

Pilot 규모의 열분해 용융 소각 시스템에서의 열분해 및 연소 특성 연구

류태우* · 양원* · 박주원* · 김봉근* · 이기방* · 김희열* · 박상신* · 전금하**

A Study on the Pyrolysis and Combustion Characteristics of Solid Waste in a Pilot scale Pyrolysis Melting Incinerator

TaeU Yu* · Won Yang* · JuWon Park** · BongKeun Kim* · GiBang Lee* · HiYeol Kim* · SangShin Park* · Keum Ha Jeon**

ABSTRACT

A pilot scale (200kg/hr) pyrolysis melting incineration system is designed and constructed in Korea Institute of Industrial Technology. The incineration process is composed of pyrolysis, gas combustion, ash melting, gas stabilization, waste heating boiler, and bag filter. For each unit process, experimental approaches have been conducted to find optimal design and operating conditions. Especially, a pyrolysis is very important process in that it is a way of energy recirculation and minimizing the waste products. This paper presents major results of the most efficient operating conditions in a pilot scale pyrolysis melting incinerator.

Key Words : pyrolysis, melting incinerator, gas combustion, tube furnace, thermogravimetric analysis(TGA), FC*(Fixedcarbon)

1. 서 론

열분해 용융 기술은 직접 소각의 경우와는 달리 폐기물을 600℃~700℃ 이하의 온도에서 저산소 상태의 환원 분위기에서 열분해 가스화 처리를 하여 다이옥신 생성을 최소화하고 1200℃ 이상의 고온으로 열분해 잔류물을 연소시킴으로써 생성된 다이옥신을 완전히 파괴하기 위한 과정을 거친다. 또한 소각시 발생하는 소각재의 처리에 있어 열분해 용융 기술을 이용해 용융 유리화하여 중금속의 용출을 막고 재활용이 가능하도록 하고 있어 기존의 전통적인 소각 방식에서 나타나는 다이옥신 또는 중금속 배출 문제를 해결할 수 있

는 대안으로 알려져 왔다.

한국생산기술연구원에 설치되어 있는 Pilot scale (200kg/hr) 열분해 용융 시스템에서 폐기물의 열분해/연소 특성을 파악하고 적정 운전인자를 도출하기 위한 실험이 이루어졌다. 폐기물이 보유하고 있는 에너지를 극대화하여 이용하기 때문에 소각재 용융을 위한 외부에너지 공급을 최소화하여 고효율의 운전이 가능해 졌으며, 배가스량이 적어 강화되고 있는 환경 기준치에 부합할 수 있는 기술력을 갖추는 등 에너지의 이용을 극대화할 수 있도록 하였다. 이에, 본 연구에서는 폐기물 처리에 매우 경제적인 축열식 고온용융 소각기술을 개발, 유용 자원 회수를 위한 가장 효율적으로 적용 가능한 처리대상물을 선정, 조합하는 기술 개발 및, 이를 기반으로 국내 실정에 맞고 경제성이 높은 최적의 용융소각설비 개발을 목적으로 한다.

* 한국생산기술연구원

† 연락처, 041)589-8537, krt702@kitech.re.kr

** (주) 동남이엔비

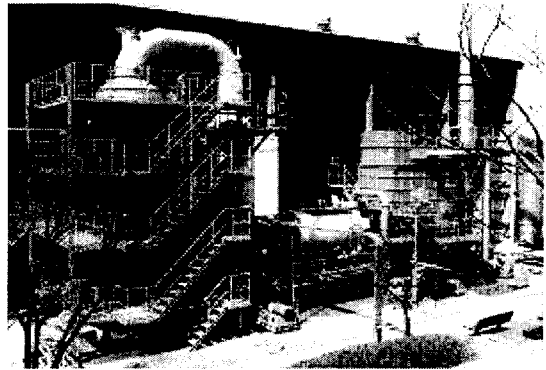
2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

