

로타리 킬른의 장입 특성이 온도분포에 미치는 영향

박종석* · 전철균**†

The Effect of Feeding Characteristics on the Temperature Distribution of Rotary Kiln

Jong-Seok Park, Chul-Kyun Chun

ABSTRACT

A theoretical model was developed for rotary kiln and computational study was conducted to find the effect of feeding characteristics. One dimensional model with the variations of heating distribution, length of heating zone, excess air ratio and revolution was considered. The comparison of parallel-flow rotary kiln with that of counter-flow was conducted. For parallel-flow type, it is found that the variation of temperature of solid is not great for the zone that is following flame-heating zone. This zone is good to take the special treatment because thermal deviation is small and contacting time is enough for another treatment. Increase of excess air ratio have the effect of decreasing solid temperature. But this effect of decreasing solid temperature goes small for the great excess air ratio. The heating is efficient for the flame which has the maximum heating at the central region of the full length.

Key Words : Parallel-flow, Counter-flow, Rotary kiln, Heating distribution, Excess air ratio

1. 서 론

로타리 킬른은 시멘트제조과정이나 제철과정의 석회석처리, 내화물 가공, 특수 소각 등 산업적 용도로 많이 쓰이고 있으나 열효율이 좋지 못해 에너지 소모가 크다는 단점이 있다. 따라서 최적인 운전을 통해 에너지 소비를 줄여야 할 필요가 크다. 그러나 로가 회전하고 있어 제어 인자들의 예측이 용이하지 않다. 따라서 로의 작동 상태를 적절히 표현해줄 수 있는 이론적 모델을 활용한 상태 인자 예측과 이에 근거한 운전조건 확립의 필요성이 크다.

이러한 필요성에 따라 로타리 킬른에 대한 이론적 모델을 개발하려는 노력이 연구자들에 의해 꾸준히 진행되어 왔다[1-16]. 이들 중에는 연료 사용량이 큰 시멘트 제조용 로타리 킬른에 대한

연구[7-9], 로타리 킬른을 이용한 소각 과정에 대한 연구[10-12], 제철 과정에 이용되는 로타리 킬른에 관한 연구[13-16] 등이 있다.

로타리 킬른은 연소에 의하여 고온가스를 형성시키고 이를 이용하여 경사면을 따라 회전하며 전진하는 장입고체를 가공한다. 이 때 열전달의 효율을 높이기 위해 보통 고온가스와 장입고체의 진행방향을 반대로 취하는 향류형 유동 형태를 취한다. 그런데 최근에는 로타리 킬른을 활성탄 제조 공정에 사용하기 위하여 고온가스와 장입고체가 동일방향으로 유동하는 병류형 로타리 킬른이 이용되고 있다. 이 같은 구조는 로 입구 부근에서 화염에 의해 재료를 탄화시키고 화염의 영향이 적은 로의 후부에서 수증기 등을 작용시켜 활성화시키기 위한 것이다. 이와 같은 로에 대해서는 관련 연구를 찾아보기가 어렵다. 따라서 이와 같은 병류형 로타리 킬른에 대한 이론적 모델을 개발하고 그 특성을 검토하고자 한다.

로타리 킬른에 대한 3차원적 CFD 모델을 검토한 연구[10] 등이 일부 있기는 하나 그 이용상

* 한국폴리텍 V 목포대학

** 목포대학교 기계선박해양공학부

† 연락처자. ckchun@mokpo.ac.kr

의 난점 때문에 조업에서의 효과적으로 사용되고 있지는 못하다. 이러한 3차원 모델 또한 부분적으로 고체상 해석 등에서 1차원적 부분 모델을 이용하는 해석을 하고 있다. 따라서 본 연구에서는 비교적 용이하게 조업에 이용할 수 있고 향후 3차원 CFD 모델에도 부분 모델로 적용될 수 있는 1차원적 모델을 개발하고자 한다.

