

폐기물 열분해/용융 소각 시스템의 용융로 Scale-up 연구

양 원*†, 김봉근*, 류태우*, 전금하**

Scale-up of Melting Chamber for a Pyrolysis Melting Incineration System

Won Yang*†, BongKeun Kim*, TaeU Yu*, KeumHa Jeun**

ABSTRACT

Ash melting chamber is one of the key facility of the pyrolysis-melting incineration system, and it should be designed and operated very carefully for avoiding solidification of slag. In this study, an example of numerical and experimental scale-up process of the melting chamber, in which high speed air is injected to the molten slag and generates bubbles, which enhances agitation of the slag and char combustion, is presented. Cold flow test, combustion and melting test in a lab-scale (30 kg/hr) chamber and a pilot scale (200 kg/hr) chamber. Minimum energy for maintaining molten slag is derived, and it was found that the molten slag can be maintained efficiently by concentrating heat into the bubbling slag.

Key Words : Pyrolysis-melting incinerator, Slag melt bubbling, Molten slag, Cold flow test

기 호 설 명

LOx	Liquid Oxygen	T_w	Inner Wall Temperature
$T(i)$	Molten Slag's Temperature	T_{out}	Outer Wall Temperature
$T(0)$	Initial Temperature	$H_i)_G$	Auxiliary Fuel's Calorie
$C_p)_{slag}$	Averaged Specific Heat of Molten Slag	CT	Castable
$C_p)_{gas}$	Averaged Specific Heat of Combustion Gas	FC	Fixed Carbon
$Q)_{cond}$	Heat Loss by Conduction	$H_i)_{wt}$	Waste's Calorie
		$Q)_{rad}$	Heat Loss by Radiation
		$Q)_{gas}$	Heat Loss by Combustion Gas

1. 서 론

폐기물 열분해 용융 소각로의 용융 공정은 폐기물 열분해/용융 소각로에 있어서 핵심적인 설비로서, 설계 및 운전에서 많은 주의를 요한다[1]. Fig. 1 에는 본 연구에서 사용된 폐기물

열분해 소각로의 용융로 개념을 나타내었다. 폐기물이 열분해를 거쳐, 발생하는 잔류물(Char)은 약 1500도로 용탕이 형성되어 있는 용융로로 투입된다. 투입된 잔류물 내 가연분은 용탕 내부로 유입되는 약 40% 산소 농도를 가지는 연소용 공기와 산화 연소하여 발생하는 연소열로 용탕의 내부 온도를 유지케 한다. 이 때 고속으로 용탕 내부로 유입되는 연소공기는 약 1-2Bar로 풍구에서 약 200m/sec의 속도로 투입되는데 이 에너지에 의하여 고온의 용탕이 폭기하게 되며, 이는

* 한국생산기술연구원 산업설비팀

† 연락처자, yangwon@kitech.re.kr

** (주) 닷나이에비

가연성 물질과 연소용 공기의 매체 역할로 용탕에 사용된다.

이러한 용융 공정에 있어서 중요한 기술적인 관건은, (1) 풍구에서의 압력 및 속도 제어를 통해 산소부화 공기 또는 일반 공기의 충분한 침투 거리를 확보하고 bubbling 특성을 확인하는 것, (2) 내화물의 침식을 막기 위해 적당한 두께의 frozen slag 층을 내화벽 안쪽에 형성시키는 것, 그리고 (3) 용탕유지를 위해 필요한 보조 연료 및 순산소 사용을 최소화하는 것이다. 본 연구는 이러한 기술적인 문제들을 해결하기 위해 수행되었다.

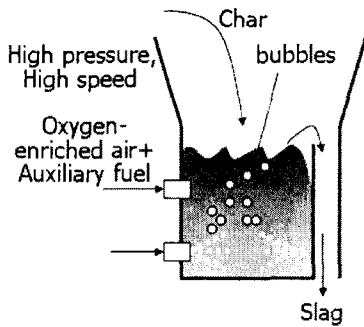


Fig. 1 Concept of the melting chamber used in this study.

