

와류 충돌형 혼합장치를 이용한 물혼합 연료의 연소특성

곽 인 석* · 한 진 희* · 이 화 순* · 박 권 하**

Combustion Characteristics of Water Emulsified Fuel by Using Swirl Impinging Mixer

I. S. Kwak, J. H. Han, H. S. Lee, K. Park

Key Words : Water Emulsified Fuel(물혼합 연료), Combustion Characteristics(연소특성), Swirl Impinging Mixer(와류충돌형 혼합장치)

Abstract

This paper discusses the combustion characteristics of water emulsified fuel produced by swirl impinging mixer. The experiments are given in a test boiler and a commercial boiler. Flame temperatures, flame shapes and exhaust emissions are measured in the test boiler, and thermal efficiency is tested in the commercial boiler.

The test data show the water in oil makes the flame wider and shorter, the flame temperature lower and the NO_x and smoke lower. Also, the commercial boiler test shows the thermal efficiency increases as well as the emissions decrease.

1. 서 론

최근 대기 환경오염문제와 관련하여 새로운 청정 연료의 기술개발이 꾸준히 연구되어 오고 있다. 선박 엔진이나 보일러에 물을 첨가하여 에멀전 연료화하는 기술은 이러한 기술 중의 하나로 연료의 개량을 통해 근원적으로 연료의 연소성능을 향상 시킴으로서 배기저감효과를 가져오는데, NO_x, Smoke를 동시에 줄일 수 있는 대표적 기술로서 활발히 연구되고 있다. 선박엔진 및 보일러에 응용되는 에멀전 연료에서는 물의 함량을 20%이상 증가시켜도 운전성능에 크게 영향을 주지 않고 있는 것으로 보고되고 있으며, 기존연료를 사용하였을 때와 비교하여 운전성능이 크게 떨어지지 않는다. 그러나 에멀전 연료는 물과 연료의 혼합으로 인한 상분리의 문제가 있으며 에멀전 연료의 액적

이 기존 연료에 비해서 상대적으로 크기 때문에 공기와 접촉하는 면이 작아 연소 조건이 좋지 않다¹⁾. 하지만 효율향상에 대한 발표도 많은데, Mitsubishi사에서는 중유 사용 버너에 물 40%까지 투입하여 NO_x 50%를 저감하고, 저감에 드는 비용을 50% 가까이 절감하였다²⁾. Yukio Mizutani 등은 버너에 유화유를 사용하여 물 30%에서 미세 폭발에 의한 화염길이가 물 첨가에 의해 연소기 내 열흡수와 불활성 가스로서의 수증기 역할에 의해 연소실 내 온도저감과 동시에 미세폭발 및 공기 유동의 활성화에 의한 국부적 온도상승의 억제로 NO_x와 분진이 동시에 저감되며 열효율의 향상을 가져온다고 하였다^{3,4)}. 특히 Wartsila Diesel사에서는 10여 년 전에 이미 디젤 배기가스에 대한 배기특성계획에 참여하면서 물혼합 연소에서 물분사가 적은 비용과 연료 소비에 최소의 영향을 미치면서 쉽게 50%까지 NO_x를 감소시킬 수 있다는 것을 보여주었다⁵⁾.

본 연구에서는 실험버너와 상용버너에서 첨가제를 사용하지 않는 와류충돌형 혼합장치를 이용하여 에멀전 연료의 연소실험을 통하여 연소특성을

* 한국해양대학교 대학원 기계공학과

** 한국해양대학교 기계정보공학부

파악하고 기존연료와 물혼합 연료의 연소효율을 비교 분석한다.

