



[2016-2-BM-004]

체인스토커 방식 2 ton/h-class 목재 펠릿 증기보일러의 부하 별 연소 특성

장준환^{1)*} · 김종진¹⁾ · 최규성¹⁾ · 강새별¹⁾

The Load-Specific Combustion Characteristics of the Chain Stoker Type 2 ton/h-class Wood Pellet Steam Boiler

Junhwan Jang^{1)*} · Jongjin Kim¹⁾ · Kyusung Choi¹⁾ · Saebyul Kang¹⁾

Received 30 October 2015 Revised 4 February 2016 Accepted 13 February 2016

ABSTRACT The aim of this study was to develop a 2 ton/h-class chain stoker type wood pellet steam boiler. A series of investigations examining the combustion load characteristics of a chain stoker type wood pellet steam boiler were conducted. A load from 60% to 100% and a chain speed from 5.00 cm/min to 5.95 cm/min were considered. The maximum efficiency was 90.7% at a 100% load; the CO concentration in this case was 156 ppm. The exhaust gas temperature increased with increasing exhaust gas oxygen concentration. The performance of the boiler was most remarkable at a chain speed of 5.81 cm/min.

Key words Wood Pellet Steam Boiler(목재펠릿 증기보일러), Chain Stoker(체인스토커), Combustion Characteristics(연소특성), Chain Speed(체인 속도)

Nomenclature

x : steam quality, %
 t : steam temperature, °C
 h : enthalpy of steam, kcal/kg
 h' : saturated enthalpy, kcal/kg
 h'' : saturated steam enthalpy, kcal/kg
 h_w : feed water enthalpy, kcal/kg
 γ : latent heat of vaporization at measurement pressure, kcal/kg
 \dot{m}_p : pellet feed rate, kg/h

\dot{m}_w : water flow rate or steam production rate, kg/h

η : thermal efficiency of boiler, %

subscript

LHV : lower heating value

1. 서론

현재 세계적으로 화석 연료의 사용량이 증가하는 추세이다. 이에 따라 화석 연료가 고갈되면서 신재생 연료가 많은 주목을 받고 있으며 신재생 연료를 활용하기 위한 연소 기술이 활발하게 개발되고 있다. 국내에서는 신재생에너지

1) Korea Institute of Energy Research E-mail: jhjang@kier.re.kr
Tel: +82-42-860-3348

공급의무제(RPS)를 시행하였으나, 신재생에너지 자원의 부족, 관련기술 수준의 한계 등으로 국내 발전 부문에서의 공급 의무율 이행에는 어려움이 예상되며 저탄소 순환에너지인 목질계 바이오매스가 대안 중에 하나이다. 이에 지역 난방공사에서 우드칩을 이용한 열병합발전소를 운영하는 등 많은 사업장에서 목질계 바이오매스를 소비하고 있으며, 성능 향상에 대한 연구가 진행 중이다.^[1-3]

목재 펠릿은 목재톱밥이나 숲 가꾸기 산물을 톱밥으로 제조한 후 압축하여 만든 연료로서, 운반 및 저장 등 취급의 용이성에서 다른 목질계 바이오매스에 비하여 유리하다. 현재 국내에서는 목재 펠릿의 수요량 증가와 함께 수입량도 급속히 증가하는 추세에 있어, 국내 생산단가를 낮추는 방안을 마련하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 이러한 시도는 국내 중소형 산업체에겐 생산비용 절감은 물론 저탄소 경제체제로의 급격한 변화를 요구하는 시대 흐름에도 가장 현실적인 대안을 제시할 수 있을 것이다.^[4]

목재펠릿의 수요처 개발을 위하여 2009년부터 산림청에서는 목재펠릿 보일러의 적극적인 보급을 추진하고 있으며, 각계에서 성능 향상을 위한 다양한 연구가 활발히 진행 중이다. 우리나라에서 산업용 보일러는 국내 산업용 연료소비량의 50% 가량을 열로 변환하는 기기로, 산업설비 중에서 가장 많은 연료를 소모하고 있는 에너지 다소비 기기이다. 산업용 보일러는 연간 300일 이상 가동되는 보일러도 많이 있기 때문에 산업용보일러로서 펠릿보일러가 보급될 수 있다면 온실가스 감축효과가 매우 클 것으로 판단된다.^[5-10]

