



단입자 바이오매스 펠릿의 연소특성에 관한 연구

Combustion characteristics of single biomass pellets in a hot gas flow

박혜민^{*,**} · 목진성^{*} · 류창국^{**} · 최석천^{**}
 Hyemin Park^{*,**}, Chinsung Mock^{*}, Changkook Ryu^{**} and
 Seukcheun Choi^{*†}

(Received 12 March 2019, Revision received 22 April 2019, Accepted 22 April 2019)

Abstract: As a pretreatment for energy conversion, biomass is often pelletized for efficient transport, storage, and handling with an increased bulk density and size uniformity. In this study, the combustion behaviors of a single biomass pellet were investigated for pine wood and bean husk in comparison to sub-bituminous coal. The pellets were immediately exposed to an updraft flow of nitrogen and air for pyrolysis and combustion analysis. The hot gas flow were at approximately 1080 K and the pellets were burned in a range of 21-40% oxygen for the combustion behaviors. The sequential progress of combustion was monitored by video recording, optical pyrometry, and gas composition analysis for their ignition, flame characteristics, and burnout time. According to the results, the biomass pellets had fast ignition, which was attributed to the release of oxidizing gases at an early stage. TGA and pyrolysis analysis also indicated that biomass had the fast volatile release due to their primary components. The flame size of pine wood were the largest among three pellets while the coal had the highest flame temperature with the smallest flame size.

Key Words : Biomass Fuel, Pellet, Combustion, Flame, Char

1. 서 론

경제성장과 함께 1차 에너지 소비가 증가하여 국내 화석 연료의 수입량이 전체 연료 소비의

*† 최석천(ORCID:<http://orcid.org/0000-0003-4834-2598>) : 수석연구원, 한국생산기술연구원 고온에너지시스템그룹
 E-mail : chsch30@kitech.re.kr, Tel : 041-589-8639

**박혜민(ORCID:<http://orcid.org/0000-0000-0000-0000>) : 대학원생, 성균관대학교 기계공학과;
 한국생산기술연구원 고온에너지시스템그룹

*목진성(ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-6634-9104>) : 포스트 닥터, 한국생산기술연구원 고온에너지시스템그룹

**류창국(ORCID:<http://orcid.org/0000-0001-8120-2592>) : 교수, 성균관대학교 기계공학과

*† Seukcheun Choi(ORCID:<http://orcid.org/0000-0003-4834-2598>) : Principal Researcher, Thermochemical Energy System Group, Korea Institute of Industrial Technology.
 E-mail : chsch30@kitech.re.kr, Tel : 041-589-8639

**Hyemin Park(ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-5453-4214>) : Graduate student, School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University; Thermochemical Energy System Group, Korea Institute of Industrial Technology.

*Chinsung Mock(ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-6634-9104>) : Post Doctor Thermochemical Energy System Group, Korea Institute of Industrial Technology.

**Changkook Ryu.(ORCID:<http://orcid.org/0000-0001-8120-2592>) : Professor, School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University.

98%를 차지하고 있다.¹⁾ 2015년 기준 수출입 통계에 따르면 전체 수입액의 약 31%가 1차 화석연료에 해당한다.²⁾ 따라서 자체적으로 생산, 공급 가능한 신재생에너지 개발의 중요성이 대두되고 있고 정부는 2030년까지 국내 신재생에너지를 전체 에너지 대비 20%까지 확대할 계획이다.³⁾ 신재생에너지 비중을 확대하는 방법에는 태양광, 풍력, 수력, 바이오매스 발전 등 다양한 방법이 있다.

바이오매스는 높은 경제성과 기존의 석탄 화력발전 시설을 활용할 수 있다는 장점을 가지고 있어 에너지 활용 측면에서 관심이 높아지고 있다.⁴⁾ 특히 국내산 미활용 산림바이오매스는 바이오매스의 발전과 에너지 연료 다양화 측면에서 이점이 있다. 또한 신재생에너지 공급인증서 가중치가 1.5~2.0으로 0.5인 목재 칩에 비해 높다.⁵⁾ 이러한 미활용 바이오매스를 이용할 수 있는 기술 개발이 요구된다.

바이오매스는 석탄과 비교하여 발열량 및 겉보기 밀도가 낮아 상대적으로 연소 효율 측면에서 단점이 있다.⁶⁾ 또한 바이오매스에 포함된 섬유질 성분에 의해 분쇄성이 낮아져 미분기 내에서 막힘 현상을 일으킬 수 있다.

펠릿은 압축 성형하여 생산한 대체 에너지원이다. 장점과 특징은 다음과 같다. 첫째 온실가스와 대기오염 물질을 적게 배출하는 저탄소 녹색 성장에 적합한 연료이다.⁷⁾ 둘째 에너지 밀도 및 소수성을 높일 수 있는 기술로 운반이나 이동작업이 용이하여 연료실로의 공급을 자동화할 수 있다. 셋째 다양한 목재 폐기물 또는 미활용 바이오매스를 원료로 사용할 수 있다. 넷째 국내에서 생산, 소비를 할 수 있고 연료 다변화 차원에서 각광 받고 있는 기술이다. 일반적으로 바이오매스(발화점: 673~703 K)는 상대적으로 발화성이 높은 석탄(발화점: 603~673 K)에 비해 발화성이 낮기 때문에 운송과정에 있어 특별한 설비나 장비가 필요로 하지 않는다.⁸⁾

바이오매스 연료의 특성을 파악하기 위해 DTF(Drop Tube Furnace) 및 TGA(Thermogravimetric Analysis)를 기반으로 연소특성 연구가 활발히 진행되고 있다.⁹⁾ 그러나 DTF의 경우 펠릿의 자발

광 화염을 포함한 휘발분 연소의 특징을 분석하기 어렵다. 또한 TGA 분석은 소량의 샘플로 낮은 가열속도로 운전되어 탈휘발 혹은 연소하기 때문에 높은 가열 속도(10^{4-5} K/s)¹⁰⁾의 연소로 내의 연소 특징을 설명하는데 제한적이다. 연소 거동은 복사 에너지 측정에 매우 중요하기 때문에 높은 가열 속도에서 정량적인 실험 방법을 통해 화염과 좌의 연소특징 분석이 선행되어야 한다.