2. 실험장치 및 조건

2.1 실험장치

2.1.1 실험버너

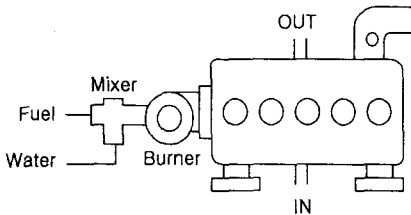


Fig. 1 Experimental burner system

본 연구의 실험버너는 물과 연료를 공급하기 위한 고압 pump, 와류충돌형 혼합장치, gun 타입 버너 그리고, 연소실로 구성된다. 연소효율 측정을 위하여 연소실에 다섯 개의 홀(hole)과 배기구에서 서모커플로 온도를 측정하며, 같은 지점에서 Smoke meter와 배기가스 측정기로 Smoke양과 NOx를 측정한다. 흡입공기량은 유속계를 버너 흡입구에 부착하여 측정한다. 와류 충돌형 혼합장치는 첨가되는 물을 연료압보다 강한 수압으로 노즐에서 분사하게 되어, 물 액적들이 5~10 μm로 깨어지고 최종연료 분사 때까지 이를 유지하기 위해 송출관에 나선형 스텔을 두어 혼합된 연료액적이 연소실내로 주입될 때에도 작은 크기를 유지할 수 있도록 제작되었다.

Table. 1 Specifications of Buner and Mixer

실험버너모델명	Gun type OM-2
연료분사노즐	3.5gal/hour
물분사노즐	0.75gal/hour
연료펌프압력	10bar
물펌프압력	10bar

2.1.2 상용버너

본 실험에 사용된 상용버너는 노즐규격이 연료 3.0Gal/hr에 혼합되는 물의 양이 0.4Gal/hr인 GF 10만Kcal의 버너이다.

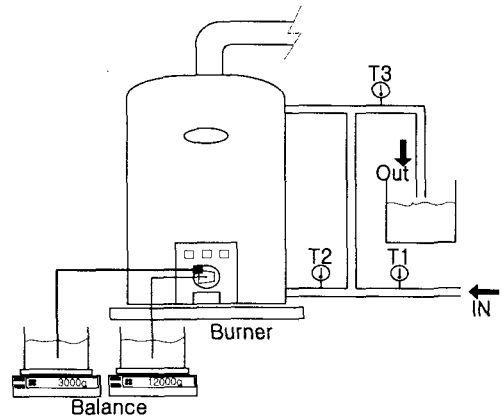


Fig. 2 Experimental apparatus

2.2 실험 조건

2.2.1 실험버너

실험은 경유, 등유 각각에 대해 Case1, Case2, Case3 등의 3가지 경우에 대해 실시하고, 실험조건은 Table 2와 같다. Case1은 연료만 사용하는 일반 운전 구간에 연료량을 2.89ml/s로 공급하며, Case2는 Case1 상태에 물 pump로 물을 0.53ml/s 공급한다. 이때 추가 공급된 물양으로 인해 기름의 공급량은 감소하지만, 버너에 공급되는 총량은 같다. Case3은 연료 pump의 압력을 조절하여 기름양은 Case1과 같은 2.89ml/s로 조절하여, 버너에 주입되는 기름의 양을 유지하며, 이로 인한 물혼합량은 총량 대비 14%로 감소한다.

Table. 2 Conditions of Experimental burner

구분	Diesel			Kerosene		
	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
기름양(ml/s)	2.892	2.415	2.87	2.85	2.08	2.85
물양(ml/s)	0	0.526	0.468	0	0.571	0.476
혼합비(%)	0	17.9	14	0	21.5	14.3
흡기온도(°C)	21	21	21	7	6	5

2.2.2 상용버너

경유, 등유에 대해 각각 물의 양과 Damper의 변화, 물혼합비를 바꿔가면서 수행한다. 물혼합비는 12%, Damper는 2.5, 3, 4, 5등으로 변화시킨다.

Table. 3 Conditions of Commercial burner

Fuel	Diesel		Kerosene	
	Diesel	물혼합	Kerosene	물혼합
Damper	5	3	4	3
유량(kg/h)	11.02	9.806	10.299	9.352
물혼합비(%)		12.16		12.8
냉각수량(kg/h)	1403.22	1409.2	1341.255	1341.55
냉각수온도(℃)	17	17	12	12
출기온도(℃)	15	15	16	15

3. 실험버너의 연소특성

3.1 물혼합 특성

일반적으로 경유에 물액적이 분사될 때 미세폭발이 가장 잘 일어나는 액적크기는 $10\mu\text{m}$ 정도로 보고되어 있다. 본 실험에 사용된 혼합장치에서의 연료액적을 광학현미경으로 촬영하여 $10\mu\text{m}$ 인 혼합연료의 액적크기를 확인하였다.