2. 접근 방법

폐기물 소각로 용융 공정의 설계/운전 인자 도출을 위해서 실험적인 방법과 해석적인 방법이 모두 요구된다. Fig. 2 에는 본 연구에서 사용된

scale-up 과정을 나타내었다. 풍구로 투입되는 공기 또는 산소부화공기의 침투 거리 및 발생되는 버블의 거동 파악을 위해 축소 규모 용융로에서 냉간 유동 실험을 실시하였고, 동일한 시스템에 대해 CFD 를 사용한 전산해석을 함께 수행하였다. 여기에서 도출된 결과를 사용하여 실험실 규모(30kg/hr) 열분해 용융 시스템에서의 용탕 실험(열간 유동)을 수행했으며, 여기에서는 용탕의 형성 여부 및 실제 거동, 그리고 용탕 유지를 위해 필요한 에너지량을 도출하였다. 이와 함께 용탕의 벽면 부분에서는 벽면으로의 열손실에 의해 frozen slag 가 생기게 되는데, 이를 해석하기 위해 열손실 해석 모델을 수행하였고, 동시에 용탕 전체에 대해 lumped parameter model 을 적용하여 비정상 상태에서의 용탕 온도 거동 해석도 동시에 수행하였다. 여기에서 도출된 에너지 요구량과 frozen slag 의 두께를 고려하여 pilot scale (200kg/hr) 에서의 용융 실험을 수행하였다.

Fig. 3 에는 사용된 용융로들의 사진을 축소 규모 냉간 유동 장치에서부터 Pilot scale 의 용융로에까지 비교하여 나타내었다. 축소 규모 냉간 유동 장치는 30 kg/hr 규모 장치와 비슷한 스케일을 가지고 있다.

2.1 냉간 유동 실험 장치 및 해석 모델

냉간 유동 실험에서는 실제 형성된 용탕의 점도에 일치하는 글리세린을 사용하여 고압 고속으로 주입되는 공기의 침투거리 및 버블링 특성, 그리고 이에 따른 혼합 특성을 파악하였다. 장치는 Fig. 4 에서 보는 바와 같이 정압계(pressure regulator), 유량계 및 아크릴로 제작된 모형용탕으로 구분 된다. 실제 원형 용탕에서의 침투 실

