

〈論 文〉

## 로타리 킬른형 도시 쓰레기 소각로의 전열해석

박상일\* · 박영재\*

(1991년 6월 17일 접수)

### Thermal Analysis of Rotary Kiln Incinerator of Municipal Solid Waste

Sang-Il Park and Young-Jae Park

**Key Words :** Municipal Solid Waste(도시쓰레기), Rotary Kiln(로타리 킬른), Incinerator(소각로), Heat Transfer Model(열전달 모델)

#### Abstract

A heat transfer model was developed to calculate the temperature distribution in the rotary kiln incinerator of municipal solid waste. The thermo-gravimetric characteristics of waste and the gas-to-waste heat transfer coefficient were determined by comparing the experimental results and model prediction. With this, heat transfer rates by existing heat transfer mechanisms were calculated to be compared each other. The effects of treatment capacity, calorific value of waste, and flow rate and temperature of combustion air on the temperature distribution in the rotary kiln incinerator were predicted by the model developed in this work.

#### 1. 서 론

현재 도시 쓰레기는 생활 수준의 향상과 더불어 급격히 발생량이 증가하고 있어 이의 처리 문제가 심각한 상태에 있다. 또한 일반 생활 수준의 향상 등으로 쾌적한 환경의 요구도가 점차 높아짐으로써 쓰레기 처리를 위한 매립지의 확보가 점차 어려워지고 있으며 매립지의 조성 비용과 인근의 지하수 오염이나 쓰레기 비산방지를 위한 추가비용이 점차 증가하고 있다. 이의 해결 방안의 하나로 도시쓰레기를 연소시켜 감량하고 동시에 에너지를 회수할 수 있는 소각 방법이 외국에서는 이미 널리 사용되고 있다. 본 연구는 최근 한국동력자원연구소에서 개발한 로타리 킬른형의 도시 쓰레기 소각로에 대하여 전열해석한 것으로 이 해석을 통하여 소각로에서의 쓰레기, 배기가스 그리고 로벽에서의 온도 분포를 예측할 수 있다.

로타리 킬른에 대한 전열해석은 먼저 시멘트의 소성공정에 대하여 일부 행하여져 왔으며 1979년에 Tscheng and Watkinson<sup>(1)</sup>는 로타리 킬른 내부의 고온 가스로부터 고체 장입물과 벽면으로의 전열량에 대하여 실험하였다. 또한 로타리 킬른의 로벽의 재생 전열효과에 대하여도 일부 연구가 수행되었다<sup>(2)</sup>. 1989년 Barr et al.<sup>(3,4)</sup>에 의하여 로타리 킬른의 열전달 모델이 개발되었으며 이에 사용된 고체 장입물로는 석회석과 ottawa sand 등이다. 이 경우 킬른의 단면에서의 전열현상에 대한 모델을 세워 킬른 내부에서의 모든 전열 현상에 대해 비교적 상세한 해석을 행하였다. 그리고 최근에 로타리 킬른 내부에 화염이 존재하는 경우의 복사 전열에 대한 해석이 보고되고 있다<sup>(5)</sup>. 그 외 도시 쓰레기 연소에 대한 기초적인 연구가 일부 수행되었다<sup>(6,7)</sup>. 그러나 로타리 킬른에서의 도시 쓰레기 소각에 대한 해석은 아직 국내에서 보고된 것이 없다.

\*정회원, 한국동력자원연구소 기기개발연구실

## 2. 도시 쓰레기의 열적 특성

도시 쓰레기의 소각특성을 살펴 보면 로타리 킬른에 쓰레기가 장입되면서 킬른의 건조영역에서 쓰레기에 함유된 수분이 먼저 가열되면서 증발하게 되며 이어서 쓰레기의 온도가 상승되면서 연소영역에서 쓰레기의 가연 성분이 열을 흡수하여 열분해되고 이 가연성의 분해가스가 고체층을 통과하여 고온의 연소공기와 반응하여 연소하게 된다. 이후 쓰레기는 불연성의 고체와 고정탄소 성분이 남게되고 이는 후연소영역에서 연소되어 재가 된다.

따라서 도시 쓰레기의 전열 특성을 해석하기 위하여 먼저 도시 쓰레기의 건조특성과 열분해 특성을 알아야 한다. 도시 쓰레기에 함유된 수분의 대부분은 물리적으로 혼합된 것으로 볼 수 있으며 이러한 수분은 대개 120~150℃정도에서 증발되는 것으로 나타난다. 그러나 열분해의 경우는 도시 쓰레기의 성분이 다양하므로 정확한 열분해 특성을 파악하는 것은 상당히 어렵다. 따라서 본 연구에서는 도시 쓰레기의 대표적인 물리적 성분을 종이(신문지), 나무, 플라스틱(PVC) 그리고 부엌 쓰레기로 나누어 생각하였다. 이러한 각 성분의 온도에 따른 열분해 특성을 살펴 보기 위하여 TGA(thermo gravimetric analysis)와 DTA(differential thermal analysis)를 사용하여 온도에 따른 각 성분의 감량되는 경향과 열흡수량을 구하였다<sup>(8)</sup>.

