

목재펠릿보일러의 연료공급 장치의 형태에 따른 연소특성에 관한 연구

최윤성 · 어승희 · 오광철* · 김대현* · 오재현[†]

국립산림과학원 산림생산기술연구소, *강원대학교 바이오시스템공학과
(2015년 2월 2일 접수, 2015년 5월 13일 수정, 2015년 5월 18일 채택)

A Study on Combustion Characteristics in terms of the Type of Fuel Supply Device (Feeder) of a Wood Pellet Boiler

Yun Sung Choi, Seung Hee Euh, Kwang Cheol Oh*, Dae Hyun Kim*, Jae Heun Oh[†]

Forest Practice Research Center, Korea Forest Research Institute, Pocheon, South Korea,

*Department of Biosystems Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, South Korea

(Received 2 February 2015, Revised 13 May 2015, Accepted 18 May 2015)

요 약

본 연구에서는 목재펠릿보일러의 연료공급 장치에 따른 연소특성의 분석을 위해, 낙엽송을 주요 구성성분으로 하는 1급 목재펠릿 연료 및 연소시스템인 목재펠릿보일러를 이용하여, 연료공급 장치(feeder)의 유형 및 형태에 따른 버너의 온도 및 배기가스(O₂, CO_x, NO_x)의 농도 등이 측정, 비교, 분석되었다. 스프링 연료공급 장치가 실험 조건으로 적용된 경우의 버너의 평균 온도는 약 821.76℃, 배기가스 산소 농도는 약 8.88%, 일산화탄소 농도는 약 93.35ppm, 이산화탄소 농도는 약 12.15%, 질소산화물의 농도는 약 139.83 ppm으로 측정되었으며, 이는 스크류 형태의 연료공급 장치가 설치된 실험조건에 비해 완전연소 조건에 도달하였으며, 배기가스의 평균농도가 허용 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 또한, 스크류 피치의 증가에 따른 연소효율이 증가하는 것으로 나타났다. 목재펠릿의 완전연소를 위한 조건에 근접, 조성하기 위해서는 연료의 투입량 조절과 더불어 투입되는 공기의 양을 제어하는 연구가 요구된다.

주요어 : 목재펠릿보일러, 목재펠릿, 연소, 배기가스, 연료공급 장치

Abstract - This study reports the combustion characteristics, such as burner temperature and the concentration of exhausted gas (O₂, CO_x, NO_x) due to the different types and pitches of the fuel supply feeder of the wood pellet boiler. The 1st grade wood pellets composed of mainly larch have been used for the experiment. In case of using the spring feeder, mean temperature of burner was approximately 821.76°C, and the mean concentration of oxygen, carbon monoxide, carbon dioxide and nitrogen oxide were approximately 8.88%, 93.35ppm, 12.15% and 139.83 ppm, respectively. The test result with the spring feeder was shown to approach the condition of complete combustion compared to that of a screw feeder and were in good agreement with authentication judgement standard. Furthermore, the combustion efficiency was improved according to the growth of screw pitch. The control of air flow rate from the blower and ventilator is needed to achieve the complete combustion.

Key words : Wood pellet boiler, Wood pellet, Combustion, Exhaust gas, Feeder

[†]To whom corresponding should be addressed.

Forest Practice Research Center, Korea Forest Research
Institute, Pocheon, South Korea
Tel : 031-540-1186 E-mail : jhoh@forest.go.kr

1. 서론

목질계 바이오매스 연료인 목재펠릿은 ‘탄소중립(Carbon Neutral)’ 에너지원으로 지정(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC, 2006)된 바, 목재펠릿보일러 등의 연소 시스템을 이용하여 난방 열원으로써 적극적 활용이 가능하며, 2014년 기준 약 17,500대의 가정용 목재펠릿보일러가 국내에 공급·운용되고 있다(Korea Forest Service, 2015)(1).

기존 난방시스템에서 기체상(gas phase) 및 액체상(liquid phase)의 연료를 사용하는 시스템의 경우, 연료의 입자 분포가 균일하여 최대의 단면적이 산화작용에 적용되는 반면, 고체 연료인 목재펠릿은 겉보기 밀도(apparent density), 함유율(moisture contents) 등의 물리적 성질(physical properties)과 휘발분(volatilizable matter), 고정 탄소분(fixed carbon) 등의 화학적 조성(chemical composition) 등 연료의 자체적 불균일성 및 간헐적 연료공급방식의 채택으로 인해 불규칙한 연소 조건이 조성되고 있다. 이로 인해, 배기가스(O₂, CO_x, NO_x) 조성비에 대한 편차(deviation) 및 변동(fluctuation)이 지속적으로 발생되고 있으며, 최고점(peak) 영역에서 배기가스 허용 기준치(Korea Energy Management Corporation, 2011)(2)를 초과하는 문제점이 발생되고 있다.