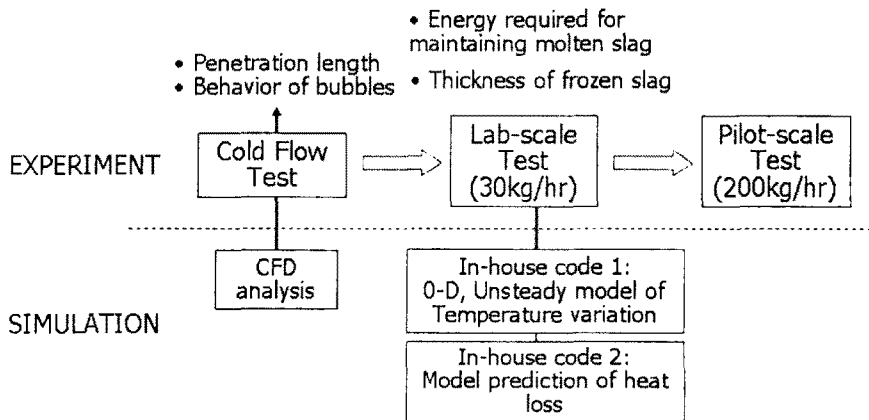


Fig. 2. Scale-up process of melting chamber for pyrolysis-melting incinerator

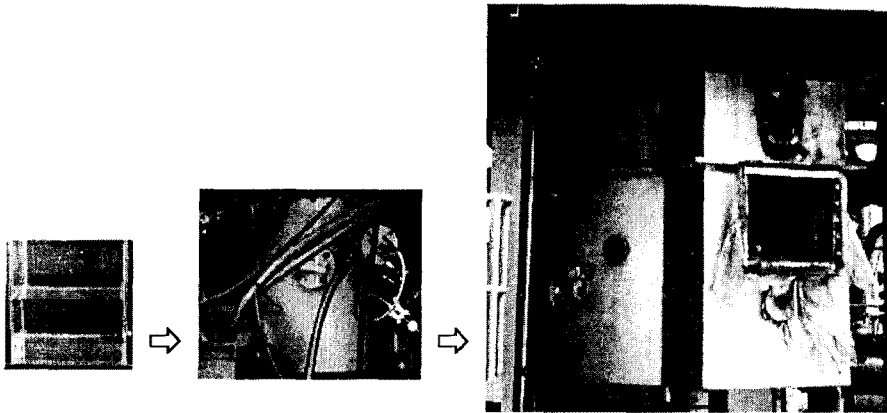


Fig. 3. Pictures of melting furnace from cold flow model to pilot scale chamber

험을 원활히 하기 위해 2차원 직사각형 단면을 고려하여 아크릴 모형을 제작하였으며, 밑면은 가로와 세로가 250mm인 정사각형이고 높이는 800mm로서 400mm지점부터는 윗부분으로 갈수록 넓어지는 형상이다. 실험에 사용된 노즐지름의 크기는 실제용탕에 설치된 12mm와 실제 설치된 노즐과 비교하기 위한 9mm, 7mm 및 5mm의 4가지 타입이며, 높이 50mm지점 벽면에 수직으로 설치되었다. 공기압의 조절과 압력에 따른 유량을 측정하기 위해 각각 정압계와 유량계를 설치하였으며, 가시화를 위해 CCD카메라(XC-HR70, SONY)를 정면에 설치하였다.

정성적인 실험으로는 우선 버블링 특성 관찰을 위한 촬영이 수행되었고, 용탕 윗 부분에 형성되어 있는 비용융 가연 물질이 용탕 내부로 버블링에 의해 들어오는 현상을 관찰하기 위해 탄소 분말을 사용하여 용탕 위에 띄워 놓은 뒤 공기 노즐을 통해 고속의 공기를 분사시켜 용탕 내 교반 특성을 관찰하는 실험이 수행되었다. 정량적인 실험으로는 노즐 크기 및 공기 분사량에 대해 육안으로 관찰된 침투 거리를 측정하는 실험을 수행하였다.

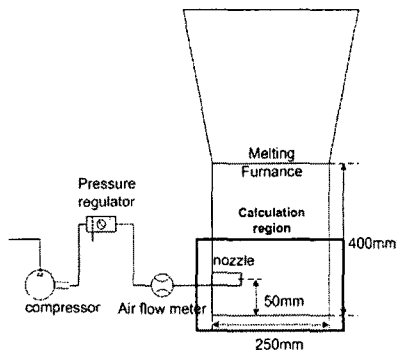


Fig. 4. Cold flow model

2.2 30 kg/hr 급 실험실 규모 열분해 용소각 시스템 및 해석 모델

본 실험에 사용된 용융로[2]는, 안지름 250mm, 높이가 300mm인 중공 원형 실린더 형태로 내화재(CT-180)가 400mm 두께로 용융로 내벽을 감싸고 있다. 용탕의 온도를 직접적으로 측정하기 위해 B-Type 열전대를 용융로 내로 투입하였으며, 온도 센서들로부터 나오는 아날로그 신호들은 모두 커넥터 블록(NI model CB-68LP)을 통하여 LabVIEW 전용 데이터 수집기(DAQ board, NI model PCI-MIO-16E-4)를 거쳐 연속적으로 컴퓨터에 입력된다.

실험 장치에 투입되는 폐기물은 RDF(Refuse Drived Fuel)로서, 저위발열량(LHV)은 원소분석과 저위발열량 계산식을 이용한 결과 5691.83 kcal/kg 이었다. 실험은 공기비 1.2, 산소농도 40% 조건에서 열분해로를 거치지 않은 상온의 폐기물을 용융로 안으로 직접 투입하는 방식으로 이루어 졌다.

용융로의 열적 거동 해석을 위한 기존의 모델은 대부분 정상상태 모델로서 초기 투입조건이 결정되면 기본적인 열평형 방정식을 이용하여 결과를 출력하는 형식으로 되어 있기 때문에 실제 실험에서는 기존의 모델을 기초로 하여 실험하게 되면 예기치 않게 용탕이 굳어지는 것을 종종 볼 수 있다. 이는 반응과정에서 용탕의 온도가 일정 시간동안 용융온도 이하로 떨어질 때 나타나는 현상으로서, 초기 투입된 폐기물의 열적거동은 시간에 따른 경로함수(Path Function)이기 때문이다. 이에 따라, 본 연구는 비정상 상태 고려가 가능한 모델을 개발하여 시간에 따른 용탕과 폐기물의 유기적 상대성 온도변화를 해석 하였으며 실제 실험 결과와 비교함으로써 타당성을 검증하였다.

