

## 열분해 용융소각로 내 용융로에서의 온도변화에 대한 과정론적 모델링

김봉근 · 양 윈† · 류태우

### A Transient Modeling of Temperature Variation in a Melting Furnace of a Pyrolysis Melting Incinerator

Bong-Keun Kim, Won Yang†, TaeU Yu

#### ABSTRACT

The previous models for thermal behavior in the melting furnace were deterministic, composed of such a form that if the initial input conditions are determined, the results would have been come out by using the basic heat equilibrium equations. But making the experiment by trusting the analysis results, the melted slag is fortuitously set often, because temperature variation of the melted slag in the reaction process is not point function but path function. So in this study, a transient model was developed and verified by comparing with the experimental results.

**Key Words** : Deterministic model, Transient model, Arrhenius equation, 1st-order linear differential equation, VBA, Melted slag

#### 기 호 설 명

<p><math>T^{\sim}</math> Former Temperature</p> <p><math>T_R</math> Waste's Temperature</p> <p><math>T_P</math> Melted Slag's Temperature</p> <p><math>U_t</math> Unit time</p> <p><math>C_p)_{Rm}</math> Averaged Specific Heat of Waste</p> <p><math>C_p)_{Pm}</math> Averaged Specific Heat of Melted Slag</p> <p><math>m_R</math> Waste's Mass</p>	<p><math>Q_{Rad}</math> Radiational Heat Transfer of Waste</p> <p><math>T_{Rh}</math> Last Temperature of Waste</p> <p><math>t_{cf}</math> Combustion time of Waste</p> <p><math>E(t)</math> Strain Coefficient of Chemical Reaction Velocity</p> <p><math>\tau_H</math> Characteristic Heating Time</p> <p><math>l</math> Height of Melted Slag Level</p>
--	--

### 1. 서 론

열분해 용융공정은 1970년대 오일쇼크로 인하여 석탄 등 대체에너지 개발에 의해 발달한 서급 연료의 고급연료화를 위한 열분해 기술과 제철산

업에서 사용하는 용융기술을 접목함으로써 폐기물의 소각과정에서 환경오염원으로 부각된 다이옥신 및 중금속 문제등을 해결하기 위해 완전 무해화를 목표로 하는 폐기물 처리기술이다[1]. 열분해 용융공정의 일반 소각공정과 구분되는 핵심 설비는 열분해로와 용융로이다. 특별히, 열분해 용융공정 중 폐기물의 용융을 위해 다량의 에너지가 소비되는 고온의 용탕유지 공정은 용융로의

\* 한국생산기술연구원 산업설비팀  
† 연락저자, yangwon@kitech.re.kr

경제적인 건설 및 운영을 위해서 많은 연구가 필요하다.

용융로의 열적 거동 해석을 위한 기존의 모델은 결정론적(Deterministic)인 것으로서 초기 투입조건이 결정되면 기본적인 열평형 방정식을 이용하여 결과를 출력하는 형식으로 되어 있다[2]. 그러나 결정론적인 해석 결과를 신뢰하여 실험하다 보면 예기치 않게 용탕이 굳어지는 것을 종종 볼 수 있다. 이는 반응과정에서 용탕의 온도가 일정 시간동안 용융온도 이하로 떨어질 때 나타나는 현상으로서, 초기 투입된 폐기물의 열적 거동은 시간에 따른 경로함수(Path Function)이기 때문이다.

본 연구는 용융로 내로 폐기물이 투입될 때 기존의 결정론적인 모델이 아닌 과정론적인(Transient/Process) 모델을 개발하여 시간에 따른 용탕과 폐기물의 유기적 상대성 온도변화를 해석 하였으며 실제 실험 결과와 비교함으로써 타당성을 검증하였다.

## 2. 모델이론 및 실험방법

### 2.1 모델이론

용탕으로 투입된 폐기물의 거동은 크게 가열, 연소 그리고 용융의 3가지 순차적 과정으로 특화할 수 있으며 Fig. 1에 간략하게 나타내었다.

