

하이브리드형 물혼합 에멀전 연료의 버너 특성

김철정¹ · 김동건² · 박권하[†]

(원고접수일 : 2012년 7월 27일, 원고수정일 : 2012년 11월 20일 심사완료일 : 2013년 4월 11일)

Burner combustion characteristics of hybrid type water mixing emulsion fuel

Cheol-Jeong Kim¹ · Dong-Kwon Kim² · Kweon-Ha Park[†]

요약: 물혼합 에멀전 기술은 물의 급속한 분리에 의하여 불안정한 연소를 나타낸다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있는데, 본 연구에서는 연료펌프입구까지 혼합연료를 순환시킴으로써 물의 분리를 최소화하는 하이브리드형 혼합장치의 성능을 분석하였다. 원통형 실험용 보일러에 버너를 부착하였으며 연료와 물의 유량을 조절하고 흡기유량을 제어하면서 배기농도와 화염온도를 측정하였다. 실험결과 배기농도와 화염온도를 유사하게 유지하는 경우 연료 소모율이 12% 저감되었으며, 흡기유량과 디젤유 유량을 동일하게 유지하는 경우 질소산화물이 45.5%, 일산화탄소가 98.5% 스모크가 97.2% 감소하였다.

주제어: 에멀전 연료, 배기 배출물, 저녹스 버너

Abstract: Water emulsion technology has the problem of unstable combustion due to the rapid separation of water. To solve the problem, a hybrid mixing device was developed. The device attached on the burner was tested. As a result, the fuel consumption reduced to 12% in the similar condition of exhaust emissions and flame temperature, and 45.5%, 98.5% and 97.2% of NOx, CO, and smoke were reduced at the same inlet air and fuel flow rate.

Key words: Emulsion fuel, Exhaust emissions, Low NOx burner

1. 서 론

최근 쾌적한 생활 요구 증대와 환경 위기감에 대한 의식의 확산으로 환경오염에 대한 적극적이고 강력한 규제가 예고되고 있다. 하지만 전체 에너지의 대다수를 차지하고 우리의 생활권과 가까이에서 사용되고 있는 화석연료는 유해한 배기가스의 방출이 불가피하다. 특히, 질소산화물과 분진은 적극적인 규제 대상이다.

버너에서 질소산화물을 저감하는 방법으로는 Zaidi et al. [1]는 과잉공기 연소법으로 질소산화물

30%, 일산화탄소 1% 감소, 배기가스 재순환으로 질소산화물 30~50% 저감, 다단 공기 연소 또는 다단 연료 연소법으로 질소산화물을 40~60% 줄이는 것을 소개하였다. Keer et al. [2]는 석탄 버너를 개선하여 최대 50%까지의 질소산화물 저감을 실현하였으며, Hayashi et al. [3]는 메탄 연소기에 다단 연소를 실시하여 96%까지 질소산화물이 저감되었고, Miller et al. [4]는 메탄 연소기에 재연소를 실시하여 40~50%의 질소산화물과 일산화탄소, HC가 저감되었다. Lee et al. [5]는 암모니아 환원제를 사용하여 질소산화물을 30% 이상 제거하였다. 이러한

† 교신저자: (606-791) 부산광역시 영도구 태종로 727,

한국해양대학교 기계에너지시스템공학부, E-mail: khpark@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4367

1 한국해양대학교 기계에너지시스템공학부, E-mail: inad25@nate.com, Tel: 051-410-4953

2 (주) 빈크 인터네셔널, E-mail: had6211@gmail.com, Tel: 051-441-8770

기술은 대부분 질소산화물 저감을 위하여 활발한 연소를 억제하기 때문에 불완전 연소에 의한 분진의 증가를 동반하게 된다. 상반된 배기특성을 가지고 있는 질소산화물과 분진의 배출을 동시에 저감하기 위하여 물혼합 에멀전 기술이 연구되고 있다. Misubishi et al. [6]는 중유에 물을 40% 혼합하여 질소산화물을 50% 저감했으며, Gollahalli et al. [7]는 잔유에 20% 물을 혼합 사용하여 질소산화물은 유사한 수준이었지만, 매연을 많이 감소시켰다. 석탄용 보일러의 경우도 Rawlins et al. [8]의 연구결과 30% 물 혼합의 경우 질소산화물이 180~750ppm 감소하였으며, Liu et al. [9]의 실험결과 46% 물 분사로 질소산화물 20% 감소와 산소 감소, 이산화탄소 증가 등의 연소 활성화 특성을 나타냈다.