본 연구에서는 유동층 반응기와 유사한 온도 (1080 K) 조건에서 입자 투입에서부터 완전연소 시점까지의 순차적 연소 거동을 관찰하였다. 이를 통해 각기 다른 바이오매스의 연소 특징을 설명하고 석탄 펠릿과 비교하여 차이점을 기술하였다. 연구 방법은 다음과 같다. 첫째 직접 관찰법을 이용하여 펠릿의 점화 및 연소시간 등을 측정하였다. 둘째 연소 중 발생하는 화염 및 좌의 물리적 거동 및 온도를 측정하였다. 마지막으로 휘발분 및 배가스를 분석하여 다양한 바이오매스의 특징을 설명하였다. 이를 통하여 추후 본 연구를 바탕으로 연소 반응상수를 구하는데 이용하고, 다변화 측면에서 국내 미활용 바이오매스 연료 발굴에 활용하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 바이오매스의 선정 및 펠릿 성형

바이오매스 연료로 목질계 바이오매스인 소나무와 미활용 바이오매스인 콩깍질을 선정하였고 연소 특징을 설명하기 위해 아역청탄과 비교하였다. 정량적인 펠릿을 가공하기 위해 다음과 같은 절차로 펠릿을 성형하였다. 우선 분쇄기(Retsch, ZM100)를 이용하여 500 μ m 크기로 시료를 미분하였다. 이후 펠릿 성형틀에 0.5 g의 시료를 투입하였다. 마지막으로 유압 펠릿 제조장치(Per Kin Elmer, Hydraulic pellet press)로 5 ton의 압력을 가한 후 약 1분의 체류시간 후 펠릿을 토출시켰다. 기존 논문에 보고된 바에 의하면 입자의 물리적인 특징이 상이할 경우 바이오매스 종류와 상관없이 점화 및 연소시간 등의 차이를 보일 수 있다.¹¹⁾ 본 단펠릿 가공 방법으로 성형한 펠릿의 밀도 및 크

기는 일정하여 펠릿 연료의 연소특징을 설명하는데 매우 효과적이다. Table 1은 각 시료별 펠릿의 길이, 질량 및 밀도 등을 측정된 값이다. 아역청탄과 바이오매스는 밀도 기준 약 2% 이내의 차이점을 보이며 유사한 물리적 특징을 보인다.

2.1.1 바이오매스의 원소분석과 공업분석

연료특성을 조사하기 위해 원소 및 공업분석을 진행하였다. 시료 약 1.5 mg을 투입하여 원소분석기(Flash 2000)에서 C, H, O, N, S 원소를 분석하였다. O 함량은 100%에서 C, H, N, S 함량을 공제하여 구하였으며, 동일 시료에 대해 3번의 평균값으로 나타냈다. 공업분석은 ASTM D7582-15의 방법으로 공업분석장비(5E-MACIV)를 이용하였다. 수분 측정을 위해 378 K까지 상승시

Table 1 Physical properties of three samples

	Length (mm)	Mass (g)	Diameter (mm)	Density (kg/m ³)
1	8.22	0.499	8	1207.70
2	8.21	0.498	8	1206.75
3	8.24	0.501	8	1209.60
4	8.22	0.500	8	1210.12
5	8.21	0.499	8	1209.17
Avarage	8.21	0.4994	8	1208.67

(a) Pine wood

	Length (mm)	Mass (g)	Diameter (mm)	Density (kg/m ³)
1	8.21	0.496	8	1201.90
2	8.21	0.498	8	1206.75
3	8.23	0.501	8	1211.07
4	8.20	0.499	8	1210.65
5	8.22	0.501	8	1212.54
Avarage	8.21	0.4999	8	1208.58

(b) Bean husk

	Length (mm)	Mass (g)	Diameter (mm)	Density (kg/m ³)
1	8.48	0.502	8	1177.71
2	8.43	0.503	8	1187.05
3	8.52	0.505	8	1179.19
4	8.41	0.503	8	1189.88
5	8.39	0.499	8	1183.23
Avarage	8.45	0.502	8	1183.41

(c) Sub-bituminous coal

Table 2 Fuel properties of biomass and coal(M: moisture, VM: volatile matter, FC: fixed carbon)

		Pine wood	Bean husk	Coal
Ultimate analysis (wt. %)	C	42.38	40.86	74.00
	H	5.82	5.99	4.85
	O	40.55	39.41	11.53
	N	0.52	2.12	1.37
	S	0.00	0.02	0.20
Proximate analysis (wt. %)	M	10.20	11.10	11.20
	VM	71.10	72.20	40.40
	FC	17.10	12.90	40.55
	Ash	1.60	3.80	7.85

(as Received basis)

키고, 45분 동안 유지 후 무게를 측정하였다.

휘발분 측정을 위해 산소와의 접촉을 차단시킨 후 1223 K까지 급속으로 상승시키고 7분간 유지 후 무게를 측정하였다. 이후 623 K 이하로 냉각하고 회분 측정을 위해 773 K까지 3 K/min으로 상승, 30분간 유지, 923 K까지 4 K/min으로 상승, 30분 동안 유지 후 무게를 측정하였다. Table 2는 실험에 사용한 바이오매스 연료들의 원소, 공업분석결과이며 특징은 다음과 같다. 원소분석 결과 바이오매스는 산소의 비율이 약 40%를 차지하고 있고 아역청탄은 74%의 탄소를 함유하고 있다. 다른 연료에 비해 소나무는 질소 성분을 적게 포함하고 있어 추후 연소 과정 중 질소 산화물의 배출이 적을 것으로 예상할 수 있다. 공업분석 결과 바이오매스인 소나무와 콩깍질의 휘발분 함량은 70% 이상이고 고정탄소는 18% 이하이다. 이에 반해 아역청탄은 휘발분과 고정탄소의 함량 모두 약 40%를 차지하고 있다.

2.2 실험방법

2.2.1 바이오매스의 열중량분석

바이오매스의 열분해 및 연소 기초 분석을 위해 공기 분위기에서 열중량 분석(Thermogravimetric analysis, TGA)을 수행하였다. TGA(STA 6000) 실험에는 약 500 μm의 크기로 미분된 시료 10 mg을 대상으로 40 cc/min의 공기를 공급하였다. 상온에서 1223 K까지 20 K/min의 속도로 승온하여 시료의 질량 감소율을 측정하였다.

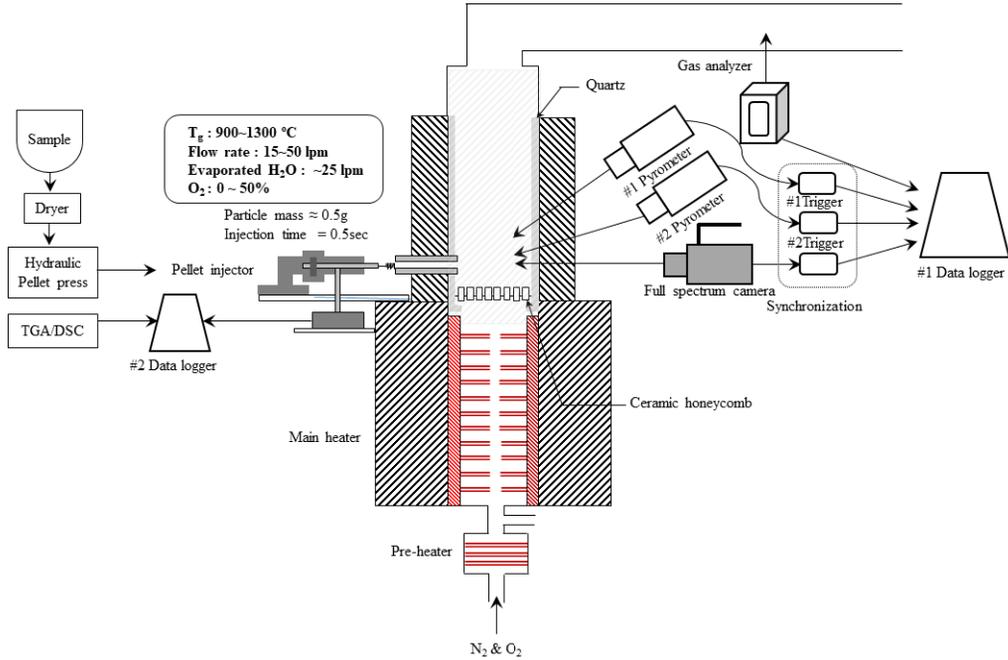


Fig. 1 Schematic diagram of single solid fuel pellet combustion system.