용탕으로 투입된 폐기물의 거동은 크게 가열, 연소 그리고 용융의 3가지 순차적 과정으로 특화할 수 있으며 Fig. 5에 간략하게 나타내었다. 먼저 용탕으로 투입된 직육면체 모양의 폐기물은 용탕 표면과 반응하여 가열된다. 그러므로 가열과정은 열전도에 의한 가열이 지배적이며, 일정한 용탕 온도에서 열평형식을 도입하면 모델링이 가능하다. 용탕 내에서 400mm 두께의 내화재로 이루어진 용융로 벽면으로의 열전달 거동을 해석하였다.

이와 함께, 내화물의 침식을 막기 위해 내화물 내벽에 형성시키는 frozen slag의 두께를 벽면 열손실을 통해 예측하기 위한 모델을 개발하였다. 계산은 최초 초기 용탕온도, 벽면온도, 슬래그 층 두께, 용탕의 기하학적 수치 및 여러 물성치들을 입력한 후 용탕 벽면온도를 이용하여 초기 벽면 열전달량을 계산한 뒤, 용탕 내 열전달량을 설정한 후 초기 입력조건들을 이용하여 용탕의 열전달 계수를 구하고, 결정된 초기 용탕온도(T_P)와 함께 모델 식에 대입하여 용탕과 슬래그 층 사이 계면의 온도(T_{PS})를 계산하는 방식으로 수행되었다. 자세한 모델은 기존의 연구 결과에 나와있다.

2.3 200 kg/hr 급 파일럿 규모 열분해 용융 소각 시스템

생산기술 연구원 내에 있는 파일럿 스케일(200 kg/hr)의 열분해 용융 소각로 용융로에서, 순산소 또는 보조 연료의 사용 없이 용탕을 유지하는 실험을 수행하였다. 보조 연료의 사용을 최소화하기 위해서 용탕의 풍구에 9200 kcal/kg 발열량의 페타이어 분말을 함께 넣어 용탕 내부에서 연소가 일어나게 하였고, 산소 부화 공기 내 산소 농도를 40% 까지 높이고, LPG 10 Nm³/hr를 투입하여 용탕을 만든 뒤, 이들을 조금씩 줄여가면서 실험을 수행하였다. 측정은 카메라를 통한 육안 관찰과 B type 열전대를 사용한 용탕 온도

및 용탕 내벽 온도를 시간에 따라 측정하는 방식으로 이루어졌다. 실제 카메라를 통한 육안 관찰로도 용탕 형성 및 유지 여부는 충분히 판단할 수 있다.

3. 결과 및 토론

3.1 냉간 유동 실험 결과

Fig. 6은 노즐을 통해 일정한 압력으로 분사되는 공기가 글리세린 용액이 담긴 용탕모형 내로 침투하는 것을 고속 CCD카메라를 이용하여 1/10000초로 가시화 한 것으로 이를 정성적으로 분석한 결과 아래 그림과 같이 4가지 정도의 유동체제(Flow Regime)가 있음을 알 수 있다[3,4]. 첫째는, Fig. 6(a)와 같은 최초 공기 침투시 발생하는 체제로 버블들의 평균 직경이 가장 작고 순간 침투 길이가 가장 긴 특성을 보인다. 둘째는, 평균 침투길이를 결정짓는 체제로 Fig. 6(b)와 같이 특징적인 하나의 큰 버블을 만들어 내며 침투 현상의 주류를 이룬다. 셋째는 Fig. 6(c)와 같은 체제로, Fig. 6(b)에서 생성된 버블이 주위의 항력에 의해 깨어지며 소산되는 과정이다. 네 번째 체제는 Fig. 6(d)에 보였으며, 담겨진 용액 내에서 발생하는 조파항력(Wave Resistance)으로 인해 버블 생성이 노즐 뒤로 밀려나며 침투길이가 가장 짧아지는 특성을 보인다.