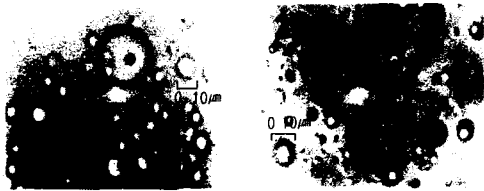


Fig. 3 Photographs of Emulsified fuel

3.2 분무화염특성

디젤만 분사하는 Fig. 4의 경우 전체적인 화염 형상은 폭 방향으로 짧고 길이 방향으로 길다. 그리고, 화염 초기에서 말기까지 연속적이며 안정적 연소를 보여준다. 화염 초기와 중기에 밝은 색의 고온부분이 넓은 범위에 집중되어 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 NOx의 주요 발생원인이 된다.

디젤에 물 14%를 혼합했을 때의 Fig. 5의 경우 화염 길이가 짧아지는 것을 볼 수 있으며, 폭 방향은 약간 증가하였다. 하지만, 온도특성에서 보면 길이가 짧아졌다고 해서 온도가 떨어지지 않는다. 이는 낮은 온도에서 계속적인 연소가 이루어지는 것으로 보이며, 전체적으로는 디젤만 연소시켰을 때보다 연소 화염온도가 저하되었고, 주연소 부분의 화염 중간에서 온도가 낮은 영역들을 볼 수 있다. 또한, 화염 끝 부분에서 간헐적으로 연소가 생성되는 부분도 볼 수 있는데, 이것은 미세폭발 효과로 판단된다. 물혼합 연료의

사용은 국부적 온도상승을 줄이고 연소초기에서 말기까지 온도변화를 완만하게 한다.

등유에 대해서는 물혼합의 영향이 경유에 비해 적은 것으로 나타난다. 등유만 사용한 Fig. 6과 경유의 Fig. 4를 비교했을 때, 등유의 화염이 넓은 부분에서 연소가 부드럽게 이루어지는 것을 볼 수 있고, 화염 윗부분과 끝부분에서 작은 불꽃들이 많이 존재하는 것을 볼 수 있는데 이는 등유의 점도가 낮아 쉽게 증발, 연소된 것으로 생각된다. 등유를 사용한 Fig. 6 역시 전체적으로 화염이 안정적이며, 중앙 부분에 집중적인 고온 영역을 볼 수 있다.

등유에 물을 혼합한 Fig. 7의 경우는 화염 끝 부분에 많은 작은 화염들이 존재하며 폭 방향으로 아주 넓게 번지는 것을 볼 수 있다. 주 화염 속에 국부적인 온도 저하들이 많이 보인다. 하지만, 경유의 물혼합보다 온도저하의 크기는 작고, 연소도 안정되어 있다. 이것은 등유 특성 중 점도와 관계된 것으로 보인다.



Fig. 4 Flames of Diesel fuel



Fig. 5 Flames of 14% water mixing Diesel fuel

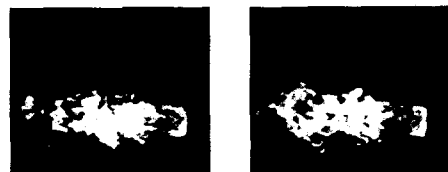


Fig. 6 Flames of Kerosene

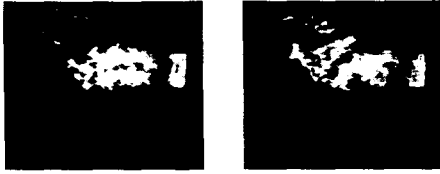


Fig. 7 Flames of 14% water mixing Kerosene fuel

3.4 온도특성

화염 중심축의 온도는 물혼합을 하지 않은 Case1 보다 물을 14% 혼합한 Case3이 주연소 영역인 2~5번 홀에서 50℃ 정도 작게 나왔다. 하지만, 최종 배기구인 6번 홀에서는 큰 차이를 보이지 않는다. 주연소 영역의 국부적 온도는 줄어들지만, 전체적인 온도 저하는 작은 걸로 보여진다. 등유의 경우는 경유에 비해 물혼합으로 인한 열 저하가 상대적으로 적게 표시되는데 이는 발화 온도가 낮기 때문에 물의 열 흡수 영향이 작은 결과이다. Case1의 경우 2번 홀에서 급속히 온도가 올라간 후에 빠르게 저하되지만, Case3은 급속히 온도가 상승하는 것을 막아주고 이후에, 하강을 느리게 하여 완만한 온도를 보여준다.