이러한 많은 장점에도 불구하고 물혼합 에멀전 기술은 일반적으로 매우 부정적인 입장이 많다. 일반적으로 물 혼합에 의한 연소의 불안정과 분사계 및 연소실의 부식 등을 들 수 있다. 특히 과거의 정교하지 못한 기술 적용 사례들은 이러한 불신을 매우 증가시켰기 때문이다. 그러나 질소산화물에 대한 배기규제가 매우 강화됨에 따라 물혼합 기술에 대한 연구가 다시 시작되고 있다.

본 연구에서는 연소의 안정성을 향상시킨 하이브리드형 혼합장치를 적용한 버너의 성능실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 실험조건

2.1 실험장치

Figure 1은 실험 장치의 개략도이다. 물과 연료의 공급장치, 물과 연료의 하이브리드 혼합장치, 버너와 연소실로 구성된다.

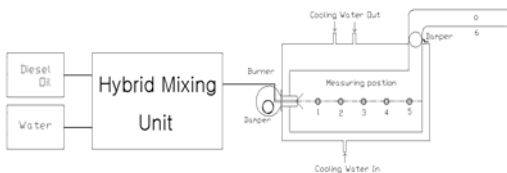


Figure 1: Experimental setup

물과 연료가 펌프에 의해 유입되고, 혼합기에서 물 혼합 연료가 생성된다. 이때 물 혼합량은 유량계에 의해 조절된다. 혼합기에서 생성된 에멀전 연료는 정적 혼합장치를 통과하여 연속적으로 순환하면서 미세하게 혼합되며 공급량만큼의 유화유가 연소실에 분사된다.

연소실의 구조는 직경 400mm, 길이 1260mm의 원통이며 연도는 직경 160mm, 길이 1500mm의 크기이다. 연소실에 5개 홀을 두어 연소 화염 구간에서의 질소산화물과 일산화탄소, 스모크를 측정하였고, 화염 온도는 화염 중심축과 반경방향으로 k-형 열전대로 측정하였다. 측정위치는 중심축의 경우 분사노즐 끝에서 200mm, 350mm, 500mm, 650mm, 800mm 5점이며 반경방향으로는 중심축에서 0mm, 50mm, 100mm, 150mm이고 측정점 6은 연도 배기가스 출구이다. 냉각수를 주입하여 연소실 온도를 일정하게 유지하였으며, 이때 입구와 출구의 온도를 측정하였다.

배기가스는 이산화탄소와 질소산화물, 스모크를 측정하였고 각 측정 장치는 다음과 같다. Testo 330-2 모델로 본 실험에서 측정 연료를 디젤로 지정하고 이산화탄소, 질소산화물을 계측하였다. 스모크는 Diesel smoke tester DS-330 모델로 측정하고 측정 타입은 수동형 여지반사식으로 측정 수치는 0~100% 값으로 나타낸다.

연소 화염의 가시화는 3m 거리에서 고속 카메라와 줌 렌즈를 이용하여 영상을 1ms 간격으로 촬영하였다. 실험에 사용한 버너는 정격출력 116kW(10만 kcal/h)의 Olympia OM-N1 모델로 상세사양은 Table 1과 같다.

Table 1: Specification of test burner

Model	Olympia OM-N1
Rated Power	116 Kw
Fuel Consumption	6-12 L/H
Fuel Feeding Pressure	0.7 ~ 1 MPa
Power Control	ON / OFF

2.2 실험조건

물 혼합물은 디젤유(diesel oil) 소모량을 기준으로 0%, 10%, 20%로 하였으며 이는 전체 소모량을 기준으로 하면 0%, 9.1%, 16.7%가 된다. 크게 2가지 기준으로 실험조건을 선정하였는데 연료 오일 소모량을 동일하게 유지하면서 물의 혼합량을 조절하는 경우와 16.7%의 물 혼합물의 경우에 배기와 부하조건을 디젤유만 사용했을 때와 유사하게 할 경우로 구분된다.