목질계 바이오매스 이용 시스템을 이용한 효율 향상 방안에 관한 선행된 연구 동향을 살펴보면, 연소조건 및 연소특성에 관한 연구(Lee et al., 2010; Ahn et

al., 2011; Sim et al., 2012; Oh et al., 2013; Jang et al., 2014; Ahn and Jang, 2014, Sim et al., 2014)(3-9), 연소시스템 및 제어에 관한 연구(Sim et al., 2012; Lee et al., 2014)(10-11), 성능 및 열전달 특성에 관한 연구(Kang et al., 2008; Fiedler and Persson, 2009; Persson et al., 2009; Kang et al., 2009; Kang et al., 2011; Sim et al., 2012; Jang et al., 2013; Sim et al., 2013)(12-19), 타르의 생성·억제·제거에 관한 연구(El-Rub et al., 2004; Yoon et al., 2009; Moon et al., 2011; Eum et al., 2011; Park et al., 2012; Euh et al., 2013)(20-25), 클링커의 생성·억제·제거에 관한 연구(Byun et al., 2002; Seong et al., 2011; Kang et al., 2012)(26-28), 배기가스 조성 및 순환에 관한 연구(Roberto et al., 2001; Lim et al., 2012; Sim et al., 2014; Oh et al., 2013)(29-32), 공기비 및 공기유동에 관한 연구(Jeong and Kang, 2006; Joel et al., 2012; Oh and Kim, 2013)(33-35), 경제성·환경성에 관한 연구(Yang et al., 2013)(36) 등이 수행된 바 있다. 이와 같이, 선행된 연구에서는 연소시스템 본체 내에서의 효율감소요인 및 이에 따른 효율향상방안 관한 연구에 국한된 실정이며, 연료공급 장치 등의 문제점에 관한 연구는 미미한 실정이다.

이에, 본 연구에서는 고체연료인 목재펠릿의 연소 조건의 안정성 및 균일성을 도모하고자, 낙엽송(larch)으로 구성된 1등급 목재펠릿을 이용한 연료공급 장치(fuel feeder)의 형상에 따른 버너의 온도 및 배기가스(O₂, CO, CO₂, NO_x)의 농도(concentration) 변화를 비교·분석하고자 한다.

2. 재료 및 방법

본 연구에 적용된 목재펠릿은 낙엽송의 목부 및 수피로 구성된 1급 목재펠릿으로, 발열량, 함유율, 겉보기밀도, 내구성, 원소조성을 포함하는 물리적 성질은 Table 1을 통해 나타내었다.

연소장치로 적용된 가정용 목재펠릿보일러는 약 20,000 kcal/h의 출력을 나타내는 3PASS 형식의 입형(立形) 연관 구조로, 연소실 내부에 설치된 버너에서 투입된 목재펠릿 및 산화제(공기)의 연소가 이루어진 후 생성된 연소가스(combustion gas)는 baffle이 설치된 2nd PASS 및 3rd PASS를 통과하면서, 전열면 외부의 열매체에 의해 열손실이 발생된 후, 3rd PASS 상단 후면에 설치된 배풍기(ventilator)에 의해

Table 1. Physical properties of wood pellet used for the analysis (Oh et al., 2013)(37)

Characteristics	Properties	Unit	Value
Heating value	higher value	kcal/h	3918.15
	lower value	kcal/h	3196.51
Elemental composition	carbon (C)	%	45.8801
	hydrogen (H)	%	6.5403
	nitrogen (N)	%	0.0069
	oxygen (O)	%	47.5727
	sulfur (S)	%	0.0000
Moisture contents		%, w.b.	8.70
Apparent density		kg/m ³	722.40
Durability		%	99.05

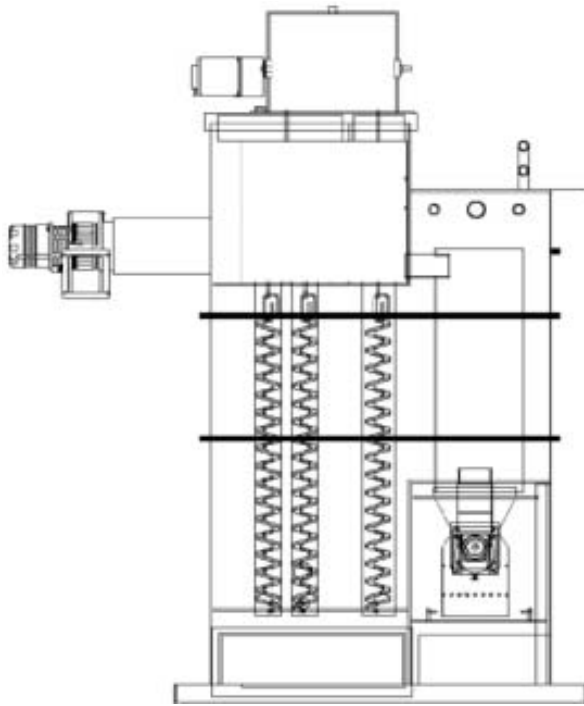


Fig. 1. Schematic of the wood pellet boiler
(Oh et al., 2013)(37)

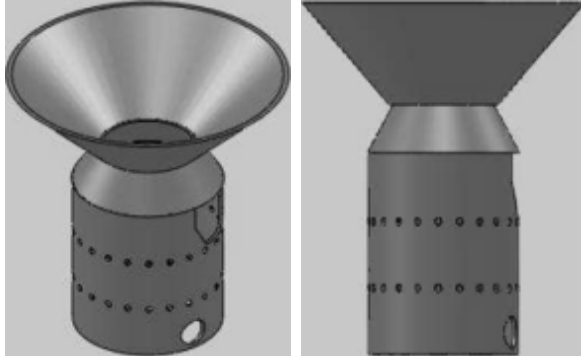


Fig. 2. Geometries of the crucible type burner
(Oh et al., 2013)(37)

배출되는 구조를 가지고 있으며, 시스템의 개략도는 Fig. 1을 통해 나타내었다.