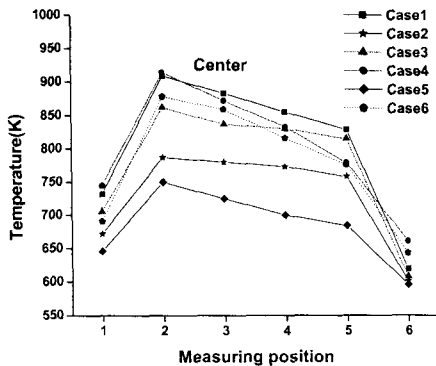


Fig. 8 Temperature variation at the center line

중심에서 폭 방향으로 30mm 거리의 경우, 경유 Case1일 때 1번에서는 매우 낮다가 급격히 상승한다. 많은 양의 연료가 분사되었지만 분사기 쪽으로의 열전달이 적어 2번 홀에서 주로 연소가 이루어져 NOx의 생성이 증가한다.

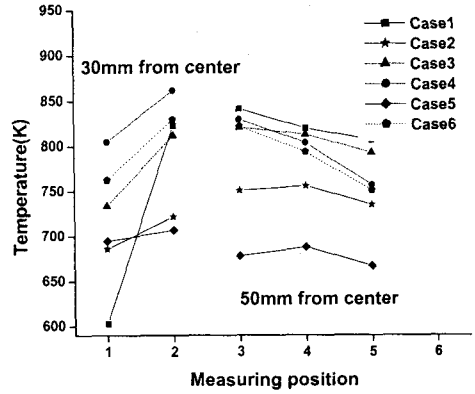


Fig. 9 Temperature variation at 30mm, 50mm from center

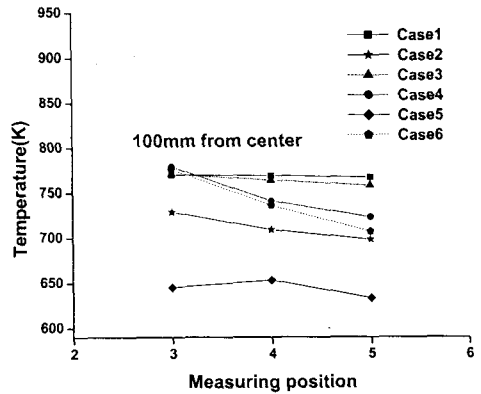


Fig. 10 Temperature variation at 100mm from center

하지만, 경유 Case3의 경우 미세폭발 등의 효과로 폭 방향 크기가 증가되어 1에서 2번 홀까지 큰 온도 상승은 보이지 않아 NOx저감이 기대된다. 등유의 경우는 역으로 물이 증발열을 흡수하여 연소가 1, 2구간에서 덜 이루어지는 것으로 보여진다. 중심에서 폭 방향 50mm의 경우는 후기연소영역(3~5번 홀)에서 Case1과 Case3은 큰 차이를 보이지 않으며, 등유의 경우 감소의 폭이 크다. 대부분의 연소가 완료되면서 온도가 감소한 것으로 보인다. 중심에서 폭 방향 100mm의 외각 영역에서도 Case1, Case3은 비슷하며 등유의 경우 연소 영역이 뚜렷이 나타나지 않는다. 물을 14% 혼합하면 초기에 급격히 온도가 올라가는 것을 막을 수 있다. 이처럼 올라가지 않은

온도는 후에 보상이 되어 평균값을 유지하며 감소되는 것을 볼 수 있어, NOx의 감소가 기대된다.

