

열가소성 폐플라스틱 연소 보일러용 펠렛 연료의 용융특성 실험

이승수*, 김혁주*, 최규성*

Experimental study on the melting characteristics of pellet fuel for a waste plastic firing boiler

Sung-Soo Lee, Hyouck-Ju Kim, Gyu-Sung Choi

ABSTRACT

Experiments were performed to investigate the melting characteristics of pellet fuel made of LDPE and PP for a waste plastic firing boiler. Pellet fuel in a burner goes through conduction, convection and radiation transferred from flame in a furnace, and complex thermo/chemical processes. To figure out effects of ambient temperature and size of pellet on melting time pellets with a diameter from 5 mm to 40 mm were made to contact high temperature flue gas generated by a LNG firing pilot burner. Though melting processes of plastics include complicated heat transfer in a burner, parameters are limited to flue gas temperature and size for the simplicity in this study. From the results, melting times of LDPE and PP with a diameter of 5mm are 63 and 62 secs respectively at 600 °C while 677 and 583 secs respectively for a diameter of 40 mm. At 900°C, melting times of LDPE and PP with a diameter of 5mm are 21 and 24 secs respectively while 408 and 337 secs respectively for a diameter of 40 mm. It is found that melting time of LDPE is longer than that of PP, and melting times of both in general increase with diameter of pellets. It is thought melting is dependent mostly on melting temperature of plastic. It is expected melting times obtained from the study might be taken into account in designing a pellet firing burner for a boiler

Key Words : LDPE, PP, 펠렛(Pellet), 용융(melting)

1. 서론

다양한 산업 분야에서 플라스틱의 사용에 의해 대량의 폐플라스틱이 발생하고 있어 폐플라스틱을 재활용하는 문제가 대두되고 있다. 폐플라스틱의 재활용은 대상물질과 처리특성에 따라 4가지 형태로 구분된다. 순수하고 균일한 폐플라스

틱의 1차 활용, 급이 낮은 제품을 제조하는 2차 활용, 열화학적 분해에 의해 원료나 연료물질을 생산하는 3차 활용 그리고 소각에 의해 에너지를 회수하는 4차 활용의 방법이 있다. 이중에 플라스틱의 소각에 의한 에너지 회수에 대한 연구는 활발하지 않았다. 근래에 농업용 폐비닐과 플라스틱을 펠렛 타입의 연료로 가공하여 미분탄 보일러와 이중 연료로 사용하는 시도가 있었다. 미분탄 보일러의 경우 대부분 대용량이며 공기 오염물질의 배출 정도가 높다. 중소 산업용 보일러에 폐플라스틱 연료만을 연소할 경우에 미분탄 연소시스템이 필요 없고 폐자원을 연료로 할 수 있으므로 사용자 측면에서 연료비를 절감할 수 있는 장점이 있다. 폐플라스틱을 소각하는 연소 시스템에서 연료를 펠렛 타입으로 가공하여 연료

* 한국에너지기술연구원 열병합보일러연구센터

† ssl@kier.re.kr

로써 활용한다. 펠렛 타입 연료는 안전하게 저장할 수 있고 운반이 쉽다는 장점이 있다. 그러나 페플라스틱의 연소 과정은 가열되어 용융 및 증발 과정을 거쳐서 최종적으로 연소가 된다. 버너의 최종 출구에서 완전히 기체 상태로 되지 않을 경우 연소효율이 저하되고 액체 혹은 고상의 플라스틱이 연소실 바닥에 유입될 경우에 미연분을 발생시킬 수 있다. 버너출구에서 완전히 가스화 시키도록 버너를 설계하기 위해서는 연료에 따라 버너내부에서 체류 시간에 맞게 설계해야 한다. 페플라스틱의 종류에 따라 비열, 열전도 계수 그리고 용점이 다르므로 펠렛 연료의 용융 시간을 파악하는 것이 중요하다. 또한 펠렛의 크기에도 좌우된다. 본 연구에서는 플라스틱중 가장 많은 부분을 차지하고 있는 LDPE와 PP에 대해서 다양한 온도의 연소가스를 펠렛에 흡렸을 경우에 펠렛의 크기별 용융특성에 대한 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

