

**왕겨와 중유연료를 겸용으로 이용하는 온수보일러
시스템에서 중유 연소특성**
**Heavy Oil Combustion Characteristics of the Hot Water
Boiler System fueled by Rice Husk and Heavy Oil**

박 승 제* 김 동 선*
정희원
S. J. Park D. S. Kim

I. 서론

현재 우리나라 농업분야에서 대량의 에너지 소비처는 시설원예와 미곡종합처리장(RPC : Rice Processing Complex)이다. 시설원예의 경우 가온형 비닐하우스 면적과 생산전용 대형 온실이 2,000년도에는 각각 9,500ha 및 2,900ha에 이르렀다(박승제, 2001). 미곡처리장의 경우에 있어서는 6000톤 규모의 연간 도정능력을 가진 미곡종합처리장(RPC)이 전국적으로 253개가 산재해 있으며 이들 RPC는 자체 난방 또는 물벼 건조에 필요한 열원을 수입경유에 의존하여 미곡종합처리장의 경영성을 떨어뜨림은 물론 국가경제의 건전성을 해치고 있다(박, 2001). 원예시설의 난방 시스템에 사용되는 연료는 거의 대부분 경유를 사용하고 있는데 이들 온실에서 연간 필요로 하는 난방용 수입경유의 양은 약 110백만ℓ에 달할 것이며 비용은 약 500억원으로 추정된다(박, 2001). 또한 RPC를 이용한 물벼의 건조 및 도정량이 증가할 것이며, 물벼 건조 또는 자체 난방을 위한 수입경유의 사용량도 계속적으로 증대될 것이다. 따라서 농업부산물이나 저가유를 연료로 하는 성능이 우수한 다목적 연소로와 그것을 이용한 온수보일러 시스템의 개발에 대한 연구는 매우 절실하다.

이에 본 연구에서는 대형 온실 난방이나 RPC 시설에 이용할 수 있는 왕겨와 중유연료를 겸용으로 이용하는 온수보일러 시스템의 개발을 위해 시스템을 설계 제작하고, 중유를 연료로 이용할 때 시스템의 성능 특성 및 연소 특성을 분석하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 실험재료

표 1과 표 2는 본 실험에서 사용한 중유 시료의 화학적 조성 성분 및 발열량

* 전북대학교 농과대학 농업기계공학과

분석이다. 화학적 조성 성분은 기초과학지원연구소에 의뢰하여 분석하였으며 고위 발열량은 Parr instrument 열량계를 이용하여 측정하였다. 저위발열량은 고위 발열량과 화학적 조성 성분 분석 결과를 기초로 환산한 것이다.

Table 1. Chemical composition of heavy oil used in experiment.

Fuel	Ash (%)	Carbon (%)	Hydrogen (%)	Nitrogen (%)	Sulfur (%)	Etc (%)	Total (%)
No.6 Oil	0.04	86.00	11.40	0.30	1.70	0.56	100

Table 2. Heating value of heavy oil used in experiment.

Higher HV (kJ/kg)	Lower HV (kJ/kg)	ρ (kg/m^3)	Specific Gravity
45,200	43,100	903.2(70℃) 927.3(30℃)	0.93

나. 실험장치

(1) 시스템의 구성

온실 1000평 난방 규모(약 1,100,000 kJ/h 용량)의 왕겨 및 중유 겸용 연소 시스템은 왕겨의 물리화학적 특성을 고려하여 고정상 연소로 시스템에 온수보일러를 채택하고 왕겨의 공급과 재의 처리를 완전 자동화 한 것이 특징이다. 특히 연소실에 중유 버너를 장착하여 중유만으로도 연소가 가능하며 톱밥 등의 가연성 농업 부산물도 연소가 가능하다.

연소로는 소용돌이가 없는 수직로 형태에 분무 입자의 연소 시간을 증가시키고, 연소실 벽체의 열교환기의 효율을 증가시키기 위하여 화염이 연소실 벽체를 따라 회전을 하도록 화염 방사 방향을 아래로 5도, 연소실 중앙으로부터 10도 정도 경사각을 이루게 버너를 설치하였다. 연소실의 하단부는 왕겨 연소시 고온과 저온이 교차하는 영역이며 또한 자동 재처리와 착화시의 이상 고온 등을 고려하여 주물로 제작하였다. 중유 연소시의 완전 연소를 기하기 위하여 연소실 벽체와 벽체 열교환기 사이에 공기 단열층을 두었다.