2.2.2 단일 펠릿 고온 연소실험

단일 펠릿의 연소실험은 Fig. 1에 나타난 장치를 이용하여 Fig. 2의 순서로 진행하였다. 실험 장치는 크게 세 부분으로 나뉜다. 첫째 시료의 열분해 연소특성을 확인하는 열분해 분석부, 둘째 펠릿 연소 분석부, 마지막으로 연소 중 발생하는 가스를 분석하는 가스 분석부로 구성된다.

펠릿 연소 분석부는 연소 특성을 가시화 할 수 있도록 설계하였다. 이를 위해 퀴즈(55×55×400

mm)로 제작하였고 내부의 열 방출을 최소화하기 위해 고온 히터(1273 K)를 장착한 단열재를 부착하였다. 고온 환경을 조성하기 위해 투입 가스는 프리 히터를 통과하면서 673 K로 상승하며 이후 메인 히터를 통과하면서 약 1673 K로 토출된다. 그러나 퀴즈를 통과하면서 내부 온도는 낮아지며 유량에 따라 온도의 차이를 보일 수 있다. 펠릿의 온도 편차를 최소화하기 위해 인젝터는 퀴즈 내부 방향으로 약 2 cm만큼 투입하였다. 본 실험에서는 15 liter/min의 공기를 투입하였고 내부 유속은 약 0.6 m/s이다.

실린지 펌프를 포함한 인젝터와 텅스텐 와이어를 이용하여 펠릿을 투입하였다. 점화 시간을정밀하게 분석하기 위해 입자 투입 소요시간(0.5 s)을 일정하게 유지하였다. 펠릿을 투입하는 시점에서부터 완전 연소에 이르기까지 전 과정을 카메라(Nikon, J5)와 근접렌즈(Tamron AF180mm, f/3.5)를 사용하여 연소 거동을 촬영하였다. 동시에 화염과 좌의 온도를 측정하기 위해 각기 다른 과장대를 가진 비접촉식 고온계를 사용하였다. 좌의 온

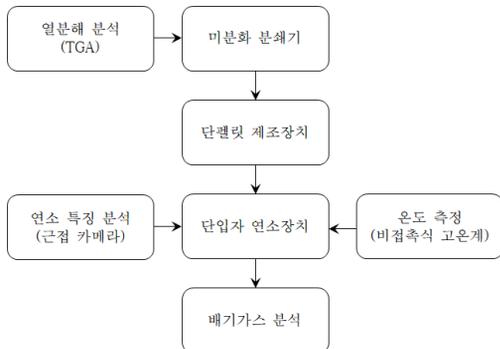


Fig. 2 Flow chart of the experimental procedure.

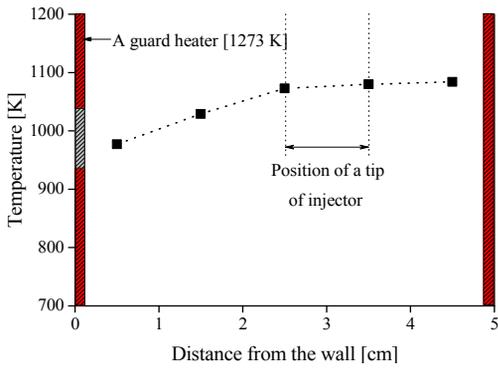


Fig. 3 Temperature gradient in the quartz.

도를 측정하는 고온계(IMPAC IGA 6, Resolution : 0.1°C)는 약 3.6 μm의 파장대로 화염을 투과하여 좌의 온도만을 측정할 수 있고 화염을 측정하는 고온계(IMPAC IS 6, Resolution : 0.1°C)는 0.7~1.1 μm의 파장대로 측정한다. 가스 분석을 위해 두 종류의 배가스 분석장치(Testo 350 & Ecom J2KN)를 사용하여 연소 중 발생하는 배가스 및 휘발분을 분석하였다. 모든 실험의 재연성을 위해 한 시료당 20개의 펠릿을 연소하였다.

2.3 실험조건

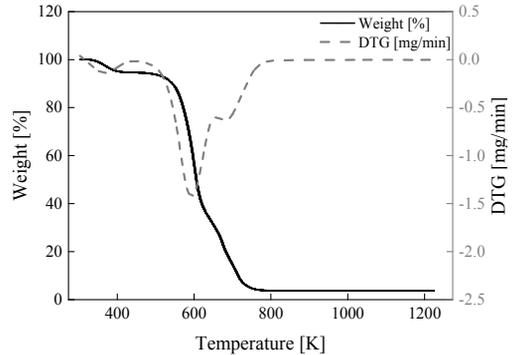
유동층 연소기 조건과 유사하게 약 1,080 K을 유지하였으며, N₂ 79 %, O₂ 21 % 조건을 기본으로 실험을 진행하였고 산소의 확산속도에 따른 차이점을 파악하기 위해 산소 농도(21~40 %)를 변화시켰다. Fig. 3은 R-type 열전대를 이용하여 퀴츠 내부 온도를 측정한 그래프이다. 왼쪽 벽면의 온도가 상대적으로 낮은 이유는 인젝터가 투입되는 구간으로 가드히터(1273 K)가 제한적으로 설치되어 있기 때문이다. 따라서 오른쪽 벽면에 비해 높은 온도 편차를 보인다. 편차를 최소화하기 위해 펠릿은 좌측으로부터 2-3 cm에 위치시켰다.

3. 실험 결과 및 고찰

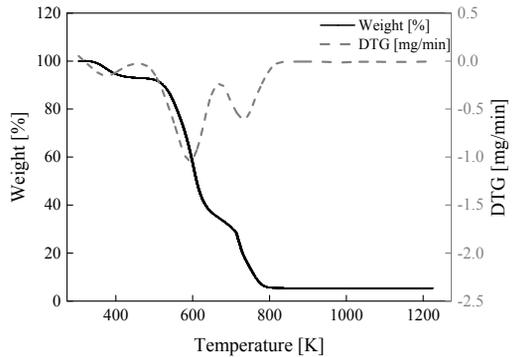
3.1 TGA 분석

Fig. 4는 바이오매스와 아역청탄 시료의 열분

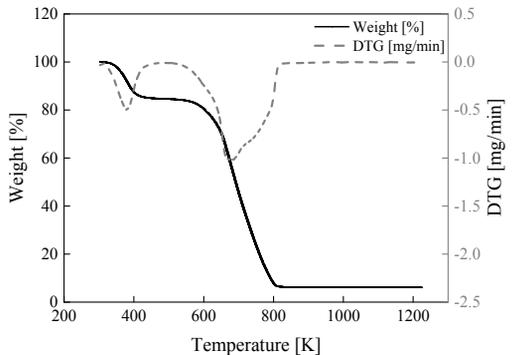
해를 분석하기 위해 다음과 같은 TGA와 DTG (Differential Thermogravimetric Analysis) 그래프로 나타내었다. 일반적으로 바이오매스는 리그닌, 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스 등의 주요 성분으로 구성되고 각각 433~1173 K, 493~588 K, 588~673 K의 범위에서 열분해가 이루어진다.¹²⁾



(a) Pine wood



(b) Bean husk



(c) Sub-bituminous coal

Fig. 4 TGA and DTG results of three samples.

