

목재펠릿보일러 화격자 상 노즐형 버너핀의 적용에 따른 열효율 비교분석

김대현¹, 김민준², 정인선², 조라훈², 이충건², 김운환³, 어승희^{4*}

¹강원대학교 바이오시스템기계공학과 교수, ²강원대학교 바이오시스템기계공학과 대학원생, ³한국에너지공학연구소 연구원,

⁴한국에너지공학연구소 소장

Comparative Analysis of the Thermal Efficiency of Wood Pellet Boilers with Nozzle-type Burner Pins on the Grate

Kim, D. H.¹, M. J. Kim², I. S. Jeong², L. H. Cho², C. G. Lee², W. H. Kim³ and S. H. Euh^{4*}

¹Professor, Department of Biosystems Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

²Graduate Student, Department of Biosystems Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

³Researcher, Korea Energy Institute, Chuncheon 24464, Korea

⁴Head, Korea Energy Institute, Chuncheon 24464, Korea

*Corresponding author: Euh, S. H. (E-mail: superbness@kangwon.ac.kr)

ABSTRACT

Received: 7 December 2018

Revised: 19 December 2018

Accepted: 19 December 2018

The main objective of this study was to improve the wood pellet boiler and overcome inefficient air supply to the grate in the combustion chamber. Nozzle-type burner pins were attached to the grate to increase the contact area between the solid fuel (pellets) in the grate and the supplied air. In order to verify the increase in thermal efficiency due to the nozzle-type burner pins, comparative experiments were conducted using the same two wood pellet boilers. Two hours of experiments were conducted under the same external conditions (amount of oxidizer, load, ambient temperature, and pellet consumption). The results showed that the combustion characteristics of the flue gas from the boiler with burner pins were improved compared to those of the conventional boiler: the carbon dioxide content was increased, and the thermal efficiency was increased by 2.51%. The contact area between the wood pellets in the grate and the air supply was increased by the nozzle-type burner pins; hence, this boiler showed an improved combustion performance compared to that of the conventional burner system.

Keywords: Injection air, Nozzle-type burner pin, Thermal efficiency, Wood pellet boiler

서론

유엔기후변화협약(United Nations Climate Change Conference, UNCCC) 당사국총회에서 결정된 온실가스감축과 관련하여 감축의무 대상국인 대한민국은 2015년 06월 29일 제출되었던 ‘국가 자발적 감축목표’를 통해, 2030년 온실가스 배출량 전망치인 85,060만 tCO₂ equivalent (tCO₂ eq.)를 기준으로, 2010년 대비 21% 감축된 약 67,197 tCO₂ eq. 또는 2015년 대비 37% 감축된 약 53,587 tCO₂ eq.를 목표로 수립한 바 있다. 이는 경제협력개발기구(Organization



for Economic Cooperation and Development, OECD)의 34개 회원국 중 에너지효율 대비 최고수준(Bloomberg New Energy Finance (BNEF), 2015)으로, 목표달성을 위한 다양한 방안의 수립·시행이 요구된다(Euh, 2016).

목질계 바이오매스 연료의 일종인 목재펠릿의 연소 시 발생하는 이산화탄소(CO_2)는 나무의 광합성에 의해 산소(O_2)로 생성되므로 탄소중립(Carbon Neutral)에너지원(Euh et al., 2018)으로써 온실가스감축의무에 대응가능한 연료로 활용할 수 있다(Choi et al., 2015). 고체연료인 목재펠릿은 함수율(moisture content), 겉보기 밀도(apparent density) 등의 물리적 성질과 휘발분(volatile matter), 고정탄소분(fixed carbon), 등의 화학적 조성 등 연료자체의 불균일성 등과 더불어, 화격자 내 적층된 목재펠릿의 내부로의 공기공급은 배제되고, 외부표면만이 유입된 공기와 접촉되어 연소되므로 불규칙한 연소조건의 조성된다. 이는 온실가스의 배출증가 및 연소생성물(타르, 그을음, 재, 클링커 등)의 발생증가에 기여할 뿐만 아니라 궁극적으로는 연소효율 및 열효율이 저하되는 요인으로 작용된다(Euh et al., 2014; Euh et al., 2016). 현재 목질계 바이오매스 이용 시스템을 이용한 효율 향상을 위한 선행된 연구는 연소조건 및 연소특성, 연소시스템 제어, 연소시스템 성능 및 열전달 특성, 연소생성물 생성·억제·제거, 배기가스 조성 및 순환, 공기비 및 공기유동, 경제성·환경성 등에 관한 연구(Choi et al., 2015)가 수행된 바 있으나 고체연료와 공기의 접촉면적을 개선하기 위한 연구는 미미한 실정이다.