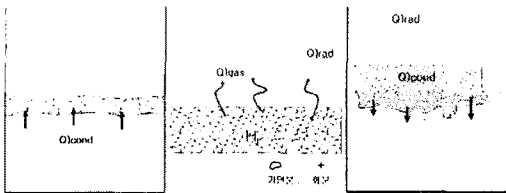


Fig. 1 Thermal reaction process of the wastes entered into a melting furnace

먼저 용탕으로 투입된 직육면체 모양의 폐기물은 용탕표면과 반응하여 가열된다. 그러므로 가열과정은 열전도에 의한 가열이 지배적이며, 일정한 용탕온도에서 열평형식을 도입하면 모델링이 가능하다.

$$mC_p)_R \frac{dT_R}{dt} = S_R Q_{Rc} \quad (2.1)$$

$$Q_{Rc} = k_R \left( \frac{dT}{dr} \right)_R \quad (2.2)$$

여기서  $S_R$ 은 폐기물의 전열 표면적,  $Q_{Rc}$ 는 전도

열전달에 의한 표면 열유속 그리고  $k_R, dr$ 은 각각 폐기물의 열전도도와 두께를 나타낸다. 식 (2.2)의  $dT$ 는 용탕 표면과 맞닿아 있는 폐기물표면 온도( $T_p$ )와 반대쪽 표면온도( $T_R$ )의 구배이다. 식 (2.1)에 식 (2.2)를 대입하여 폐기물의 가열에 대한 특성시간을 구하면 다음과 같다.

$$\tau_H = \frac{\rho C_p}{k_R} r^2 = \frac{r^2}{\alpha} \quad (2.3)$$

여기서  $\alpha$ 는 열확산 계수이며, 결국 폐기물의 가열시간은 용탕에서 폐기물로의 열확산율에 반비례하고 폐기물 두께의 자승에 비례함을 알 수 있다.

$$T_R(t)' + \frac{1}{\tau_H} T_R = \frac{T_P}{\tau_H} \quad (2.4)$$

식 (2.4)는 식 (2.3)을 이용하여 식 (2.1)을 재 정리한 것으로 비 동차(Non Homogeneous) 1계 선형미분방정식 모델로서 이를 계산하면 시간에 따른 폐기물의 가열온도를 구할 수 있다.

$$T_R(t) = T_p + (T_R(0) - T_p(t)) e^{-\frac{t}{\tau_H}} \quad (2.5)$$

첫 번째 과정에서 폐기물이 식 (2.5)와 같이 시간에 따라 가열되면 그에 따른 용탕온도 변화의 주요인은 상대적으로 폐기물의 가열이 될 것이다. 이를 식으로 구현하면 시간에 따른 용탕의 온도 변화는 식 (2.6)과 같이 나타낼 수 있다. 즉 폐기물이 가열되는 양 만큼, 폐기물 투입전에는 나타나지 않던 새로운 용탕의 열손실이 발생하여 용탕의 온도가 떨어지는 것이다.

$$T_p(t) = T_p^-(t) - dT_p(t) \quad (2.6)$$

$$\text{where, } dT_p(t) = \frac{mC_p)_{Rm} (T_R(t) - T_R^-(t))}{mC_p)_{Pm}}$$

두 번째 과정으로, 연소모델을 기초로 하여 가열된 폐기물의 시간에 따른 온도변화를 계산하였다. 연소 시 폐기물의 승온은 폐기물의 저위발열량에 의존하며 Dulong의 식으로 구할 수 있다.[3]

$$H_i = 8100c + 28800 \left( h - \frac{O}{8} \right) + 2500s - 600w \quad (\text{kcal/kg}) \quad (2.7)$$

폐기물의 연소 시간은 화학반응이 지배적인 밀도 감소모형을 적용하여 다음과 같이 계산된다. 식 (2.8)에서  $K_c$ 는 화학반응 속도계수( $\text{kg/m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{atm}$ )를,  $P_R$ 는 산소의 분압(atm)을 그리고  $d_0$ 는 폐기물의 두께(m)를 나타낸다. 여기서 화학반응 속도계수는 Arrhenius 형태로 표현되며  $A_0$ 와  $E_a$ 는 각각 빈도인자와 겉보기 활성화 에너지를 뜻한다.[4] 이때 폐기물의 온도( $T_R$ )는 최종 가열온도이다. 식 (2.7)을 식 (2.8)로 나누면 시간에 따른 일정한 단위 질량 당 폐기물의 발열량을 모사할 수 있다.

$$t_{cf} = \frac{\rho_0}{6K_c P_g} d_0 \quad (2.8)$$

where,  $K_c = A_0 e^{-\frac{E_a}{RT_R}}$

연소과정 모델링에서 고려해야 할 또 다른 현상은 시간에 따른 폐기물의 무게 변화로써 식 (2.9)와 같이 모사 할 수 있다.