Fig. 7에는 탄소 가루를 5 mm 두께로 용탕 위에 띄워 놓은 뒤 (Fig. 7(a)), 고속의 공기를 분사하여 용탕 내 탄소 가루가 섞여 들어가는 현상을 관찰한 결과를 나타내었다. 고속의 공기가 분사되면서 Fig. 7(b)의 경우 탄소 가루가 용탕 내부로 들어오는 현상을 관찰할 수 있으며, 시간이 좀더 지남에 따라 기포가 사진 중앙 부분을 중심으로 하여 올라가면서 탄소 가루 층이 두 부분으로 나누어지는 것을 Fig. 7(c)에서 관찰할 수 있다. 또한 기포가 표면에 이르러 터짐으로써 입

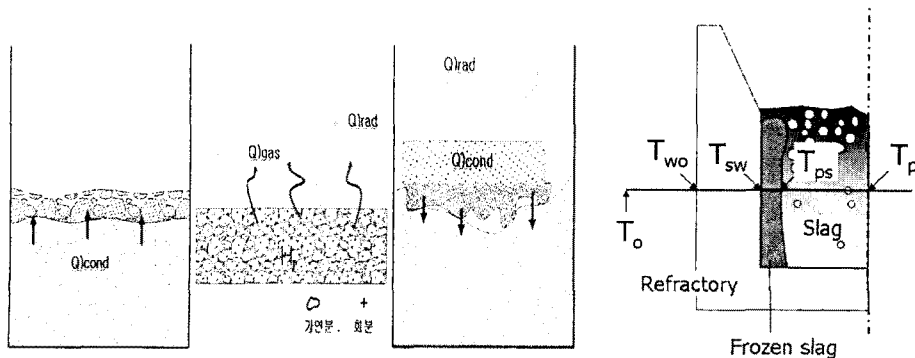


Fig. 5. Thermal reaction process of the wastes entered into a melting furnace

자를 액체 속으로 밀어넣는 현상을 관찰할 수 있다.

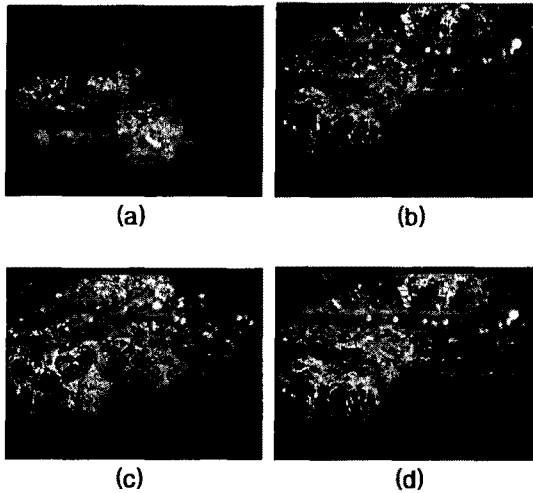


Fig. 6. Visualization of the air bubbles percolating through glycerin solution at four different incidents

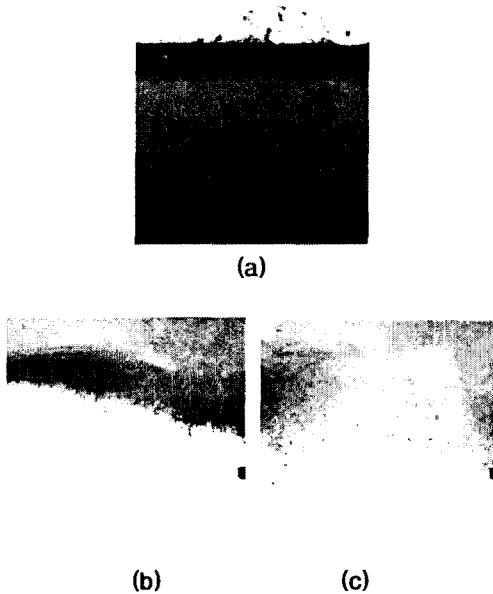
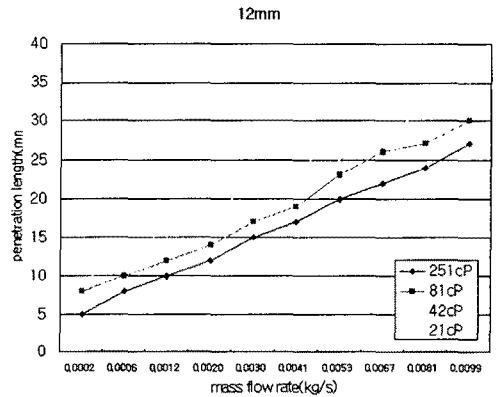


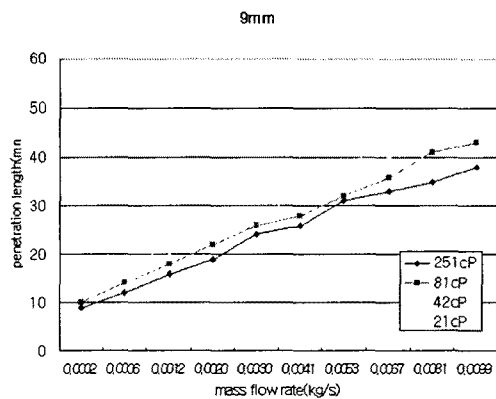
Fig. 7. Visualization of the carbon particles in the cold flow experiment.

