

폐기물 열분해 용융소각로의 용탕 유지를 위한 실험적 연구

김봉근* · 박주원* · 류태우* · 양 원† · 전금하**

Experimental Study for Keeping a Melting Pool in a Waste Pyrolysis Melting Incinerator

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

ABSTRACT

The large amount of energy is consumed in a process for keeping the high temperature melting pool. For this reason, in addition to the wastes input to keep the high temperature melting pool, it is necessary for an auxiliary fuel and LOx to throw into the melting pool. So in this study, using a new melting furnace system, the experiments to keep the melting pool with minimal energy without throwing an auxiliary fuel and LOx was carried out. Also it is hoped that the results of the experiment will be available to analyze keeping a melting pool and behavior in a melting furnace.

Key Words : Slag melt bubbling, Melting pool, Case 1,2,3, LHV, Mixing strength, Molten slag, Mixed waste

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

열분해 용융소각로 기술은 생활폐기물처리에 있어서 무해화, 안정화 및 재활용이 가능하게 하는 기술로서, 1970년대 오일쇼크로 인하여 석탄 등 대체에너지 개발에 의해 발달한 저급연료의 고급연

료화를 위한 열분해 기술과 제철산업에서 사용하는 용융기술을 접목함으로써 폐기물의 소각과정에서 환경오염원으로 부각된 다이옥신 및 중금속 문제등을 해결하기 위해 완전 무해화를 목표로 하는 폐기물 처리기술이다[1]. 이러한 열분해가스화 용융 기술은 유럽 및 일본 등에서 개발되었으며, 최근 일본에서는 열분해 용융소각로의 사용 비율이 점점 증가하는 추세이다[2].

열분해 용융공정의 일반 소각공정과 구분되는 핵심설비는 열분해로와 용융로이다. 특별히, 열분

* 한국생산기술연구원 산업설비팀

† 연락처자, yangwon@kitech.re.kr

** (주) 닷나이에비

폐기물 및 페타이어의 성상은 Table 1과 같으며, 저위발열량(LHV)은 원소분석과 Dulong의 저위 발열량 계산식을 이용한 결과 각각 4050.3 kcal/kg, 9095.9 kcal/kg 이었다.

성분	혼합폐기물	페타이어
Volatile	79.7	64
FC*	12.5	32.1
Ash	7.8	3.9
C	40.4	85.1
H	5.4	7.6
O	21.8	1.0
N	0.7	0.4
S	0.3	2.0
Cl	23.9	-

Table 1 Composition of the mixed wastes.

본 실험에서 원활한 용탕 유지를 위하여 크게 3가지 새로운 방법을 도입하였다. 첫째로는 용융로 외벽면과 내벽면을 각각 Castable (CT-160, 180)와 Brick(SA40S)으로 축조하는 축열식 공법을 사용하였다.

둘째로는 풍구 중 하나를 개조하여, 기존의 열분해로를 통해 용탕 위 표면으로 떨어지던 폐기물을 풍구를 통하여 용탕 바닥면으로 투입되도록 하였다. 이는 용탕 내 폐기물의 혼합효과를 증진시킬 것으로 기대하였으며 열분해로를 통해 투입되는 폐기물과는 별도로 개조된 풍구로 분쇄된 페타이어를 투입하였다.

마지막으로 용융로 벽면 내에 열교환기를 2단으로 설치하여 용탕으로 투입되는 압축공기의 온도를 상승시킴으로써 용탕유지에 필요한 에너지의 효율을 높이고자 하였다. 실제로 식 (2.1)에서 보인 기본적인 열 및 물질 정산식을 통하여 풍구로 투입되는 압축공기의 온도변화에 따른 용탕의 온도상승을 해석하였다. 좌변과 우변은 각각 용융로에서의 입열과 출열을 나타낸 것으로서 좌변의 3개의 항은 각각 폐기물, 보조연료 및 풍구 투입공기의 입열을 나타낸 것이며 우변의 4개의 항은 각각 연소가스, 복사, 벽면 및 슬래그 층의 열손실을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} \dot{H}_l)_{wt} + \dot{H}_l)_{G} + \dot{Q}_{air} = \dot{m} C_p)_{gas} (T(i) - T(0)) \\ + A\epsilon\sigma (T(i)^4 - T_w^4) + \frac{2\pi kL(T(i) - T_{out})}{\ln(r_{out}/r_{in})} \\ + \dot{m} C_p)_{slag} (T(i) - T(0)) \end{aligned} \quad (2.1)$$