우리나라의 펠릿보일러는 화격자 청소장치가 장착되어 있거나 화격자가 이동하는 형태로 되어 있어야만 한다. 이를 만족하기 위하여 왕복운동을 하는 Moving grate 방식의 연소장치가 연구되어 일부 펠릿보일러에 적용되고 있다. 우수한 목재펠릿 보일러 개발을 위해서는 무엇보다도 클링커 및 슬래그가 발생하지 않아야하고 장기적인 운전에도 이상이 발생하지 않아야한다. 이런 면에서 Chain stoker 방식의 화격자는 Chain stoker를 회전시키며 탱크의 바퀴처럼 구동하는 화격자위에 연료를 끌고루 펼쳐져서 투입되는 과정으로 진행되어 클링커 발생이 적고 화격자가 계속해서 열을 받는 것이 아니기 때문에 제품의 안정성에도 탁월하다. 또한 연료의 성질 및 등급에 따라 자유롭게 환경에 맞는 연소가 가능한 특징을 가지고 있다.

이러한 장점에도 불구하고 현재 국내에서는 Chain stoker 방식 목재 펠릿 보일러의 연구가 미흡한 실정이다. 또한 본 연구 이전의 1ton/h 급 보일러의 연소 실험 결과 CO가 다량으로 배출되는 등 적절한 연소 조건을 찾는 것에 어려움을 겪었다. 이에 본 연구에서는 2ton/h 급 Chain stoker 방식의 목재펠릿 증기보일러를 개발하여 연소가 잘 이루어질 수 있는 조건을 찾기 위한 보일러의 연소 특성에 대한 실험을 수행하였다.^[11,12]

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

보일러는 Fig. 1과 같이 수관과 연관으로 구성되는 수연관식이며 연소실의 표면에서 외부로 방출되는 방열손실을 줄이기 위하여 연소실 외벽에 수관부를 설치하였다. 연소실 내부는 화염이 부력에 의하여 상부에 뜨는 상황이 예측되기 때문에 연소실 상면을 내화물로 시공하였다. 또한 시작품 보일러의 CO 발생을 줄이기 위하여 연소실 체적을 비교적 크게 설계(61m³)하였다.

보일러의 기본구조는 3-pass 구조로 하여 연소실(1-pass)에서 연소된 연소가스가 연소실 후 단에서 연소실 앞부분으로 이동(2-pass)하여 보일러 동체 내에 설치한 연관군(3-pass)을 거쳐서 절탄기로 유입하게 하였다. 2번째 pass는 보일러 동체의 외벽과 수관으로 구성되는 공간이다 (Fig. 1).

연소용 공기는 체인스토커 하부에서부터 공급되어 체인스토커를 통과하여 화층으로 공급되는 구조이며, 체인스토커 하부는 3구간으로 나누어서 공기량을 조절할 수 있는 댐퍼를 3개 설치하였다. 체인스토커의 하부에는 연소 후 발생하는 ash를 처리할 수 있게 재받이를 설치하였고, 실험 후 ash

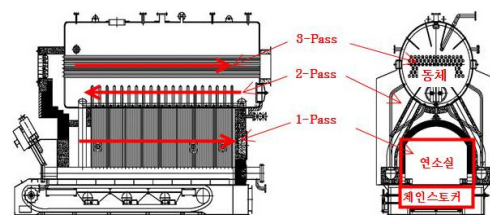


Fig. 1. Schematic diagram of boiler

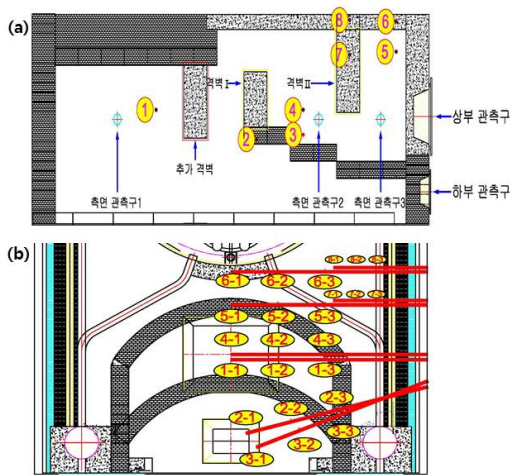


Fig. 2. Temperature sensor and observation location; (a) side view; (b) front view

를 채집, 분석하여 연소효율을 도출할 수 있도록 하였다.