연소의 안정성을 보장하기 위한 버너의 종류 및 연료 투입 방식은 도가니(crucible) 형태 및 상부 낙하식이 각각 채택·적용되었으며, 구현된 버너의 형상은 Fig. 2를 통해 표현되었다.

연료공급 장치(feeder)는 스프링(spring), 스크류(screw) 형태로 구분되고, 각각 형태가 적용되었으며, 스프링의 피치(pitch)는 40 mm, 스크류의 피치는 35 mm 및 55 mm 로, 실제 형태 및 구조는 Fig. 3과 같다.

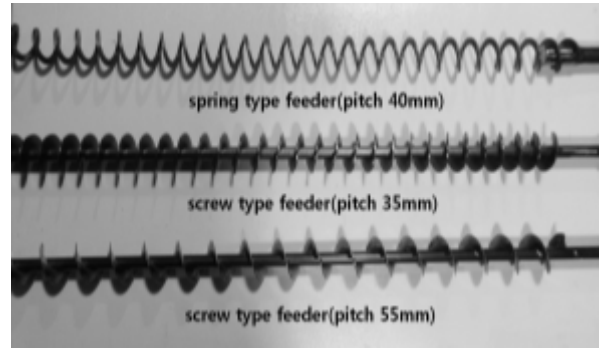


Fig. 3. Figure of the spring and screw
(Oh et al., 2013)(37)



Fig. 4. Figure of measuring and control system
(Oh et al., 2013)(37)

목재펠릿의 연소 시 발생하는 배기가스의 성분(O_2 , CO_x , NO_x)을 측정·분석하기 위해 배기가스 분석기(350XL, TESTO, Germany)가 설치되었으며, 배풍되는 배기가스의 유속을 측정하기 위한 풍속계(06359540, TESTO, Germany), 산소 농도의 측정 및 연소의 자동 제어를 위한 램다센서(LSM11, BOSCH, Germany), 배기 폐쇄 시 보일러 정지를 위한 풍압스위치(SAPS70F8-3, SHINEUI ENTEC Co., LTD., South Korea), 투입되

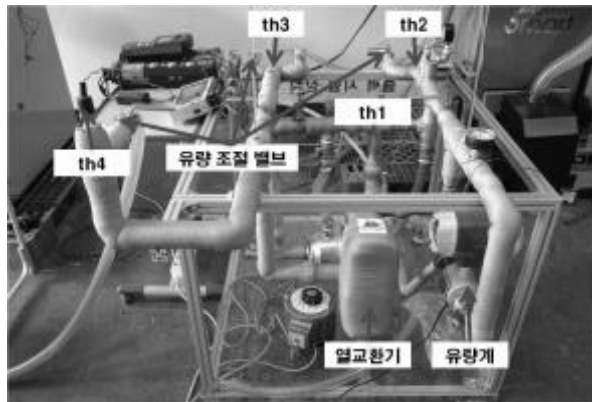


Fig. 5. A testing system of the heating output (Oh et al., 2013)(37)

는 1차 및 2차 공기량의 제어를 위한 인버터(IE5, LS 산전, South Korea), 투입되는 목재펠릿의 양의 측정을 위한 로드 셀(BONGSHIN, OBBA-300, South Korea), 난방 부하의 설정을 위한 열교환기(100,000 kcal)를 포함하는 난방출력시험장치, 보일러의 초기점화·운전·소화의 제어를 위한 PLC (Programmable Logic Controller) (XGB XBC-DR64H, LS산전, South Korea) 기반 제어시스템, 그리고 출력되는 각각의 데이터를 수집·저장·모니터링 할 수 있는 데이터 수집 장치 (data acquisition system) (DaqBook/2000, Measurement Computing (MC) Corp., USA) 등이 구성·설치되었다(Fig. 4).

연료로 사용된 낙엽송으로 구성된 1급 목재펠릿은 시간당 약 5.2 kg이 공급, 발화 후 연소의 안정시점(O₂ 10% 미만, CO 300 ppm 미만, NO_x 150 ppm 미만)으로부터 각 데이터의 계측 및 측정이 수행되었다. 목재펠릿보일러의 난방부하에 의한 출수 및 환수의 온도차는 약 20℃(에너지관리공단, 2011)로 설정·유지되었고, 난방출력 시험은 대기개방식 난방성능 시험법(KS B 8101)에 의거하여 수행되었으며, 난방부하의 설정을 위한 120,000 kcal/h 급 판형 열교환기, 유량계, 열전대, 유량조절밸브를 포함하는 난방출력시험장치는 Fig. 5를 통해 나타내었다.