폐열회수 온수보일러는 관리가 용이하고 열효율도 좋은 관군형을 선택하였다. 배기가스내의 유출 입자를 포집하기 위하여 표준 사이클론을 이용하였으며 이 사이클론에 물자켓을 설치하여 열교환기 기능을 겸하도록 하였다. 연소실과 열교환기 시설은 모두 SUS 재질로 하여 중유연소시의 황산화물과 연소시의 고온 부식 문제등에 대비하였다. 버너의 연소의 시작과 종료시에는 노즐의 폐색을 방지하기 위하여 10분 정도 경유 연소를 실시하였다. 그림 1은 전북대학교의 실험용 미곡종합처리장에 설치 한 연소로 본체, 폐열회수 열교환기, 사이클론 열교

환기 및 연소재 수집 사이클론이 구성되어 있는 정면 사진이다.

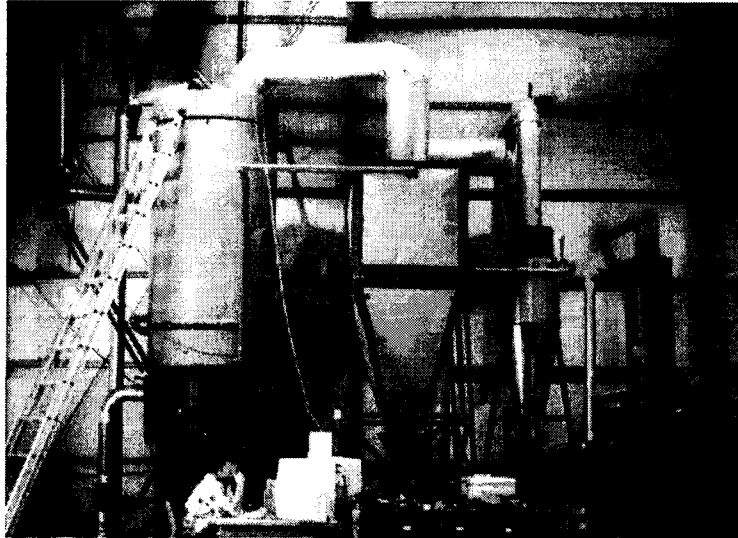


Fig. 1. Picture of combustion chamber, waste heat recovery heat exchanger, cyclone heat exchanger, ash collection cyclone

(2) 실험방법

중유연소 시스템의 연소효율에 큰 영향을 미치는 중요 작동인자는 노즐의 크기에 따른 연료공급율과 연소실 내의 진공압력이다.

예비실험 등을 통해 얻은 결과를 토대로 진공압력 500Pa 하에서 노즐 크기에 따른 공급량 4수준(노즐 2.0, 2.25, 2.5, 3.0 GPH)과 노즐 2.5, 3.0GPH 조건에서 연소실 진공압력 4수준(375, 500, 625, 750 Pa)에 대하여 2 회 반복 실험하였다.

시스템 자동제어 프로그램으로 배기댐퍼가 개방되면 배기팬이 가동하고 버너를 예열, 착화시키면서 배기관을 스텝핑 모터로써 정밀하게 제어하여 연소실의 진공압력을 일정하게 유지시키면서 연소는 진행된다. 초기 착화와 소화시 노즐의 폐쇄를 막아주기 위해 연료를 경유로 하여 약 10분간 운전을 하며 중유 연소시에는 컨트롤 패널에서 중유로 연료를 전환해 주었다. 시스템의 각 위치별 온도는 디지털온도 기록계와 자료수집장치의 온도 측정 장치를 병렬로 연결하여 연소가 정상상태에 도달한 후 측정기간 2 시간동안 15분 간격으로 측정하였다. 이용된 온도센서는 K-type 열전대였다. 온수순환유량은 동일한 측정시각에 디지털 유량계로써, 배연가스의 성분은 CO₂, O₂, CO, SO_x, NO_x 등을 측정할 수 있는 가스분석기로써 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 연소시스템의 온도 특성

그림 2는 진공압력 500Pa에서 노즐 크기에 따른 실험 처리별 정상상태시의 측정 위치별 평균 온도를 나타낸 것이다. 버너의 화염 분출은 T2와 T3 사이에 위치하지만 화염의 방향은 약간 아래로 향하게 되어 있다. 그림에서 보면 전체적으로 T3 온도가 가장 높고 화염이 있는 위치인 T1, T2가 비슷한 온도를 보인다. 그리고 화염으로부터 멀어지는 위치일수록 온도가 낮아지는데 노즐의 크기가 커질수록 온도 강하율이 낮다. 이 현상은 공기량과 연료가 많은 상태에서 연소실내의 유속이 빨라 연소가 분사 화염 위치에서 완전히 연소를 끝내지 못하고 연소실 상부에서 약간의 연소가 진행되기 때문으로 판단된다.

