배출된 연소가스는 수관으로의 열손실 때문에 온도가 강하되고 멀티 사이클론에서 분진이 제거된 후 연돌을 통해 대기로 배출된다. 또한 연소실 내부의 화염상태는 보일러 후면에 설치된 관측창을 통하여 확인할 수 있었다.

보일러 연소시 화염에서 수관으로의 열전달량을 파악하여 열효율을 구하기 위하여 보일러 수관에서 가열된 물이 스팀으로 배출되는 스팀라인에 온도계와 압력계를 설치하였다.

2.2 실험방법

본 실험에 사용된 버너는 3 ton/hr 용량의 로타리 분무방식의 노통연관식 보일러(제조사: Sunway, Model: DF 300)이며, 연료량은 대략 100% 부하시 210~240kg/hr 이다. 또한 연소기에 공급되는 연료의 온도는 연료의 이송 및 분무가 용이하도록 연료예열기에서 90~110℃로 예열되어 버너로 공급된다.

화염 모니터링과 비상시 연료차단을 위해 연소실 전면에 화염감지기(Flame Detector)가 설치되어 있으며, 연료점화용 점화기(Ignitor)가 설치되어 있다. 보일러 연소초기에 화염안정화에 사용되는 Pilot Burner 의 연료로는 경유를 사용하였으며 로내의 온도가 상승하여 중질유 연소가 가능한 시점



(a) Bunker-C Oil(Load: 59%, Excess O_2: 2.9%) (b) Bunker-C Oil(Load: 69%, Excess O_2: 2.9%)

(c) Emulsified Fuel(Load: 61%, Excess O_2: 2.9%) (d) Emulsified Fuel(Load: 74%, Excess O_2: 2.9%)

Fig. 2 Characteristics of boiler operating parameters

에 중유로 연료를 전환하였다.

또한 화염의 안정성을 파악하기 위하여 Bunker-C 유 또는 유화연료에 대해서 각각 연료예열온도, 보일러 부하와 공기비 및 유화연료의 수분함량을 바꾸어가며 화염을 관찰하였다. 보일러 부하는 디지털 유량계와 유량조절기를 사용하여 연료유량을 제어함으로서 원하는 부하를 얻을 수 있었으며, 공기유량은 연료라인과 연결된 공기량 조절용 링크를 사용하여 제어하였다. 또한 배기가스중의 산소농도를 계측하여 과잉공기의 상태를 파악할 수 있었다.[9] 보일러 하류에 설치된 측정구를 통해 배기가스를 샘플링한 후 배기가스분석기를 활용하여, 연료예열온도, 연소부하 및 공기비가 변할 경우에 Bunker-C 와 유화연료의 NOx 및 CO 등의 배기가스농도 및 Smoke(Bacharach Smoke Scale) 측정을 통해 화염상태를 파악하였다. 또한 Bunker-C 유와 유화연료 간의 연료전환이나 연소조건 변경시 실험조건에서 화염안정화를 위해 30 분 이상 충분히 운전한 후 30~60 분간 5 분 단위로 데이터를 측정하였다.

Table 1 Fuel specifications of Bunker-C oil and 5 kinds of emulsified fuels.

	Bunker-C oil	*E.F.1~ E.F.3	E.F.4	E.F.5
Sp. Gr., 15/4℃	0.9322	0.9472	0.9422	0.9347
Flash Point,℃	102	-	-	-
Sulfur, wt.%	0.45	0.38	0.39	0.41
Saybolt Viscosity, cSt @50℃	218	178	175	164
Water Content, vol.%	-	W: 26.9	W: 25.2	W: 17.3
G.H.V, kcal/kg	10,643	7,534	7,651	8,544

* E.F.1~5: Emulsified Fuel 1~5

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시료분석

실험에 사용된 Bunker-C 유와 유화연료의 성상분석결과를 Table 1 에 나타내었다.[10~11] 유화연료 1, 2, 3 의 경우 물함량은 26.9 vol.%, 유화연료 4, 5 의 경우는 각각 25.5 와 17.3 vol.%이다. 물함량의 증가로 유화연료의 경우 발열량이 감소되고 비중은