3. 실험 결과 및 고찰

연료공급 장치의 종류에 따라 변화하는 목재펠릿의 평균 공급량 대비 표준편차의 비율에 관한 변동계수(coefficient of variation)는 35 mm-pitch의 screw feeder (small pitch screw feeder, SP-SCF), 55 mm-pitch의

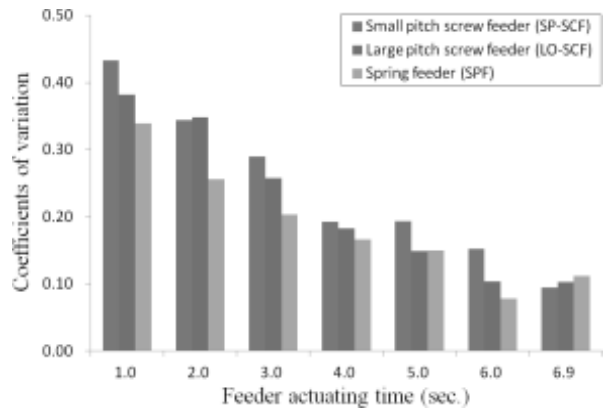


Fig. 6. Coefficients of variation due to feeder type

screw feeder (large pitch screw feeder, LP-SCF), 40 mm-pitch의 spring feeder (spring feeder, SPF)를 포함하는 3종의 연료공급 장치에 대해 산출, 비교, 분석되었다.

공급시간이 1초에서 6.9초까지 증가함에 따라 변동계수는 감소하는 경향을 살펴보면, 6초까지는 SPF의 변동계수 값이 최소로 가장 안정된 값으로 나타났으나, 6.9초에서는 SP-SCF 및 LP-SCF의 변동계수 값이 SPF 대비 안정되는 것으로 나타났다. 즉, 분석범위 내에서 screw feeder의 경우는 6.9초로 설정, spring feeder의 경우는 6초로 설정하는 것이 간헐적 연료공급에서의 공급안정성을 도모할 수 있는 연료공급시간임이 입증되었으며, 결과는 Fig. 6을 통해 나타내었다.

목재펠릿보일러의 연료공급 장치의 형태에 따른 연소실험 기간 중 3600초간의 데이터가 인버터의 주파수 범위(54 Hz, 55 Hz, 56 Hz)에 대해 수집, 평균값으로 적용되었으며, 연료공급 장치의 형태(spring, screw) 및 피치(35 mm, 40 mm, 55 mm)의 변화에 따른 버너온도(℃) 및 배기가스(O₂, CO_x, NO_x)의 농도(%)가 측정·비교·분석되었다. 버너의 온도를 살펴보면, SPF는 평균 821.76℃, SP-SCF는 평균 797.66℃로 가장 낮게, LP-SCF는 평균 857.67℃로 가장 높게 나타났다. 각 데이터의 산포도(散布度)를 나타내는 표준편차(standard deviation)는 SPF의 경우, 약 8.06℃로 가장 낮게 나타나 변동(fluctuation) 폭이 가장 작은 것을 알 수 있으며, 반면, SP-SCF는 약 37.45℃으로 변동폭이 가장 크게 나타난 것을 알 수 있다(Fig. 7).

배기가스 내 산소(O₂)의 농도를 살펴보면, Fig. 8에 나타난 바와 같이, 평균 산소 배출 농도는 SPF는 약 8.88%, SP-SCF는 약 9.92%로 가장 높게, LP-SCF는 약 8.83%로 가장 낮게 나타났으며, 모든 조건에서, 배