$$m_R(t) = m_{R_0}(0) - \frac{m_{RF}(0)t}{t_{cf}} \quad (2.9)$$

식 (2.7)~ (2.9)를 종합하여 열평형 방정식을 이용하면 다음의 식 (2.10)과 같은 연소 시 시간에 따른 폐기물의 온도변화 함수를 도출 할 수 있다.  $Q_c$ 는 연소시 폐기물의 순(net) 발열량으로 단위시간( $U_i$ )당 폐기물의 지위발열량에서 단위 시간당 연소가스의 열손실과 폐기물의 복사열손실을 뺀 양이다.

$$T_R(t) = T_R^{\sim}(t) + \frac{E(t) Q_c}{m_R(t) C_p)_{R_m}}$$

where,

$$Q_c = \frac{H_i U_i}{t_{cf}} - \frac{m_{RF}(0) C_p)_g (T_R^{\sim}(t) - T_{R_0}) U_i}{t_{cf}} - Q_{Rrad}$$

$$E(t) = \frac{K_c(t) - K_c}{K_c} \quad (2.10)$$

그러나  $Q_c$ 는 시간에 따라 고정된(steady) 값은 가지므로 현재 폐기물의 온도에 종속적 양인 화학반응 속도 변형률계수( $E(t)$ )를 곱하여 보정하였다.  $E(t)$ 는 초기  $K_c$ 에 대한 시간에 따른  $K_c$ 의 변형률이다. 두 번째 연소과정에서 폐기물이 식 (2.10)과 같이 시간에 따라 가열되면 그에 따른 용탕온도 변화는 식 (2.11)과 같은 열평형식으로 나타낼 수 있다. 식에서 용탕의 가열 속도는 연

소 시 폐기물의 순 발열량에서 용탕에서의 방열손실, 복사열손실, 연소가스 열손실 및 폐기물로 전도열손실을 뺀 양에 비례하며, 용탕의 무게와 평균 비열의 곱에 반비례함을 알 수 있다.

$$T_P(t) = T_P^{\sim}(t) + \frac{E(t)(Q_c - Q_{Pwall} - Q_{Prad} - Q_{Pgas} - Q_{Pcond})}{m C_p)_{P_m}}$$

마지막으로, 식 (2.12)은 폐기물 중 회분의 용융과정에 대한 시간에 따른 온도 계산 모델로서 연소과정이 완료된 폐기물의 온도는 용탕의 온도보다 높으며 이에 따른 기존 용탕으로의 전도 열손실을 고려하였다. 기본적인 모델링 방식은 식 (2.1)과 같으나 진행 중인 열손실을 고려한 용탕 및 폐기물의 온도를 연속적으로 대입하여 계산한다는 점에서 큰 차이가 있다. 이에 대응하는 용탕의 온도변화 식은 따로 세울 필요가 없이 식 (2.11)을 계속 사용한다. 이는, 이미 식 (2.12) 자체가 새로운 용탕의 온도변화식이기 때문이다. 즉, 식 (2.12)의 계산 결과는 식 (2.11)에 영향을 주며 식 (2.11)의 계산 결과는 다시 식 (2.12)에 영향을 주어 결국 새로 형성된 적은 용탕과 기존의 용탕은, 연속적으로 존재하던 식 (2.11)에 나타난 여러 열손실들을 통하여 열평형에 이르게 된다.

$$T_R(t) = (T_{R_0}(t) - T_P^{\sim}(t))e^{-at} + T_P^{\sim}(t)$$

where  $a = \frac{S_p k_p}{m C_p)_{P_m}}$  (2.12)

## 2.2 실험 장치 및 실험 방법

본 실험에 사용된 용융로를 Fig. 2 에 나타내었으며, 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, 서위발열량(LHV)은 원소분석과 서위발열량 계산식을 이용한 결과 5691.83 kcal/kg 이었다.[5] 실험은 공기비 1.2, 산소농도 40% 조건에서 열분해로를 거치지 않은 상온의 폐기물을 용융로 안으로 직접 투입하는 방식으로 이루어 졌다.

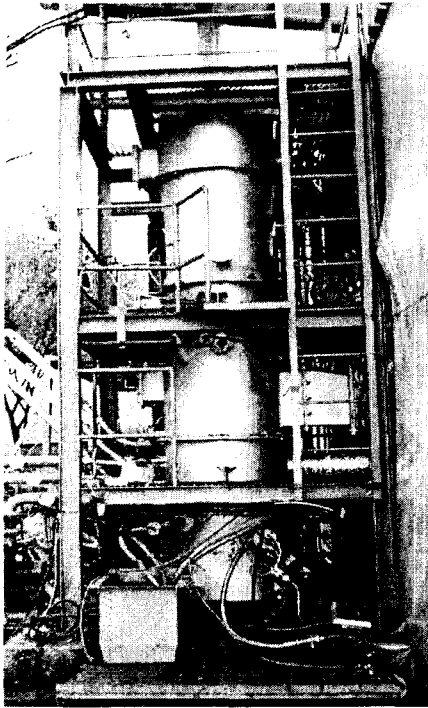


Fig. 2 A photograph of the melting incinerator.