그림 3은 노즐 크기를 2.5 GPH로 고정하고 진공압력에 따른 실험처리의 측정 위치별 평균 온도를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 진공압력이 커질수록 연소실 하부의 온도는 낮아지고 연소실 상부의 온도는 유사한 경향을 보이고 있다. 그 이유는 진공압력이 높아지면서 버너에서 공급하는 공기의 양이 많아지고 연소실의 연소가스의 배출 속도가 커져 연소실 상부로 화염이 빨리 전파되면서 상부에서 약간의 연소가 진행되기 때문이다. 노즐 크기를 3.0 GPH로 고정하고 진공압력에 따른 실험처리에서 화염의 모양이나 연소형태는 노즐 2.5GPH와 큰 차이는 없었다.

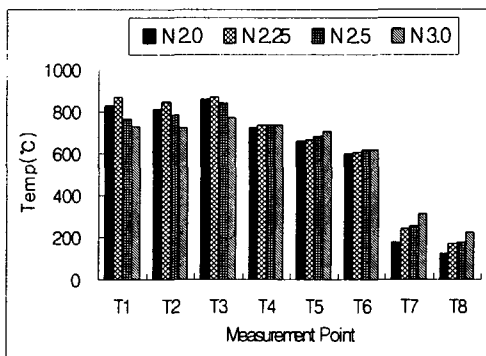


Fig. 2. Mean temperature at the each measurement point according to the nozzle size (Vacuum pressure : 500Pa)

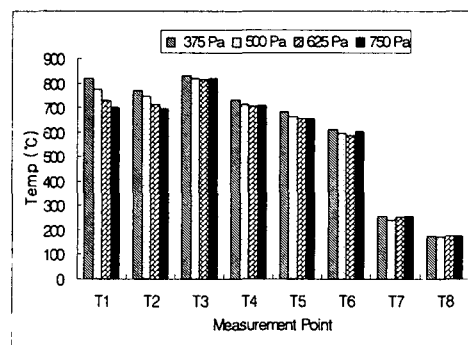


Fig. 3. Mean temperature at the each measurement point according to vacuum pressure (Nozzle size: 2.5GPH)

나. 연소시스템의 효율 특성

열교환기의 효율은 연료의 연소에 의하여 발생된 열량에 대한 열교환기를 통하여 온수로 전달된 열량의 비로서 정의하였는데 그것은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$E_e = \frac{M \times C_p \times (T_o - T_i)}{LHV \times F \times E_{ct}} \quad \text{----- (1)}$$

여기서,

- E_e : 열교환기 효율 (소수) M : 온수의 순환유량 (kg/h)
 C_p : 온수의 정압비열 (kJ/kg-°C) T_o : 열교환기 出口의 온수 온도 (°C)
 T_i : 열교환기 入口의 온수 온도 (°C) F : 중유의 공급율 (kg/h)
 LHV : 중유의 저위 발열량 (kJ/kg) E_{ct} : 중유의 연소효율 (소수)

그림 4는 진공 압력 500 Pa에서 노즐 크기별 열교환기 효율을 나타낸 것이다. 노즐이 클수록 연소실 벽체의 열교환기 효율은 감소하고 폐열회수 열교환기 효율은 증가하는 경향을 보이고 있다. 이것은 온도 특성에서 나타난 바와 같이 노즐이 클수록 같은 진공 압력일지라도 공기공급량이 많기 때문에 연소실 하부의 온도가 낮아 전체적으로 연소실 내 평균온도가 낮아져 연소실 벽체의 열교환기 효율은 낮아지나 배기가스의 열용량은