2.1.1 Pilot scale (200kg/hr) 열분해 용융 시스템

Fig. 1에 한국 생산 기술 연구원내에 설치된 200kg/hr 규모의 열분해 용융 시스템을 나타내었다. 시스템은 크게 열분해+용융+연소로와 보일러, 그리고 후처리 설비로 나뉘어진다. 열분해로, 용융로 및 연소로는 일체형으로 되어 있으며, 목재 폐기물은 투입된 후 약 20~50 bar 정도의 압력으로 압축되고 압축된 바이오매스는 푸셔에 의해 열분해로로 들어간다. 열분해로에서는 간접가열식으로 열분해가 이루어지며, 열분해로 후단에는 아연소실이 설치되어 연소 공기를 소량 공급하여 방출되는 휘발분의 부분 연소를 도모한다. 열분해로에서 열분해가 어느 정도 이루어진 후 고형물은 용융로로 떨어지고 열분해 발생 가스는 연소실에서 연소가 이루어진다. 연소실에는 3단에 걸쳐 2차 공기 노즐을 설치하였으며, 4개의 노즐이 10° 기울어져 마주보고 있어 연소실 내 swirl 이 형성된다. 이외에도 thermostack 을 통해 3차 공기를 주입함으로써 연소실 내 혼합을 극대화하였다.

발생된 연소 가스는 가스 안정화로 (Gas stablizer)에서 안정화 과정을 거치게 되는데, 이는 열분해로에서 열분해가 끝나지 않은 폐기물이 떨어지는 경우 급격하게 증가할 수 있는 노내압에 대한 완충역할을 하게 된다. 가스 안정화로를 지난 연소 가스는 연관식으로 되어 있는 폐열회수 보일러를 지나 냉각된 뒤, 백필터에서 먼지가 제거되어 굴뚝으로 배출된다.

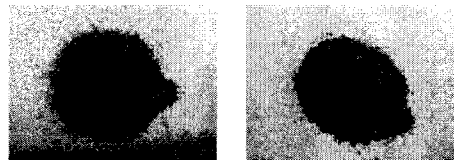


(b) Photograph

Fig. 1 Pilot scale pyrolysis melting incinerator

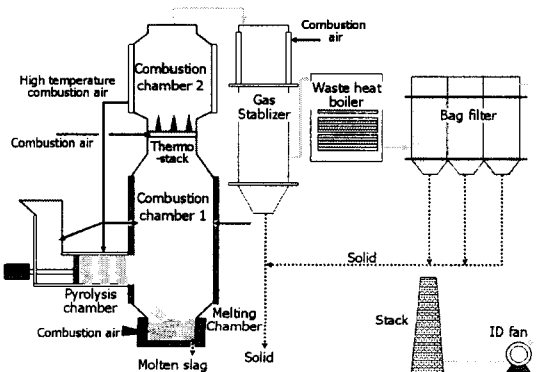
2.1.2 Tube Furnace 열분해 기초 실험

열분해는 에너지 재활용과 폐기물 배출의 최소화를 위한 방법 중 하나로서, 고발열량의 합성가스를 얻어내는데 있어 필요한 공정이다.

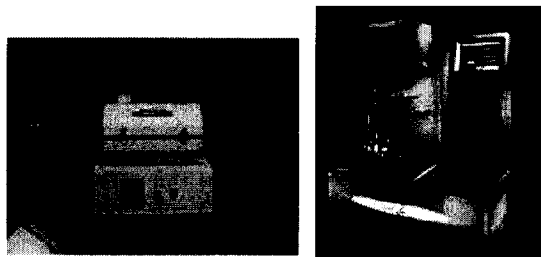


Wood Plastic
Fig. 2 Waste sample

본 연구에서는 Fig. 2의 목재 폐기물 및 폐 플라스틱에 대해서 열분해 잔류물의 분석을 통해 열분해 시 온도 영역별 잔류물의 변화를 알아보고자 기초 실험으로서 tube furnace 실험을 수행하였다. Fig. 3 (a)는 tube furnace 실험 장치의 사진이며, 그 제원을 Table 1에 나타내었다.