이 실험 결과로부터 각 성분에 대한 열분해에 요구되는 열량은 500℃에서 종이 1022kJ/kg, 나무가 2487kJ/kg, 플라스틱이 3263kJ/kg 그리고 부엌 쓰레기가 977kJ/kg인 것으로 나타났으며 대부분의 열흡수는 300~400℃ 범위에서 나타나고 있음을 알 수 있었다. 그리고 각 성분의 온도에 따른 중량의 감량변화의 대략적인 경향은 서로 비슷하며 각 성분의 열분해에 필요한 흡수열량의 온도에 따른 변화와 거의 같게 나타남을 알 수 있었다.

## 3. 소형 단위 소각로에서의 실험

### 3.1 실험장치

본 연구의 실험장치인 로타리 킬른형식의 KIER 식 소각로의 도시쓰레기 처리용량은 42ton/day이며 증기발생량은 52~62ton/day이다. 소각 실험장치의 구조는 Fig. 1과 같다<sup>(9)</sup>.

로타리 킬른의 본체는 길이가 5,500mm, 외경이 1,016mm이며 경사각은 5도이다. 킬른의 회전 속도는 가변제어장치를 이용하여 0.1~1.0rpm의 범위에서 조절된다. 킬른 내부로 장입된 쓰레기는 경사진 면을 따라 이동하며 연소용 공기는 재처리구 부분에서 유입되어 쓰레기의 이동방향과 반대로 흘러간다. 킬른에서 연소된 배기가스는 건조영역을 지나면서 일부의 미연소 가스와 함께 2차 연소실에서 재연소되며 이후 폐열보일러, 질탄기 그리고 고체입자를 이용한 공기예열기를 거쳐 유인 송풍기

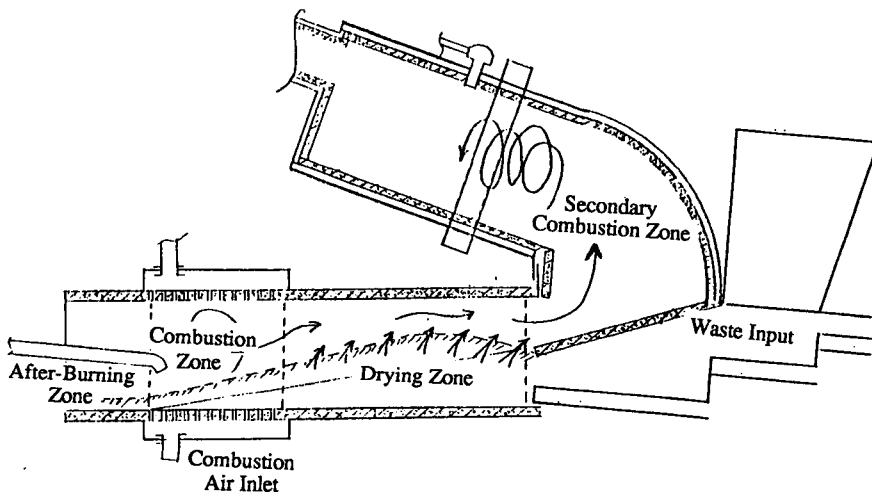


Fig. 1 Schematic diagram of KIER type incinerator

에 의하여 연도로 나가게 된다.

**3.2 실험 결과**

본 연구에서 사용한 쓰레기 86년도에 분석한 대전시의 쓰레기의 조성을 가지고 있다고 가정하였다<sup>(10)</sup>. 이 쓰레기의 조성에 나타난 가연물질의 성분은 종이 13.23%, 목재 0.1%, 비닐 4.21%, 섬유 1.35%, 플라스틱 2.04%, 음식 4.14% 그리고 기타 10.0%이며 이러한 가연물질의 각 성분에 대한 대표적인 화학조성을 구하였다<sup>(11)</sup>. 가연 성분중 기타로 구분된 것은 셀룰로스로 가정하였으며 이로부터 구한 가연성분의 화학조성을 도시 쓰레기의 조성과 함께 Tabel. 1에 나타내었다.

소각 실험에서 쓰레기의 장입량은 장입장치의 구동시간 간격을 43초 정도로 유지하여 조절하였다. 그리고 배기가스의 배출량은 최대 160m<sup>3</sup>/min이며 과잉공기비는 대략 1.6~1.8 정도이다. 소각 시스템의 각 위치에서의 시간에 따른 온도의 변화를 열전대를 사용하여 측정하였으며 이 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 측정 결과를 보면 킬른에서 배출되는 배기가스의 온도는 정상적인 가동상태에서 시간에 따른 온도 변화가 상당히 심하며 대략적인 온도 범위는 700~900℃ 정도이며 평균적으로 볼 때 약