상승함을 알 수 있다. 또한 연료의 점화성능을 나타내는 인화점은 Bunker-C 유의 경우 102℃이나 유화연료의 경우는 물의 혼합으로 인하여 인화점 측정이 불가능하였다. 이는 인화점 측정시 연료의 온도를 상승시키면서 점화를 시키는데 물의 혼합으로 인해 연료온도가 상승하여도 점화가 되지 않기 때문이다. 또한 실험에 사용된 연료의 유황함량은 0.45wt.%로 산업현장에서 많이 사용되는 0.5wt.% Bunker-C 유 이다.

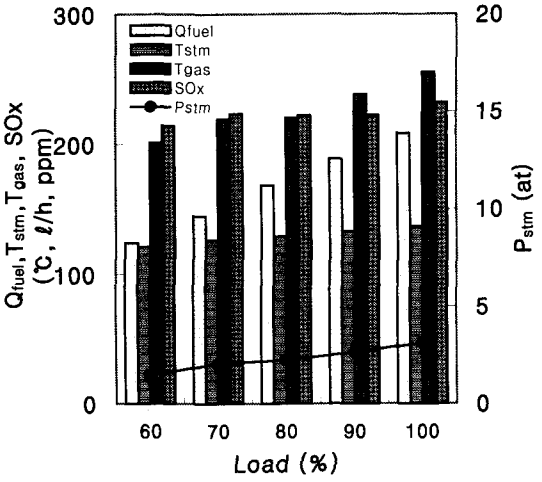
3.2 Bunker-C 유와 유화연료의 부하별 운전특성

Fig.2 에 본 실험에 사용된 보일러 운전시의 Bunker-C 유와 유화연료의 부하별 운전특성을 나타내었다. 초기 연소시 사용되었던 경유에서 Bunker-C 유 또는 유화연료로 연료를 전환한 후 연소조건(보일러 부하, 과잉공기량, 연료예열온도)을 고정한다. 연소조건 고정 후 주어진 조건에서 화염 및 연소실 조건의 안정화를 위해 30 분 동안 운전한 후 5 분 간격으로 30~60 분간 연료온도 및 유량, 급수량, 스팀온도 및 압력과 배기가스농도, Bacharach Smoke Scale 등을 측정하였다. Fig. 2 에서 보여지는 바와 같이 시간변화에 따른 연료유량 및 연료예열온도, 스팀온도 및 압력은 대체로 일정하게 유지되었다.

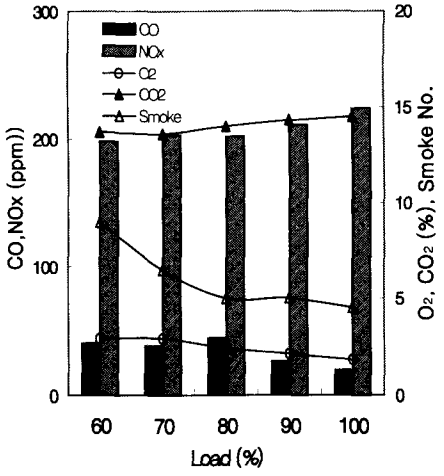
부하증가시 연료량 및 급수량이 증가하였으며, 보일러에서 배출되는 총발열량은 증가된 급수량에 의해 흡수되므로 스팀온도 및 압력변화는 미미하였다. 보일러 공급수량은 운전 부하와 드럼수위를 고려하여 제어하였으나 시간에 따라 약간의 차이를 보인다. 다만 보일러 효율 계산시는 보일러 드럼에서 공급수량의 수위가 일정하게 유지될 경우 실험을 시작하고 같은 위치에서 수위가 일정하게 유지될 경우 실험을 종료하여 효율 계산시 급수량 변화에 따른 오차를 최소화하였다. Fig. 2 의 시간에 따른 주요 변수들의 거동은 보일러 효율계산시의 기초자료로 사용되었다.