보일러의 연소실과 연소실의 온도측정 위치를 Fig. 2에 나타내었다. 측정 점에는 k-type 열전대 probe를 설치하였으며, 각각의 probe는 3개의 측정점이 설치되어 있어, 총 24개의 열전대 측정점이 설치되었다. 연소실 내부의 화염 관측을 위하여 측면에 3개의 관측구를 설치하였고, 연소실 후단에는 상하로 각각 1개의 관측구를 설치하여 총 5개의 위치에서 연소상태를 관찰할 수 있도록 하였다.

보일러 연소실 내부에는 3개의 격벽이 설치되었다. 1차 제작에서는 Fig. 2(a)의 격벽 I과 격벽 II를 설치하여 실험을 수행하였으나, CO 배출량이 많아 연소실 내부의 수정이 불가피하였다. 이에 따라 연소실 앞쪽에 화염이 떠오르는 것을 방지하여 화염의 길이를 증가시키기 위한 추가 격벽을 설치하여 연소실 내부를 효과적으로 사용하도록 하였다. 격벽은 장시간의 고온과 에 붕괴되지 않도록 아치형으로 설치하여 안정성을 확보하도록 하였다.

2.2 실험방법

시작품 보일러의 성능을 분석하기 위해서는 보일러 열효율, 연소효율, 배기가스 성분 그리고 증기 건도 등을 측정해야한다. 다음의 식 (1)은 발생 증기의 건도, 식 (2)는 발생포화 증기의 엔탈피, 그리고 식 (3)은 보일러 열효율을 도출할 때 사용하는 식이다. 각각의 식은 KS B 6205의 육상용 보일러의 열 정산 방식을 적용 하였으며, 이 규격은

고체, 액체 및 기체 연료를 사용하는 육용 보일러의 실용적 시험에서 열 정산의 일반적 방식에 대하여 규정하고 있다. 다음의 결과를 얻기 위하여 펠릿 공급량, 급수량, 급수 온도, 각 부의 연소가스 온도, 증기 온도 등을 측정하였으며, 배기가스 성분을 분석하고, 연소 후의 남은 재(ash)를 채집하여 분석하였다.

펠릿 투입량은 load cell FS-2191c 모델을 이용하여 측정하였고, 급수유량은 Kometer사의 KTM-800 전자유량계로 측정하였으며, 급수온도는 RTD, 연소가스와 건도계의 온도는 열전대로 측정하였다. 배기가스 분석은 Testo-350 가스분석계를 표준가스로 검증한 후 사용하였다. 실험 시 사용한 펠릿의 발열량은 발열량계를 이용하여 측정하였고, 효율계산 시에는 저위 발열량을 사용하였다.

$$x = \frac{[(0.46(t - 99.09) + 638.81 - h')]}{\gamma} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

$$h = h' + x(h'' - h') \quad [\text{kcal/kg}] \quad (2)$$

$$\eta = \frac{\dot{m}_w(h - h_w)}{\dot{m}_p \times LHV} \times 100 \quad [\%] \quad (3)^{[13]}$$

급수 제어는 간헐 급수 방식을 사용하여, 수위가 일정하게 유지되도록 하였고, 펠릿 공급부에는 자체 개발한 펠릿 분배기를 설치하여 펠릿이 고르게 분배되도록 하였다.

급수량, 펠릿 투입량, 각 부의 온도, 배기가스 성분 측정 값은 실시간으로 실험용 PC에 전달되어 저장할 수 있는 data logging system을 구축하였다.

체인스토커의 회전속도 변화와, 60~100% 범위에서 20% 간격으로 부하 변동에 따른 성능 시험을 수행하였고, 부하 별 성능시험의 경우 산소 농도를 5~11%까지 2% 간격으로 변경하여 실험을 수행하였다. 실험 시 증기 압력은 5kg/cm²으로 일정하게 유지하였다.