### 3. 결과 및 고찰

모델은 엑셀의 VBA(Visual Basic Application) 기능을 이용하여 편리하게 프로그래밍 되었다. 초기 입력되는 값들은 실제 실험 조건을 바탕으로 한 것이다. 비록 과정론적인 모델이라고는 하나, 각각의 과정은 복잡한 초기 투입조건에 많은 영향을 받는다. Fig. 3은 모델을 실행시켜 얻은 폐기물과 용탕의 온도변화 그래프와 실제 실험을 통해 얻은 용탕의 온도변화 그래프를 함께 보인 것이다.

모델링과 실제 실험에서의 용탕 온도변화 그래프를 살펴보면 모델링의 기본구조 설계가 적절하였음을 알 수 있으며 시간 및 온도의 오차 범위는 5% 이내이다. 그림에서 보듯이 폐기물이 용융로 내로 투입되면 가열과정에서 급격한 온도 강하가 일어나게 되며, 이는 곧 예기치 않은 용탕의 굳어짐을 유발한다.

Fig. 4는 완성된 모델을 이용하여 폐기물 투입량 변화에 따른 가열과정에서의 용탕의 온도강하를 나타낸 것으로, 폐기물의 투입량을 늘릴수록 용탕의 온도강하는 더 커짐을 볼 수 있다. 이는 결정론적인 관점으로 용융로의 경제적인 운영을 위해 폐기물의 투입량을 늘리려는 시도가 부

적절함을 보여주는 단적인 예이다.

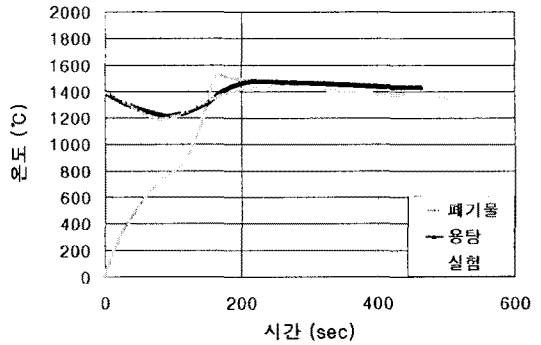


Fig. 3 A graph comparing the results of modeling with the experimental one

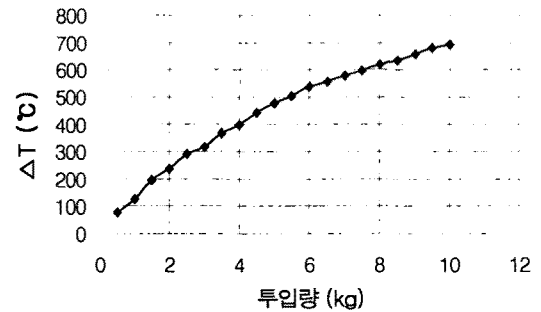


Fig. 4 A graph of the temperature drop range according to the waste input

### 4. 결론

용융로의 경제적인 운영을 위해서는 결정론적인 관점에서 벗어나 과정론적인 접근이 불가피하다. 이에 본 연구를 통하여 폐기물 투입 후 용융로 내에서 일어나는 열전달 과정을 가열, 연소 및 용융 세 단계로 나누어 폐기물과 용탕의 시간에 따른 온도변화에 대한 과정론적인 모델을 개발하였으며, 실제 실험 결과와 비교함으로써 전체적인 모델링 구조설계의 타당성을 검증하였다.

### 참고문헌

[1] 신동훈, 전병일, 이진호, 황정호, 류태우, 박대규, "열분해 용융 소각로 설계인자 도출을 위한 수치해석적 연구", 제 27회 KOSCO 심포지엄, 2003

- [2] 방병렬, 신명철, 류태우, 김봉근, “폐기물 고온 용융로의 연소 및 열전달 모델링 연구”, 생산기술연구논문집 제 13호, 2005
- [3] 任齊彬 外, 1995, “大氣汚染과 防止技術”, 東和技術, p.199
- [4] Stephen R. Turns, “An introduction to combustion”, 2000, p.116
- [5] 한국생산기술연구원, 류태우, “축열식 고온용융 소각로 개발”, 2005, pp.18