Fig. 8 은 점도변화에 따른 침투길이를 노즐 지름의 변화에 대해 나타낸 그래프로써 점도가 작아짐에 따라 각각의 지름에서 침투길이가 증가하며 질량유량 증가에 따라서도 침투길이가 선형

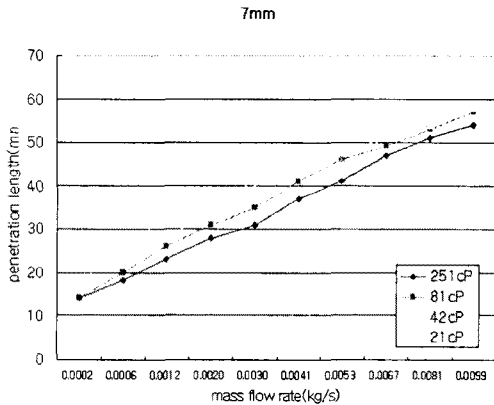
적으로 증가함을 알 수 있다. 노즐 지름이 12, 9, 7, 및 5 mm 일때 점도변화에 따라 글리세린 수용액 내로 침투하는 공기의 질량유량증가에 따른 세부적인 침투길이는 각각 Fig. 8(a), (b), (c), (d)에 나타내었다. 특히 Fig. 8(d) 에서는 지름이 5mm인 노즐의 초기 침투길이 경향이 12mm, 9mm, 7mm의 노즐과 비교 했을 때 비선형적인 원인은 노즐 내부에서 마찰효과에 의한 주 손실 이외에 면적의 변화에 따른 부차적 손실이 더 발생했기 때문이다. 글리세린 비율 90%를 기준으로 했을 때 최대 침투길이는 80%, 70%, 60%가 각각 12%, 28%, 34%가 증가했음을 알 수 있다. 따라서 침투길이를 증가시키기 위해서는 노즐 입구의 지름을 변화시키는 것이 더 효율적임을 알 수 있었다.



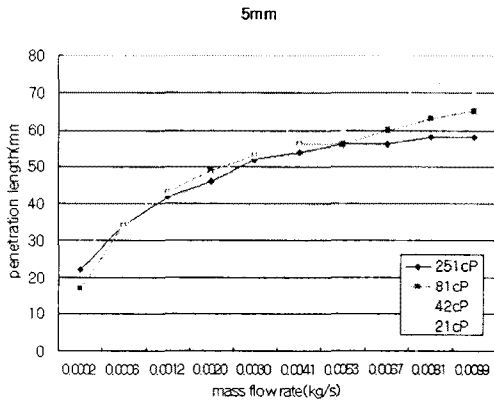
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 8. Penetration lengths for various nozzle diameters

3.2 30 kg/hr 규모 용탕 실험 결과

폐기물 용탕 형성 후 정상 작동 상태에 있는 용융로의 열전대 위치에 따른 온도 변화 그래프를 Fig. 9에 나타내었다. 용융로 내로 폐기물이 투입될 때마다 용탕의 온도가 급격하게 떨어졌다가 회복되는 양상이 반복됨을 볼 수 있으며 용탕, 용탕 내벽면 및 내벽면에서 200mm, 300mm 떨어진 곳의 온도가 각각 평균 1750°C, 1300°C, 510°C 및 290°C 가량으로 운전됨을 알 수 있다.

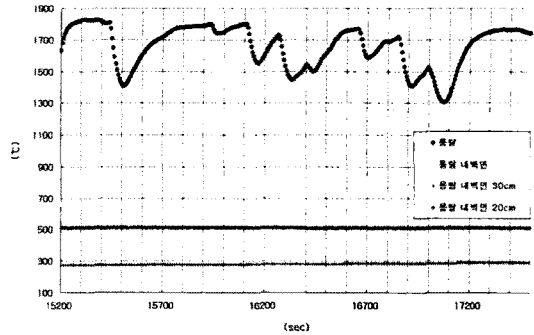


Fig. 9. Temperature of the furnace according to thermocouple position.