결과에서 보이는 열분해의 특징적인 부분은 다음과 같다. 소나무와 콩깍질 시료에서는 건조 과정을 포함한 세 개의 최고점이 발생한 반면 아역청탄에서는 두 개의 최고점만 나타났다. 공통적인 첫 번째 최고점은 약 373 K에서 발생하며 이는 수분이 증발하면서 질량이 감소하였기 때문이다. 두 번째 소나무와 콩깍질 시료에서 약 573 K에서 발생한 최고점은 헤미셀룰로오스이다. 세 번째 발생한 최고점은 리그닌이 분해하면서 나타난 것이다. 각 최고점 폭의 차이는 세 성분의 양적 차이를 판단할 수 있는 기준이 되며 화염 특성과 배가스 조성 등에 영향을 미친다.

3.2 단일 펠릿 탈휘발 특성 분석

탈휘발 특성을 설명하기 위해 단펠릿 연소 장치에 5 liter/min의 질소를 투입하고 내부 발열체 기준 1173 K에서 실험을 진행하였다. Fig. 5는 휘발 성분을 나타낸 것으로 이산화탄소, 수소, 메탄 및 일산화탄소 등의 배출량을 측정한 결과이다. 휘발분 측정 결과 다음과 같은 결과를 보였다.

첫째 아역청탄에 비해 바이오매스의 산화제 가스의 토출이 빠르게 진행되었다. 이는 휘발연소 점화에 영향을 미칠 수 있다. 둘째 바이오매스에서 초기 메탄(CH₄)과 일산화탄소(CO)의 휘발분 농도가 높게 측정되었다. 메탄의 최고 발생량은 소나무 1,920 ppm, 콩깍질 2,060 ppm, 아역청

탄 1,480 ppm이 측정되었다. 일산화탄소의 경우 소나무 32,795 ppm, 콩깍질 24,019 ppm, 아역청탄 13,619 ppm로 석탄에 비해 바이오매스에서 높게 발생한 것을 확인하였다. 바이오매스는 초기 일산화탄소 가스가 많이 발생할 수 있어 WGSR(Water gas shift reaction) 반응 등을 이용하여 수소 수율을 증대할 수 있다. 마지막으로 초기 CO₂ 발생량은 아역청탄에서 가장 적게 측정되었다. 하지만 아역청탄은 좌 연소 시간이 길기 때문에 1개의 펠릿 당 CO₂ 가스의 양이 가장 많이 발생하였다. 탈휘발 결과와 비교하여 고체연소는 매우 복잡한 화학 반응을 포함하고 있어 다른 가스 조성이 나타난다.

3.3 단일 펠릿 연소 특성 분석

일반적으로 펠릿 연소는 순차적인 연소과정을 거친다. 연소장치에 투입됨과 동시에 입자의 온도가 상승하고 이후 일정 온도 이상 도달하면 입자 표면에서 휘발분이 분출하기 시작한다. 이때 자연 발화온도에 도달할 경우 휘발연소 점화가 이루어진다. 수소, 메탄 및 이산화탄소의 발화 온도는 각각 약 858, 830, 934 K이다. 화염이 사라지면 입자 표면부터 좌 연소가 시작되어 이후 재만 남게 된다. 펠릿 입자의 중형비가 클 경우 화염이 발생하기 전 입자의 측면에서 좌 연소가 이루어진다. 이를 오버랩 연소라고 부르며 온도나 산소의 농도가 높은 경우에 발생한다.

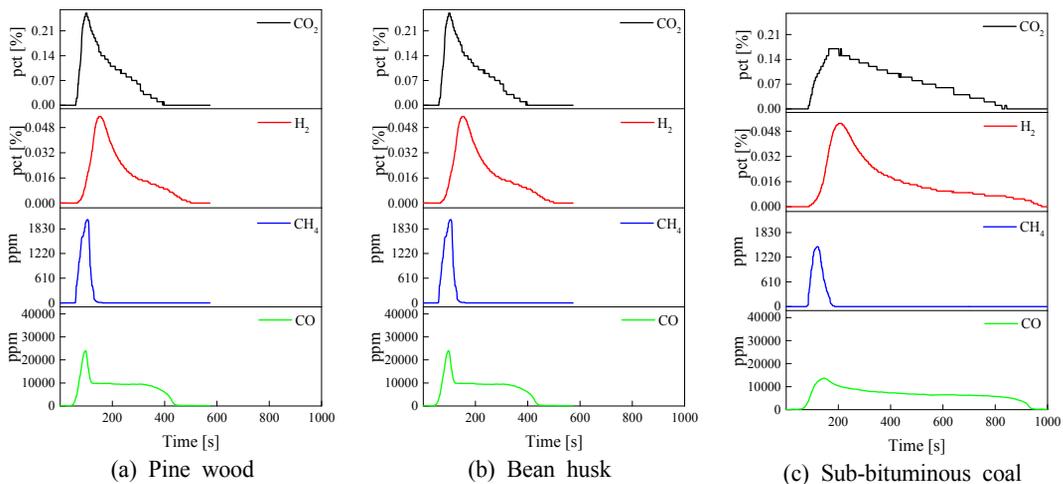
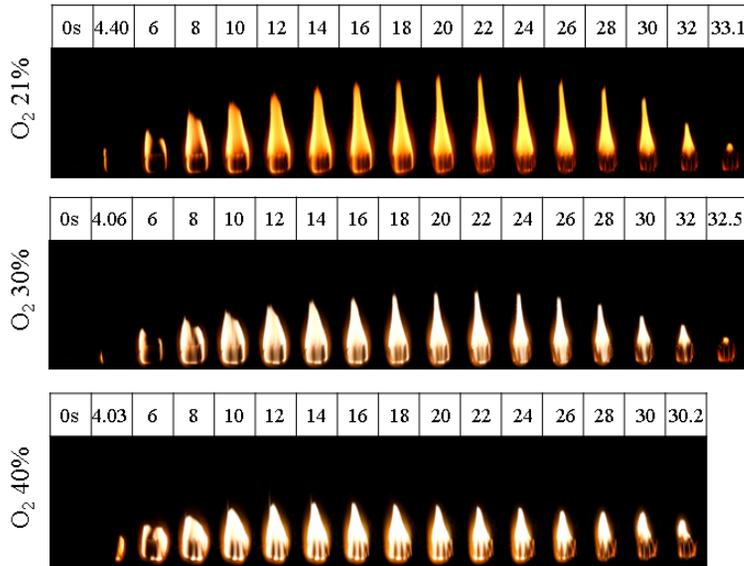