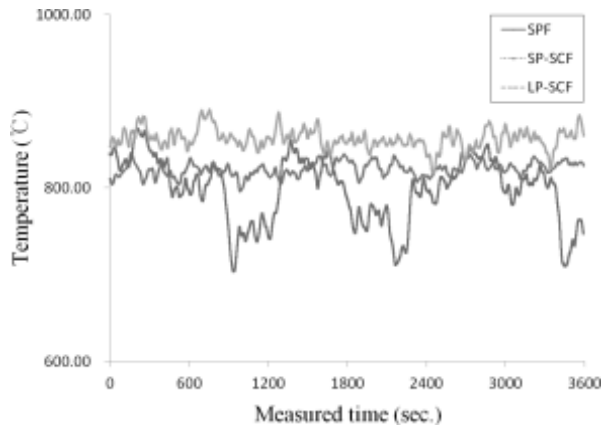


Fig. 7. Burner temperature due to the shape of feeder

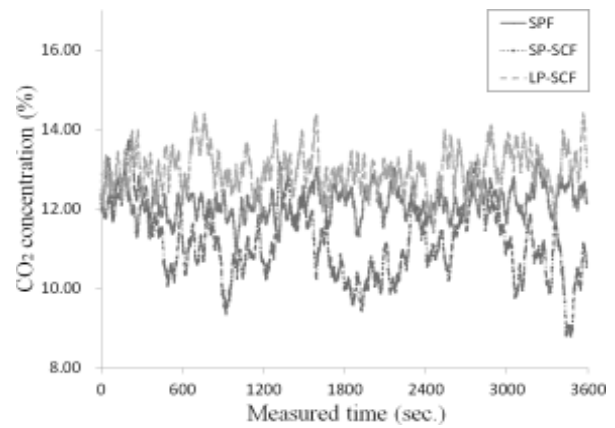


Fig. 10. CO₂ concentration due to the shape of feeder

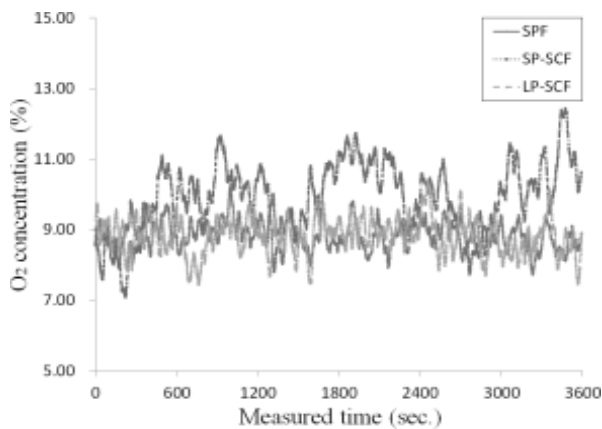


Fig. 8. O₂ concentration due to the shape of feeder

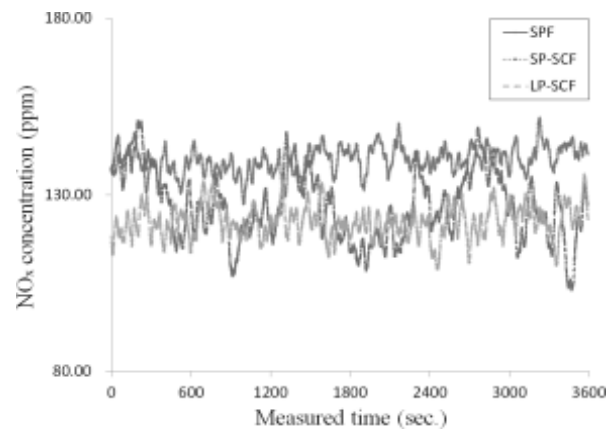


Fig. 11. NO_x concentration due to the shape of feeder

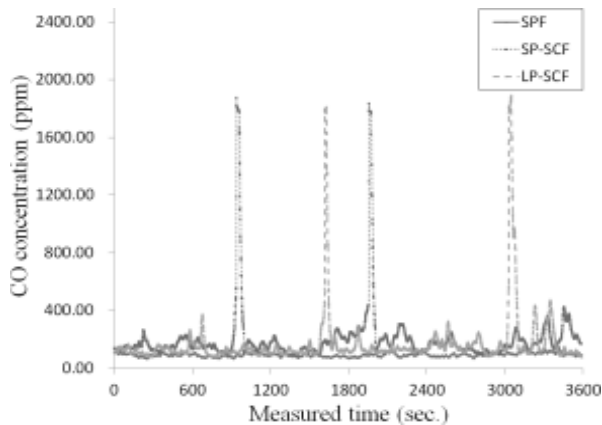


Fig. 9. CO concentration due to the shape of feeder

기가스 허용기준치인 ‘10% 이하’를 만족하는 것을 확인할 수 있다. 표준편차는 SPF의 경우, 약 0.40%로 가장 낮게, SP-SCF는 약 1.02%로, 변동 폭이 가장 크게 발생하는 것으로 나타났으며, peak 영역에서는 허용기

준을 초과하는 것을 확인할 수 있다.

배기가스 내 일산화탄소(CO)의 농도를 살펴보면, SPF는 평균 93.35ppm으로 가장 낮게, SP-SCF는 평균 200.79ppm으로 가장 높게, LP-SCF는 평균 175.27ppm으로 나타났다. 현재, CO의 배기가스 허용기준치는 앞서 언급한 바와 같이, 300 ppm 이하로, 각 형태의 feeder를 변수로 하는 CO 배출 평균값은 허용기준을 만족하는 것으로 나타났다. SPF의 peak는 약 158.15 ppm으로 나타난 반면, SP-SCF 및 LP-SCF에 대한 peak는 각각 1871.99 ppm 및 1890.59 ppm으로, 허용기준치를 최대 1590.59 ppm을 초과하는 것으로 나타났다(Fig. 9).

배기가스 내 이산화탄소(CO₂)의 농도를 살펴보면, SPF는 평균 12.15%, SP-SCF는 평균 11.16%로 가장 낮게, LP-SCF는 평균 13.00%로 가장 높게 나타났으며 (Fig. 10), 이러한 CO₂ 농도의 증가는 완전연소 비율의 상승을 의미하며, 앞선 Fig. 8의 O₂ 농도와는 반비례

Table 2. The values of burner temperature and the concentration of exhausted gas due to the shape of feeder

Variables	Feeder type	Mean	Minimum	Maximum	Standard deviation	Coefficient of variation*
Burner Temp. (°C)	Spring (40 mm-pitch)	821.76	795.74	840.67	8.06	0.0098
	Screw (35 mm-pitch)	797.66	703.16	867.84	37.45	0.0469
	Screw (55 mm-pitch)	857.67	816.06	890.52	11.49	0.0134
Oxygen, O ₂ (%)	Spring (40 mm-pitch)	8.88	7.73	10.30	0.40	0.0448
	Screw (35 mm-pitch)	9.92	7.07	12.44	1.02	0.1032
	Screw (55 mm-pitch)	8.83	7.45	10.37	0.51	0.0580
Carbon monoxide, CO (ppm)	Spring (40 mm-pitch)	93.35	65.99	158.15	12.93	0.1385
	Screw (35 mm-pitch)	200.79	85.20	1871.99	208.25	1.0372
	Screw (55 mm-pitch)	175.27	79.23	1890.59	204.34	1.1659
Carbon dioxide, CO ₂ (%)	Spring (40 mm-pitch)	12.15	10.88	13.27	0.37	0.0301
	Screw (35 mm-pitch)	11.16	8.78	13.82	0.93	0.0833
	Screw (55 mm-pitch)	13.00	11.42	14.41	0.51	0.0390
Nitrogen oxide, NO _x (ppm)	Spring (40 mm-pitch)	139.83	127.31	151.89	3.72	0.0266
	Screw (35 mm-pitch)	126.69	102.88	150.84	9.77	0.0771
	Screw (55 mm-pitch)	122.44	108.93	136.04	4.56	0.0372

* dimensionless parameter

함을 알 수 있다.