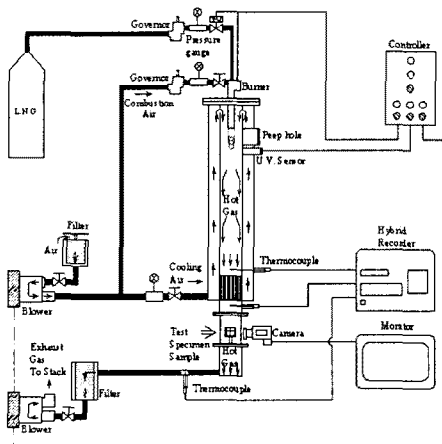


Fig. 1 Schematic diagram of experiment

Fig.1은 페플라스틱 펠렛 연료의 용융 실험 장치에 대한 개략도를 도시한다. 페플라스틱을 가열하기 위해서 일정한 온도를 유지하기 위해서 고온의 공기를 사용했다. 고온의 공기를 발생시키기 위해서 장치 상단부에 LNG 연소용 버너를 장착하였다. 장치에 두개의 블로워가 설치되어 있는데 첫 번째 블로워는 연소용 공기와 연소용 공기에 추가적으로 공기를 공급하는데 추가적으로 더해진 공기에 의해서 배가스의 온도를 설정 온도로 조절할 수 있도록 하였다. 두 번째 블로워는 하향 배출되는 배가스를 흡입

하여 외부로 배출하는 역할을 한다. 연소실의 말단부에 하니콕을 장착하여 배가스의 흐름을 정류시켰다. 하니콕 아래에 석영관을 장착하고 내부에 펠렛 연료를 중앙에 놓고 비디오키메라를 설치하여 용융과정을 촬영하였다. 석영관의 직전에 열전대를 설치하여 실험 조건의 온도를 측정하고 추가 공급되는 공기의 량을 온도에 맞도록 밸브를 조정하였다.

2.2 펠렛 연료

페플라스틱 연료는 5에서 40mm 직경의 다양한 크기의 펠렛을 실험 대상으로 하였다. 펠렛의 길이는 직경과 같도록 가공하였으나 1~2mm 차이를 보였다.

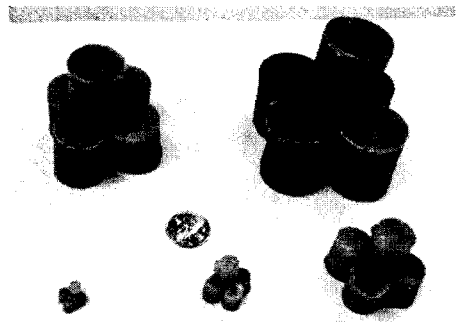


Fig. 2 LDPE pellet fuel

Fig.2에서 본 연구에 사용된 펠렛 연료를 도시한다. 플라스틱의 재질은 널리 쓰이고 있는 LDPE와 PP를 사용했다. 플라스틱 연소과정의 열화학적 과정을 <Table 1>에서 나타내고 있다.

<Table 1> Combustion processes of plastic

과정	결정인자
가열	비열 · 열전도도
용융	용융 및 휘발잠열
노화,분해	열에 불안정한 결합의 함유물, 분해온도, 분해잠열, 열의 공급속도, 분해거동
기화, 확산	확산속도, 산소 농도, 기화열
착화	분해 생성물의 분포량, 발화점, 인화점
연소의 진행	연소열, 연소 속도, 불 전달속도

연소 과정은 가열, 용융, 분해, 기화, 착화 그리고 연소의 순으로 진행된다. 각 과정의 중요 인자로서 가열에서는 비열과 열전도, 용융에서는 용융점 및 잠열, 노화 과정에서는 분해 온도 및 잠열 등, 기화 과정에는 확산 속도와 산소 농도, 착화 과정에는 분해 생성물의 분포량과 발화/인화점,

연소에는 연소열과 연소 속도 등이다. <Table 2>에서 LDPE와 PP의 물성치를 도시한다. LDPE가 PP보다 비열과 열전도도는 높은 반면 용점은 낮았다. LDPE에서는 발화점과 인화점의 구분이 있지만 PP의 경우에 같다. 연소열은 LDPE가 약간 높다.

<Table 2> Combustion characteristics of plastics

	LDPE	PP
비열(Cal/g·°C)	0.55	0.46
열전도도 (10 ⁻⁴ Cal/sec cm ²)	8.0~10.0	2.8
용점(°C)	105	176
분해온도(°C)	335~450	328~41
발화점(°C)	350	0
인화점(°C)	340	570
연소열(°C)	11140	10506
열분해 생성물	Oletin, paraffin, cyclic	<-
연소 생성물	CO, CO ²	<-
표면 연소 속도 (in/min)	0.3~1.2	0.7~1.6

2.3 실험 방법

버너에서 연소시키는 가스 연료량을 0.69 Nm³/h로 고정하고 일단 연소가 원활히 된 상태에서 공기를 추가하여 연소공기의 온도를 조정했다. 공기 유량을 게이트밸브를 이용하여 조정하였다. 석영관에 유입되기 직전 연소가스의 온도가 일정하게 유지된 상태에서 석영관 내부에 펠렛 연료를 넣고 용융 과정을 측정하였다.