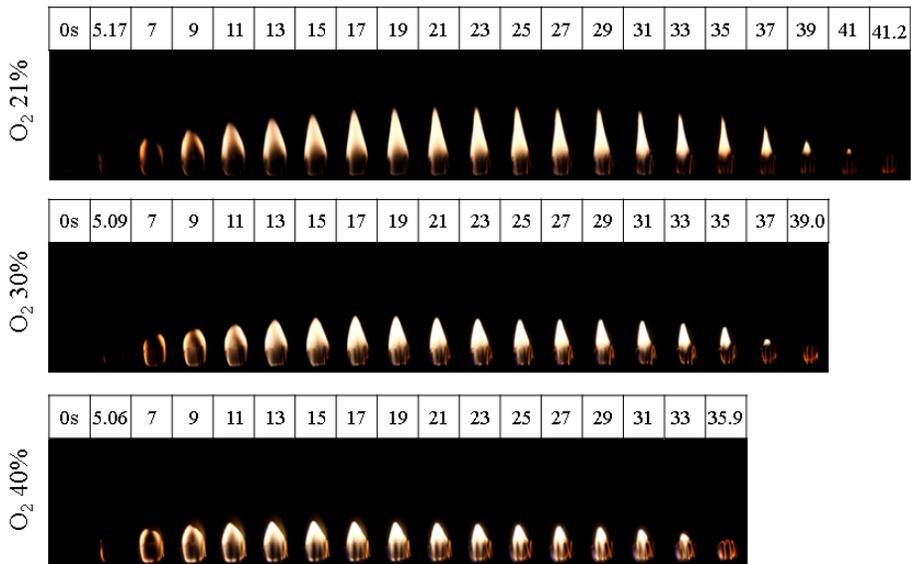
Fig. 5 Gas compositions of pellet under nitrogen.

연소 중 복사에너지는 화염의 크기나 발광성 등 물리 화학적인 차이에 의해 결정되기 때문에 화염의 특성을 분석하는 것이 복사에너지를 설명하는데 중요하다. Fig. 6은 각 펠릿의 연소 중 발생한 화염과 좌의 형상을 나타낸 것이다. 휘발분 연소보다 좌 연소 시간이 상대적으로 길어 화염의 형상은 2초, 좌는 10초 간격으로 편집하였다.

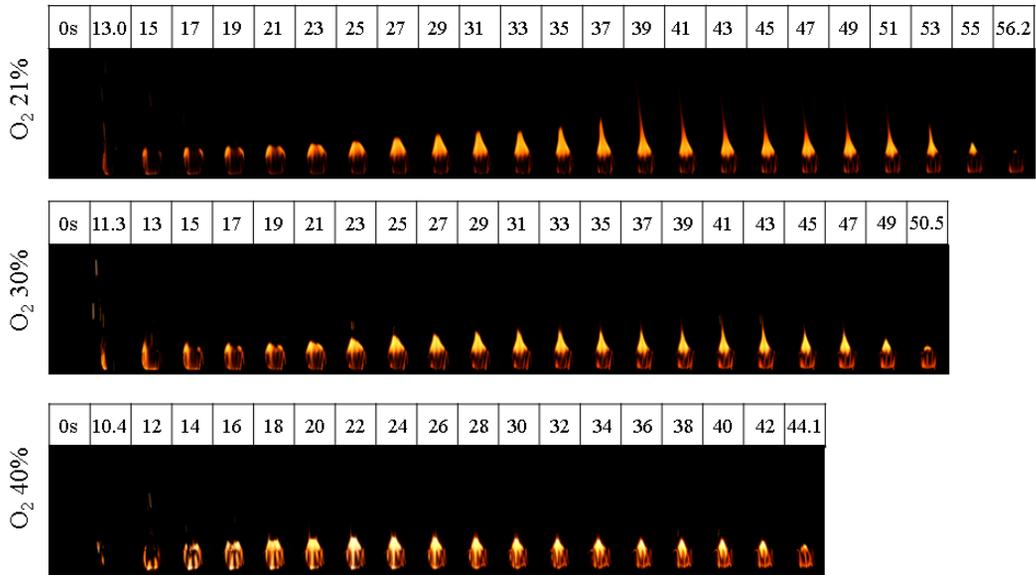
실험은 21~40%의 산소 농도 조건 하에서 진행하였다. 세 가지 펠릿 모두 산소 농도가 높아질수록 전체 연소 시간이 짧아졌고, 화염은 크기가 작아지고 자발광이 높아졌다. 이는 산소 농도가 높아질수록 산소의 확산속도가 빨라져 결국 산화 속도에 영향을 미치기 때문이며 Mock 등의^{13,14)} 논문 내용과 일치한다.



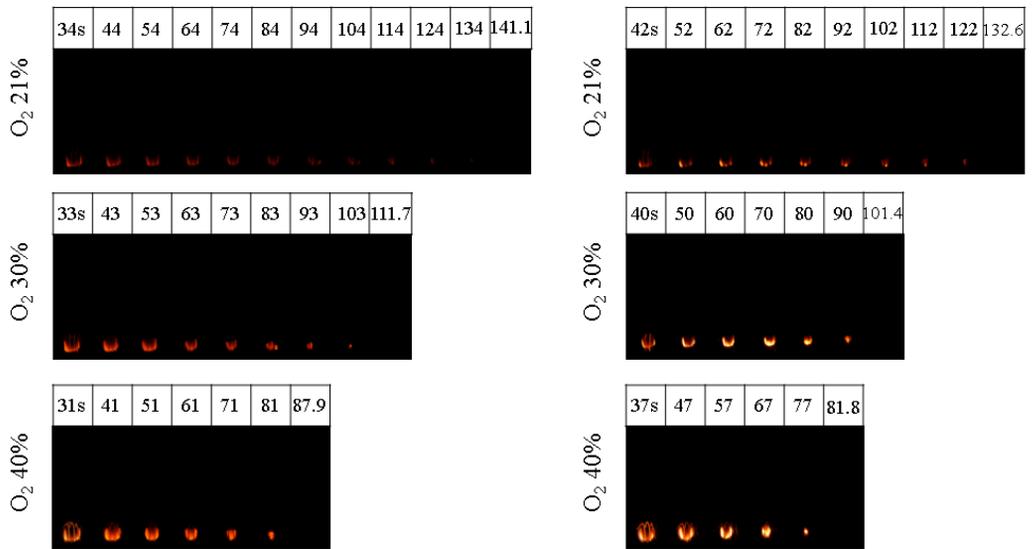
(a) Flame, pine wood



(b) Flame, bean husk

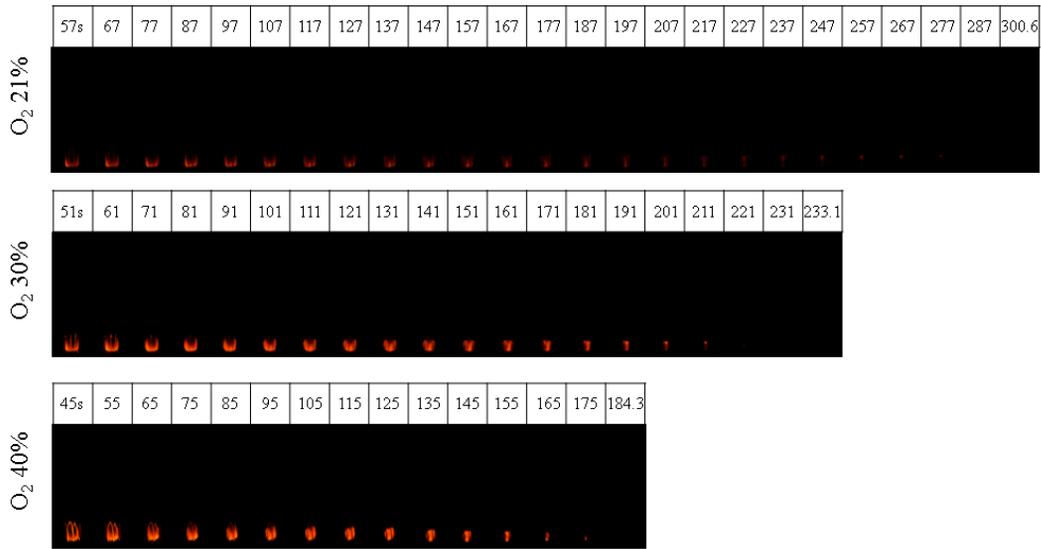


(c) Flame, sub-bituminous coal



(d) Char, pine wood

(e) Char, bean husk



(f) Char, sub-bituminous coal

Fig. 6 Photographs of combustion process.