(a) Schematic diagram



(a) tube furnace

(b) TGA

Fig. 3 Experimental apparatus of (a) tube furnace and (b) thermogravimetric analysis

열분해 특성을 규명하기 위해 Fig. 3 (b)의 열중량 분석장치(Thermogravimetric analysis, TGA)를 사용하였으며 그 제원을 Table 2에 나타내었다. 원소분석이 수행된 샘플은 107°C에서 건조된 시료와 tube furnace에서 무산소 분위기 하에 300°C, 500°C, 700°C에서 열분해 잔류물이다. 이 실험을 통하여 1)고형폐기물의 각 온도별 영역에서의 질량 감소율을 파악할 수 있고, 2)열분해 후 남아있는 잔류물의 조성을 분석할 수 있으며, 3)열분해로 설계와 운전에 필요한 기초 자료를 획득할 수 있다.

Table 1 Specification of Tube Furnace

| | |
|----------------------------|----------------------------|
| Model | TMFG-C |
| Max. temp. range | 1200°C |
| Max. working temp. range | 1050°C |
| Temp. accuracy & stability | ±1°C |
| Thermocouple | K type |
| Internal dimension | Dia.100 x 500Hmm |
| External dimension | 500W x 430D x 650Hmm |
| Tube dimensions | Dia. 50mm x Quartz 1000Lmm |
| Heater capacity | 1000W |
| Insulation | Ceramic Board & Wool |
| Power source | AC-220V, 단상 |

Table 2 Specification of TGA apparatus

| | |
|-----------------------|----------------------|
| Model | TGA Q500 |
| Temp. increasing rate | 20°C/min, 10°C~800°C |
| Ambient gas | nitrogen |

2.2 실험 조건

실험은 목재 폐기물을 사용한 경우와, 목재 폐기물과 페플라스틱을 사용한 경우에 대해서 수행되었다. Table 3에 사용된 목재 폐기물과 페플라스틱의 성상을 나타내었다. 플라스틱 폐기물에는 PE, PP, PVC 계 폐기물 외에도 불연물이 함께 섞여 있어 비교적 많은 양의 회분이 나타나고 있다. 다만 플라스틱 폐기물의 경우에 매우 불균일한 조성을 보이고 있어 대표성을 띄기 어려운 측면이 있다. 저위 발열량은 Dulong 식에 의해 계산한 결과, 목재 폐기물이 3,174 kcal/kg, 페플라스틱이 6,870 kcal/kg으로 나타났다.

Table 3 Composition of wood and plastic waste used in this study

| | wood | plastics |
|----------|------|----------|
| moisture | 13.5 | 10.3 |
| volatile | 72.5 | 66.4 |
| FC* | 12.5 | 6.7 |
| Ash | 1.5 | 16.6 |
| C | 40.0 | 56.3 |
| H | 5.6 | 9.2 |
| O | 37.6 | 6.6 |
| N | 1.1 | 0.6 |
| S | 0.4 | 0.3 |

Table 4에는 주요 운전 조건을 나타내었다. 용융로의 용탕 유지를 위해 보조 연료가 투입되었고, 1차 공기 외에도 2차, 3차 공기를 모두 사용하여 운전이 이루어졌다. 또한 아연소실에 공기를 투입하여 열분해로에서 최대한 열분해가 많이 이루어지도록 하였다.

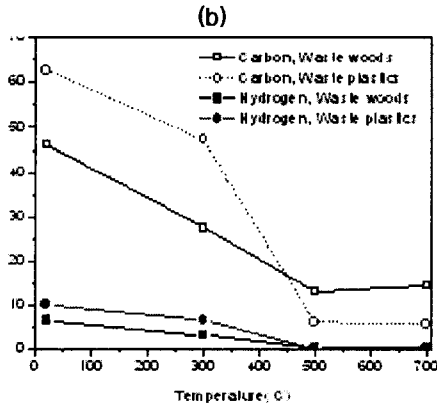
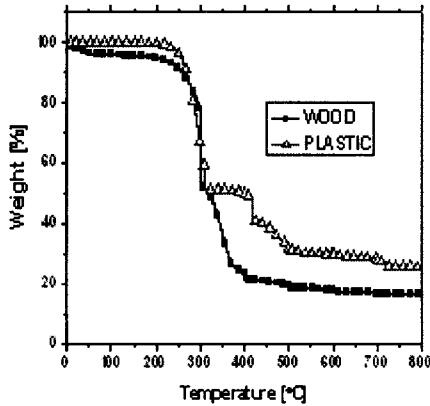
Table 4 Operating conditions