**Table 1** Composition of municipal solid waste

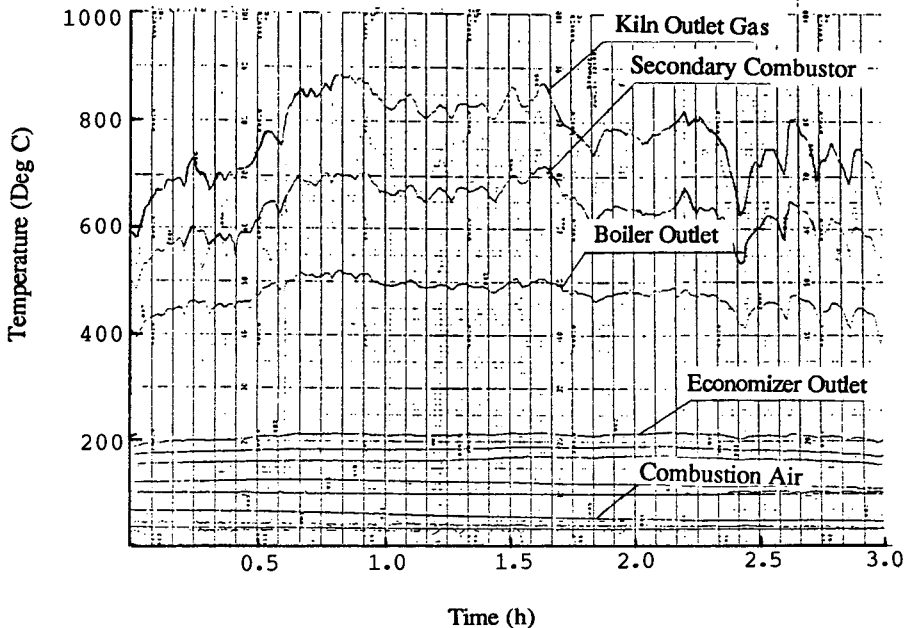
Water	49.65%
Combustable	
C	14.60%
H	2.46%
O	11.80%
S	0.02%
N	0.17%
H <sub>2</sub> O	4.03%
(Total)	33.08%
Non-combustable	17.27%
Lower calorific value	4456kJ/kg

800℃로 볼 수 있다. 소각로로 들어가는 연소용 열공기의 온도는 약 70℃ 정도이다.

**4. 소각로 온도분포 해석**

**4.1 로타리 킬른에서의 전열현상**

로타리 킬른 내부에서의 전열현상은 상당히 복잡하다. 이 현상을 세부적으로 구분하여 보면 다음과 같이 분류할 수 있다<sup>(3)</sup>.



**Fig. 2** Measured temperature of incinerator system

- (1) 배기가스로부터 고체 장입물로의 대류 및 복사전열
  - (2) 배기가스로부터 로벽으로의 대류 및 복사전열
  - (3) 회전하는 로벽으로의 대류 및 복사전열
  - (4) 로벽으로부터 고체 장입물표면 및 주위 로벽으로의 복사 전열
  - (5) 고체 장입물의 축방향으로의 전도 및 이동에 의한 전열
  - (6) 로벽으로의 열손실
- 이외에 도시 폐기물의 조각에 관련하여 다음의 현상이 추가된다고 볼 수 있다.
- (7) 쓰레기에서의 건조 및 열분해를 위한 열흡수
  - (8) 열분해 가스의 배기가스내 연소
  - (9) 쓰레기 표면에서의 연소
  - (10) 킬른 내부에 설치된 날개에 의한 전열 증대 효과

이러한 전열 현상을 모두 상세히 해석하는 것은 상당히 복잡하여 본 연구에서는 단순화하여 먼저 복사현상에 대하여는 킬른의 각 단면에서 배기가스로부터 고체장입물의 표면과 배기가스에 노출된 로벽으로의 복사만을 고려하였다. 그리고 킬른의 로벽의 원주방향의 열전도도를 무한하다고 가정하여 킬른의 각 단면에서의 로벽의 온도는 일정하다고 보았다. 고체 장입물과 로벽내의 축방향으로의 열전도는 무시하였으며 표면연소와 회전 날개에 의한 전열 증대효과로는 배기가스와 쓰레기의 대류전열량의 증대효과로 볼 수 있다고 가정하였다. 그리고 고체 장입물 내부에서의 열전도는 무한하여 킬른의 각 단면에서 일정한 온도를 유지한다고 가정하였다. 이 때의 수분의 증발과 열분해에 의한 고체 장입물의 온도에 따른 감량은 Fig. 3의 3가지의 경우

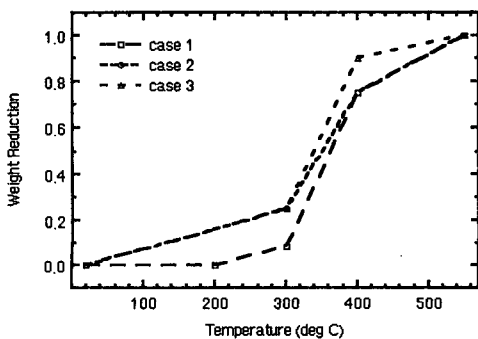


Fig. 3 Thermo-gravimetric characteristics of solid waste

를 가정하였다. 먼저 (1)의 경우는 TGA의 결과와 가장 유사한 경향을 나타내며 (2)의 경우는 조각로의 건조영역에서도 표면연소가 발생하여 이에 따라 저온 영역에서의 감량을 포함시킨 것이다. 그리고 (3)의 경우는 (2)의 경우와 후연소 부분이 다르며 이는 도시쓰레기중 고정탄소의 비율이 일반적으로 10% 전후인 것으로 나타나 이를 고려하여 수정한 것이다. 또한 도시 쓰레기의 가열에 의해 발생한 열분해가스는 배기가스측으로 배출되어 즉시 연소한다고 가정하였다.