이에, 본 연구에서는 목재펠릿보일러 연소실 내 화격자 내에 연소 시 일정주기로 공급되어 적층되는 목재펠릿더미 내부로의 원활한 공기공급을 위해 개발된 노즐형 버너핀을 화격자의 구멍에 설치한 보일러(실험군, A-boiler)와, 설치되지 않은 조건의 기존 보일러(대조군, B-boiler)의 비교실험을 통해 배기가스 및 열효율이 비교·분석되었으며, 한대의 보일러(A-boiler)를 이용하여 노즐형 버너핀의 설치 유·무에 따른 배기가스(O_2 , CO, CO_2) 특성이 비교·분석되었다.

재료 및 방법

본 연구에 적용되는 장치들은 국립강원대학교 농업생명과학대학의 바이오시스템기계공학과 농업공학실에 부속된 내부공간에 설치되어 외부로부터의 환경변화영향이 최소화되었다(Fig. 1).



Fig. 1. Schematic of the wood pellet boiler.

목재펠릿보일러

목재펠릿보일러(K-23A, Kyuwontech Co. Ltd., Republic of Korea)는 한국에너지기기산업진흥회 에너지기기시험원(Korea Energy Appliances Industry Association, KEAA) 및 한국산업기술시험원(Korea Testing Laboratory, KTL)에 의한 기초성능검증(시험성적서 No. 14-030196-01-1)이 완료·적용되었다. 보일러는 난방열출력 약 26.74 kW (22996.4 kcal/hr) 급의 소형(가정용) 범위에 해당되며, 연소실(the 1st passage, 1PASS) 및 5행 2열(the 2nd passage 및 the 3rd passage, 2PASS 및 3PASS)의 입형(立形) 연관식 구조를 나타낸다. 연소실(1PASS) 내 연소안정성을 도모하기 위한 화격자는 도가니형, 연료공급은 하향식이 채택되고, 2PASS 및 3PASS의 연관 내에는 배플이 설치되어 연소가스 유동의 통제 및 전열면 상 연소생성물 제거 등의 기능을 포함한다(Euh, 2016).

연소실 내 화격자 상의 목재펠릿 및 유입된 1차·2차 공기는 연소되고, 생성된 고온의 연소가스는 배플을 포함한 연관이 설치된 2PASS 및 3PASS를 통과하면서 주위의 난방수에 의해 열손실이 발생된 후 3PASS 상단·후면에 설치된 배풍기에 의해 배기가스의 형태로 배출된다. 난방수의 관수(灌水)용량은 약 0.09 m³으로, 3PASS 하단·후면에 설치된 펌프에 의해 배수되고, 목표지점에서 열손실이 발생된 후 연소실 상단으로 환수되는 구조(Fig. 2)를 나타낸다(Euh et al., 2017).

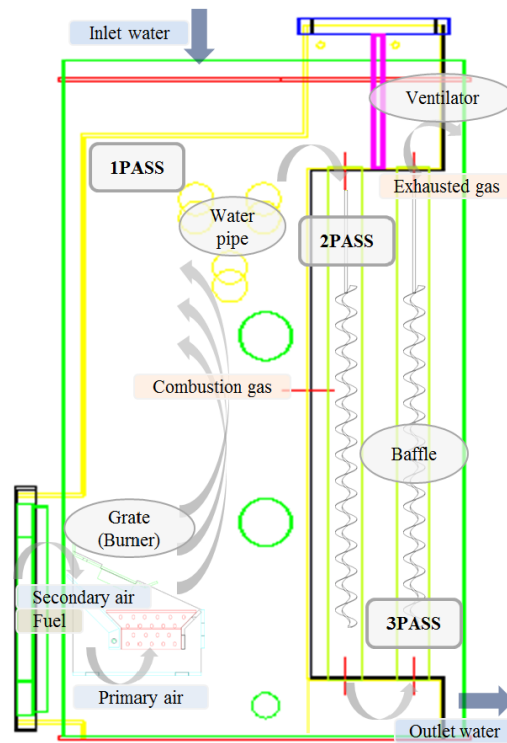


Fig. 2. Schematic of the wood pellet boiler (Euh et al., 2017).