3.3 보일러 연소특성

Fig. 3 에 Bunker-C 유 연소시 보일러 부하변동에 따른 운전변수와 배출특성을 나타내었다. 보일러 부하가 증가함에 따라 보일러에 공급되는 연료유량은 선형적으로 증가하였다. 또한 연소장에서 단위체적당 발열량의 증가로 배기가스와 스팀온도 및 스팀압력도 증가하였다. 부하 증가에 따른 연소실 내부의 온도상승으로 인한 Thermal NOx 의 증가로 보일러에서 배출되는 NOx 농도는 증가하



(a) Experimental parameters



(b) Emission characteristics

Fig. 3 Combustion characteristics of a boiler with combustion load

였으며, SOx 의 경우는 부하변동에 따른 차이가 미미하였다. CO 와 Smoke 농도는 부하상승에 따른 연소조건 개선으로 부하에 따라 감소하는 경향을 보였다. 또한 연소시 산소농도는 부하가 상승함에 따라 농도가 감소하였으며, 이는 일반적인 보일러 연소시 저부하에서 화염으로부터 주변으로의 열손실로 인한 요구공기비가 증가하는 특성을 잘 반영하는 것으로 보이며 부하증가시 연소조건 개선에 기인한다.[9, 12]

Fig. 4 에 부하를 70 으로 고정하였을 경우, 산소농도에 따른 보일러 연소특성을 나타내었다. Fig. 4 에 나타난 바와 같이 보일러 부하를 고정하고

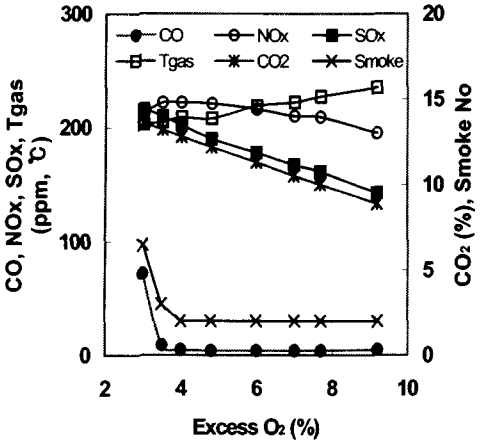


Fig. 4 Combustion characteristics of a boiler with excess O_2(%) for a fixed load(70%)

과잉공기량을 증가시킬 경우, Smoke 와 CO 배출농도는 감소하였으며 산소농도가 4% 이상일 경우는 일정한 값을 유지하였다. SOx 와 CO_2 농도는 공기량 증가에 따라 감소하였는데 이는 전체 배기가스 유량중 공기량 증가에 따른 희석효과로 판단된다. NOx 농도는 산소농도가 3.5%일 경우 가장 높게 나타났으며 산소농도가 증가하거나 감소함에 따라 NOx 농도도 감소하였다. 이는 중질유 연소시 산소농도가 과도하게 증가하면 로내의 온도강하로 인한 Thermal NOx 가 감소하고, 산소농도 감소시 공기 및 연료중의 질소성분과 반응하여 NOx 를 형성할 수 있는 확률이 감소하기 때문이다. 또한 과잉공기량이 증가함에 배기가스의 온도가 선형적으로 증가하였다. 배기가스온도는 보일러 연소실 하류에서 측정하였으며, 동일 부하에서 산소농도 또는 과잉공기량이 증가하면 배기가스 유량이 증가하게 된다. 이러한 배기가스 유량의 증가는 보일러 연소실 주변의 열교환면을 통과하는 유속증가로 이어져 연소시 발생한 열량이 주변의 물로 충분이 전달되지 못하여 배기가스 온도 상승의 원인이 된다.[13]

3.4 Bunker-C 유와 유화연료의 연소특성

Bunker-C 유 연소시는 연료공급압력변동이 5% 이내로 안정적으로 유지되나 유화연료 연소시는 0.5~4.5 kg/cm^{2}의 연료공급압력 변동이 발생하였다. 이는 유화연료 예열중 중유예열기의 고온부위에서 유화연료 중에 함유된 수분이 기화되어 연료공급라인의 압력변동이 발생하는 것으로 판단된다. 또한 Bunker-C 유 연소시는 안정적인 화염유지가