배가스의 온도는 500°C에서 900°C까지 100°C씩 승온시켜 실험을 수행하였다.

3. 실험 결과

Fig.3은 연소가스 온도를 600°C로 유지한 채 석영관 안에 흘렸을 경우에 직경 15 mm의 LDPE, PP 펠렛의 용융 변화를 나타낸다. 같은 조건에서 완전히 용융되는 시간은 LDPE는 168초 PP는 150초 걸렸다. 고온의 연소가스를 가스에 접한 후 42초부터 LDPE는 표면에서 용융이 시작되고 PP는 38초부터 시작되었다. PP의 비열이 LDPE보다는 약간 낮아서 승온이 더 빨라 용융이 더 일찍 시작되었다. 그러나 용점은 LDPE가 훨씬 낮아서 표면전체에서 용융이 일어나는 반면에 PP의 경우에 연소가스와 정면에서 접하는 상부에서 용융이 시작되었다. LDPE의 열전도도가 PP보다 크지만 용점이 낮은 PP가 더 빨리 용융됨을 알 수 있다.

Fig.4는 연소가스 온도가 600°C에서 LDPE와 PP의 펠렛 크기별 용융 시간을 도시한다. 직선은 각 재질에 대한 측정값을 선형 회귀곡선으로 피팅을 한 결과이다. 가장 작은 크기인 5mm에서는 용융시간은 44초와 42초로 시간 차이가 작지만 최대 직경인 40 mm 펠렛에 대해서는 용융시간이 각각 545와 511초 걸렸다. 펠렛 연료의 형상이 균일하지 않고 놓인 위치에 따라서 약간씩 달라져 크기별 재질에 따른 용융시간의 차에 일관성을 확인할 수 없었지만 전체적으로 LDPE의 용융시간이 길고 직경이 커질수록 용융시간은 증가했다.