흡기조건은 디젤유만 사용한 경우에 배기가스 중의 스모크 농도가 0.1%가 되도록 흡기구의 개도량을 조절하였으며 이를 기준(100%)으로 개도량을 75%, 50%가 되도록 하였고, 16.7% 혼합물에 대한 추가 실험의 경우는 스모크 농도가 디젤유만을 사용한 경우와 동일한 스모크 농도가 되도록 조절하였다. 이상은 **Table 2**와 같이 요약된다.

Table 2: Test conditions

Water mixing percent (%)	Intake opening	Oil flux (cc/min)
0	100% of Opt*	250 cc/min
9.1	75% of Opt*	
16.7	50% of Opt*	
16.7	Opening adjusted as same condition	220 cc/min

Opt* ; Opening optimized in water_0%

3. 실험결과 및 고찰

액적들이 1 μ m에서 10 μ m 정도로 분포되며, 여러 논문에서 언급되었듯이 물 액적의 크기가 1 μ m 이하에서는 미소 폭발이 아닌 액적의 분리만 가져오고 10 μ m 이상에서는 미소폭발은 잘 일어나지만 연소효율이 저하되는 결과를 가져오므로 본 실험 장치의 액적 크기는 **Figure 3**의 사진에서 보는 것과 같이 1~10 μ m 사이로 적절하다.

3.1 화염 거동

Figure 4는 디젤유만을 공급할 경우 점화가 시작될 때의 화염성장을 보여준다. 2~3회의 점화 스파크가 있는 후에 착화되었으며 화염이 흡입공기와

함께 후류로 밀려나가다가 10ms 후에 버너에 접촉되어 연속화염이 형성됨을 볼 수 있다.

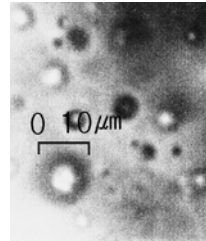


Figure 3: Photomicrograph of the emulsified fuel

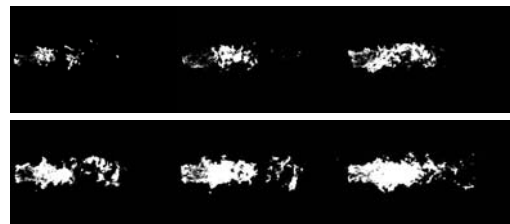


Figure 4: Flame development of the diesel oil case at ignition start

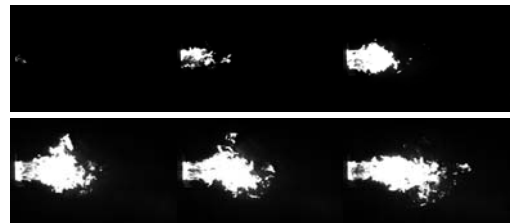


Figure 5: Flame development of the 9.1% mixing case at ignition start

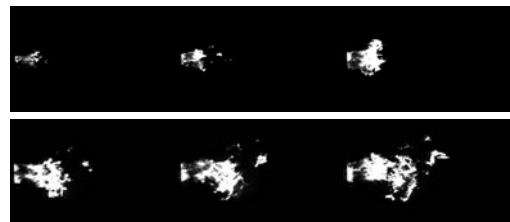


Figure 6: Flame development of the 16.7% mixing case at ignition start

Figure 5는 물 혼합물 9.1%인 경우 점화가 시작될 때의 화염 성장을 보여준다. 화염은 점화 초기

부터 매우 안정적인 상태로 버너에 부착되어 성장하지만 완전 성장까지 디젤 화염과 비교할 때 많은 시간이 소모된다.

Figure 6은 물을 16.7% 포함하는 경우 점화 시의 화염 성장을 보여준다. 혼합물 9.1%의 경우와 유사하게 점화초기부터 화염이 버너에 부착한다. 그러나 화염부상의 정도가 디젤유만을 사용한 경우와 유사하며 30ms가 지나면서 화염이 급격하게 확대된다. 이는 동일한 디젤유 유량에 물을 추가로 혼합하여 전체 연료 유량이 16.7% 증가하여 연료의 분사속도가 증가되었고 물혼합에 의하여 증가된 잠열의 영향으로 연소되지 못한 후류의 연료가 일시에 연소된 것으로 생각된다.