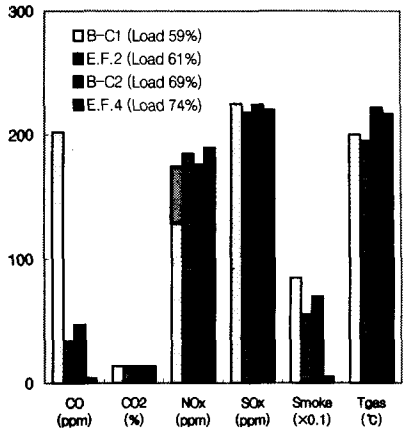


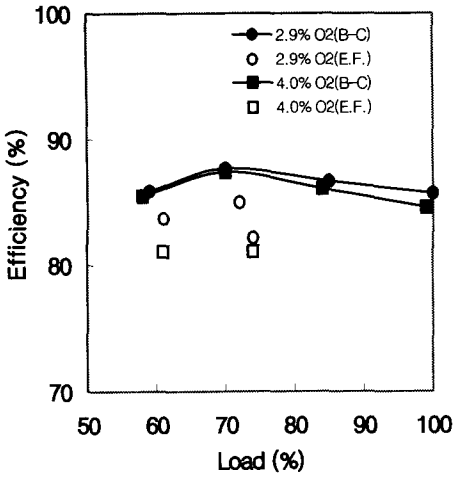
Fig. 5 Emission Characteristics with boiler load at fixed excess O_2(2.9%)

가능하였지만 유화연료 연소시는 연료공급압력 변동 또는 연료공급의 장애가 발생하여 화염이 소화되는 경우가 발생하였다.[13~14]

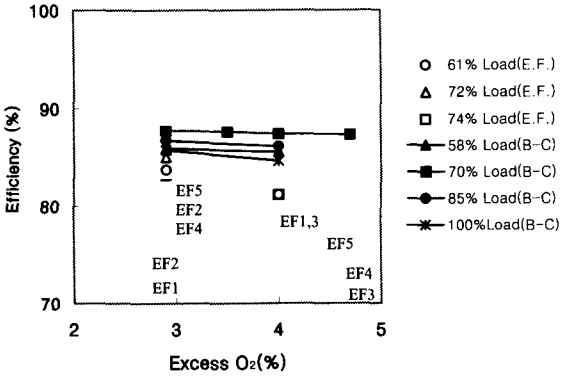
Fig. 5 에 Bunker-C 유와 유화연료 연소시의 배출특성을 나타내었다. 유화연료 연소시는 Bunker-C 유를 연소할 경우 보다 CO 배출농도가 40~90% 정도로 현격하게 저감되며, Bacharach Smoke No.는 3.0~6.0 정도 감소하였다. 이는 기존의 연구에서 나타난 바와 같이 유화연료의 일반적인 연소특성이다.[15~16] 특히 CO 및 Bacharach Smoke 저감은 보일러에서 열손실이 많고 화염이 상대적으로 불안한 저과잉공기 조건에서 크게 나타났다. SOx 농도는 Bunker-C 유와 유화연료의 경우 큰 차이가 없으며 유화연료의 경우 약간 작게 나타났다. 이는 유화연료연소시 물함유량에 따른 배기가스유량 증가로 인한 희석효과로 판단된다. NOx 농도는 Bunker-C 유 연소시와 유화연료연소의 경우 큰 차이가 없었으며, Bunker-C 유 연소시 NOx 농도의 변화가 심하게 나타났으며 Fig. 5 에 그 변화폭을 나타내었다.[13, 16~18]