#### 4.2 킬른내부에서의 대류 열전달

킬른 내부에서의 대류에 의한 열전달 현상을 고려하기 위해서는 4가지의 열전달계수가 필요하며 Silcox<sup>(5)</sup>은 이에 대하여 잘 요약하였다. 먼저 고체 장입물과 킬른의 로벽과의 접촉에 의한 열전달계수는 Tscheng and Watkinson<sup>(1)</sup>에 의하여 다음 식이 추천되었다.

$$\frac{h_{ws}l_w}{k_s} = 11.6 \left[ \frac{nr_{in}^2\beta}{\alpha} \right]^{0.3} \quad (1)$$

여기서  $l_w$ 는 고체 장입물에 의하여 덮여진 로벽의 원주 길이,  $n$ 은 킬른의 회전수[rps],  $r_{in}$ 은 킬른 내면의 반경  $\beta$ 는 고체 장입물이 차지하는 중심점으로부터의 각도[radian],  $\alpha$ 와  $k_s$ 는 각각 고체 장입물의 열확산률과 열전도도이다. Silox<sup>(5)</sup>의 경우와 같이 계산 결과에 큰 영향을 미치지 않으므로 본 연구에서는  $h_{ws}=100W/m^2K$ 의 일정한 값을 사용하였다<sup>(5)</sup>.

Gorog et al.<sup>(2)</sup>은 킬른의 배기가스와 로벽과의 대류 열전달계수에 대하여 다음의 식을 추천하였다.

$$h_{gw} = 0.036(k_g/D) Re^{0.8} Pr^{0.33} (D/L)^{0.055} \quad (2)$$

여기서  $k_g$ 는 가스의 열전도도,  $D$ 는 킬른의 내경 그리고  $L$ 은 킬른의 길이이다. 이 식은 킬른내의 유동이 난류인 경우에 사용하였다. 본 연구에서는  $h_{gw}=20W/m^2K$ 를 사용하였다<sup>(5)</sup>.

또한 가장 중요한 인자의 하나인 킬른의 배기가스와 고체 장입물과의 대류 열전달 계수에 대하여는 아직 잘 규명되어 있지 않으나 Gorog et al.<sup>(2)</sup>은 pilot scale의 실험 결과를 통하여 다음의 식을 추천하였다.

$$h_{gs} = 0.4(G_g)^{0.62}, [W/m^2K] \quad (3)$$

여기서  $G_g$ 는 킬른의 내부를 통과하는 배기가스의

질량유속이며 단위는  $[kg/m^2hr]$ 이다. Brimacombe and Watkinson<sup>(11)</sup>는 직화되는 로타리 킬른인 경우에  $120\sim 240W/m^2K$ 를 사용하였다. 본 연구에서는 킬른 내벽의 회전 날개와 도시 쓰레기 표면에서의 일부 직접연소에 의한 열전달의 증대 효과를 고려하기 위하여  $h_{gs}$ 의 값을 변화시키며 실험 결과와 비교하여 추정하였다.

킬른 외부에서의 열전달 계수는 수평형의 원통으로 간주하여 자연 대류에 의한 것으로 볼 수 있으며 본 연구에서는  $10.0W/m^2K$ 를 사용하였다<sup>(6)</sup>.

### 4.3 복사 열전달

킬른내부에서의 복사에 의한 열전달 현상을 단순화하기 위하여 킬른의 로벽과 장입물 그리고 배기가스를 회색체로 보았으며 배기가스에 포함된 이산화탄소와 수증기의 함유량을 계산하여 이로부터 배기가스의 방사율을 구하였다. 또한 로벽과 쓰레기의 방사율은 잘 알려져 있지 않으나 두 경우 모두 Silcox<sup>(6)</sup>가 제시한 값에 가까운 0.8로 가정하였다. 따라서 킬른 내부에서의 각 축방향의 위치에서의 배기가스로부터 고체장입물과 로벽으로의 복사 열량은 다음의 식으로부터 구하였다<sup>(12)</sup>.

$$q_r = \frac{\epsilon_w + 1}{2} A \sigma \left[ \epsilon_g (T_g)^4 - \alpha_g (T_w)^4 \right] \quad (5)$$

for  $\epsilon_w > 0.8$

여기서  $\epsilon_w$ 와  $\epsilon_g$ 는 각각 로벽과 배기가스의 방사율이며  $\alpha_g$ 는 배기가스의 흡수율이다. 그리고  $A$ 와  $\sigma$ 는 각각 로벽의 전열면적과 Stefan-Boltzmann 상수이다.