디젤유와 물혼합 연료의 화염 거동을 종합하면 점화가 시작된 직후 흡입공기와 함께 화염이 후류로 날리면서 버너 노즐에 화염이 부착과 부상을 반복하며 화염이 성장한다. 물 혼합률이 16.7%의 경우 9.1%보다는 부족하지만 0%인 디젤유만의 점화보다는 안정된 화염의 성장을 가져온다. 이는 더 많은 량의 연료가 분사되면서 화염이 집중되기 때문으로 생각된다. 화염이 완전히 성장된 후의 거동은 물 혼합률이 증가하면 화염의 폭발향과 축방향으로 넓은 화염을 나타내지만 화염이 집중되어 큰 휘도를 나타내는 버너 근처의 주화염은 축소된다. 또한 화염의 전 영역에서 휘도가 감소한다. 이는 물 혼합 액적의 미세 폭발의 원인과 물 혼합량만큼의 분사속도 증가의 원인으로 사료된다.

3.2 화염 온도

Figure 7은 흡기구 100% 개방조건에서 화염중심 축상의 온도 분포를 나타낸다. 디젤유의 경우 분사 노즐 직후에 850℃를 나타낸 후 770℃까지 낮아지며 이후에 온도가 증가되는 현상을 나타낸다. 물 혼합물 9.1%의 경우도 0%와 유사한 변화경향을 나타내지만 평균 1.5% 낮은 온도 특성을 보인다. 물 혼합물 16.7%의 경우도 9.1%와 유사한 온도 변화특성을 나타내지만 온도가 매우 저하되어 디젤유 대비 평균 5.9% 낮은 온도를 나타낸다. 2번째 측정점에서 매우 낮은 온도를 나타내며 전체적으로 큰 온도변화를 나타내는 것은 많은 급기 유량에 의한 큰 스웰유통의 영향이며, 물 혼합물의 증

가와 함께 온도가 낮아지는 것은 혼합된 물의 증발과 미세폭발 등에 의한 화염의 확산에 기인한 것으로 생각된다.

Figure 8과 Figure 9는 흡기 개도율 50%, 75% 경우의 화염 중심축에서의 온도분포를 나타낸다. 개도량이 적어지면서 흡입 공기량이 감소되어 연소에 의한 열발생량이 다소 감소되지만 가열 유체의 유량도 크게 감소되기 때문에 온도가 증가한다. 개도량 50%인 경우 더욱 높은 온도분포를 나타내는데 0%의 경우 3번 위치부터 급격히 온도가 저하된다. 이는 연소공기의 부족으로 불완전 연소가 이루어지기 때문이다. 하지만 물혼합 연료의 경우는 전체적으로 높은 온도를 유지하는데 이는 미세폭발에 의한 화염의 확산으로 주위 공기를 충분히 이용하기 때문이다.

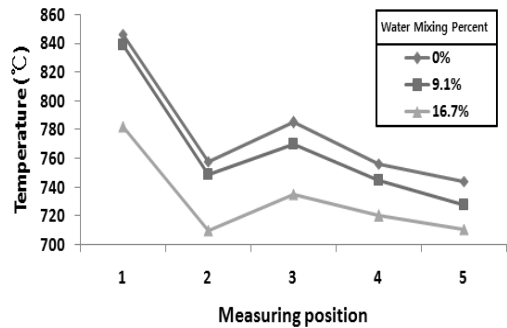


Figure 7: Temperature distribution in the flame center axis in the 100% open case