배기가스 내 질소산화물(NO_x)의 농도를 살펴보면, SPF는 139.83ppm으로 가장 높게, SP-SCF는 126.69ppm, LP-SCF는 122.44ppm으로 가장 낮게 나타났으며, 세 가지 조건에 대해 배출되는 질소산화물의 평균 농도는 허용기준치인 150 ppm 이하를 모두 만족하는 것으로 나타났다(Fig. 11).

각 조건별 편차가 상이한 각각의 결과에 대한 정확한 비교를 위해 변동계수(coefficient of variation)를 이용하였으며, SPF의 경우, 버너의 온도, 배기가스 배출량에 대한 모든 변동계수가 SCF에 비해 낮게 나타났으며, 이를 통해, 시간에 따라 변화하는 온도 및 농도의 편차가 작게 나타난 것을 알 수 있다(Table 2). 상기 기술된 연료공급 장치의 유형 및 형태에 따른 버너의 온도 및 배기가스(O₂, CO, CO₂, NO_x) 배출 농도 등이 실험 기간 내의 평균·최소·최대·표준편차·변동계수의 값으로 산출, 분석되었으며, 각 조건에 해당되는 결과는 Table 2를 통해 나타내었다.

Table 2에 나타난 바와 같이, 버너 온도 및 CO를 제외한 배기가스 배출 농도에 대한 SCF의 평균값이

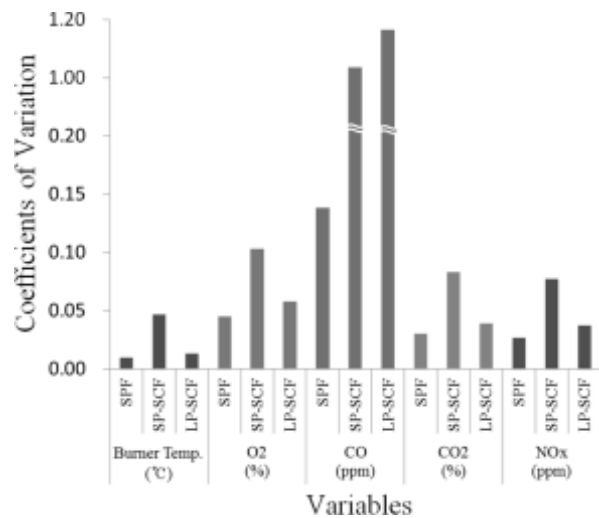


Fig. 12. Coefficients of variation due to the burner temperature and exhausted gas concentration

SCF 대비 낮게 나타났지만, 모든 경우에 대한 SPF의 변동계수는 가장 낮게 산출된 것을 확인할 수 있다. 이는 측정기간 동안 가장 작은 변동(fluctuation) 폭의 데이터가 나타난 것을 의미하며, 나아가 연료 공급에

따른 연소의 안정성이 가장 효율적으로 이루어진 결과로 판단할 수 있다. 각각의 변동계수는 Fig. 12를 통해 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 가정용 목재펠릿보일러를 대상으로, 낙엽송으로 구성된 1급 목재펠릿을 이용하여, 연료공급 장치의 유형(spring and screw) 및 형태(pitch)에 따른 버너의 온도 및 배기가스(O_2 , CO , CO_2 , NO_x)의 농도 등이 비교·분석되었다.

버너온도의 측정 및 분석에서는, spring feeder (SPF)가 screw feeder (SCF)에 비해 표준편차가 작게 산출되었으며, 이는 feeder에 의한 목재펠릿의 상부 이송 시 주변 간극으로의 연료 소실의 최소화 및 일정량 연료의 안정적 공급에 따른 연소조건이 안정화됨에 기인하는 것으로 판단된다. 더불어, 배기가스 내 질소산화물(NO_x)의 농도는 버너온도의 변화에 상응하여, 생성, 배출되었으며, 모든 조건에서의 평균 배출량은 배기가스 허용기준치 이하의 값을 만족하는 것으로 나타났다.

배기가스 내 산소(O_2) 농도의 측정 및 분석에서는, SPF 조건인 경우, 일정한 양의 연료가 안정적으로 공급, 완전연소에 적합한 공기비가 조성되어 산소배출농도는 평균 8.88%, 표준편차는 약 0.40%로 가장 안정적 배출 양상을 나타내었다. SCF의 크기가 small에서 large로 증가 시 산소 배출량이 약 1.09%p 감소되는 것으로 나타났으며, 이는 screw 기의 표면적 증가에 따른 연료의 이송 시 기의 최외각으로 소실되는 양의 감소 등에 따른 안정적 연료공급에 기인하는 것으로 판단된다.