난방출력시험장치

목재펠릿보일러 내 난방수의 온도가 60°C에 도달되면 3PASS 하단·후면에 설치된 순환펌프에 의해 출수(出水)되고, 판형열교환기에 유입 및 열손실 발생 후 연소실 상단으로 환수된다. 반면, 물탱크 내 냉각수는 순환펌프에 의해 출수되고, 동일 열교환기에 유입 및 열획득 발생 후 외부로 배수되는 구조를 나타낸다. 난방출력시험 장치(Fig. 3)는 열

교환기의 각 입·출수구와, 난방·냉각수의 순환배관이 각각 연결되며, 난방수의 출수·환수 및 냉각수의 출수·배수의 온도를 측정하기 위한 K-type 열전대(SY-1150CA, 신유전기엔지니어링, Korea)가 설치된다(Euh et al., 2017).

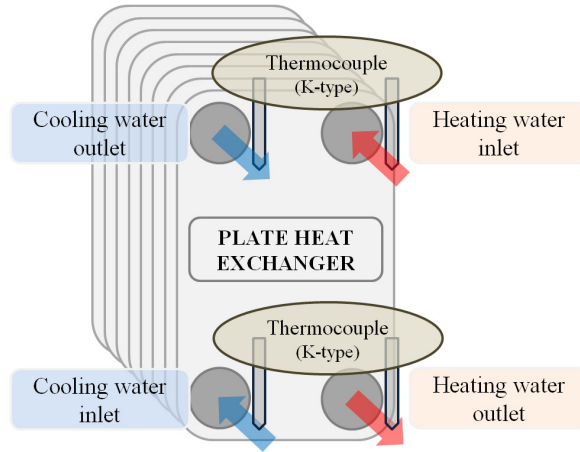


Fig. 3. Schematic of the plate-type heat exchanger (Euh, 2016).

계측장치

목재펠릿보일러 난방수의 출수구 및 환수구, 물탱크 냉각수의 출수구 및 배수구, 3PASS 상단·후면 연소가스배출구로부터 연통중앙부의 약 0.1 m 이하 지점의 배기가스의 온도측정을 위해 설치된 K-type의 열전대로부터의 출력신호를 실시간 데이터로 수집·저장·모니터링 할 수 있는 데이터수집장치(GL800, Graphtech, Japan)가 구성·설치되었다. 난방출력시험 장치의 내부로 순환하는 냉각수의 유량을 측정하기 위해 디지털유량계(F-1000, (주)조선계측기, Korea)가 설치되었다. 배기가스의 성분(O₂, CO, CO₂)은 프로브로부터의 신호를 실시간으로 측정·수집할 수 있는 가스분석기(350XL, Testo Inc., USA; Optima 7, MRU, Germany)가 설치되었다(Euh et al., 2017).

목재펠릿

목재펠릿의 등급은 크기(지름, 길이), 겉보기밀도, 함수율, 회분, 내구성, 발열량, 중금속 등의 구성비에 의해 규격·품질 기준이 결정되며, 이에 본 연구에 적용된 1급 목재펠릿의 주요 규격·품질의 기준이 되는 함수율은 10% 이상, 저위발열량은 각각 4,300 kcal/kg를 만족한다. 목재펠릿의 수분, 휘발분, 회분, 고정탄소분을 포함하는 공업분석과, 탄소, 수소, 질소, 산소를 포함하는 원소분석은 한국에너지기술연구원(Korea Institute of Energy Research, KIER)에 의해 수행되었으며, 해당 결과(제10-0859호)는 Table 1과 같다(Euh et al., 2017).