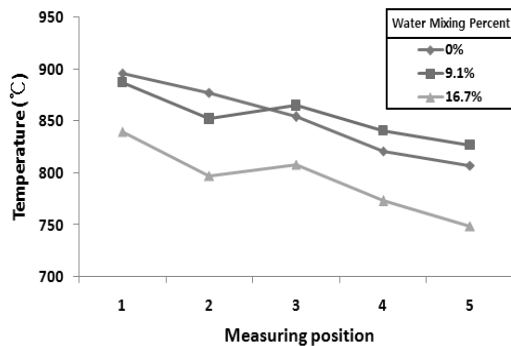


Figure 8: Temperature distribution in the flame center axis in the 75% open case

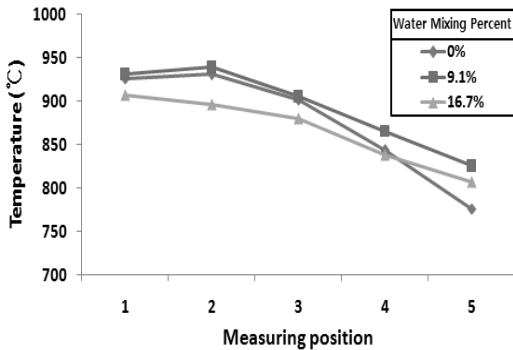


Figure 9: Temperature distribution in the flame center axis in the 50% open case

3.3 배기가스

Figure 10은 흡기 개도율이 변화할 때 물혼합률에 따른 질소산화물 농도를 나타낸다. 100% 개도율에서 디젤유만을 사용한 경우 14ppm정도를 유지하다 20ppm까지 증가한 후 12ppm정도로 낮아진다. 물혼합 연료의 경우로 비슷한 경향을 나타내지만 물혼합률의 증가와 함께 질소산화물 배출이 감소된다. 물혼합률 16.7%에서 위치에 따라 47%까지 감소되었다. 개도율이 50%일 때 물혼합률 0%인 디젤유만을 사용한 경우 매우 낮은 7ppm 정도의 값을 나타내는데 이는 부족한 공기의 영향으로 불완전연소가 심화되어 낮은 화염온도가 형성된 영향으로 생각된다.

Figure 10의 (d)는 보일러 연도로 최종 배출되는 배기가스 중 질소산화물 농도를 나타낸다. 디젤유만 사용한 0%에서는 개도율 100% 일 때 11ppm, 75% 일 때 13ppm으로 증가한 뒤 50% 개도에서 5ppm으로 급격히 낮아지는데 이는 전술한 바와 같이 공급되는 공기의 부족에 기인한 불완전 연소의 영향이다. 물을 9.1%, 16.7% 혼합한 경우는 화염온도의 증가와 공급공기의 감소가 질소산화물 생성에 서로 반대되는 작용을 하여 전체적으로 유사한 결과를 나타낸다.

Figure 11은 흡기량과 물혼합률이 변화할 때의 일산화탄소 배출 농도의 변화를 나타낸다. 개도율이 100%이고 물혼합률이 0% 일 때 일산화탄소 농

도는 분사노즐에서 멀어지는 측정위치 2, 3에서 200ppm 이상의 높은 값을 나타내며 이후에는 줄어들어 연도로 배출될 때는 매우 낮은 값을 나타낸다. 이는 공연비가 충분히 높은 경우의 전형적인 연소현상으로 연소시작 반응과 함께 발생한 CO의 증가와 CO의 연소에 의한 이산화탄소의 생성으로 CO를 소모하는 반응의 결과이다. 물혼합률이 9.1% 일 때 가장 낮은 값을 나타내며 16.7% 일 때 다시 증가되는 것을 알 수 있다. 개도율이 75%, 50%로 낮아지면 산소가 부족하여 연소초기에는 CO의 농도가 줄어들다가 미연소된 연소의 불완전연소 증가로 CO농도가 다시 증가되는 현상을 나타낸다. 그러나 16.7%의 물혼합률의 경우는 50% 개도율까지 연속적으로 CO의 농도가 낮아짐을 보이는데 이는 예멸전 연료의 미소폭발과 분사량 증가에 따른 분포의 넓은 확산으로 흡입되는 공기를 충분히 이용한 결과이다. 배기가스가 연도를 빠져나가는 측정위치 6의 경우를 보면 흡기 개도율이 100%, 75%까지는 모두 낮은 값을 나타내지만 50% 개도율의 경우는 물혼합률이 16.7% 일 때는 낮은 값을 유지하나 9.1% 일 때 CO배출농도가 크게 증가하고 0% 일 때 더욱 증가되는 것을 알 수 있다.