일산화탄소(CO) 및 이산화탄소(CO_2)의 배출농도는 상호 반비례 관계로, 완전연소가 활발한 경우에는 이산화탄소의 발생량이 증가되는 반면, 불완전연소가 활발히 이루어지는 경우에는 일산화탄소의 발생량이 증가하게 되며, 산소(O_2)의 배출 농도가 가장 안정적으로 나타난 SPF 조건에서의 일산화탄소 발생량은 가장 낮게 측정되었으며, 또한, SCF 조건 모두에서, 일산화탄소 배출량에 대한 변동(fluctuation) 구간이 크게 발생하는 것은 연료의 간헐적 공급에 따른 공급중단시간 내에 상대적으로 목재펠릿 대비 공기의 양(과잉공기비)이 비대칭 공급에 의해 1800ppm 이상의 과도 peak 구간이 발생하는 것으로 판단된다.

향후, 목재펠릿의 완전연소를 위한 조건에 근접, 조성을 위해서는 연료의 투입량 조절과 더불어 투입되는 공기의 양을 제어하는 연구가 요구된다.

References

1. Korea Forest Service, "Dominate Travail Plan," 2015.
2. Korea Energy Management Corporation, "Detailed Standard on System Evaluation of New & Renewable Energy," 2011.
3. Lee, Y. W., Ye, I. S., Li, M. R., Hong, J. H., Oh, J. G., Lee, U. J., Ryu, C. K., "Improving the Combustion Efficiency of a Wood Pellet Stove," KOSCO SYMPOSIUM, 2010, pp. 249-253.
4. Ahn, J., Kim, J. J., Park, B. S., "Combustion and Heat Transfer Characteristics inside the Combustion Chamber of a Wood Pellet Boiler," The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Winter Conference, 2011, pp. 363-366.
5. Sim, B. S., Kim, H. J., Park, H. C., Kim, J. J., Choi, K. S., Kang, S. B., "Combustion Characteristics of a Wood Pellet," The Korean Society of Mechanical Engineers, Spring Conference, 2012, pp. 276-278.
6. Oh, J. H., Choi, Y. S., Kim, D. H., "Analysis Combustion Property for Logging Residues of Wood Pellet Boiler," Korean Forest Society, Conference, 2013, pp. 889-892.
7. Jang, J. H., Kim, J. J., Choi, K. S., Kang, S. B., Sim, B. S., Ahn, J., "The Load Combustion & Heat Transfer Characteristics inside the Combustion Chamber of Moving Grate Type of a Wood Pellet Boiler," Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Summer Conference, 2014, pp. 932-935.
8. Ahn, J., Jang, J. H., "CFD (Computational Fluid Dynamics) Study on Partial-Load Combustion Characteristics of a 4-Step-Grate Wood Pellet Boiler," The Korean Society of Mechanical Engineers, 2014, Vol. 38, No. 4, pp. 365-371.
9. Sim, B. S., Kim, J. J., Choi, K. S., Kang, S. B.,

- Jang, J. H., "Experimental Study on the Combustion Characteristics of Moving Grate Wood Pellet Combustor," Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Summer Conference, 2014, pp. 869-872.
10. Sim, B. S., Kim, J. J., Choi, K. S., Kang, S. B., Mun, J. S., Oh, H. Y., "Performance Characteristics of Wood Pellet Combustion Facilities 200,000 kcal/h-class," The Korean Society of Mechanical Engineers, Spring Conference, 2012, pp. 276-278.
 11. Lee, S. H., Jin, I. S., Lee, H. J., Park, Y. S., "The Control System of Wood Pellet Boiler," Proceedings of KIIS, Spring Conference, 2014, Vol. 24, No. 1, pp. 61-62.
 12. Kang, S. K., Choi, K. S., Yoon, J. Y., "Numerical Simulation on the Flow and Heat Transfer in the Combustion Chamber of Domestic Gas Boiler with 2-stage Heat Exchanger," Korean Society for Fluid Machinery, Winter Conference, 2008, pp. 607-613.
 13. Fiedler, F. and Persson, T., "Carbon Monoxide Emissions of Combined Pellet and Solar Heating Systems," Applied Energy, 2009, Vol. 86, pp. 135-143.
 14. Persson Tomas, Fiedler Frank, Nordlander Svante, Bales Chris, Paavilainen Jane, "Validation of a dynamic model for wood pellet boilers and stoves," Applied Energy, 2009, Vol. 86, No. 5, pp. 645-656.
 15. Kang, S. B., Kim, J. J., Choi, K. S., "Performance Test and Flue Gas Characteristics of Domestic Wood Pellet Boiler," Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Winter Conference, 2009, pp. 569-573.
 16. Kang, S. B., Kim, H. J., Kim, J. J., Park, H. C., Choi, K. S., "Performance Characteristics of Domestic Wood Pellet Boilers," The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Summer Conference, 2011, pp. 900-903.
 17. Sim, B. S., Kim, J. J., Choi, K. S., Kang, S. B., Mun, J. S., Oh, H. Y., "Performance Characteristics of Wood Pellet Combustion Facilities 200,000 kcal/h-class," The Korean Society of Mechanical Engineers, Spring Conference, 2012, pp. 276-278.
 18. Jang, J. H., Ahn, J., Kim, J. J., "Combustion & Heat Transfer Characteristics Inside a Combustion Chamber of 13-Step-Grate Wood Pellet Boiler," Korean Society for Computational Fluids Engineering, 2013, pp. 73-77.
 19. Sim, B. S., Kim, J. J., Choi, K. S., Kang, S. B., "A Study on the Performance of Wood Pellet Boiler by the Method of Driving," The Korean Society of Mechanical Engineers, Spring & Autumn Conference, 2013, pp. 3416-3419.
 20. El-Rub, Z. Abu, Bramer, E. A., Brem, G., "Review of Catalysts for Tar Elimination in Biomass Gasification Process," Laboratory of Thermal Engineering, 2004, Vol. 43, No. 22, pp. 6911-6919.
 21. Yoon, S. J., Son, Y. I., Kim, Y. K., Lee, J. G., "Removal of Tar and Soot in the Syngas Produced from Gasification of Wood Chip by using Catalytic Reformer," The Korean Hydrogen and New Energy Society, 2009, Vol. 20, No. 6, pp. 519-525.
 22. Moon, J. H., Lee, U. D., Ryu, C. K., Lee, Y. M., Bae, W. K., "Characteristics of Tar Generation during the interval of Gasification of Woodchip," The Korean Society of Combustion, 2011, Vol. 16, No. 1, pp. 8-14.
 23. Eum, P. R. B., Lee, Y. W., Ryu, C. K., Park, Y. K., "Experimental Study on Thermal Cracking of Tar and Effect of Char in Biomass Gasification," The 43th KOSCO SYMPOSIUM, 2011, pp. 211-214.
 24. Park, H. Y., Kim, Y. J., Kim, T. H., Baek, S. H., Kim, K. S., Kwon, D. J., "Characteristics of Unburned Material Derived from Coal-fired Power Plant Burning Low Grade Coal," Journal of Energy Engineering, 2012, Vol. 21, No. 1, pp. 68-74.
 25. Euh, S. H., Oh, J. H., Ju, Y. M., Huh, J. N., Kim, D. H., "A Thermal Flow Analysis of Tar Scaled Heating Surface in a Pellet Boiler Using