### 4.4 후연소영역에서의 연소

킬른의 연소영역을 지난 후 장입물중의 휘발성분은 열분해되어 연소되고 주로 고정탄소인 나머지 미연소분이 후연소영역에서 연소하게 된다. 이 경우의 연소는 배기가스의 온도가 낮고 산소성분이 풍부하기 때문에 주로 desorption에 의하여 연소속도가 결정된다고 볼 수 있으며 다음 식으로 나타낼 수 있다<sup>(6)</sup>.

$$t_0 = K [1/\exp(-E_2/RT)] d_0 \quad (6)$$

여기서  $t_0$ 는 연소시간[sec],  $K$ 와  $E_2$ 는 각각 화학상수와 활성화 에너지로 Tu et al.<sup>(14)</sup>에 의하면 탄소인 경우 각각  $7.38 \times 10^{-5}$  sec/cm와 40kcal/g-mole이다. 그리고  $d_0$ 는 연소 입자의 직경이며 단위는

[cm]이다. 본 연구에서는 실제 소각실험에서의 후연소영역의 길이가 약 1m정도로 관찰되어 이로부터 탄소주위의 온도를 1100K, 입자의 직경을 0.05 cm로 가정하여 연소시간을 327초로 잡아 계산하였다.

## 5. 열평형 방정식

로타리 킬른의 각 위치에서의 온도분포를 계산하기 위하여 축방향의 한 단면에서의 배기가스, 고체장입물 그리고 로면의 온도는 일정하다고 가정하였으며 킬른의 축방향으로 구간을 10등분하여 배기가스, 고체 장입물 그리고 로벽의 각 요소에 대하여 다음과 같은 열평형 방정식을 세웠다.

$$(m_g C_p g T_g)_o - (m_g C_p g T_g)_i = -q_{gs} - q_{gw} - q_{rs} - q_{rw} + q_{comb} + q_{cs} \quad (6)$$

$$(m_s C_p s T_s)_o - (m_s C_p s T_s)_i = q_{gs} - q_{ws} + q_{rs} - q_{pyr} - q_{dry} - q_{cs} \quad (7)$$

$$0 = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r k_w \frac{dT}{dr} \right) + q_{gw} - q_{ws} - q_{loss} \quad (8)$$

여기서  $q_{gs}$ 와  $q_{gw}$ 는 각 단면에서의 배기가스로부터 고체 장입물과 로벽으로 대류에 의하여 전열되는 열량이고  $q_{rs}$ 와  $q_{rw}$ 는 배기가스로부터 고체장입물과 로벽으로 전열되는 복사량이다.  $q_{comb}$ 는 장입물에서 열분해된 가스가 연소되어 생성되는 연소열이며  $q_{ws}$ 는 로벽으로부터 장입물로 접촉에 의하여 전열되는 열량이다.  $q_{pyr}$ 와  $q_{dry}$ 는 쓰레기가 열분해 또는 수분을 증발하면서 흡수하는 열량이며  $q_{loss}$ 는 킬른의 바깥면에서 대기로 방출되는 손실 열량이다. 그리고  $q_{cs}$ 는 쓰레기가 가열되면서 건조되거나 열분해하여 감량된 만큼 배기가스측으로 흡수되므로 이에 따른 물질전달에 의한 전열량으로  $q_{cs} = \Delta m_s C_p s T_s$ 로 볼 수 있다.

## 6. 실험 결과와의 비교

로타리 킬른 내에서 온도에 따른 도시 쓰레기의 감량에 대한 가정은 배기가스 및 쓰레기의 온도분포의 계산에 상당히 중요하다. 먼저 TGA의 조건과 다른 점은 쓰레기의 평균온도가 낮은 경우에도 표면연소의 가능성이 있다는 것이다. 따라서 Fig. 3의 3가지 경우를 가정하여 킬른내의 온도분포를 계산하였으며 이의 해석 결과는 Fig. 4에 나타내었

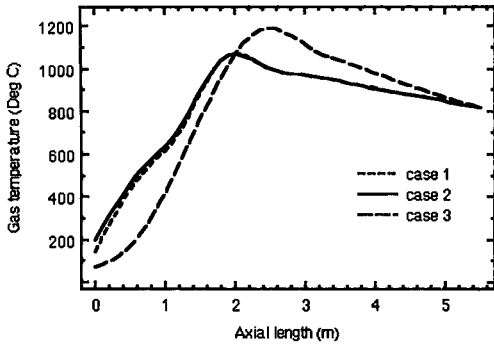


Fig. 4 Temperature distributions in 3 cases

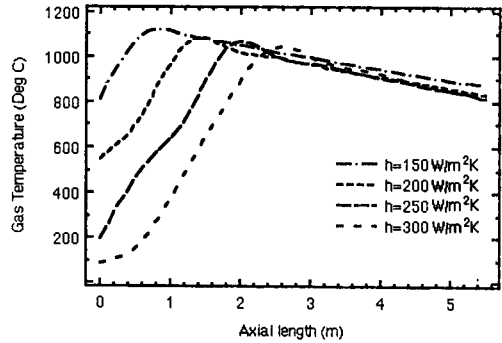


Fig. 5 Effect of gas-to-waste heat transfer coefficient on gas temperature distribution

다.