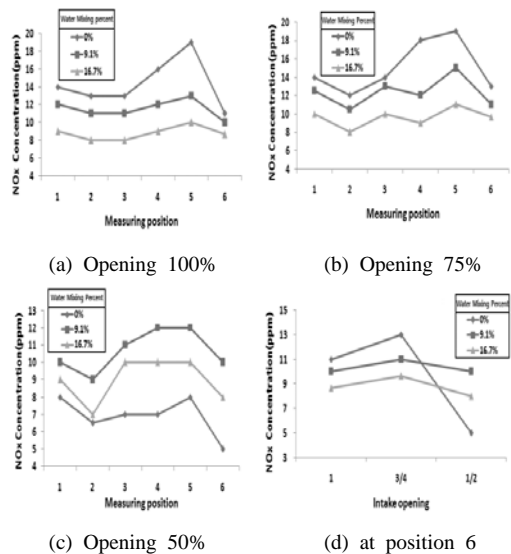


Figure 10: NOx concentration variation with intake opening

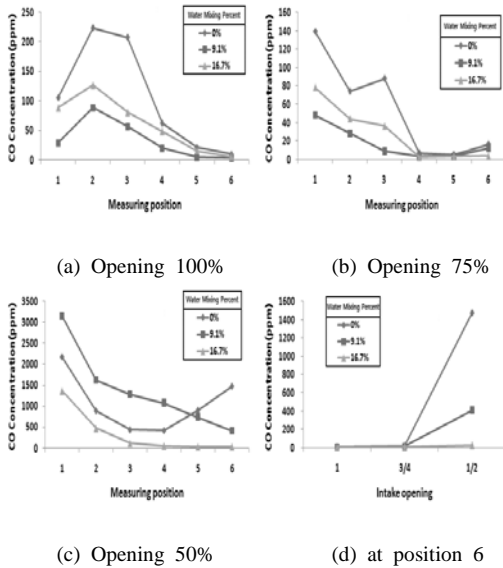


Figure 11: CO concentration variation with intake opening

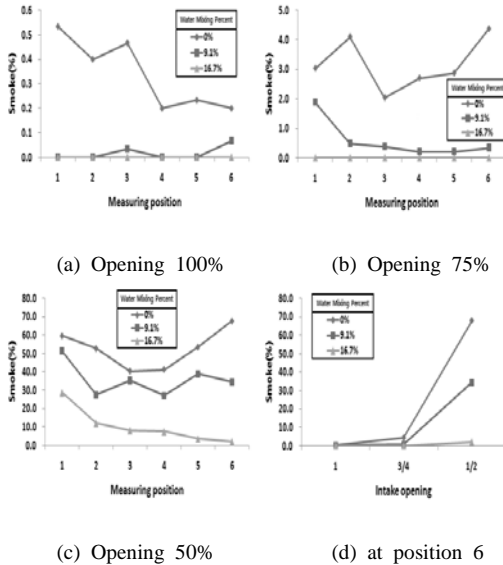


Figure 12: Smoke concentration variation with intake opening

Figure 12는 흡기 개도율과 물혼합률이 변화할 때의 스모크 농도 변화를 나타낸다. 개도율이 100%인 경우 모든 물혼합률에서 0.5% 이하의 매우 낮은 값을 나타낸다. 개도율이 75% 일 때 물혼

합률 0%인 디젤유의 경우 3% 내외의 스모크량이 증가되지만 16.7%의 물혼합률에서는 거의 0%를 유지한다. 50% 개도율의 경우 0% 물혼합률에서 매우 높은 60% 정도의 스모크량을 나타내며 9.1% 물혼합률의 경우도 35% 내외의 높은 값을 나타낸다. 16.7% 물혼합률의 경우는 연속적으로 스모크량이 줄어들어 배기가스 출구에서는 매우 낮은 값을 보여준다. 배기가스 출구를 기준으로 할 때 16.7% 물혼합률의 경우 물혼합이 없는 디젤유와 비교하여 97%의 높은 저감률을 나타낸다.

3.4 디젤과 에멀전 연료 비교 분석

물혼합 에멀전연료의 버너성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여 첫 번째로 연소실의 온도와 배기배출특성을 유사하게 유지시키면서 연료공급량과 흡기량을 조절하여 효율에 미치는 영향을 실험분석 하였으며, 두 번째로 연료공급량과 흡기량을 동일하게 유지하면서 배기가스농도를 측정하여 배기에 미치는 영향을 분석하였다.