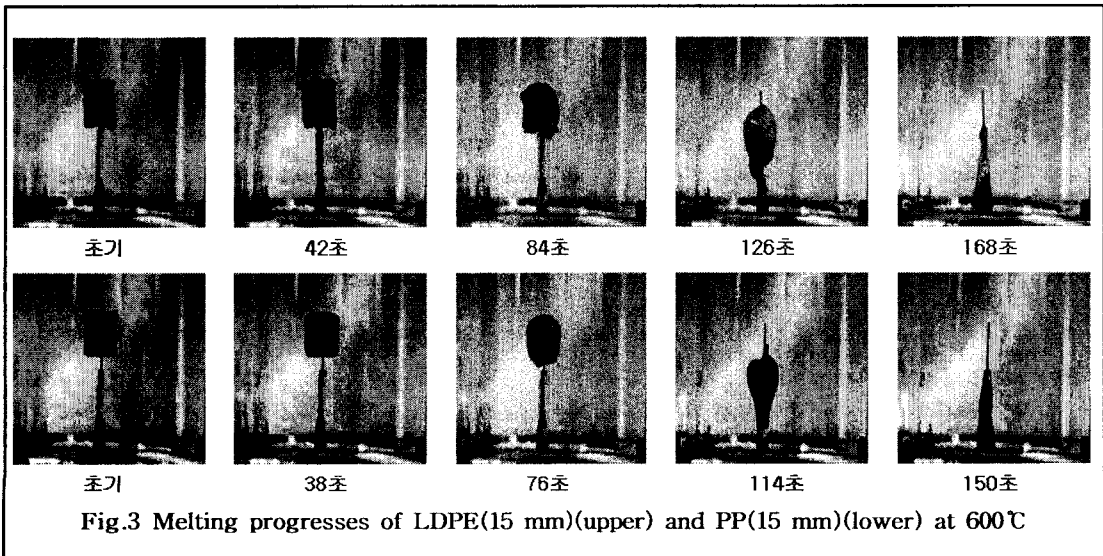


Fig.3 Melting progresses of LDPE(15 mm)(upper) and PP(15 mm)(lower) at 600°C

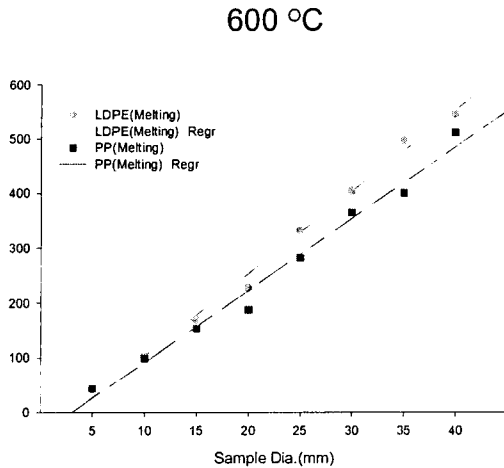


Fig. 4. Melting times with pellet diameter at 600 °C

직선은 각 재질에 대한 측정값을 선형 회귀곡선으로 피팅을 한 결과이다. 가장 작은 크기인 5mm에서는 용융시간은 44초와 42초로 시간 차이가 작지만 최대 직경인 40 mm 펠렛에 대해서는 용융시간이 각각 545와 511초 걸렸다. 펠렛 연료의 형상이 균일하지 않고 놓인 위치에 따라서 약간씩 달라져 크기별 재질에 따른 용융시간의 차에 일관성을 확인할 수 없었지만 전체적으로 LDPE의 용융시간이 길고 직경이 커질수록 용융시간은 증가했다.

Fig.5는 연소가스의 온도를 600°C에서 800 °C로 승온한 경우에서 용융과정을 비교 도시한다.

LDPE의 경우에 PP보다 용융시간이 길기 때문에 채류시간이 길게 버너를 설계해야하고 두 재질이 혼합된 경우에는 두 재질의 중량비의 가중치를 둔 상당 용융시간을 고려하여 설계해야 할 것이다.

완전히 용융되는 시간은 LDPE는 122초 PP는 113초 걸렸다. 600°C 경우와 비교해서 LDPE의 경우에 46초, PP의 경우에 37초 빨라졌다.

연소가스의 온도가 높아서 두 재질에서 11초부터는 표면에서 발화가 시작되면서 발생열에 의해서 펠렛 연료에 자체 가열이 되면서 용융이 빨라졌다. 시간적 차이는 있지만 용융되는 과정은 두 재질이 유사했다.

Fig.6에서는 연소가스 온도에 따른 펠렛의 크기별 용융 시간의 변화를 도시한다. 공통적으로 연소가스의 온도가 높고 크기가 작을수록 용융 시간은 짧았다. 같은 실험 조건에서 LDPE의 용융시간이 PP의 용융 시간보다 길었다. 연소가스의 온도가 500°C와 600°C에서 시간차가 크고 800°C와 900°C에서 온도차가 대체적으로 가장 낮게 나타났다. 폐플라스틱 연소 시스템에서 펠렛 연료가 이동하는 공간의 평균 온도를 안다면 위의 실험결과에 기초하여 펠렛 연료의 크기에 맞는 채류 시간을 확보할 수 있도록 설계해야 할 것으로 판단된다.