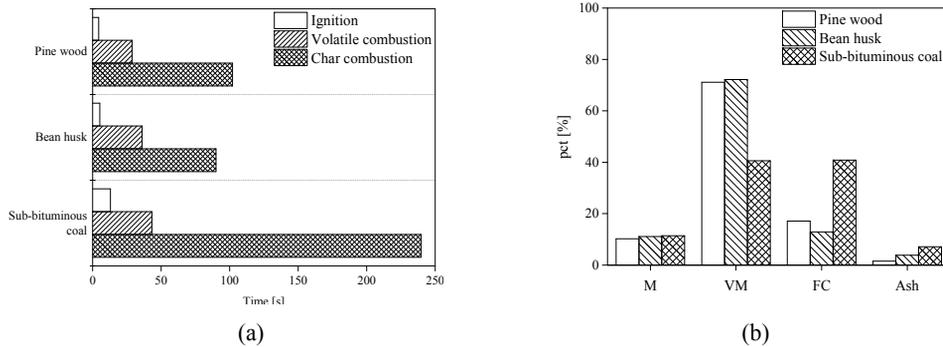


Fig. 7 (a) Combustion time of pellets; and (b) proximate analysis of three samples.

전체적으로 시료 별로 화염 크기 및 좌 형상 변화가 다르게 나타났다. 화염의 크기는 소나무가 가장 크고 아역청탄이 가장 작았다. 그러나 아역청탄은 바이오매스 화염에 비해 수트(soot)한 화염의 형태를 보인다. 이는 화염 내부에 많은 양의 미확인 탄화수소 입자가 존재하기 때문이며 이때 화염 겉껍질 부근에서 가스 및 입자의 산화가 매우 활발하게 이루어진다. 마지막으로 휘발분 연소 시간은 소나무(33.1 s)와 콩깍질(41.2 s)에 비해 아역청탄(56.2 s)에서 길게 나타났으며 좌 연소는 고정탄소 비율이 가장 높은 아역청탄에서 가장 길게 나타

났다.

공업분석 결과와 연관된 연소특징을 설명하기 위해 Fig. 7에서 세 가지 펠릿의 점화, 휘발분 및 좌 연소 시간을 그래프로 나타내었다. 한 시료당 20개의 펠릿을 21% 산소 조건에서 연소하여 평균값을 산출하였고 이때 표준편차는 약 5% 이내이다. 바이오매스는 낮은 온도에서 열분해 하기 때문에 아역청탄에 비해 점화 시간이 약 7-8초 빠르게 나타났다. 수분 함량은 세 시료 모두 유사하여 점화에 영향을 미치지 않았다. 그러나 수분의 함량 차이가 날 경우 흡열반응인 건조과정

이 길어지므로 점화지연이 발생할 수 있다. 고정탄소의 양이 많을수록 최 연소 시간이 길게 나타나므로 아역청탄의 최 연소 시간이 약 2배 이상 길게 측정되었다. 그러나 아역청탄의 경우 휘발분의 양이 상대적으로 적음에도 불구하고 휘발분 연소 시간이 약 15초 이상 길게 나타나는 특징을 보였다. 이는 석탄 화염 내에 상대적으로 많은 양의 탄화수소 입자를 포함하고 있어 산화속도가 상대적으로 느려지기 때문이다.

3.4 온도 분석

화염과 최 온도는 반응속도 및 연소특징을 설명하는데 있어 중요한 인자이다. 온도를 측정하기 위해 기존 연구¹⁵⁾에서는 입자 내부에 열전대를 삽입하여 온도 변화를 측정하였다. 그러나 화염을 통과하면서 열전대의 세라믹 단열체에 열이 전달될 수 있어 오차가 발생한다. 본 연구에서는 실험 전 보정한 비접촉식 고온계를 이용하여 온도를 측정하였다. 흑체 장치에서 온도를 측정할 결과 고온계의 온도 차이는 약 3도 이내로 매우 안정적이었다.

Fig. 8은 연소 중 발생하는 화염과 최의 온도를 N₂/O₂ (79/21 %) 조건에서 측정한 그래프이다. 화염과 최 온도를 측정할 수 있는 파장대가 다르기 때문에 두 종류의 고온계를 사용하였다. 화염 고온계의 파장은 0.6~0.9 μm로 측정범위는 825~273 K이며 최를 측정할 고온계의 파장은 3.6 μm, 348~1473 K이다. 고온계의 특성상 화염 및 최의 전체 온도를 측정할 수 없으므로 화염과 최의 중앙 부분을 측정하였다.

실험 결과 최의 온도 증가폭은 세 부분으로 나뉜다. 첫 번째는 ignition 구간으로 세 고체연료 모두 약 900 K에서 점화가 시작되었다. 두 번째는 휘발분 연소 구간으로 소나무는 946~1209 K에서 화염이 발생하였으며 콩깍질은 957~1214 K, 그리고 아역청탄은 926~1291 K로 측정되었다. 세 번째는 최 연소 구간으로 소나무는 1209~961 K, 콩깍질은 1215~948 K, 아역청탄은 1291~988 K사이에서 최 연소가 진행되었다. Table 3은 연소 중 화염과 최의 최고 온도를 나타낸 것이다. 전체적

Table 3 Maximum temperature of flame and char

Max. Temperature [K]	Pine wood	Bean husk	Coal
Flame	1641.4	1580.8	1772.4
Char	1296.7	1287.2	1299.2

으로 아역청탄에 비해 소나무와 콩깍질 펠릿의 온도가 낮게 나타났다.

3.5 배가스 분석

배가스 분석은 연료의 활용성 및 연소 방법 선택 측면에서 매우 중요한 연구이다. 본 실험에서는 산소 농도가 21 %일 때 배가스 농도를 측정하였으며 Fig 9로 나타내었다. 소나무와 아역청탄의 경우 산소 농도가 감소할수록 불완전연소에 의해 일산화탄소 발생량이 증가(10%일 때 65 ppm)하였지만 콩깍질은 산소 농도가 높을수록 일산화탄소 배출량이 증가하였다(30 %일 때 1546 ppm). 이는 콩깍질 내에 기름 성분이 많기 때문이며, 휘발 연소 이후 일산화탄소의 발생량이 급격히 증가함을 보였다.