폐기물의 조성변화에 따른 용융상태를 알아보기 위하여 초기 용탕은 석탄과 Ash로 용탕로 내부로 투입되면 용탕로 하부에 위치한 산소버너에 의한 석탄과 Ash의 채널링이 활발히 일어나고 용융이 1400°C 부근에서 시작된다. 안정화를 시킨 후 실험을 실시하였다.

Fig. 10은 용탕의 형성과정을 용융로 하단의 풍구를 이용하여 시간대 별로 촬영한 사진이다. Fig. 10(a)는 폐기물이 용탕로 내부로 투입된 후 초기 가열하였을 경우 사진이고, Fig. 10(b)는 10분 경과 후, Fig. 10(c)는 20분 경과 후, Fig. 10(d)는 30분 경과 후의 사진이다. Fig. 10(b)에서 나타나는 바와 같이 10분이 지난 후에는 약간의 채널링(channeling)이 일어나는 것으로 보아 용탕이 버너 부근에서만 형성되어 있는 것으로 판단된다. Fig. 10(c)는 용융이 어느정도 진행되어 용융물 입자가 산소버너에 의하여 버블링과 채널링이 일어나는 것으로 관측되었다. Fig. 10(d)는 폐기물이 용융로 내부로 투입되었을 때의 폐기물의 용융되는 사진을 촬영한 것이다. 30분이 경과한 후의 결과로 용융 상태는 양호한 것으로 관측되었다. 용융에 필요한 최소 열량은 순산소 200 lpm, LPG 60 lpm 으로서 약 100,000 kcal/hr에 해당된다. 이렇게 큰 값이 나오는 이유는 소규모로 특성으로 인해 열손실이 많이 발생하기 때문으로 사료된다.



(a)

(b)

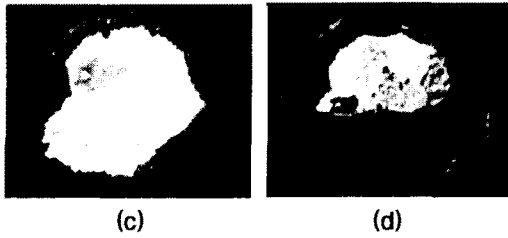


Fig. 10. Bubbling of the slag in the melting furnace

해석 모델을 실행하면 Fig. 11과 같은 결과를 얻는다. 초기 설정한 슬래그 층의 두께 0.06m에서 루프가 반복될수록 새롭게 계산되는 벽면 열전달 값은 초기 벽면 열전달 값으로 점차 수렴하게 되며 최종 슬래그 층의 두께는 해석 결과 0.005m에 이른다. 또한 T_PS의 온도는 용탕 중앙의 온도인 1750℃보다 100℃가량 떨어져 용탕과 벽면 슬래그 사이의 경계층을 형성한다.

Fig. 12는 실제 실험 결과로서 용탕 실험 후 용융로를 소각로에서 분리하여 위에서 본 것이다. 그림에서 보듯이 용융로 내벽은 용탕 슬래그로 코팅되어 있으며 그 두께는 해석 결과와 매우 유사함을 알 수 있다.



Fig. 12. Frozen slag after experiments

3.3 Pilot plant 용탕 유지 실험 결과

Fig. 13에는 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 벽면 가까이 빼 두었다. 초기에 용탕이 활발하게 형성되어 있을 경우 용탕 온도는 1800°C를 넘어가고, 벽면 온도는 용탕 온도에 비해 약 100°C가량 낮게 형성된다. 여기에서 LPG를 줄이면 용탕 온도와 벽면 온도가 약 100°C 가까이 떨어지게 되고, 이 경우 frozen slag의 두께는 더 두꺼워 질 것으로 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. Figure 14에는 페타이어, 순산소, LPG 공급이 모두 0일 때 굳어가고 있는 슬래그 사진(Fig. 14(a))과 페타이어를 30 kg/hr로 투입하고 순산소와 LPG 주입량을 모두 0으로 했을 때의 용탕의 거동 사진(Fig. 14(b))을 나타내었다. 순산소와 보조 연료 주입 없이도 slag의 버블링이 매우 활발하여 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 열량