Fig. 4를 보면 (1)의 경우 연소위치에서의 배기 가스온도가 1200°C보다 높게 나타나며 킬른의 출구로 나가면서 온도의 저하가 현저하다. 그러나 배기 가스의 출구온도는 3가지 경우 모두 같다. 그리고 (2)와 (3)의 경우에는 온도 분포가 거의 비슷하게 나타나고 있다. 따라서 배기가스의 출구 온도로 각 경우를 비교하여 판단할 수 없으나 저온부의 건조 영역에서도 장입물의 표면에서 특히 종이류가 연소되는 현상이 실제 실험에서 관찰되어 (2)의 경우로 가정하는 것이 가장 타당한 것으로 판단되었다.

또한 킬른내의 배기가스로 부터 고체 장입물로의 전열은 대부분 대류에 의하여 대류 열전달 계수의 가정이 온도 분포에 상당한 영향을 끼치므로 대류 열전달 계수의 변화에 따른 온도 변화를 계산하였으며 이 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

식 (3)으로 부터의  $h_{gs}$ 의 계산치는 약  $200W/m^2K$ 이나 이 경우 공기 유입구에서의 온도가 예열공기의 온도인  $70^\circ C$ 보다 높게 약  $550^\circ C$ 로 나타나 장입물의 완전 소각을 위하여 실제 실험에서 거의 사용하지 않은 보조연소가 필요함을 나타낸다. 그리고 실험을 통하여 킬른 출구로부터 연소영역의 위치는 약 3.5m정도인 것으로 판단되어 본 연구에서는 대류 열전달 계수를  $250W/m^2K$ 인 것으로 추정하여 계산하였다. 이외의 다른 열전달 계수의 변화에 의한 온도 결과에 대한 영향은 크지 않았으며 따라서 일정하다고 가정하였다.

이와 같은 가정하에서 계산한 실제의 실험 조건에 대한 계산 결과로부터의 킬른내에서의 배기가스, 고체 장입물 그리고 로벽의 온도 분포는 Fig. 6과 같다.

이 그림으로부터 배기가스의 최고온도는  $1100^\circ C$

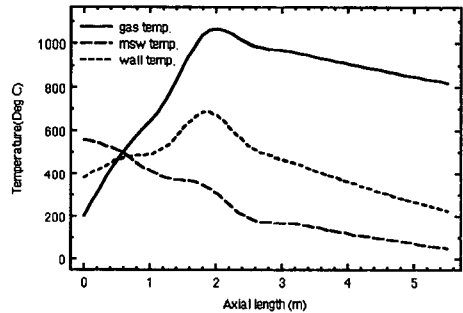


Fig. 6 Temperature distribution in experimental condition

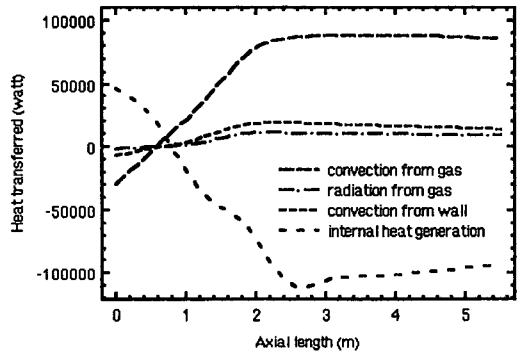


Fig. 7 Heat transfer rate of each heat transfer mechanism

이하이며 출구온도는 약  $800^\circ C$ 정도이고 또한 연소대의 위치도 쓰레기의 투입구로부터 약 3.5m 정도에 위치하여 실험 결과와 대략적으로 일치하는 것을 알 수 있다. 그리고 쓰레기의 출구온도는  $550^\circ C$  이상의 온도를 나타내어 거의 완전연소됨을 알 수 있으며 연소위치에 이르기까지 장입물의 온도가 거의  $200^\circ C$ 이하로 유지되어 건조됨을 알 수 있다. 노

벽의 온도도 700°C 이하로 유지되어 안전한 범위 내에서 운전됨을 나타내고 있다.

또한 실험 상태에서의 킬른 내에서의 전열현상에서 나타나는 각 현상의 영향을 알아보기 위하여 각 열전달 현상에 의하여 고체 장입물로 유입되는 열량의 크기를 Fig. 7에 나타내었다.

이 그림을 보면 배기가스로부터 고체 장입물로 대류에 의하여 전열되는 열량이 가장 크며 배기가스로부터의 복사와 로벽을 통한 대류에 의한 열전달량은 전체 열량의 20% 이하인 것을 알 수 있다. 또한 장입물의 온도가 증가하면서 발생하는 건조와 열분해 현상에 의한 고체 장입물 자체의 열량 흡수가 상당한 영향을 미치는 것으로 나타나 고체 장입물의 열적 특성이 상당히 중요한 인자임을 알 수 있다.