Table 1. Component analysis data of a first-grade pellet (Euh et al., 2017)

Technical analysis (wt.%)		Elemental analysis (wt.%)	
Water	9.73	Carbon (C)	46.90
Volatile	72.30	Hydrogen (H)	6.60
Ash	0.56	Nitrogen (N)	0.10
Fixed carbon	17.50	Oxygen (O)	45.90
		Sulfur (S)	0.50

노즐형 버너핀

목재펠릿보일러 연소실 내 화격자의 밑면 및 측면에 형성된 다수의 구멍을 통해, 송풍기에 의해 화격자 하단부로 유입된 공기가 연료의 외부표면과 접촉된다. 이에, 적층된 목재펠릿더미의 중심부로 공기를 직접적으로 공급하기 위한 노즐형 버너핀(길이: 21 mm, 외경: 6 mm, 내경: 4.84 mm, 측면 4개 구멍 직경: 1 mm)이 화격자 바닥면의 구멍 39 개에 각각 설치되었으며(Fig. 4), 버너핀의 형상은 Fig. 5와 같다.



Fig. 4. Modified burner with the nozzle-type burner pins.

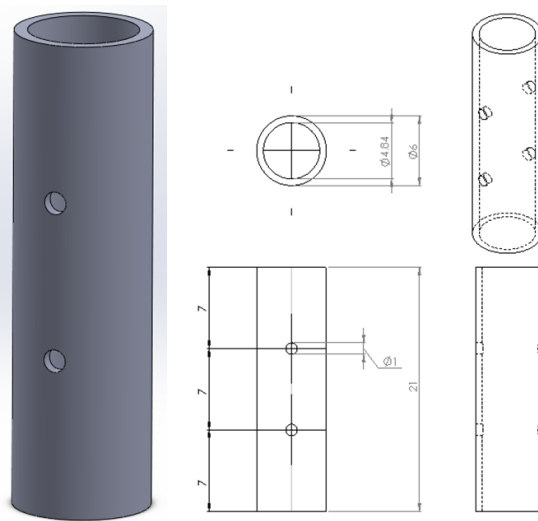


Fig. 5. Geometry of the nozzle-type burner pin.

열효율 시험

본 연구에 적용된 열효율 시험방법은 산업통상자원부 국가기술표준원(Korea Agency for Technology and Standards, KATS)의 한국산업표준(Wood pellet boilers, KS B 8901 : 2017)이 기본적 기준으로 채택되었다. 이에, 열효율 시험은 정격부하에서는 정상상태 30분 이상 2회, 목재펠릿의 소비량측정 허용오차는 $\pm 1.5\%$, 난방수의 유량측정 허용오

차는 ±1.0%, 난방수의 온도측정 허용오차는 ±1.0°C로 결정되었다. 특히, 난방수의 출수온도 약 75°C를 기준으로, 난방수 환수온도는 이보다 약 20°C 낮은 범위로 설정되었다.

한국산업표준(Wood pellet boilers, KS B 8901 : 2017)에 따른 난방효율(η)은 난방출력(H), 연료소비량(I_s), 연료의 총발열량(H_h)을 고려한 식 (1)을 통해 산출된다.

$$\eta = \frac{H \times 3600}{I_s \times H_h} \times 100 \tag{1}$$

여기서, 난방출력(H)는 순환수량(G_h), 물의 비열(C_p), 난방 환수구 온도(th_1), 난방 출수구 온도(th_2)를 고려한 식 (2)를 통해 산출된다.

$$H = G_h \cdot C_p (th_2 - th_1) \tag{2}$$

결과 및 고찰

비교실험을 위해 두 대의 목재펠릿보일러(A-boiler, B-boiler)가 모두 노즐형 버너핀이 설치되지 않은 동일한 조건에서 열효율 분석이 진행되었으며, 1회 실험당 최소 30분 이상의 안정화된 데이터가 3set 이상 수집되었고, 이를 3회 반복한 데이터가 이용·비교·분석되었다. 특히, 모본산을 모르는 소표본($n < 30$)인 경우이므로 t -검정(t -test)을 이용하여 두 보일러 열효율의 표본평균 간 차이를 검정하였다. 5% 유의수준에서 양측검정 기각값 $t_{0.05(2)} = 4.3027$ 이고, t -통계량은 약 0.4705로 산출되고 기각값보다 작으며, 확률 P값은 약 0.6843으로 산출되므로, 두 표본평균 간 차이는 유의하지 않으며(즉, 차이가 없으며), $t_{0.05(2)} = 4.3027^{NS}$ 로 표현된다(Table 2). 즉, t -검정 결과, 두 보일러의 0.82%p의 열효율 차이는 5% 유의수준에서 차이가 없다고 규정된다.