| | | CASE 1 | CASE 2 |
|--------------------------------------|--------------------------|--------|--------|
| Feed-rate (kg/hr) | Wood | 100 | 50 |
| | Plastic | - | 30 |
| | Aux. fuel | 20 | 20 |
| Combustion air (Nm ³ /hr) | Primary air (40% oxygen) | 70 | 70 |
| | Secondary air | 300 | 240 |
| | Starved Comb. air | 90 | 110 |
| | Tertiary air | 80 | 80 |
| | Total | 540 | 500 |

용탕의 유지를 위해서 순산소, LPG 등의 보조연료를 사용하였으나 이를 최소화하기 위해서 발열량 9,200 kcal/kg 의 페타이어 분말을 풍기로 투입하여 용탕 내부에서 연소가 일어나게 하였고, 산소 부화 공기 내 산소 농도를 40% 까지 높이고, LPG 10 Nm³/hr 를 투입하여 용탕을 만든 뒤, 이들을 조금씩 줄여가면서 실험을 수행하였다. 측정은 카메라를 통한 육안 관찰과 B-type 열전대를 사용한 용탕 온도 및 용탕 내벽 온도를 시간대 따라 측정하는 방식으로 이루어졌다. 실제 카메라를 통한 육안 관찰로도 용탕 형성 및 유지 여부는 충분히 판단할 수 있다.

3. 시스템 운전 결과

3.1 Tube furnace 기초 실험 결과



(b)
Fig. 4 (a)TGA curves of solid wastes and (b)Carbon and hydrogen contents in the residue of pyrolysis under various temperatures

Fig. 4 에는 기초 실험인 tube furnace 실험에서 도출된 주요 결과를 나타내었으며, 이를 통해 목재 폐기물과 폐플라스틱 탄소 성분과 수소 성분이 특정 열분해 온도 후 얼마나 남아있는지를 확인할 수 있다. 목재 폐기물의 경우 상온에서 500°C 까지 거의 일정한 비율로 탄소 성분이 감소하고 있는 것을 볼 수 있으며, 500°C 이후 다소 오르는 결과를 보여주는데, 이는 측정 오차에

의한 것으로 보이고 500°C 이후로는 열분해는 거의 일어나지 않는 것으로 보여진다. 수소 성분의 경우에도 탄소 성분과 비슷한 경향을 보이고 있다. 반면에, 폐플라스틱의 경우에는 상온에서 300°C까지는 목재 폐기물보다 더 느린 속도로 열분해가 진행되지만, 300°C에서 500°C까지의 온도 범위에서는 폐목재에 비해 훨씬 더 빠른 속도로 탄소 성분과 수소 성분의 감소가 일어나서 전체적으로 100~500°C 사이 온도 범위에서 훨씬 더 빠른 열분해 속도를 보여주고 있다. 폐플라스틱 역시 500°C 이후로는 탄소 성분이나 수소 성분에 있어 큰 차이를 보여주고 있지 않다. 이 결과를 통하여 열분해로 운전 온도가 약 500°C 정도일 때가 가장 최적의 운전 조건임을 알 수 있다. 또한 목재 폐기물의 경우 휘발분 방출 속도가 폐플라스틱에 비해 느리다는 것을 알 수 있으며, 이에 따라 좀더 안정적인 노내 압 제어와 연소 제어가 가능하다는 것을 확인할 수 있다.