### 7. 계산에 의한 온도 예측

실험을 통하여 고체 장입물의 열감량 특성과 배기가스로부터 고체 장입물로의 열전달 계수를 250 W/m<sup>2</sup>K로 추정하였다. 이로부터 로타리 킬른을 이용한 도시 쓰레기 소각의 경우 각 운전 조건에 따른 킬른내의 온도분포의 변화를 예측할 수 있다. 본 연구에서 고려한 운전조건은 소각처리용량, 킬른의 회전수, 쓰레기의 발열량, 그리고 예열공기의 유량 및 예열온도이다. 먼저 실험조건에서 소각 처리용량만을 변화시켰을 경우의 배기가스 온도분포의 계산 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

이 그림으로부터 처리용량이 증가하면서 연소 위치가 배기가스 출구로부터 점차 멀어져 소각에 필

요한 건조영역과 연소영역의 길이가 줄어들게 되며 온도의 변화도 비교적 완만하여 진다. 50ton/day의 경우에는 완전 소각을 위한 보조 연소가 필요하게 된다. 그러나 각 경우의 배기가스의 최대온도와 출구에서의 온도는 비슷하게 나타나고 있다. 그리고 처리 용량이 일정한 경우 로타리 킬른의 회전수를 변화시켜 장입물의 유속을 변화시키는 경우에 대하여 계산하였으나 이로 인한 온도분포에 대한 영향은 거의 무시할 정도이었다.

도시 쓰레기의 발열량의 영향을 살펴 보기 위하여 쓰레기중 가연성분의 화학적 조성을 일정하게 놓고 가연성분의 전체 량에 대한 비율을 조절하였다. 발열량이 4190에서 6700kJ/kg까지 변화하는 경우에 대하여 계산한 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

이 그림으로부터 장입물의 발열량이 증가하면서 연소에 필요한 킬른의 길이가 줄어들며 배기가스의 출구온도가 높아짐을 알 수 있다. 그러나 각 발열량의 경우에서의 배기가스의 최대 온도는 비슷하게 나타난다.

다음으로는 예열공기의 과잉공기비에 의한 영향을 살펴 보았으며 이는 소각로에서의 온도 조절에 주로 사용되는 방법이다. 과잉공기비는 1.4에서 2.3까지 변화시켰으며 이 경우의 배기가스의 온도분포는 Fig. 10과 같다.

연소용 공기의 유량이 적은 경우에는 배기가스의 열용량이 감소하여 동일한 연소 열량에 대하여 온도의 증가와 현저하여 배기가스의 최대온도가 증가하며 또한 장입물의 가열로 인한 건조영역에서의 배기가스의 온도 감소도 크게 나타난다. 반면에 과잉 공기비가 증가하는 경우 배기가스의 온도가 낮