3.4.1 화염온도 비교

Figure 13은 물혼합률이 0%와 16.7%이고 유량을 적절히 조절하여 연소실 내부의 처음과 끝의 온도를 동일하게 유지한 경우의 온도분포를 비교한 것이다. 디젤유의 공급유량은 물혼합률이 0%인 경우 250cc/min이며 16.7% 물혼합률의 경우 220cc/min이며 물공급유량 44cc/min이다. 연소실 중심축에서의 온도분포는 물혼합률 16.7%의 경우가 약간 높은 값을 나타낸다. 반경방향으로도 에멀전의 경우가 약간 높은 분포를 나타낸다. 이는 보일러의 부하, 즉 가열량이 에멀전의 경우가 약간 높다는 것을 나타낸다.

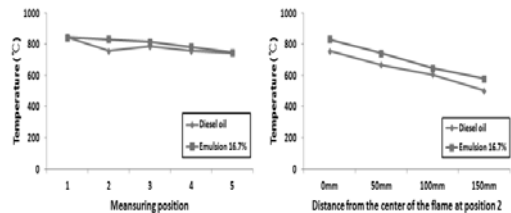


Figure 13: Comparison of flame temperatures

3.4.2 배기가스 비교

Figure 14는 디젤유인 물혼합률 0%인 경우와 물 혼합률이 16.7%이고 디젤유 공급량을 12% 줄인 경우인 버너부하와 스모크량을 유사하게 맞춘 경우의 질소산화물 배출농도를 비교한 그래프이다. 두 경우 모두 20ppm 이하의 낮은 값을 나타내지만 에멀전의 경우 버너 근처에서만 약간 높은 값을 나타내고 이후부터 낮은 값을 유지한다. 배기가스 배출위치에서는 45.5%의 저감을 나타낸다.

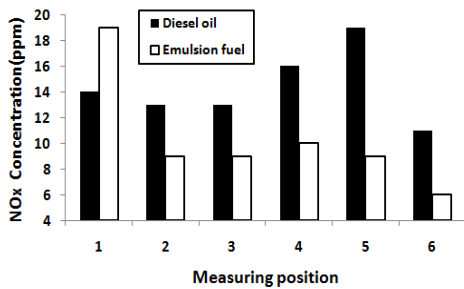


Figure 14: NOx comparisons between diesel and the emulsion of water mixing percent of 16.7% and fuel consumption reduction of 12%

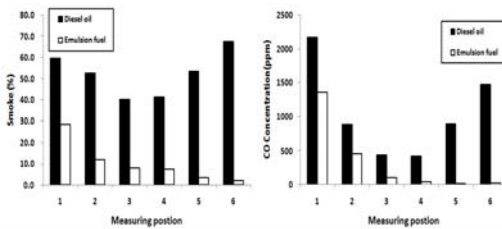


Figure 15: Comparisons of CO and smoke between diesel and emulsion 16.7% in the 50% opening case

Figure 15는 개도율이 50% 일 때의 물혼합률 0%와 16.7%의 경우에 배출되는 일산화탄소와 스모크의 비교를 나타낸다. 일산화탄소와 스모크 농도의 변화는 매우 유사한 경향을 나타내는데, 디젤유인 0% 혼합률의 경우 버너 근처에서 매우 높은 값을 나타낸 후에 중간부분에서 다소 줄어든 후에 화염 후류에서 다시 크게 증가된다. 이는 일산화탄소와

스모크 모두 불완전연소에 기인하는 생성물로 흡기량 부족이 원인이다. 그러나 에멀전 연료의 경우 연속적으로 저감되어 배기가스 배출시점에서는 매우 낮은 값을 나타내는데 이는 흡입된 공기를 액적 미세 폭발과 유동의 활성화에 의하여 충분히 이용한 결과로 사료된다. 결과적으로 동일한 흡기량에서 배기가스가 일산화탄소는 98.5%, 스모크는 97.2% 저감되었다.