3. 실험결과

3.1 체인 속도 변화에 따른 실험결과

체인스토커의 이동속도는 회전모터의 주파수제어에 의

Table 1. Chain speed with respect to frequency

주파수 (Hz)	체인이동속도 (cm/min)	주파수 (Hz)	체인이동속도 (cm/min)
19	5.00	23	6.24
20	5.44	24	6.90
21	5.81	25	7.59
22	5.95	26	8.29

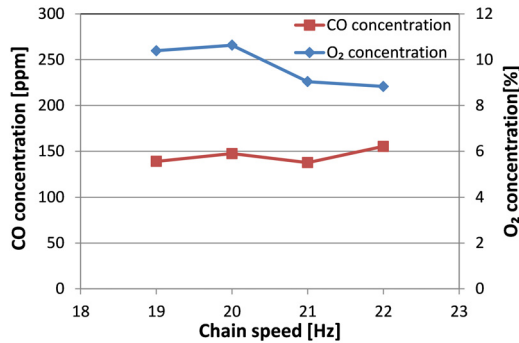


Fig. 3. CO / O₂ Concentration with respect to chain speed

해 조절되기 때문에 모터의 주파수에 따른 체인스토커 불판속도를 예비실험에서 측정하였다. 주파수(Hz)에 따른 체인의 이동속도를 Table 1에 나타내었다.

예비실험 시에 23Hz 이상으로 불판 속도가 빨라지면 효율이 감소하는 경향을 보였기 때문에 불판속도에 따른 배기가스 특성을 분석 실험 시에는 속도제어 인버터의 출력을 22Hz 이하로 하여 실험을 수행하였다.^[14]

부하율을 100%로 하고, 체인 속도는 22Hz, 배기가스 중 산소농도를 9%로 하여 실험을 진행한 후 이후 체인 속도를 1Hz씩 감소시켜 19Hz까지 낮추어 실험을 진행하였다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 체인 속도가 감소함에 따라서 산소농도는 증가하고 이에 따라 CO 배출량은 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 체인 속도가 증가하면 화층이 연소실 후부까지 길게 형성됨으로써 연소 공기량이 감소하는 것으로 판단된다.

3.2 부하 별 실험 결과

시작품 보일러에 대하여 부하 별 실험을 수행한 결과 부하가 클수록 공기비가 작을수록 효율이 증가하는 경향을 보이고 있다. 효율은 100% 부하에서 89.1~90.7%, 80% 부하에서 88~89.1%, 60% 부하에서 86.0~88.8%의 범위

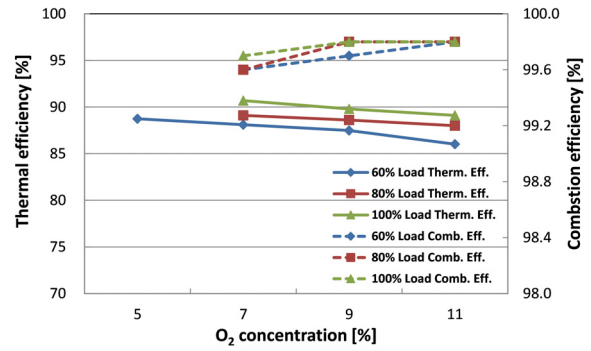


Fig. 4. Thermal & Combustion efficiency of boiler

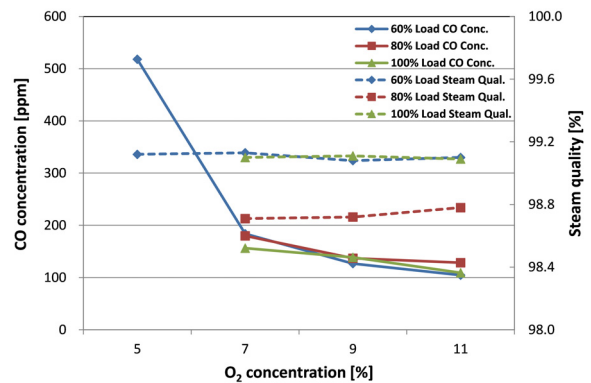


Fig. 5. CO concentration of flue gas and steam quality of boiler

를 보이고 있다(Fig. 4). 보일러의 연소효율은 모든 부하와 모든 산소농도 조건에서 99.6% 이상으로 연소 상태가 매우 좋은 것으로 판단된다(Fig. 4).