용탕 유지 실험 시 용융로로 투입된 공기, 보조연료 및 혼합 폐기물의 투입조건은 Table 2에

자세히 나타내었으며 소각로 전체적인 과잉산소비는 1.2~1.4로 유지하였다. Case 1은 가장 일반적인 실험 조건을 나타낸 것이며, Case 2와 Case 3은 본격적인 용탕 유지를 위한 실험조건으로, 각각 용탕 유지의 핵심인 모멘텀과 에너지의 영향을 고려하고자 한 것이다.

실험조건	Case 1 (kg/hr)	Case 2 (kg/hr)	Case 3 (kg/hr)
공기	270	270	270
순산소	30	0	0
LPG	Various	0	Various
혼합폐기물	100	0	Various
페타이어	0	Various	0

Table 2 Input conditions into the furnace.

3. 결과 및 고찰

Case 1을 기준으로 용탕 유지 여부의 판단 근거가 되는 용탕 온도 측정 실험을 용탕 내벽면과 용탕 중앙에 위치시킨 B-type 온도계를 이용하여 실시한 결과를 Fig. 4에 나타내었으며 이때 두 온도계는 용융육 위 표면으로부터 20cm 깊이에 잠겨있었다. 용탕 중앙의 온도계는 용탕 폭기와 고온의 산화 환원 분위기로 인해 3~5 시간 내에 파손되며 이를 위해 용탕 내벽면 온도와의 보정이 필수적이다. 그림에서 보는 바와 같이 용탕 내벽면의 온도변화 추종성이 뛰어나음을 볼 수 있으며 용탕 중앙과 용탕 내벽면의 온도차는 평균 30℃ 가량이었다. 또한 용탕 폭기의 저하로 인한

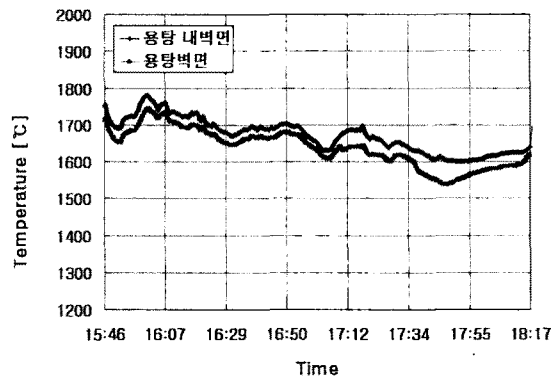


Fig. 4 temperatures of the molten slag at the center and near-wall points.

용융 슬래그의 혼합 능력이 떨어지면 용탕 내벽면으로부터 중앙으로 용탕의 고화가 진행되기 시

작하는데, 이때 온도 차는 최대 80℃까지 벌어지게 됨을 볼 수 있다.

Case 1과 같은 일반적인 경우의 실험조건 하에서 LPG를 20kg/hr로 투입하였을 때 풍구로 투입되는 공기의 온도변화에 따른 용탕의 온도 변화 해석 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서

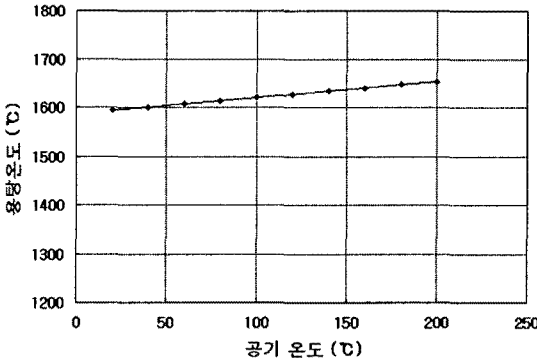


Fig. 5 Slag temperature vs. inlet air temperature.

보는바와 같이 풍구로 투입되는 공기의 예열은 용탕 유지에 어느 정도 도움이 되었음을 알 수 있다.