3.5 배기특성

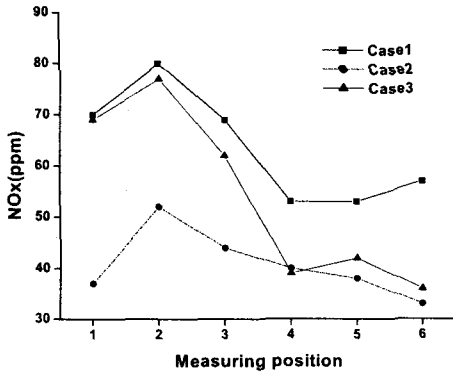


Fig. 11 NOx emissions in Case1~3

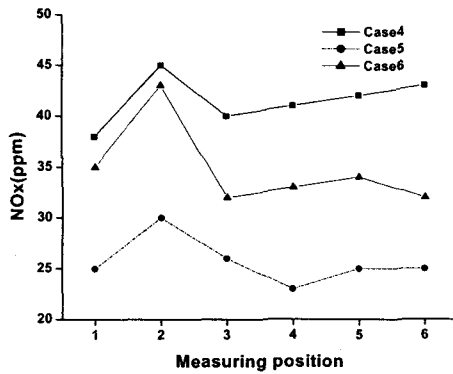


Fig. 12 NOx emissions in Case4~6

3.5.1 질소산화물

경유에서 물을 혼합하지 않은 Case1, 기름양을 줄이고 물을 17.9% 혼합한 Case2, Case1과 기름양은 동일하면서 물을 14% 추가한 Case3의 NOx 양을 비교하면 물을 사용하지 않은 Case1보다 물을 사용한 Case2, Case3의 NOx 감소량은 37~42%에 달한다. 기름양이 동일한 Case1과 Case3을 비교하면 1, 2번 위치에서 NOx의 수치는 비슷하지만 물을 혼합한 Case3은 갈수록 NOx 수치가 감소하여 최종 배기구인 6번에 가서는 37%의 NOx 저감을 가져온다. 이는 전반적인 연소 온도의 저하로 NOx의 수치가 감소된 결과로 보여진다. 등유의 경우는 경유보다 전반적인

로 NOx의 수치가 낮게 나오고 초기에서 말기까지 NOx의 수치 변동이 적다. 즉, 점도가 낮아 증발이 잘 이루어지고 넓은 부분에서 연소가 잘 이루어져 국부적 온도상승이 없어 NOx의 수치가 경유보다 작은 것으로 보여진다. 등유만 사용한 Case1과 14% 물혼합을 사용한 Case3을 비교하면 25.6%의 NOx 저감효과를 가져온다.

3.5.2 분진

경유의 Smoke 감소량은 눈에 띄게 좋아졌다. 물을 혼합한 Case2, Case3은 Smoke 92%의 감소를 보여준다. 미세폭발에 의한 완전연소의 결과로 Smoke 감소를 가져온 결과로 보여진다. 하지만 등유의 경우, 고압유로 뛰어난 연소성능으로 인한 Smoke의 발생이 적으므로 물혼합 연료의 사용으로 큰 효과를 보이진 않지만, 1~2%의 Smoke 감소로 물혼합 연료의 효과를 입증하였다.

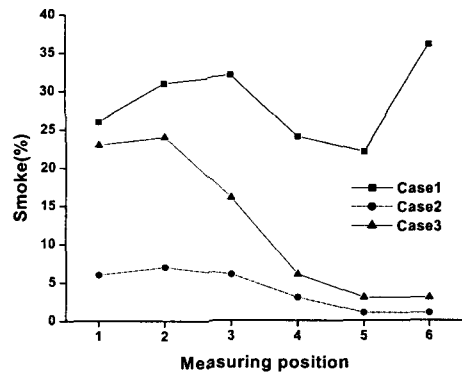


Fig. 13 Smokes in Case1~3

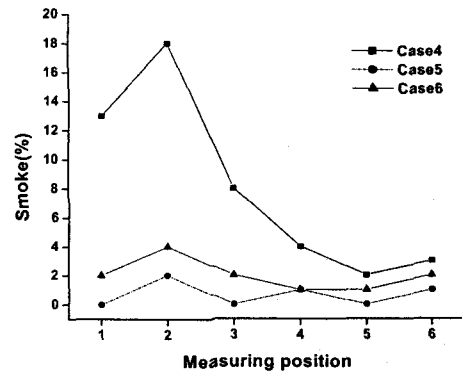


Fig. 14 Smokes in Case4~6

4. 상용버너의 연소특성

4.1 열효율

석유 연소기기 시험방법 통칙(KS B8021-1991)의 계산방법에 의해 열효율을 계산한다.