CO 배출량은 공기비가 클수록 적게 배출되는 경향을 보이고 있으며, 산소농도 7% 이상 구간에서는 모든 부하에서 200ppm 미만으로 측정되었으나, 산소농도가 7% 미만이면 CO 배출량이 급격히 늘어나는 경향을 보이고 있다. 부하 80%와 100%에서는 CO 배출량이 2000ppm 이상으로 치솟는 등 더 이상 측정이 불가능하였다(Fig. 5). 증기의 건도는 증기 압력과 건도계의 2차 측 온도의 함수로 측정된다. 산림청의 '산업용 목재펠릿 보일러 준공검사를 위한 시험기준'에 따르면 증기의 건도가 98% 이상이면 양질의 증기로 판단한다. 건도는 본 실험에서 증기의 건도는 모든 부하에서 98.7% 이상으로 측정되었으며, 이를 Fig. 5에 나타내었다.^[15]

연소가 시작 될 때부터 보일러의 모든 pass를 거쳐 배기가스로 대기에 방출될 때까지의 일련의 온도 변화를 Fig. 6

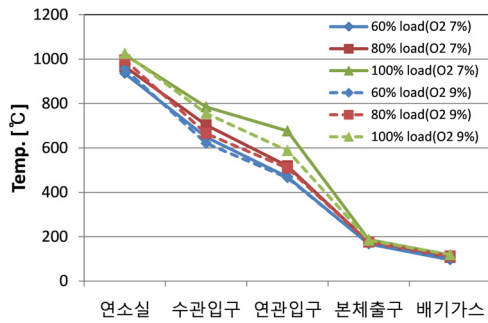


Fig. 6. Temperature inside the boiler

에 나타내었다. 고 부하 일수록 높은 온도 분포를 보이고 있으며, 그 차이는 보일러 본체 출구를 지나면서부터 급격히 줄어드는 것으로 파악된다. 또한 공기비가 클수록(O₂ 9%) 연소실 내부에서의 온도는 높게 형성되었지만 연소실 후단인 수관입구에서는 작은 공기비(O₂ 7%)와 비교하여 급격히 낮아져 더 낮은 온도를 형성하는 경향을 보인다. 이는 공기비가 클 경우에는 화염의 길이가 짧아져 연소실 후단까지 고온의 화염이 미치지 않아 그런 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 2ton/h 급 체인스토커 방식 목재 펠릿 증기 보일러의 연소 특성에 대한 실험을 수행하였고, 체인스토커의 체인 회전 속도 변화와 부하 변동에 따른 연소 특성 변화를 비교하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 보일러의 효율은 모든 부하에서 86~90.7%의 분포를 보이며, 산업용 목재 펠릿 보일러 준공검사를 위한 시험 기준(85%)과 비교할 경우 기준 이상의 성능을 보여주고 있다. 다만 보일러 연소실 내부에 다량의 내화물이 설치되어 있어서 축열되는 시간이 상당히 길기 때문에 정상 상태에 도달하는데 많은 시간이 소모된다. 따라서 현재 연구 중인 보일러를 산업 현장에 적용하기 위해서는 정상 상태 도달 시간을 줄일 수 있는 방안을 마련할 필요가 있다고 판단된다.^[15]
- 2) 체인을 제어하는 인버터의 주파수 변화에 따른 실제 체인의 이동 속도를 측정하였으며, 체인 속도가 감소함에 따라서 배기가스 중의 산소농도는 증가하고 이에 따라

CO 배출량은 감소함을 확인하였다. 이처럼 CO 발생량은 공기비가 작을수록 증가하는 경향을 보이며, 일정 공기비 이하로 떨어질 경우 급격히 증가하였다. 이에 따라 향후 이어질 연구에는 낮은 공기비에서도 원활한 연소가 이루어질 수 있도록 연소실 내부 구조 개선, 2차 공기의 투입 등과 같은 방안을 마련하는 것이 필요하다고 판단된다.