일반적으로 열분해로를 통과하여 용탕 표면 위로 떨어진 폐기물은 크게 가열, 연소 및 용융의 과정을 거치게 되며 Fig. 6에 간략하게 나타내었다[4]. 이는 용융로 내로 투입된 폐기물과 용

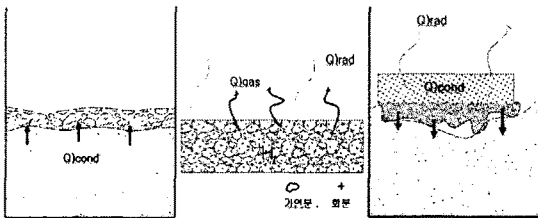


Fig. 6 Thermal reaction process of the wastes entered into a melting furnace.

융 슬래그와의 용탕 폭기에 의한 혼합을 저해하여 순간적으로 용탕 표면의 온도를 200℃~400℃ 가량 떨어뜨리는 요인이 된다. 이러한 영향을 최소화하기 위하여 풍구를 통해 폐기물을 직접 투입함으로써 용탕 폭기에 의한 용융 슬래그와의 혼합을 활발하게 하였으며 각각의 Case를 기준으로 한 폐기물 투입방식에 따른 용탕 내벽면 온도변화 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보는 시간대를 기준으로 Case 1의LPG 투입량은 20kg/hr, Case 2의 페타이어 투입량은 40kg/hr 끝으로 Case 3의 LPG 및 혼합 폐기물 투입량은

각각 20kg/hr, 60kg/hr였다.

그림에서 Case 1의 결과를 보면 폐기물이 용융로 내로 투입될 때 용탕 내벽면 온도는 70℃가량 떨어지며 다시 회복되는데 10분 정도가 소모됨을 알 수 있다. 이는 Case 1의 공정 자체가 위에서 언급한 바와 같이 폐기물의 투입이 불연속적인 이유도 있으나 Case 1의 경우 근본적으로 취약 용탕 표면위로 떨어져 용탕을 덮는 방식으로 용탕의 폭기를 저하시킴으로써 용탕 내 용융 슬래그의 원활한 혼합능력을 떨어뜨리기 때문이다.

Case 2에서 온도의 급격한 하락은 페타이어의 투입량이 줄다가 잠시 중단 되었을 때 나타난 현

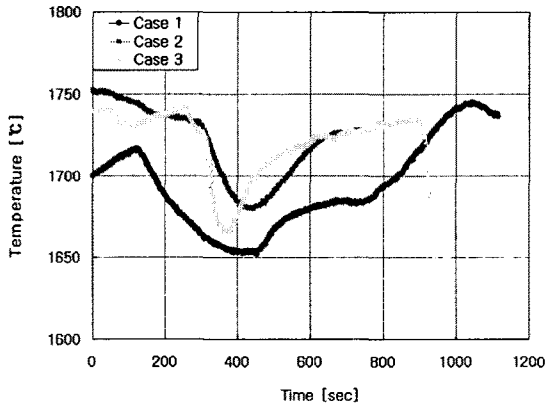


Fig. 7 Near-wall temperatures according to the cases.

상으로 투입 재개 시 온도가 빠르게 회복됨을 볼 수 있으며 폐기물 투입으로 인한 Case 1과 같은 온도의 급격한 하락이 나타나지 않았음을 알 수 있다. 이러한 Case 2의 실험 결과는 Case 1의 실험 결과에서 언급된 주장을 뒷받침하는 중요한 논거로 볼 수 있다.

Case 3은 Case 1의 경우에서 순산소 투입을 중단하고 혼합 폐기물의 투입량을 줄여서 실험한 결과이다. 그림에서 보는바와 같이 폐기물 투입 직후 온도의 하락은 Case1의 경우 보다 더욱 급격하나 회복 속도는 2배 가량 빠름을 알 수 있다. 결국, 온도의 급격한 하락은 폐기물 투입 시 순산소로 인한 용탕의 폭기가 중단되었기 때문이며 또한, 온도의 빠른 회복은 그만큼 적은 양의 폐기물이 투입됨으로써 한정된 용탕의 혼합능력 하에서 상대적으로 더욱 빠른 혼합이 일어났기 때문이다.