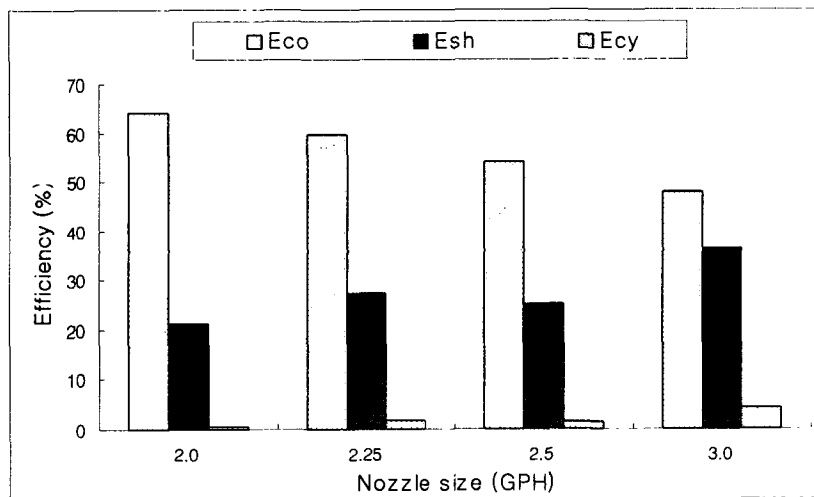


Fig. 4. Heat exchanger efficiency with nozzle size
(Vacuum pressure : 500 Pa)

- Eco; combustion chamber heat exchanger efficiency
 Esh; shell & tube type heat exchanger efficiency
 Ecy; cyclone type heat exchanger efficiency

증가하기 때문에 폐열회수 열교환기들의 효율은 증가하게 된다. 시스템의 열효율은 2.5GPH 노즐에서 진공압력이 증가할수록 감소하는 경향을 보였으며, 375, 500, 600, 725Pa에서 보일러 효율은 88.5, 84.3, 83.0, 81.5%로 나타났다. 3.0GPH에서도 유사한 경향을 보였으며 각각의 진공압력에서 보일러효율은 89.6, 88.2, 83.8,

80.2%로 나타났다. 이러한 현상은 공급되는 공기량이 많을수록 열효율 측면에서는 불리한 것을 의미하는데, 최저 진공압력 수준 375 Pa도 연소에 큰 문제는 없다는 것을 나타내기도 한다. 그러나 3.0GPH 노즐에서 375 Pa 수준에서는 약간의 불완전 연소가 나타났다는데 이것은 배기가스 분석 결과로써 판단할 수 있었다. 배기가스 매연 농도는 허용 배출기준이 링겔만 비탁표로 2도인데, 배연 굴뚝의 가스 색깔이 사람의 눈으로 인식하기 어려울 정도였기 때문에 측정할 필요성을 느끼지 못하였다. 그러나 바카라(Bacharach) 스모크 스케일은 30분 주기로 측정하였는데 모든 실험처리에서 3-4 수준에 있었으며 허용기준은 4수준이다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 가연성 폐기물을 이용한 시설원에 난방에너지 공급시스템 개발을 위하여 대형 온실 난방이나 RPC 시설에 이용할 수 있는 왕겨와 중유 겸용 연소 시스템에서 중유의 연소 및 성능 특성을 분석하고자 하였다. 중요 인자로는 분사노즐의 크기(2.0, 2.25, 2.5, 3.0 GPH)와 진공압력(375, 500, 625, 750 Pa)을 설정하였으며 이에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 진공압력 500Pa 조건에서 연료 공급율이 증가할수록 연소실 벽체 열교환기 효율은 감소하고 폐열회수 열교환기와 사이클론 열교환기의 효율이 증가하였으며, 노즐 2.5GPH에서 진공압력이 커질수록 연소실 하부의 온도가 감소하였고 연소실 상부에서는 비슷한 경향을 보였다.

2. 연소온도특성, 열효율, 배기가스 성분분석 등의 결과로 볼 때 최적의 연소 조건은 노즐 2.5GPH는 진공압력 375Pa, 노즐3.0GPH는 진공압력 500Pa과 625Pa 사이로 판단되었다.

3. 배연가스내의 대기오염 성분은 모든 실험처리에서 CO 함량은 거의 없고 SO₂와 NO_x의 함량 또한 일반 보일러 허용기준을 만족하는 것으로 나타났다.

5. 참고문헌

1. 김광렬외2. 1999. 최신 연소공학, 동화기연
2. 김종진,박승제, 2001, 시설원에난방의 저가연료 대체기술 개발 농림부 보고서.
3. 박승제. 1988. 왕겨 연소기를 이용한 온수보일러 시스템 개발에 관한 연구. 박사학위논문. 서울대학교.
4. 시설원에연구회. 1998. 시설원에 석유 대체에너지 이용기술에 관한 세미나
5. 홍성택, 1967, 병커C 중유의 성상, 대한화학회지 11(1) : 17~21