3.2 연소로 운전 결과

Fig. 5 에는 파일럿 연소로에서의 전형적인 연소실 운전 데이터를 나타내었다. 여기에서의 측정값은 측정하여 MMI (Man-Machine Interface) 프로그램 창에 나타난 것과 별도로 용탕 내 슬래그 온도를 파악하기 위해 B-type 열전대를 삽입하여 측정한 값이다. 용탕 슬래그 내부는 매우 고온인데다 버블링에 의한 슬래그의 교반으로 인해 장시간의 측정이 불가능하여 정상상태에서 약 13분 가량의 측정 결과만 나타내었다. 용탕 슬래그 내부는 약 1700~1800°C 사이에서 매우 높은 온도로 유지되고 있으며, 용탕 바로 위에서 측정 한 값은 약 1500°C 정도로 높게 유지되고 있다. 2차 연소실 온도는 약 1100°C 전후에서 매우 안정적으로 유지되고 있는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 안정적인 운전 조건의 확보가 가능함을 알 수 있다.

Fig. 6 에는 본격적으로 목재 폐기물만 연소시킨 경우(Case 1)와 목재 폐기물과 플라스틱 폐기물을 혼합하여 연소시킨 경우(Case 2)에 대해 연소실 온도와 열분해로 온도를 나타내었다. 열분해로의 온도값을 살펴보면, 전체적으로 원하는 열분해로 온도, 즉 기초 실험에서 도출된 약 500°C 온도값이 나오지 못하고 최고 약 300°C 정도에서 머무르고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 간접 가열식 열분해로의 문제점으로, 열분해·외벽의 열교환기를 지나가는 열분해 공기의 온도가 약 450°C 가량이 나옴에도 불구하고 열전달 효율의 저하로 인해 열분해 공기가 가지고 있는 에너지가 실제 목재 폐기물 또는 폐플라스틱에 전달되지 못하기 때문이다. 또한, 나무만 열분해시킬 경

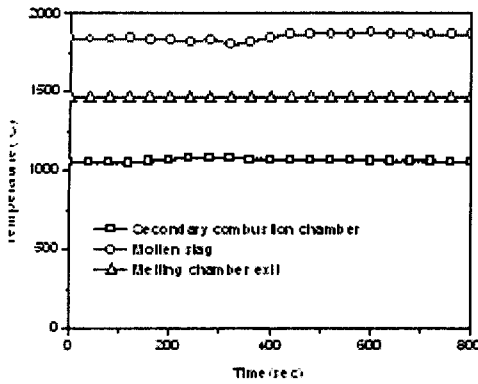
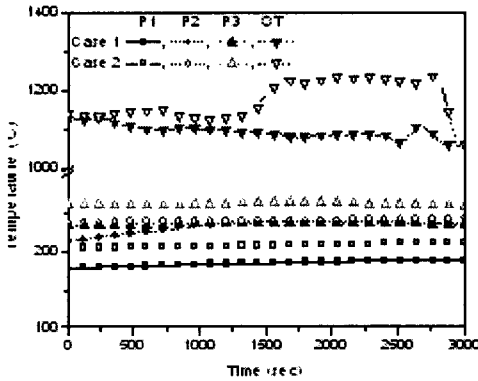


Fig. 5 Typical temperatures at the combustor exit, molten slag and melting chamber exit

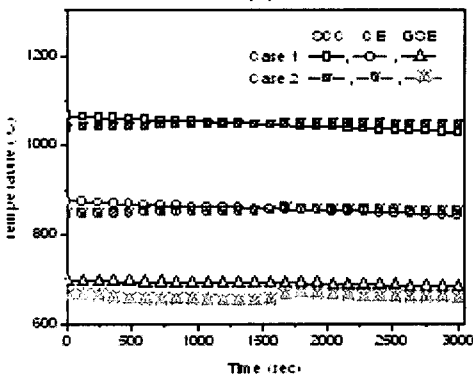
우에 비해 폐플라스틱을 혼합하여 열분해시킬 때 온도가 모든 지점에서 다 높게 나오는 것을 확인할 수 있는데, 이는 아연소실 온도가 Case 2의 경우에 Case 1에 비해 많게는 약 200°C 가량 높게 나오고 있는 데서 그 원인을 찾을 수 있다.