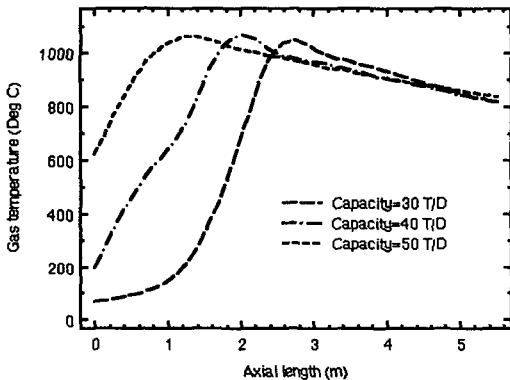


Fig. 8 Effect of incinerator capacity on gas temperature distribution

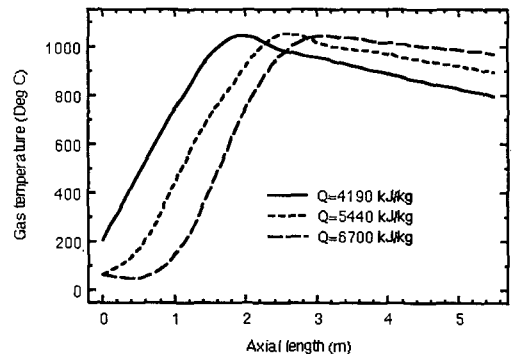


Fig. 9 Effect of small calorific small value on gas temperature distribution

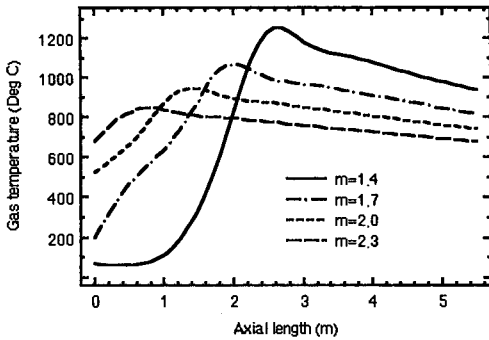


Fig. 10 Effect of air-fuel ratio on gas temperature distribution

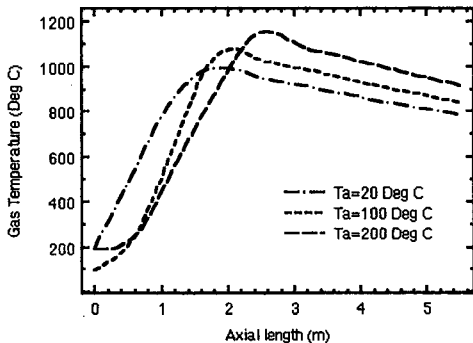


Fig. 11 Effect of combustion air temperature on gas temperature distribution

아지게 되고 장입물의 온도를 충분히 소각될 정도까지 높여 주지 못하여 보조 연소가 필요하게 된다. 그리고 공기비의 증가에 따라 연소 위치에서의 최대온도도 감소하게 되며 배기가스의 출구온도도 함께 감소하게 된다.

Fig. 11에 예열공기의 영향을 보기 위한 계산 결과를 나타내었다. 예열공기의 온도가 증가할수록 연소 위치가 배기가스 출구쪽으로 이동하며 배기가스의 최대 온도와 출구온도가 함께 증가하게 된다.

### 8. 결 론

본 연구를 통하여 로타리 킬른형 도시 쓰레기 소각로에서의 열전달 해석 방법을 개발하였으며 도시 쓰레기의 열감량 특성과 배기가스로부터 장입물로의 대류 열전달 계수의 변화가 킬른내의 각 부의 온도분포에 미치는 영향을 계산하여 이 계산 결과와 실험 결과를 비교하여 이들의 값을 추정하였다. 이로부터 실험조건에서 킬른 내부에서 발생하는 각

열전달 현상에 의한 전열량을 비교할 수 있었으며 각 부의 온도 분포를 알 수 있었다.

그리고 로타리 킬른 소각의 중요한 인자인 쓰레기 처리용량, 킬른의 회전속도, 쓰레기의 발열량, 그리고 예열공기의 과잉공기비 및 예열온도의 영향을 예측할 수 있었다. 이 결과 쓰레기 처리 용량과 킬른의 회전속도가 배기가스의 출구온도에 끼치는 영향은 적었으며 주로 쓰레기의 발열량, 예열 공기 온도 및 과잉공기비에 의하여 배기가스 출구온도가 변화됨을 알 수 있었다.

### 참고문헌

- (1) Tscheng, S.H. and Watkinson, A.P., 1979, "Convective Heat Transfer in a Rotary Kiln," The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol.57, pp.433~443.
- (2) Gorog, J.P., Adams, T.N. and Brimacombe, J.K., 1982, "Regenerative Heat Transfer in Rotary Kilns," Metallurgical Trans.B, Vol.13 B, pp.153~163.
- (3) Barr, P.V., Brimacombe, J.K. and Watkinson, A.P., 1989, "A Heat-Transfer Model for the Rotary Kiln : Part I. Pilot Kiln Trials," Metallurgical Trans. B, Vol.20B, pp.391~402.
- (4) Barr, P.V., Brimacombe, J.K. and Watkinson, A.P., 1989, "A Heat-Transfer Model for the Rotary Kiln: Part II. Development of the Cross-Section Model," Metallurgical Trans. B, Vol. 20B, pp.403~419.
- (5) Silcox, G.D. and Pershing, D.W., 1990, "The Effects of Rotary Kiln Operating Conditions and Design on Burden Heating Rates as Determined by a Mathematical Model of Rotary Kiln Heat Transfer," J.Air Waste Manage. Assoc. Vol.40, pp.337~344.
- (6) Howard, J.B., 1968, "Combustion of Solid Refuse," ASME Winter Annual Meeting and Energy System Exposition, New York, N.Y., pp. 85~97.
- (7) Monroe, Jr., E.S., 1972, "Combustion Fundamentals : An Engineering Approach to the Design of Industrial Incinerators," ASME winter Annual Meeting, pp.271~278.



- (8) 이광순 외, 1990, “도시 고품 폐기물 열분해공정 개발을 위한 기초연구: 1차년도 결과”, 서강대학교 화학공학과 보고서.
- (9) 박영재외, 1989, “도시폐기물 소각로 폐열회수장치 개발(Ⅱ)” 한국동력자원연구소 보고서.
- (10) 박영재외, 1987, “소형 단위 소각로 개발(Ⅱ)”, 한국동력자원연구소 보고서, KE-87-7.
- (11) Brimacombe, J.K. and Watkinson, A.P., 1978, “Heat Transfer in a Direct-Fired Rotary Kiln : I Pilot Plant and Experimentation,” *Met. Trans.B* Vol.9B, Vol.9B, p.201.
- (12) Holman, J.P., 1976, *Heat Transfer, International Student Edition.*
- (13) Tu, C.M., Davis, H. and Hottel, H.C., 1934 *Ind. Eng. Chem.*, Vol.26, p.749.