$$\text{열량 } H = \text{비열(kcal/kg}^\circ\text{C)} * \text{냉각수량(kg/h)} * \Delta T(^\circ\text{C})$$

$$\text{효율 } \eta = \frac{\text{열량H}}{\text{저위발열량(kcal/kg)} * \text{연료량(kg/h)}}$$

*경유 LHV = 10300kcal/kg

*등유 LHV = 10000kcal/kg

KS통칙에 의한 계산결과로 상용버너에 경유와 등유를 사용하여 그 효율을 비교한다. 각각의 Damper에 대한 실험결과 실제 Damper의 조절은 Smoke 및 CO의 양에 의해 결정된다. 배기특성에서 Smoke 및 CO가 낮은 수치를 나타내는 Damper에서 효율을 계산한다.

Table. 4 Conditions of Fuel

Fuel	Diesel		Kerosene	
	Diesel	물혼합	Kerosene	물혼합
Damper	5	3	4	3
유량(kg/h)	11.02	9.806	10.299	9.352
물혼합비(%)		12.16		12.8
냉각수량(kg/h)	1403.22	1409.2	1341.255	1341.55
입구온도	17	17	12	12
출구온도	80	76	79	75
효율	77.88	82.31	85.95	90.1

Smoke와 CO 수치가 같아지는 댐퍼조건에서 다젤과 물혼합은 4.43%, 등유와 물혼합은 4.15%의 열효율이 향상된다. 연소 시 물의 증발 잠열에 의한 손실이 있지만 전체적인 효율이 상승한 것은 공기과잉율이 줄어들고 물의 미세폭발 효과에 의한 영향으로 보인다.

4.2 배기특성

Table. 5 Results of Exhaust Gas

Fuel	Diesel		Kerosene	
	Diesel	물혼합	Kerosene	물혼합
Damper	5	3	4	3
NOx	78	55	78	51
Smoke	0	1	0	0
HC	2	1	0	2
CO	0	0	0.01	0
CO2	11.2	12.4	13	11.7
O2	3.78	2.83	1.98	3.95

NOx는 경유 41.3%, 등유 39.5%의 저감을 보인다. CO, Smoke의 증가 없이 O₂의 감소로 과잉공기가 줄어 열효율 향상에 도움을 준다.

5. 결론

실험버너 및 상용버너에 와류충돌형 물혼합 장치를 사용한 실험은 다음과 같이 요약된다.

1. 혼합정도는 혼합 물 액적의 크기가 5~10 μ m 정도였으며 이는 미세폭발에 적절하다.
2. 분무화염은 스웰유동을 동반하는 분무를 공급함으로서 분사 액적들을 넓게 분포시킨다.
3. 연소실은 연소 초기영역의 급격한 온도상승과 국부적 온도상승을 억제시킨다.
4. 경유에 물을 14% 혼합한 경우에 NOx 37%, Smoke 92%의 감소를 가져온다.
5. 동일한 Smoke와 CO 배출기준의 경우 12%의 물혼합에서 4.4%의 열효율 향상을 보인다.

참고문헌

- (1) 서희준, "엑시머레이저를 이용한 예열전 연료의 분무특성 연구", 충남대학교 석사논문, 2000.
- (2) Mitsubishi Oil Company, "Low-NOx Burner Using Fuel Mixed with Emulsified Water", New Technology & Product, 98-07-007-01, Mitsubishi Oil. Co. Ltd, 1998.
- (3) Yukio Mizutani, Akio Taki, "水乳化燃料噴霧の燃焼・排出特性と燃焼機構", 日本機械學會論文集(B編) 47卷424号(昭56.12), pp2386~2391, 1982.
- (4) Douglas C.Rawlins, Geoffrey J.Germane, Paul O.Hedman and L.Douglas Smoot, "Laboratory-Scale Combustion of Coal Water Mixtures", COMBUSTION AND FLAME 63 pp59~72, 1986.
- (5) Peter Svahn, "NOx Reduction by Direct water Injection in Wartsila Diesel medium speed Diesel Engines", Third Nordic Conference on SOx and NOx from heat and power generation, Wartsila Diesel International Ltd. Oy Vaasa, Finland, 1996.