아연소실의 고온 조건에서 폐플라스틱의 휘발분이 훨씬 더 빠른 속도로 방출됨에 따라 아연소에 의해 온도가 더 높게 상승하고, 이 연소열이 뒤쪽의 연료에 복사열전달 형태로 전달되어 전체적으로 열분해로 내 온도가 Case 2에서 더 높게 나오는 것으로 추정된다. 그러나, 전체적으로 연소실 내 온도는 두 Case에서 모두 큰 차이를 나타내고 있지 않다.

Fig. 7 에는 두 Case 에 대한 가스 성분 데이터를 나타내었다. 온도 조건에서 보이는 것과 마찬가지로 두 경우 모두 대체로 안정적인 결과를 나타내고 있다.

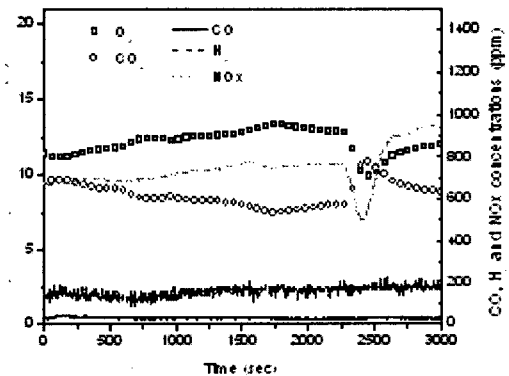


(a)

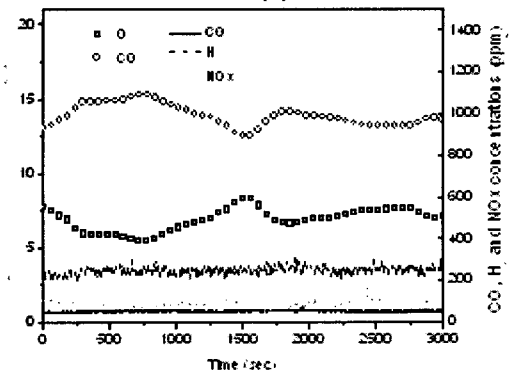


(b)

Fig. 6 Temperature of the pilot scale experiments for Case 1 and Case 2: (a) Pyrolyzer, (b) Combustion chamber and gas stabilizer



(a)



(b)

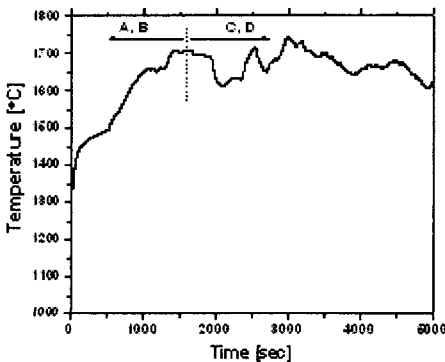
Fig. 7 Gas composition of the pilot scale experiments for Case 1(a) and Case 2(b)

Case 2에서는 보다 적은 공기를 사용하여 효율적으로 운전이 진행되고 있음을 알 수 있다. 두 경우에서 나타나는 가장 큰 차이점은 NOx 농도에 대한 것인데, 목재 폐기물만을 사용한 경우에는 NOx 농도가 약 700 ppm으로 높게 나오고 있는 반면에 폐플라스틱을 혼합한 경우에는 NOx 농도가 약 100 ppm으로 매우 낮게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 이렇게 나타나는 이유는 크게 두 가지로 생각해볼 수 있는데, 첫째로는 Case 1의 경우 좀더 많은 과잉공기가 들어감으로써 질소의 산화가 일어날 수 있는 가능성이 더 높았다는 것이고, 둘째로는 Case 2에서의 폐플라스틱 혼합 폐기물 연소시 폐플라스틱의 빠른 열분해로 인해 연소실 하단에 환원 분위기가 형성되고, 이로 인해 NOx의 생성이 억제되어 다단 연소 효과를 낳게 됨으로 인해 NOx가 훨씬 낮게 나온다는 것이다. 이 두 가지의 경우가 복합적으로 영향을 끼친 것으로 생각되며, 이에 따라 목재 폐기물의 연소시 NOx 생성을 저감하기 위한 적절한 다단 연소 조건을 찾아내는 것이 매우 중요한 것으로 사료된다.