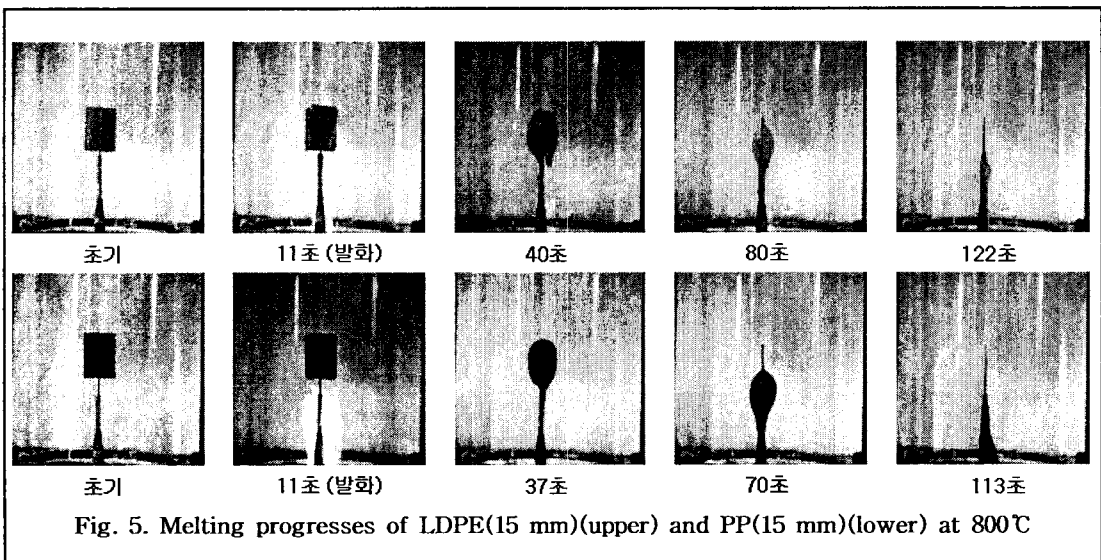


Fig. 5. Melting progresses of LDPE(15 mm)(upper) and PP(15 mm)(lower) at 800 °C

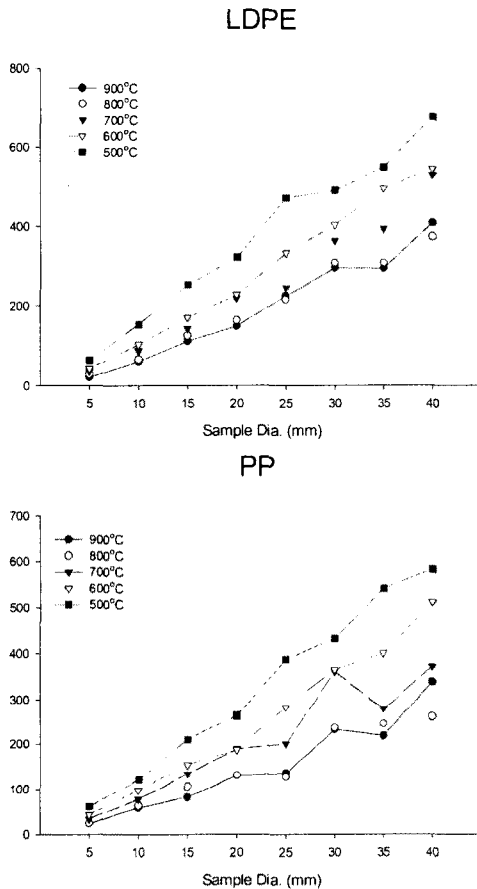


Fig. 6. Melting times with flue gas temperature and size

4. 결론

폐플라스틱 연소 보일러 설계를 위한 기초 자료로써 LDPE와 PE 펠렛에 대한 용융 특성 실험을 수행하였다. 폐플라스틱 연소용 버너에서 펠렛 연료가 용융되어 열분해되는 과정은 연소실의 화염에서 전달되는 진도, 대류 그리고 복사 열전달에 의해서 이루어진다. 버너 설계에서 열전달의 영향을 간단하게 하기 위해서 펠렛 연료의 용융 특성에 영향을 미치는 인자를 단지 버너 내부의 평균온도로 한정하였다. LDPE와 PP 재질의 펠렛 연료에서 다양한 가스 온도와 크기에 대해서 용융 과정을 관찰한 결과 연소가스의 온도가 500°C에서 펠렛의 직경이 5mm에서 LDPE와 PP의 용융시간은 63, 62초이고 40mm에서는 677, 583초였다. 그리고 900°C에서 펠렛의 직경이 5mm에서 LDPE와 PP의 용융시간은 21, 24초이고

40mm에서는 408, 337초였다. 전체적으로 동일한 실험 조건에서 LDPE의 용융시간이 길었고 펠렛의 크기가 커질수록 시간은 길어졌다. 플라스틱의 물성치중에 용융시간을 결정하는 주요인자는 용점임을 알았다. 버너의 연소율을 알고 사용 연료의 재질과 크기가 정해진다면 본 실험에서 얻어진 용융시간을 적용하여 적정 체류시간을 갖도록 버너를 설계할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 산자부 대체에너지 선행과제사업의 일환으로 수행하였고 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 김영성, "TGA에서의 플라스틱 혼합물의 열분해 특성", 화학공학, Vol. 30, No 2, 1992, pp 13-138.
- [2] Thomai Panagiotou, Yiannis Leventdis, "A study on the Combustion Characteristics of PVC, PS, PE, and PP particles under High heating rates", Combustion and Flame 99, 1994, pp 53-74.
- [3] Petra E. Campbell, Sharon McCahey, Brian C. Williams, Mark L. Beekes, "Coal and plastic waste in a PF boiler", Energy Policy, Vol. 28, 2000, pp 223-229.
- [4] James W. Garthe, "Using Agricultural Plastic Mulch as a Supplemental Boiler Fuel", Penn state university, 2002.
- [5] Dongsu Kim, Sunghey Shin, Seungman Sohn, Jinsik Choi, Bongchan Ban, "Waste plastics as supplemental fuel in the blast furnace process", Journal of Hazardous Materials, B94, 2002, pp 213-222.