- CFD,” Korean Society for Agricultural Machinery, Spring Conference, 2013, pp. 95-96.
26. Byun, Y. C., Kim, E. K., Park, S. H., Hwang, J. H., Lee, J. M., Kim, J. S., "Study of Nozzle Characteristics on Clinker Formation in a CFBC Boiler with CFD Calculation," The Korea Society for Energy Engineering, 2002, Vol. 11, No. 3, pp. 224-229.
 27. Seong, J. H., Choi, S. H., Kim, B. S., "Clinker Formation Characterizes in Opposed Coal Firing Boiler," The Korean Society of Mechanical Engineers, Spring Conference, 2011, pp. 52-54.
 28. Kang, S. B., Kim, J. J., Choi, K. S., Park, J. W., Sim, B. S., Oh, H. Y., "A Study on Production of Clinker, Byproduct of Combustion in a Domestic Wood Pellet Boiler Burner," The Korea Society for Energy Engineering, Spring Conference, 2012, pp. 78.
 29. Roberto Coll, Joan Salvado, Xavier Farriol, Daniel Montane, "Steam Reforming Model Compounds of Biomass Gasification: Conversion at Different Operating Conditions and Tendency towards Coke Formation," Fuel Processing Technology, 2001, Vol. 74, pp. 19-31.
 30. Lim, Y. S., Kim, Y. I., Chung, K. S., "A Study of Domestic Wood Pellet Boilers Flue Gas Characteristics according to Induced Fan Air Flow Rate," Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Summer Conference, 2012, pp. 593-596.
 31. Sim, B. S., Kim, J. J., Choi, K. S., Kang, S. B., Jang, J. H., "NO_x Reduction Characteristics by the FGR of a Wood Pellet Boiler," Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Winter Conference, 2014, pp. 344-347.
 32. Oh, J. H., Hwang, J. S., Kim, D. H., "Identification Optimal Combustion of Wood Pellet Boiler for O₂ and CO Concentration," Korean Forest Society, Conference, 2013, pp. 885-888.
 33. Jeong, Y. G., Kang, D. W., "Reducing to Unburned Carbon in T-Fired Boiler," KOSCO SYMPOSIUM, 2006, p. 275.
 34. Joel Chaney, Hao Liu, Jinxing Li, "An Overview of CFD Modelling of Small-scale Fixed-bed Biomass Pellet Boilers with Preliminary Results from a Simplified Approach," Energy Conversion and Management, 2012, Vol. 63, pp. 149-156.
 35. Oh, J. H., Kim, D. H., "Development Control Logic of Wood Pellet Boiler for Fuzzy Control," Korean Forest Society, Conference, 2013, pp. 840-843.
 36. Yang, J. S., Yoon, S. Y., "Economical and Environmental Feasibility of Cultivation under Structure Due to the Introduction of Bio-energy -Comparative Analysis of Wood Pellets and Diesel-," Korean J Organic AGRI, 2013, Vol. 21, No. 3, pp. 335-350.
 37. Oh, J. H., Choi, Y. S., Lee, J. A., Kim, D. H., "A Study on Combustion Characteristic Devices Fuel Supply of Wood Pellet Boiler," Korean Forest Society, The Conference, 2013, pp. 260-263.