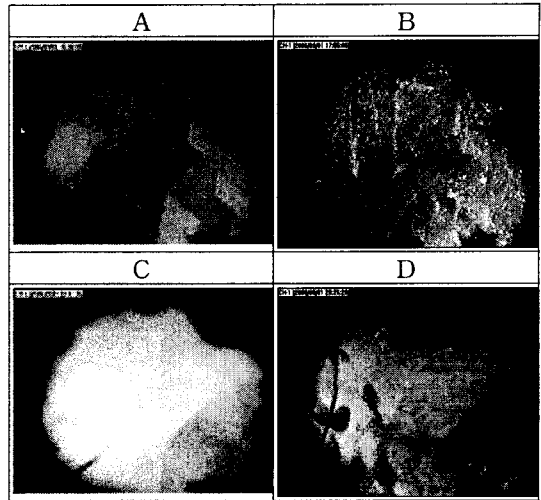
3.2 용탕 유지 실험 결과

3.2.1 용탕 형성 과정

Fig. 8에는 용탕이 형성되는 과정에 용탕 벽면 온도와 그에 따른 용탕 내부 사진을 나타내었다. 용탕을 형성하기 위하여 최초 보조연료인 LPG와 순산소를 사용함으로써 용융로 내부를 축열하는 과정이 필요하다. 용탕 벽면의 온도가 1500℃ 이상 축열되면 Fig. 8(b)의 사진D와 같이 용융로 벽면의 슬래그(slag)가 서서히 용융되어 흘러내리는 것을 볼 수 있다. 축열된 용융로 내부에 폐기물이 투입되고 폐기물의 가연분이 용탕 내부에서 급격하게 연소되는 과정이 Fig. 8(b)의 사진C에 나타난다.



(a) Inner wall temperature



(b) Photo of melting furnace

Fig. 8 Slag condition for the inner wall temperature

3.2.2 용탕 유지 실험

Fig. 9에는 용탕 유지 실험을 수행하는 동안의 용탕 온도와 벽면 온도 추이를 나타내었다. 해당 측정 시간 동안에는 LPG 공급량을 15 Nm³/hr에서 5 Nm³/hr로 줄이고, 다시 10 Nm³/hr로 늘리면서 실험하였다. 슬래그 온도 측정시에는 열전대를 밀어넣어 두었다가 조건을 바꾼 뒤 잠시 동안 열전대 보호를 위해 열전대를 벽면가까이 빼 두었다. 초기에 용탕이 활발하게 형성되어 있을 경우 용탕 온도는 1800℃를 넘어가고, 벽면 온도는 용탕 온도에 비해 약 100℃가량 낮게 형성된다. 여기에서 LPG를 줄이면 용탕 온도와 벽면 온도가 약 100℃가까이 떨어지게 되고, 이 경우 frozen slag의 두께는 더 두꺼워 질것으로 예측되고 slag의 점도는 급격하게 증가하게 된다. 이를 해결하기 위해 페타이어 분말을 20 kg/hr 주입량으로 풍구쪽에 투입하게 되면 용탕 내 페타이어 분말의 연소가 일어나게 되고 다시 slag가 녹아 버블링이 활발하게 일어나는 것을 볼 수 있다. Fig. 8(b)의 사진D는 페타이어를 40 kg/hr로 투입하고 순산소와 LPG 주입량을 모두 0으로 했을 때의 용탕의 거동을 나타내었다. 순산소와 보조 연료 주입 없이도 slag의 버블링이 매우 활발하게 형성되는 것을 볼 수 있으며, 이를 통해 보조 연료 없이 페타이어 분말을 사용하여 용탕을 유지할 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 LPG 사용시 용탕 유지에 필요한 열량이 약 360,000 kcal/hr로 나타났는데, 페타이어의 경우에도 같은 열량이 필요함을 확인할 수 있었다.

그러나, 본 실험은 단일 풍구에서의 페타이어 투입에 대한 것이며, 실제 2~3 개의 풍구에서 페타이어를 투입하게 되면 용탕 유지에 필요한 페타이어 분말량은 더욱 줄어들 것으로 예측된다. 이에 대해서는 추후 실험 및 정량적인 해석이 필요하다.