원소분석 결과 질소 함량이 가장 높은 콩깍질에서 NO_x 발생량이 98 ppm으로 가장 높게 측정되었다. Fuel N은 Fig. 10과 같은 메커니즘으로 NO_x로 전환됨을 설명할 수 있다.¹⁶⁾ 따라서 휘발분 연소 중 산화에 의해 NO_x로 전환되며 일부는 HCN 혹은 NH₃ 등과 같은 물질에 의해 환원되어 질소로 배출된다. 또한 입자의 특성에 따라 차이는 있으나 부분적으로 최 연소 중에도 NO_x가 발생한다. 본 실험 결과 배출되는 대부분의 NO_x는 휘발분 연소에서 발생하였고 최 연소 과정에서는 미량의 NO_x가 측정되었다.

SO_x는 다른 가스에 비해 상대적으로 적게 발생하였고, 그 중 콩깍질 시료에서 14 ppm으로 가장 높았다. 아역청탄의 경우 원소분석결과 상대적으로 많은 황의 함량이 존재하지만 매우 적은 양의 SO_x가 측정되었다. 이는 연소과정에서 매우 복잡한 화학반응이 일어나기 때문이다. 또한 SO_x

발생량은 온도에 따라 달라질 수 있으며 본 연구에서는 비교적 낮은 온도에서 연소가 이루어졌다. 황은 회분과 반응하여 황산염의 형태로 형성

될 수 있기 때문에 회분의 성질에 따라 SO_x 의 배출 정도가 달라질 수 있다.