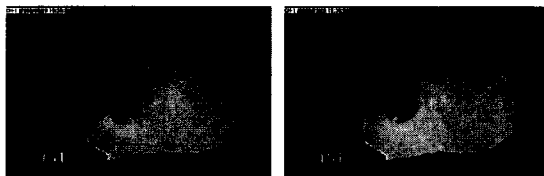
각각의 실험 조건 별 용탕 유지에 필요한 최소한의 에너지 투입량 및 용탕의 유지 사진을 Table 3과 Fig. 8에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 Case 2와 Case 3의 경우가 가장 최소한

의 에너지로 효과적으로 용탕을 유지할 수 있었음을 알 수 있다. 이는 앞에서도 언급한 바와 같이 에너지 효율적인 측면에 있어서 용탕 유지를 위해서는 반드시 모멘텀과 에너지 양 측면을 모두 특정한 임계치 이상으로 용융로 내에 투입해야 함을 보여준다.

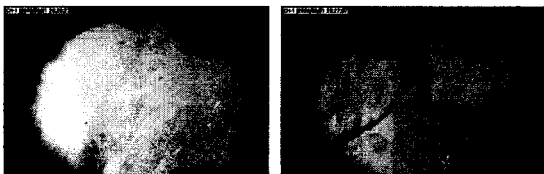
Case 1의 용탕 유지 사진은 순산소와 LPG 투입으로 원활한 용탕 유지가 이루어졌음을 알 수 있으나 용탕 폭기의 모습은 나타나지 않았다. 그러나 Case 2의 사진을 보면 용탕 폭기의 모습이 그대로 드러나 있음을 볼 수 있다. Case 3의 사진은 Case 1과 Case 2의 용탕의 상태가 서로 중화되어 나타나 보인다.

실험조건	Case 1 (kg/hr)	Case 2 (kg/hr)	Case 3 (kg/hr)
순산소	30	0	0
LPG	10	0	10
혼합폐기물	100	0	60
페타이어	0	40	0
총 입열 (Mcal/hr)	520	360	360

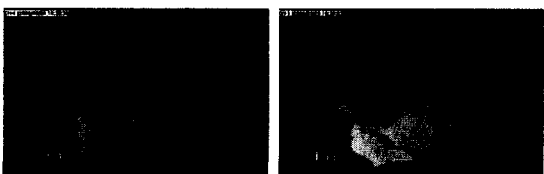
Table 3 The amount of energy input for keeping the melting pool in different cases.



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 8 Photographs concerning each case.

4. 결론

기존의 용융로 시스템은 원활한 용탕 유지를 위해서 다량의 에너지 투입이 요구되었으며 이에 따른 보조연료 및 순산소의 투입이 불가피 하였다. 이에 본 연구는 보조연료 및 순산소의 투입없이 최소한의 에너지로 용탕을 원활하게 유지 할 뿐만 아니라, 향후 용탕 유지 및 거동해석에 필요한 기초자료를 얻고자 실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 풍구로 투입되는 공기를 예열 할 경우 원활한 용탕 유지가 기대된다.
2. 순산소와 LPG 투입 없이도 용탕 유지가 가능하였으며 3가지의 실험 조건 내에서 용탕 유지에 필요한 최소한의 에너지는 360Mcal/Hr였다.
3. 용탕 유지에 필요한 충분한 에너지의 공급에도 불구하고 용탕의 고화가 발생하는 요인은 용융슬래그의 혼합능력이 저하되어 나타나는 용탕 내벽면의 고화된 슬래그 층의 증상으로의 성상 때문이다.
4. 원활한 용탕 유지를 위해서는 특정 임계치 이상의 모멘텀과 에너지를 용융로 내로 투입해야 한다.

참고문헌

- [1] 신동훈, 전병일, 이진호, 황정호, 류태우, 박대규, "열분해 용융 소각로 설계인자 도출을 위한 수치해석적 연구", 제 27회 KOSCO 심포지엄, 2003
- [2] 박정철 "직접용융 자원화 시스템 다이옥신류의 억제대책" 폐기물 열처리기술 특별 심포지움 및 추계학술 발표회 논문집 pp. 55~59 (2003).
- [3] V.P. Bystrov, A.A. Komkov, A.N. Fyodorov, E.A. Ladygo "Use of Vanyukove process and furnace for comprehensive treatment of non-ferrous metal slag, various wastes and intermediate products".
- [4] 김봉근, 양원, 류태우, "열분해 용융소각로 내 용융로에서의 온도변화에 대한 과정론적 모델링", 한국연소학회 춘계학술발표회 논문집 pp. 167~171 (2006).