Table 2. Thermal efficiency of two wood pellet boilers under the same condition (no nozzle-type burner pins)

Experiment	A-boiler (non-existence)	B-boiler (non-existence)	Difference	t-test
1st	71.59	69.97	1.62	$t_{0.05(2)} = 4.3027^{NS}$
2nd	69.07	73.29	4.22	
3rd	67.80	67.67	0.13	
average	69.49	70.31	0.82	

이에, 두 대의 목재펠릿보일러(A-boiler, B-boiler) 중 A-boiler는 노즐형 버너핀이 설치된 조건과 B-boiler는 노즐형 버너핀이 설치되지 않은 조건에 대하여 열효율 및 배기가스 특성이 비교·분석되었다. 위와 마찬가지로 t -검정을 이용하여 두 보일러 열효율의 표본평균 간 차이를 검정하였다. 5% 유의수준에서 양측검정 기각값 $t_{0.05(2)} = 4.3027$ 이고, t -통계량은 약 7.9380으로 산출되고 기각값보다 크며, P값은 약 0.0155으로 산출되므로, 두 표본평균 간 차이는 유의하며(즉, 5% 유의수준에서 차이가 인정되며), $t_{0.05(2)} = 4.3027^*$ 로 표현된다(Table 3). 이를 통해, 노즐형 버너

핀이 설치된 A-boiler의 평균 열효율은 약 72.24%이고, 노즐형 버너핀이 설치되지 않은 B-boiler의 평균 열효율은 약 70.22%로 나타나, 노즐형 버너핀이 설치됨에 따라 5% 유의수준에서 열효율이 약 2.51%p 향상된 것으로 나타났다.

더불어 한 대의 목재펠릿보일러(A-boiler)를 이용하여 노즐형 버너핀의 설치 유·무에 따른 배기가스(O₂, CO, CO₂) 특성이 비교·분석되었다. 이 역시 t-검정을 이용하여 보일러 각 배기가스(O₂, CO, CO₂)의 표본평균 간 차이를 검정하였다. 5% 유의수준에서 양측검정 기각값 $t_{0.05(2)} = 4.3027$ 일 때, 산소(O₂)와 일산화탄소(CO)의 t-통계량은 각각 기각값보다 작고, P값이 각각 0.0596 및 0.1124로 산출되므로, 두 표본평균 간 차이는 유의하지 않으며(즉, 차이가 없으며), $t_{0.05(2)} = 4.3027^{NS}$ 로 표현된다(Table 4). 즉, t-검정 결과, 노즐형 버너핀의 설치 유·무에 따른 배기가스 내 산소(O₂)와 일산화탄소(CO)의 농도 차이는 5% 유의수준에서 차이가 없다고 할 수 있다. 하지만 이산화탄소(CO₂)의 t-통계량은 약 4.6532로 산출되고 기각값 보다 크며, P값은 0.0432로 산출되므로, 두 표본평균 간 차이는 5% 유의수준에서 차이가 인정되며, $t_{0.05(2)} = 4.3027^*$ 로 표현된다(Table 4). 이를 통해, 노즐형 버너핀의 설치 유·무에 따른 A-boiler에서 목재펠릿 연소 시 발생하는 배기가스 내 이산화탄소(CO₂)의 농도는 노즐형 버너핀 설치 시 미설치 조건 대비 5% 유의수준에서 약 1.07%p 증가되는 것으로 나타났다.