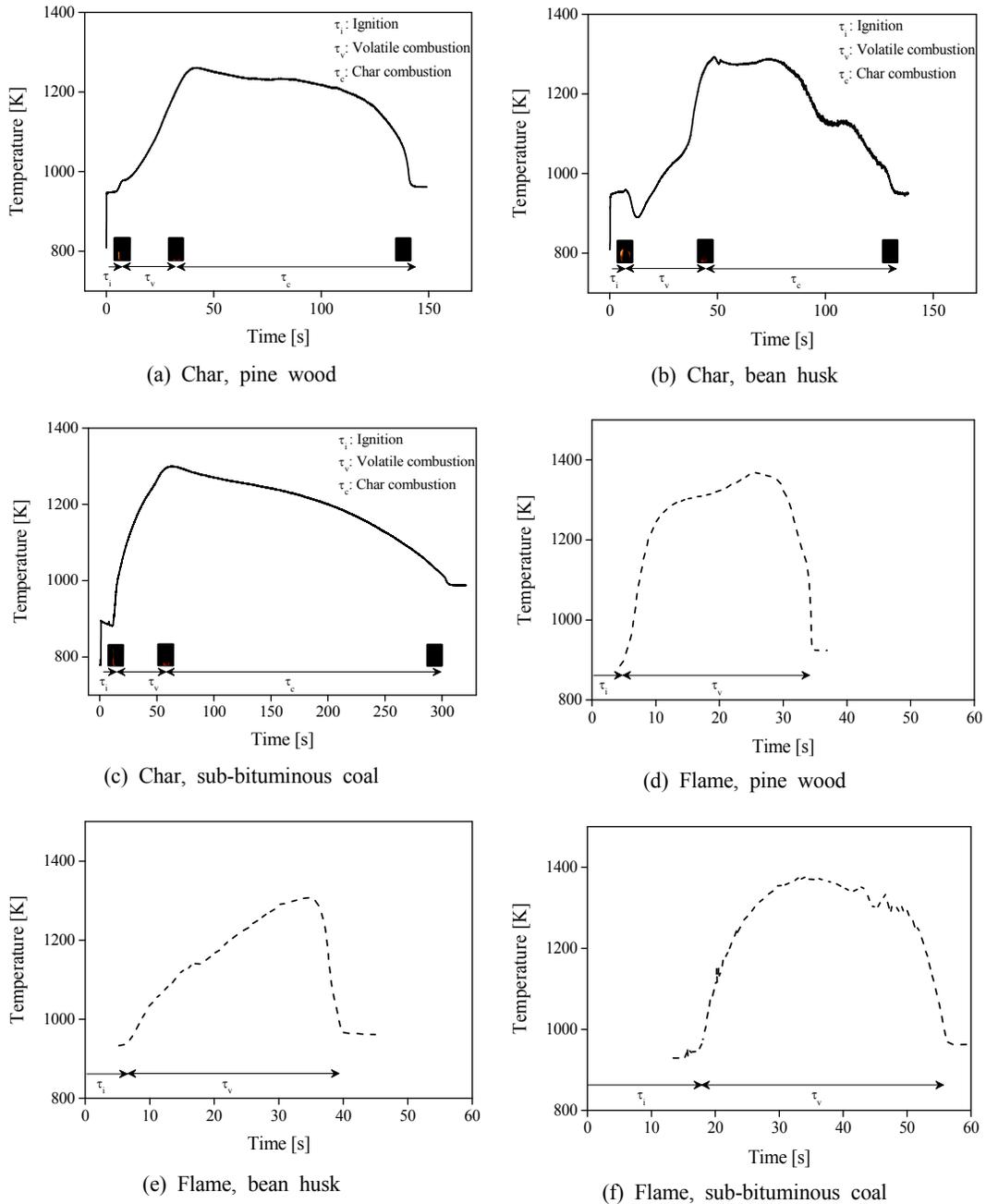


Fig. 8 Temperature profiles on the particle and flame under 21% O_2

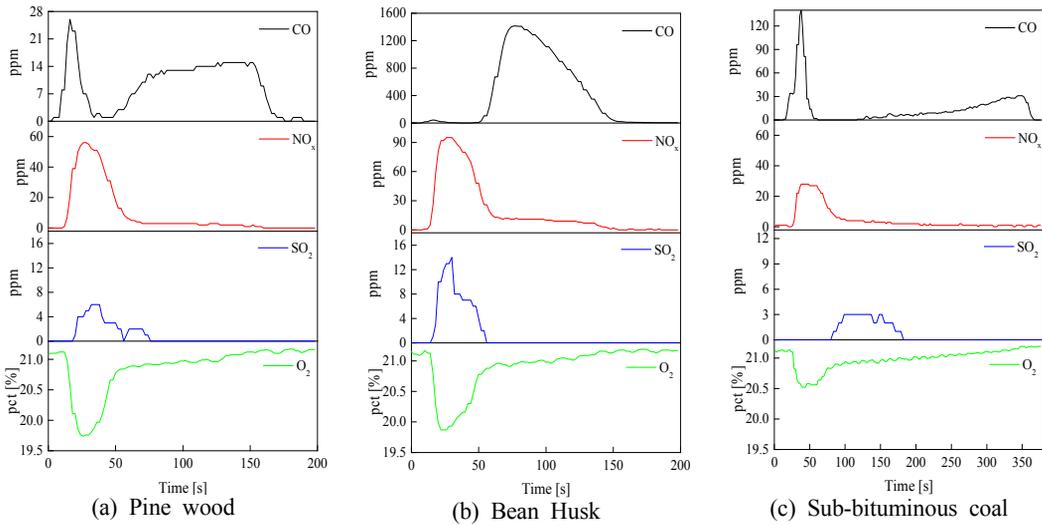


Fig. 9 Flue gas emissions during combustion of a single pellet under 21% O₂

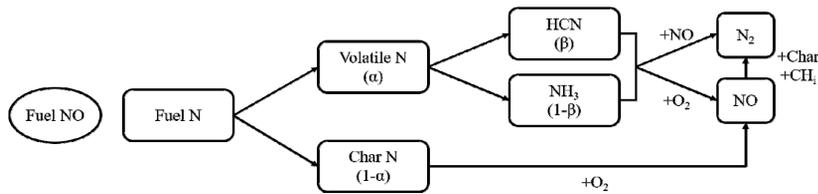


Fig. 10 Mechanism of NO_x conversion¹⁵⁾

4. 결론

본 연구에서는 화염과 촉의 형상 및 온도, 연소가스와 탈휘발분을 분석하여 바이오매스의 연소 특성을 석탄과 비교하였다. 화염의 크기나 자발광 등이 복사에너지에 영향을 미칠 수 있어 정량적 실험 방법을 통해 각 연료의 연소 특성을 분석하였다. 본 연구에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 바이오매스를 구성하는 주요 성분인 리그닌, 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스의 열분해 온도차이로 인해 DTG 그래프가 입자 별로 상이하게 나타났다. 특히 바이오매스 시료에서는 건조 과정을 포함한 3개의 최고점이 발생하였고 그에 반해 아역청탄은 2개의 최고점이 확인되었다. 바이오매스에서 두 번째와 세 번째 최고점의 차이는 주

요 구성 성분의 양적 차이를 판단할 수 있는 기준이 된다.

2) 탈휘발분 분석 결과, 아역청탄에 비해 바이오매스에서 메탄과 일산화탄소 등의 도출 시점이 빠르게 나타났고 이는 휘발연소 점화에 영향을 미친다. 바이오매스와 비교하여 아역청탄에서 초기 이산화탄소의 농도가 가장 적게 측정되었지만 촉 연소 시간이 길기 때문에 동일한 질량에서 이산화탄소의 양이 가장 많이 발생하였다.

3) 바이오매스는 아역청탄에 비해 점화가 빠르고 화염의 크기가 큰 편이다. 이는 바이오매스의 열분해 온도가 낮고 휘발분 속도가 상대적으로 빠르기 때문이다. 아역청탄의 휘발분 연소가 바이오매스에 비해 긴 이유는 화염 내에 상대적으로 산화 반응이 느린 탄화수소 입자가 많이 존재하기 때문이다.

4) 배가스 분석결과 콩깍질은 상대적으로 많은 양의 NO_x와 SO₂를 배출하며 휘발분 연소 후 다량의 일산화탄소가 발생하였다. Fuel N에서 발생하는 대부분의 NO_x는 휘발분 연소 중 산화에 의해 NO_x로 발생하였으며 미량의 NO_x만이 촉 연소 중에 측정되었다.

후 기

본 논문은 산업통상자원부-한국에너지기술연구원 청정화력핵심기술개발사업(20161110100090)의 지원으로 연구되었습니다. 이에 관계자 여러분의 지원에 감사드립니다.

Author contributions

S. C. Choi; Conceptualization, Funding acquisition, Project administration, Supervision, Writing - review & editing, H. M. Park : Data curation, Formal analysis, Investigation, Visualization & Writing - original draft, C. S. Mock : Conceptualization, Formal analysis, Investigation, Resources, Validation & Writing - original draft C. K. Ryu : Investigation & Supervision.

References

1. "Korea Energy Economics Institutes", 2015, KEEI Annual Report.
2. "Korea Energy Management Corporation", 2015, Korea Energy Handbook
3. "A Strengthening Plan for Preparation of Renewable Energy Diffusion at Power system flexibility", "Korea Energy Economics Institutes"
4. A. Garg, R. Smith, D. Hill, N. Simms and S. Pollard, 2007, "Waste as Co-Fuel : The policy Framework for Solid Recovered Fuel (SRF) in Europe, with UK Implication", Journal of Environmental Science and Technology, Vol. 68, pp. 4868-4874. (DOI:10.1021/es062163e)
5. "Management & Operating Instructions for New • Renewable Energy Portfolio standard & Renewable Fuel Standard", "Ministry of Trade, Industry and Energy"
6. D. Lee, B. Yun and Z. Wang, 2014, "A Study on The Flame Stability of Pellet Combustor Using Swirling Flow" Journal of the Korea Society For Power System Engineering" Vol. 18, pp. 35-41. (DOI:10.9726/kspse.2014.18.5.035)
7. P. Gilbert, C. Ryu, V. Sharifi and J. Swithenbank, 2009, "Effect of process parameters on pelletisation of herbaceous crops", Journal of Fuel, Vol. 88, pp. 1491-1497. (DOI:10.1016/j.fuel.2009.03.015)
8. H. C. Simes, 1988, "Wood densification", West Virginia University Extension Service, Morgantown, West Virginia.
9. J. Riaza, R. Khatami, Y. Levendis, L. Álvarez, M. V. Gil, C. Pevida, F. Rubiera and J. J. Pis, 2014, "Combustion of single biomass particles in air and in oxy-fuel conditions", Journal of Biomass and Bioenergy, Vol. 64, pp. 162-174. (DOI:10.1016/j.biombioe.2014.03.018)
10. H. Yang, R. Yan, H. Chen, D. Lee and C. Zheng, 2007, "Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis", Journal of Fuel, Vol. 86, Issues 12-13, pp. 1781-1788. (DOI:10.1016/j.fuel.2006.12.013)
11. E. Biagini, M. Simone and L. Tognotti, 2009, "Characterization of high heating rate chars of biomass fuels", Journal of Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 32, Issue 2, pp. 2043-2050. (DOI:10.1016/j.proci.2008.06.076)
12. D. Gera, M. P. Mathur, M. C. Freeman and A. Robinson, 2002, "Effect of Large Aspect Ratio of Biomass Particles on Carbon Burnout in a Utility Boiler", Journal of Energy & Fuels, Vol. 16, Issue 6, pp. 1523-1532. (DOI:10.1021/ef0200931)
13. C. Mock, H. Lee, S. Choi, W. Yang and V.

- Manovic, 2017, "Burning characteristics of single particles of coal and wood mixtures for co-firing in an upward-flowing hot gas stream", *Journal of Fuel*, Vol. 163, pp. 20-34. (DOI:10.1016/j.fuproc.2017.03.030)
14. C. Mock, H. Lee, S. Choi, W. Yang, S. Choi and V. Manovic, 2018, "Combustion Behaviour of Single Pellets of Coal-Wood Mixtures in a Hot gas Flow Field", *Journal of Energy & Fuels*, Vol. 32, Issues 11, pp. 11913-11923. (DOI:10.1021/acs.energyfuels.8b02557)
15. F. Shan, Q. Lin, K. Zhou, Y. Wu, W. Fu, P. Zhang, L. Song, C. Shao and B. Yi, 2017, "An experimental study of ignition and combustion study of ignition and combustion of single biomass pellets in air and oxy-fuel", *Journal of Fuel*, Vol. 188, pp. 277-284. (DOI:10.1016/j.fuel.2016.09.069)
16. J. Zhang, T. Ito, T. Okada, E. Oono and T. Suda, 2013, "Improvement of NO_x formation model for pulverized coal combustion by increasing oxidation rate of HCN", *Journal of Fuel*, Vol. 113, pp. 697-706. (DOI:10.1016/j.fuel.2013.06.030)