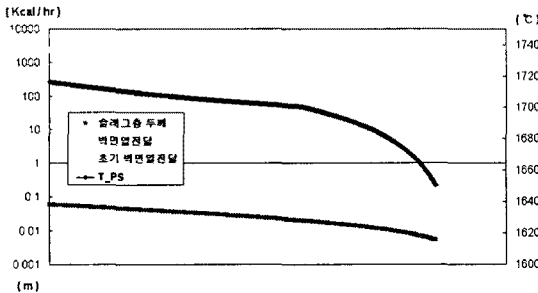
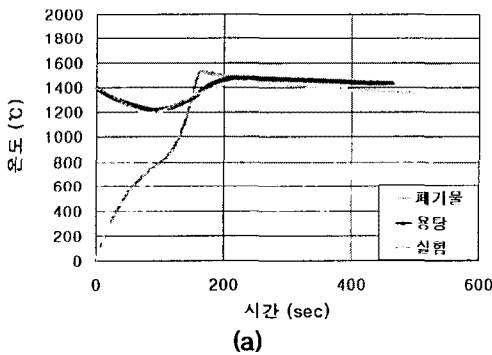


Fig. 11. Simulation results of the slag temp.(a) and wall heat transfer(b)

이 약 270,000 kcal/hr 로 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.

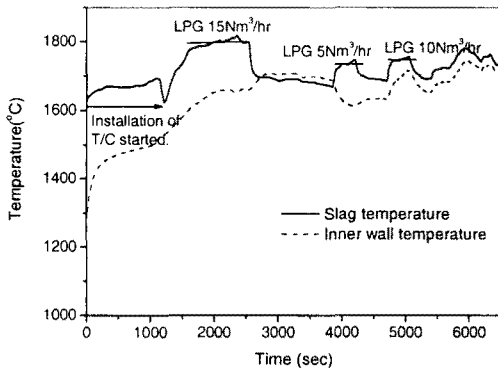
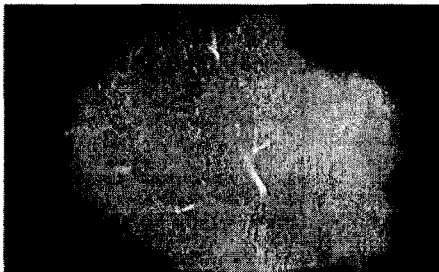
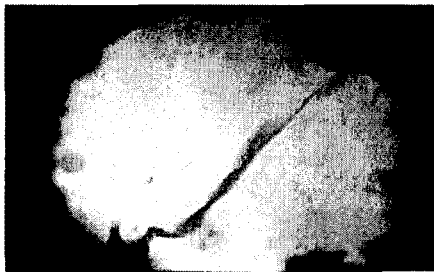


Fig. 13. Temperatures of slag and inner wall for various LPG supplies



(a)



(b)

Fig. 14. Pictures of slag: (a) freezing slag for no oxygen, no LPG and no tire supply, (b) bubbling slag for no oxygen, no LPG and 30 kg/hr tire supply

4. 결론

폐기물 열분해/용융 소각로에서의 용융로 scale-up 연구 결과를 정리하였다. 축소 규모 냉간 유동 실험과 실험실 규모의 용융로 실험을 통해 풍구 운전 조건과 버블링 특성, 용탕 내 교반 특성 및 용탕 유지에 필요한 에너지량을 도출하였고, 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 운전에 있어 중요한 자료를 제공한다.

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] 류태우, 김봉근, 양원, 전금하, 신동훈, 박상욱, 임성진, 김대성, 이진호, 황정호, "30 kg/hr 급 열분해 용융 소각로에서의 폐기물 열분해/연소/용융 특성 연구", 32회 한국연소학회 춘계 학술대회, 경주, 2006. 4
- [3] 김대성, 이진호, 양원, 류태우, 신동훈, "공기 주입에 따른 모형용융소각로의 용탕 내부 침투길이에 관한 연구", 대한기계학회 춘계학술대회, 제주, 2006. 6.
- [4] 손기현, 이상렬 1999, "수중에서 상승하는 기포거동에 관한 수치해석" 대한기계학회 논문집 제23권 제12호, pp.1606~1613