3.5 Bunker-C 유와 유화연료의 보일러 열효율

Bunker-C 유와 유화연료 연소시의 보일러 열효율을 비교하기 위하여 열효율 측정시 흡수법을 사용하였다. 흡수법에 의한 열효율은 보일러의 입열에 대한 보일러수로 전달된 열량의 비로 정의된다 보일러의 입열은 시간당 연료량과 연료의 발열량으로부터 파악할 수 있었으며, 보일러수로 전달된 열은 시간당 공급된 보일러수 유량과 스팀의 온도 및 압력으로부터 구할 수 있었다. Fig. 6 에 보일러 부하 및 산소농도별 Bunker-C 유와 유화연료의



(a) With load variations



(b) With excess O_2(%) variations

Fig. 6 Boiler thermal efficiency

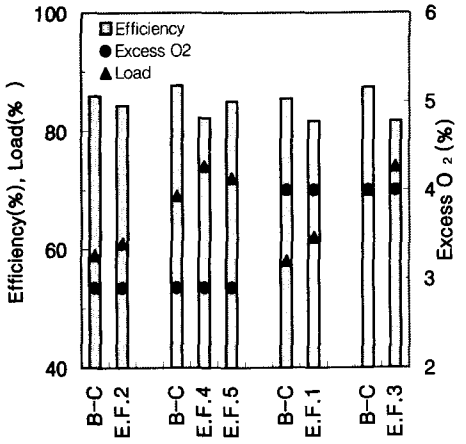


Fig. 7 Relations between boiler thermal efficiency and experimental parameters

열효율을 나타내었다.

Fig. 6 에서 나타난 바와 같이 보일러 열효율은 Bunker-C 유 연소시 보다 유화연료 연소의 경우 1.6~5.7% 낮게 나타났다. 이는 유화연료중의 수분의 증발잠열손실과 유화연료 연소시의 화염의 불안정성과 관련이 있는 것으로 판단된다. 또한 유화연료의 수분함량을 25.2%에서 17.3%로 감소시키면 열효율은 2.8% 상승하는 것으로 나타났다. Bunker-C 와 유화연료 모두 보일러 부하가 70% 정도일 경우 보일러 효율이 가장 높게 나타났다. Fig. 6(b)에 나타난 바와 같이 배기가스 중의 산소농도가 증가하면 부하에 상관없이 보일러 효율이 감소하는 것을 알 수 있는데 이는 과잉공기량이 증가할수록 보일러 열손실 중 가장 큰 비중을 차지하는 배기가스에 의한 열손실이 증가하기 때문이다.

Fig. 7 에 Bunker-C 유와 유화연료에 대해 각각 부하와 산소농도가 변할 경우 보일러의 효율변화를 나타내었다. 유화연료 4 와 유화연료 5 는 배기가스 중의 산소농도가 같고 보일러 부하는 유화연료 5 의 경우 2% 낮은 72% 이다. 이 경우 흡수법에 의한 보일러 효율은 유화연료 5 의 경우 85%로 3.3% 높은데 이는 유화연료 5 중의 수분함량이 17.3%로 유화연료 4 보다 9.6%가 낮기 때문이다. 물함량이 유사한 유화연료 1, 2 의 경우는 동일한 부하조건에서 배기가스 중의 산소농도 차이로 인해 2.6%의 효율차이를 보였다. 이는 배기가스 중의 산소농도가 증가하면 배기가스로의 열손실이 증가하기 때문이다

4. 결 론

산업용 보일러에서 실시한 Bunker-C 유와 유화연료 연소실험 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Bunker-C 유 연소시는 상대적으로 안정된 화염이 존재하였지만, 유화연료 연소시는 연료공급 압력변동 및 화염소화 등의 화염안정화에 문제가 발생하였다.

(2) 유화연료 연소시 CO, Bacharach Smoke 농도 등의 저감에는 효과가 있는 것으로 나타났으나 NOx, SOx 등의 저감효과는 미미하였다.

(3) 유화연료 연소시는 Bunker-C 유 연소시보다 보일러 열효율(흡수법)이 1.6~5.7% 감소하였다.

(4) Bunker-C 유 연소시 NOx 농도변화가 심하게 나타났으며, 유화연료와의 교차 실험에 의한 유리

수분의 영향으로 판단된다.