Table 3. Thermal efficiency test of two wood pellet boilers with nozzle-type burner pins

	Experiment	A-boiler (existence)	B-boiler (non-existence)	Difference	t-test
Thermal efficiency	1st	72.48	70.35	2.13	$t_{0.05(2)} = 4.3027^*$
	2nd	73.35	70.15	3.21	
	3rd	72.37	70.17	2.20	
	average	72.74	70.22	2.51	

Table 4. Exhausted gas characteristics of the wood pellet boiler (A-boiler) with nozzle-type burner pins

		A-boiler (existence)	A-boiler (non-existence)	Difference	t-test
Thermal efficiency	Oxygen (O ₂ , %)	17.74569	18.76044	1.014756	$t_{0.05(2)} = 4.3027^{NS}$
	Carbon monoxide (CO, %)	0.021441	0.053534	0.032094	$t_{0.05(2)} = 4.3027^{NS}$
	Carbon dioxide (CO ₂ , %)	3.146423	2.07863	1.06779	$t_{0.05(2)} = 4.3027^*$

요약 및 결론

두 대의 목재펠릿보일러(A-boiler, B-boiler)가 모두 노즐형 버너핀이 설치되지 않은 동일한 조건에서 열효율 분석이 진행되었으며, t-검정 결과, 두 보일러의 0.82%p의 열효율 차이는 5% 유의수준에서 차이가 없다고 규정된 바, 다음 단계인 노즐형 버너핀이 설치된 조건을 설정하여, 설치되지 않은 조건과 비교실험을 수행할 수 있었다.

이에, 두 대의 목재펠릿보일러(A-boiler, B-boiler) 중 노즐형 버너핀이 설치된 A-boiler의 평균 열효율은 노즐형 버너핀이 설치되지 않은 B-boiler의 평균 열효율 대비 약 2.51%p 향상된 것으로 나타났으며, 이는 노즐형 버너핀의 끝

단이 화격자 바닥면으로부터 21 mm 떨어진 목재펠릿더미의 내에 위치하여 공기를 직접 유입 및 접촉시킬 수 있으므로 상대적으로 완전연소조건에 근접한 것으로 판단된다.

노즐형 버너핀의 설치 유·무에 따른 A-boiler에서 목재펠릿 연소 시 발생하는 배기가스 내 이산화탄소(CO₂)의 농도는 노즐형 버너핀 설치 시 미설치 조건 대비 약 1.07%p 증가되는 것으로 나타났으며, 이는 노즐형 버너핀이 설치됨에 따라 공기가 원활하게 공급되어 연소 시 목재펠릿 내 고정탄소분이 상대적으로 산소와의 활발한 화학반응을 통해 완전연소 시 발생하는 이산화탄소 농도가 높게 나타난 것으로 판단된다.

향후, 노즐형 버너핀의 길이, 형상, 설치 위치 등의 변화에 따른 연구가 추가적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

사사

본 연구는 중소기업기술정보진흥원 산학연협력기술개발사업(No. 120171115)으로부터 지원받아 수행되었습니다.

인용문헌(References)

- Bloomberg New Energy Finance (2015) Australia's 2030 emissions pledge in line with other OECD nations, but lacks the tools to deliver. <http://about.bnef.com/>.
- Choi, Y. S., Euh, S. H., Oh, K. C., Kim, D. H., Oh, J. H. (2015) A study on combustion characteristics in terms of the type of fuel supply device (feeder) of a wood pellet boiler, *J Energy Eng* 24:120-128.
- Euh, S. H., Oh, K. C., Oh, J. H., Kim, D. H. (2014) The formation characteristics of tar; Ash and clinker due to combustion of wood pellet and performance analysis of wood pellet boiler in terms of the moisture contents change of the wood pellet, *J Energy Eng* 23:221-230.
- Euh, S. H. (2016) A study on tar fouling mechanism to improve the combustion system efficiency. Ph.D. Thesis, Kangwon National University, Chuncheon, Korea.
- Euh, S. H., Kafle, S., Choi, Y. S., Oh, J. H., Kim, D. H. (2016) A study on the tar fouled on thermal efficiency of a wood pellet boiler: A performance analysis and simulation using computation fluid dynamics, *Energy* 103:305-312.
- Euh, S. H., Kafle, S., Lee, S. Y., Lee, C. G., Jo, L. H., Choi, Y. S., Oh, J. H., Kim, D. H. (2017) Establishment and validation of tar fouling mechanism in wood pellet boiler using kinetic models, *Appl Therm Eng* 127:165-175.
- Euh, S. H., Choi, Y. S., Nam, Y. S., Lee, C. G., Lee, S. Y., Oh, K. C., Oh, J. H., Kim, D. H. (2018) Development of a real-time drying control system for a pneumatic conveying dryer for sawdust in pellet production, *Energy* 161:10-16.