- 3) 보일러의 각 부분에서의 온도 측정을 통해서 연소실 내부에서부터 대기로 방출될 때까지의 온도 변화를 비교 분석하였다. 공기비에 따라서 화염의 길이가 변하였고, 이는 공기비가 높을수록 화염 길이가 짧아져 낮은 공기비에 비하여 효율이 감소하는 결과로 이어짐을 확인하였다. 향후 효율 향상을 위해서 절탄기의 용량에 대한 검토가 필요하다고 판단되며, 최적의 연소를 위한 연소실 내부(연소실~수관입구)의 구조에 대한 검토 또한 필요하다.

References

- [1] Jeong, N. Y., Kim, L. H., 2010, "The Study of Economic Feasibility of Wood Pellet in Domestic Power Plant Sector", *Journal of Energy Engineering*, 19(4), 251-257.
- [2] Suh, G. Y., Kim, S. H., 2012, "Case Study and Evaluation of Economic Feasibility of Combined Heat and Power System using Woodchip Biomass", *Journal of New & Renewable Energy*, 8(4), 21-29.
- [3] Kim, T. K., Youn, H. K., Seung, S. S., Park, S. W., 2002, "Development of a Simulation Software for the Fluidized Bed Sludge Incinerator", *KSME Spring Annual Meeting*, pp. 2179-2184.
- [4] Yang, I., Kim, S. H., Han, K. S., 2015, "Effects of Moisture Content and Particle Size of Sawdust and Operating Time of Flat-die Pelletizer on the Fuel Characteristics of Wood Pellets Fabricated with Mongolian Oak and Rigida Pine Sawdust", *Journal of New & Renewable Energy*, 11(3), 11-20.
- [5] Chungun Yin, Lasse A. Rosendahl, Soren K. Kaer, 2008, "Grate-Firing of Biomass for Heat and Power Production", *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, 725-754.

- [6] Jang, J. H., Ahn, J., Kim, J. J., 2013, "Combustion & Heat Transfer Characteristics inside a Combustion Chamber of 13-Step-Grate Wood Pellet Firing Boiler", KSCEF Spring Meeting, pp. 73-77.
- [7] Sim, B. S., Kim, J. J., Park, H. C., Kim, H. J., Choi, K. S., Kang, S. B., 2011, "Development of Wood Pellet Combustion Facilities 200,000 kcal/h-class", Energy Engineering Fall Annual Meeting, pp.117.
- [8] D. Djurovic, S. Nemoda, D. Dakic, M. Adzic, B. Repic, 2012, "Furnace for Biomass Combustion-Comparison of Model with Experimental Data", International Journal of Heat and Mass Transfer, 55, 4312-4317.
- [9] T. Klason, X. S. Bai, 2007, "Computational Study of the Combustion Process and NO Formation in a Small-Scale Wood Pellet Furnace", Journal of Fuel, 86, 1465-1474
- [10] Ahn, J., Jang, J. H., 2014, "CFD (Computational Fluid Dynamics) Study on Partial-Load Combustion Characteristics of a 4-Step-Grate Wood Pellet Boiler", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-B, 38(4), 365-371.
- [11] Jang, J. H., Kim, J. J., Choi, K. S., Kang, S. B., Sim, B. S., 2014, "The Load Combustion Characteristics of Chain Stoker Type Wood Pellet Steam Boiler", KSME Fall Annual Meeting, pp. 2803-2807.
- [12] Jang, J. H., Kim, J. J., Choi, K. S., Kang, S. B., Sim, B. S., 2014, "The Combustion Characteristics Change for Bulkhead of Chain Stoker Type Wood Pellet Steam Boiler", SAREK Winter Annual Meeting, pp. 348-351.
- [13] Korean Agency for Technology and Standards, 2014, "KS B 6205:2014, Land boilers – Heat balancing".
- [14] Jang, J. H., Kim, J. J., Choi, K. S., Kang, S. B., 2015, "The Combustion Characteristics Change for Bulkhead of Chain Stoker Type Wood Pellet Steam Boiler", SAREK Winter Annual Meeting, pp. 298-301.
- [15] Korea Forest Service, 2013, "산업용 목재펠릿 보일러 준 공검사를 위한 시험기준", pp. 10.
- [16] Kim, J. J., 2015, "Development Trend of Combustion System for Wood Firing", KSNRE Spring Annual Meeting, pp. 55.