(5) 본 연구는 Bunker-C 유 연소보일러에서 유화연료를 Bunker-C 유와 동일한 연소조건에서 연소실시 후 결과를 비교한 것으로, 추후 유화연료 연소시 버너시스템 등의 최적화가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

(1) Jacques, M.T., 1977, "Transient Heating of an Emulsified Water-in-Oil Droplet," *Combustion and Flame*, Vol.292, pp.77~85.

(2) Cook, D.H. and Law, C.K., 1978, "A Preliminary Study on the Utilization of Water-in Oil Emulsions in Diesel Engines," *Combustion Science and Technology* Vol. 18, pp. 217~221.

(3) Law, C.K., 1977, "A Model for the Combustion of Oil/Water Emulsion Droplets," *Combustion Science and Technology* Vol. 17, pp. 29~38.

(4) Nicholas, J.M., Kennedy, I.M. and Frederick, L.R., 1983, "Internal Phase Size Effects on Combustion of Emulsions," *Combustion Science and Technology* Vol. 33, pp. 299~307.

(5) Pyon, D. Y., Cho, J. Y., Baek, S. W., Ahn, K. Y., 1997, "Combustion and Microexplosion of Al/Liquid Fuel Slurry Droplets(I)," *Transactions of KSME (Part B)*, Vol. 21, No. 12, pp. 1576~1585.

(6) Gollahalli, S.R., Rasmussen, M.L. and Moussavi, S.J., 1981, "Combustion of Drops and Sprays of No. 2 Diesel Oil and Its Emulsion with Water," *Eighteenth Symposium (International) on Combustion*, pp. 349~360.

(7) Ballester, J.M., Fueyo, N and Dopazo, C., 1995, "Detailed Measurements in Heavy Oil and Oil/Water Emulsion Flames," *Combustion Science and Technology* Vol. 106, pp. 383~391.

(8) Gollahalli, S.R., Nasrullah, M.K. and Bhashi, J.H., 1984, "Combustion and Emission Characteristics of Burning Sprays of a Residual Oil and Its Emulsions with Water," *Combustion and Flame* Vol. 55, pp. 93~103.

(9) SK Corporation, 1995, An Introduction to Heavy Fuel Oil, pp. 61-90.

(10) Korea Petroleum Institute, "The Specification and Quality of Petroleum Products," 1999, pp. 76~82.

(11) Lee, Y. I., Han, J. S., 2001, "A Study on the Spray Characteristics of Hydrocarbon-fuels with Viscosity Variations," *ILASS-Korea*, Vol. 6/No 3, pp. 23~32.

(12) Kojima, Sakai, Yokugawa, 1994, "Fuel Oil of Large-scale Marine Diesel Engine–Usage of Low Quality Fuel Oil and Air Pollution," Sanhaedang, pp. 208-232.

(13) Lee, Y. I., 1996, "The Countermeasures to Reduce Nitric Oxides," SK Corporation, pp. 26~48.

(14) Ballester, J.M., Fueyo, N. and Dopazo, C., 1996, "Combustion Characteristics of Heavy Oil-Water Emulsions," *Fuel* Vol. 75 No 6, pp 695~705.

(15) Gulyurtlu, I., Lopes, H. and Cabrita I., 1996, "The Determination of Emissions of Pollutants from Burning Waste Oils," *Fuel* Vol. 75 No 8, pp. 940~944.

(16) Barreiros, I. and Carvalho, M.G., 1993, "Combustion of the Near Burner Region and Measurements of NOx and Particulates Emissions in Heavy Fuel Oil Spray Flames," *Combustion and Flame*, Vol.92, pp.231~240.

(17) Stephen C. Wood, 1994, "Select the Right NOx Control Technology," *Chemical Engineering Progress* Vol. 90/No. 1, pp. 32~38.

(18) Ashutosh Garg, 1994, "Air Staging, Fuel Staging, and Internal Flue Gas Recirculation are among the Design Features that Help Reduce NOx Emissions," *Chemical Engineering Progress* Vol. 90/No. 1, pp. 46~49.