4. 결 론

분사펌프 직전까지 혼합연료를 순환시켜 물의 분리현상을 최소화시키는 하이브리드형 물혼합장치를 부착한 버너 성능을 실험한 본 연구를 종합하면 다음과 같다.

1) 화염 거동 : 디젤화염은 화염의 중심부에 높은 휘도를 나타내며 연소가 집중됨을 나타낸 반면, 에멀전 화염은 화염의 휘도가 전체적으로 낮아지며 화염의 측면부와 후류부로 조각화염이 넓게 분포되는 구조를 갖는다.

2) 화염 온도 : 동일한 디젤유 유량과 흡기 개도의 경우는 디젤화염이 높은 온도분포를 나타내지만, 흡기유량을 조절하면 유사한 온도분포를 유지할 수 있다.

3) 배기가스 : 질소산화물은 동일한 연소실 온도에서 스모크 배출이 45.5% 저감되었으며, 흡입 공기량을 1/2로 감소시키면 디젤 배기가스 중 일산화탄소와 스모크의 매우 큰 증가를 보이는 반면, 에멀전 연료는 거의 증가하지 않는다.

4) 연료 비교 분석 : 에멀전 16.7%에서 연소실 내부온도와 배기상태를 유사하게 유지한 경우 연료소모율이 12% 저감되었으며, 동일한 흡기량에서 배기가스가 일산화탄소는 98.5%, 스모크는 97.2% 저감되었다.

참고문헌

[1] A.Zaidi and S.Kumar, "Combustion control techniques to reduce NOx emissions from in-

- dustrial boilers”, PULP & CANADA , vol. 96, no. 6, pp. 45-52, 1995.
- [2] A Keer, R Bautista, L Y Manzanares, E S Garbett, and J Swithenbank, “NOx reduction in a Pulverised-Coal swirl burner with High-Velocity jets”, Journal of the institute of energy, vol. 40, no. 2, pp.71-80, 1998.
- [3] Shigeru Hayashi, Hideshi Yamada, Kazuo Shimodaira, and Tohru Machida, “Nox emissions from Non-Premixed, direct fuel injection methane burners at High-Temperature and elevated pressure conditions”, Twenty-Seventh symposium (International) on Combustion/ The combustion institute, vol. 27, no. 2, pp. 1833-1839, 1998.
- [4] C.Andrew Miller, A.Dahman Touati, Julian Becker, and Jost O.L.Wendt, “Nox abatement by Fuel-Lean reburning: Laboratory combustor and Pilot-Scale package boiler results”, Twenty-Seventh symposium (International) on Combustion/ The combustion institute, vol. 27, no. 2, pp.3189-3195, 1998.
- [5] Jung Bin Lee and Sang Done Kim, “NOx reduction by hydrazine in a Pilot-Scale reactor”, Chemical engineering journal, vol. 69, no. 2, pp. 99-104, 1998.
- [6] Misubishi Oil.Co.Ltd, “Low-NOx burner using fuel mixed with emulsified water”, vol. 98, no. 7, pp. 11-17, 1998.
- [7] S. R. Gollahalli, M. K. nasrullah, and J. H. Bhashi, “Combustion and emission characteristics of burning sprays of a residual oil and its emulsion with water”, COMBUSTION AND FLAME , vol. 55, no. 1, pp. 93-103, 1984.
- [8] Douglas C. Rawlins, Geoffrey J. Germane, Paul O. Hedman, and L. Douglas Smoot, “Laboratory-Scale combustion of Coal-Water mixtures”, COMBUSTION AND FLAME, vol. 63, no. 1, pp. 59-72, 1986.
- [9] Da-Hua Liu, Ali M. Zghoul, Zongwen Li, Bon-Siau Tan, Karl L. Lockwood, and Robert H. Essenhigh, “High intensity combustion of coal with water injection”, COMBUSTION AND FLAME , vol. 63, pp. 49-57, 1986.
- [10] Dong-Hoon Yoo, Osami Nishida, Hirotsugu Fujita, and Jae-Keun Lim, “Combustion characteristics of emulsified C-heavy oil in constant volume combustion with high temperature and pressure”, Journal of the Korean Society of Marine Engineering , vol. 34, no. 2, pp. 243-249, 2010 (in Korean).