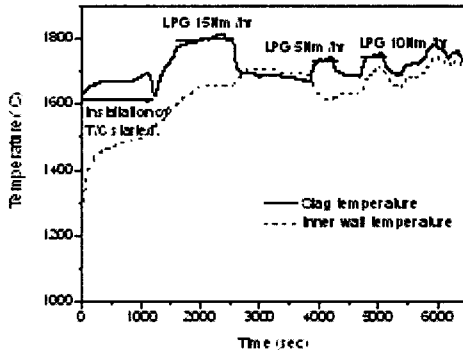


Fig. 9 Temperatures of slag and inner wall for various LPG supplies

4. 결론

한국생산기술연구원 내에 설치되어 있는 파일럿 규모 (200 kg/hr) 열분해 용융 시스템에서 폐기물의 열분해/연소 특성을 파악하기 위한 실험을 수행하였다.

(1) 기초 분석을 통해 목재 폐기물의 연료 특성을 페플라스틱과 비교하여 파악하였고, 이 결과 페플라스틱에 비해 더 느린 열분해 속도를 가지고 있다는 사실을 정량적으로 확인하였으며 열분해 온도를 약 500°C 로 가져갈 때 최적의 열분해 조건을 도출할 수 있음을 확인하였다.

(2) 실제 파일럿 규모의 열분해 용융 시스템에서의 실험을 수행하였고, 안정적인 운전 결과를 도출하였다. 이러한 일련의 결과들은 이후 장치의 단순 연소를 통한 에너지 생산 기술 외에도 열분해/가스화기로의 활용을 위한 기초 데이터로서 활용이 가능할 것으로 보여진다.

(3) 용탕 유지 실험에 있어 실제 pilot plant 실험에서 이들을 적용하여 순산소 및 보조 연료 공급 없이 페타이어만을 사용하여 용탕을 유지시키는 데 성공하였다. 향후 황이 많이 함유되어 있는 페타이어 공급량을 줄이고 용탕 유지를 위한 최적 조건을 도출하기 위한 추가 실험이 필요하다. 이 결과는 폐기물 열분해/가스화 용융 공정을 통한 합성 가스 생산 공정에 있어서도 용융로 운전 에 있어 중요한 자료를 제공한다.

후 기

본 연구는 축열식 고온 용융 소각로 개발(환경부 지원)의 연구비지원을 받아 이루어졌습니다.

참고문헌

- [1] Ruoyo Hong, Hongzhong Li, Haibin Li, Yang Wang, 1997, "Studies on the inclined jet penetration length in a gas-solid fluidized bed" Powder Technology, Vol. 92, Issue 3, pp.205-212
- [2] 손기현, 이상렬, 1999, "수중에서 상승하는 기포거동에 관한 수치해석" 대한기계학회 논문집 제23권 제12호, pp.1606~1613
- [3] 류태우, 김봉근, 양원, 전금하, 신동훈, 박상욱, 임성진, 김대성, 이진호, 황정호, 2006, "30 kg/hr 급 열분해 용융 소각로에서의 폐기물 열분해/연소/용융 특성 연구", 32회 한국연소학회 춘계 학술대회
- [4] 김대성, 이진호, 양원, 류태우, 신동훈, 2006. "공기주입에 따른 모형용융소각로의 용탕 내부 침투길이에 관한 연구", 대한기계학회 춘계학술대회
- [5] F. J.Gomez-Moreno, D. Snz-Rivera, M. Martin-Espigares, D. Papameletiou, G.De Santi and G.Kasper, "Characterization of particulate emissions during pyrolysis and incineration of refuse derived fuel", Aerosol Science 34, pp1267-1275, (2003)
- [6] 장은석, 김승도, 엄유진, 송동근, 박종호, 정재성, 공성호, 김승수, "생활폐기물의 열분해 특성에 대한 연구", 한국폐기물학회, vol. 21, no. 1, pp.67-82(2004)