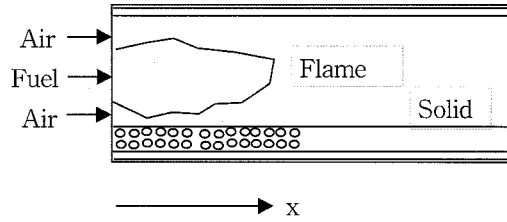
경제적인 조업을 위해서는 연료사용량을 줄일 수 있는 방안을 강구해야하며 가열에 적절한 온도분포를 확립해줄 수 있는 화염을 형성시키는 것이 중요하다. 이는 로에 형성되는 화염의 공기량 조절이나 선회류 조절 및 다단 연소 등을 통하여 조절 가능하다. 이와 관련하여 개발 모델을 이용하여 화염의 발열 특성을 변화시키고 이 때 나타나는 가공물의 가열 특성을 동시에 파악하고자 한다.

이상과 같이 본 연구는 병류형 로타리 킬른에 대한 이론적 모델을 개발하고 그 특성을 검토하는 것을 목표로 하고 있다. 아울러 개발 모델을 이용하여 화염의 발열 특성을 변화시키고 이 때 나타나는 가공물의 가열 특성 변화를 파악하여 조업에 필요한 자료를 제시하고자 한다.

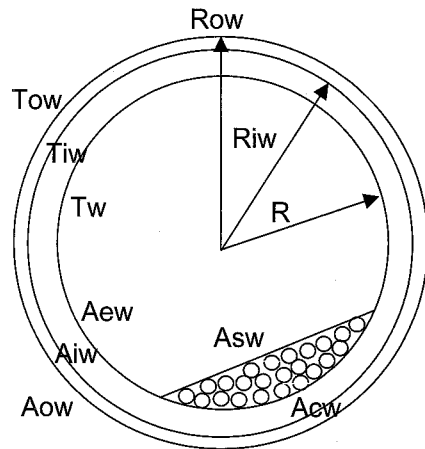
2. 이론 해석

2.1 로타리 킬른 모델

Fig.1은 해석하고자하는 로타리 킬른의 형상과 단면을 나타낸 것으로 킬른의 특성을 나타내는 여러 인자들이 표현되어 있다. Fig.1 (a)는 킬른의 종단면을 나타낸 것으로 공기 및 연료가 로 내로 투입되어 화염을 형성하고 그 하부에는 가공할 고체장입물이 층을 형성하고 있다. 공기 및 연료 투입 킬른 끝단을 x 축 원점으로 한다. 고체장입물은 향류형 로에서는 공기나 연료가 투입되지 않는 로의 반대편 끝단에서 투입되어 로의 회전에 따라 x축 원점을 향해 가스와 반대방향으로 전진한다. 반면 병류형 로에서는 공기나 연료와 함께 투입되어 로의 회전에 따라 x축을 따라 가스와 같은 방향으로 전진한다. Fig.1 (b)는 킬른의 횡단면을 나타낸 것이며 킬른 벽 구성 및 로벽과 장입물 간의 열전달을 적절히 나타내기 위한 면적요소들을 나타내고 있다. 킬른은 내벽과 외벽으로 구성되며 내벽 반지름은 R, 외벽 반지름은 Row, 두 벽의 경계 반지름은 Riw이다. 각 표면의 온도도 같은 방식으로 T, Tow, Tiw 로 칭한다. 각 표면의 면적은 마찬가지로 Aiw, Aow, Aew, Acw로 표기한다. 단, 내벽면은 가스와 접촉하고 있는 면을 Aew, 고체 장입물과 접촉하고 있는 면을 Acw라 한다. 또한 고체 장입물과 로내 가



(a) Longitudinal cross-section



(b) Lateral cross-section

Fig.1 Cross-sections of rotary kiln

스가 접촉하는 면적을 Asw라 한다.

이상의 로타리 킬른에 대하여 열분석을 수행하기 위한 방정식들을 유도하였다. 로는 일정한 속도로 계속 회전하며 이에 따라 고체 장입물은 늘 고루 뒤섞이며 가열되고 로벽 또한 온도의 편차가 적다고 보아 한 횡단면 안에서 온도분포는 각각 균일한 것으로 가정한다. 따라서 종방향의 열전달을 고려한 1차원 정상상태의 식들을 기체상과 고체상, 로 내벽, 로 외벽의 4부분에 대해 유도하였다. 고체상에 대해서는 병류인 경우와 향류인 경우에 대하여 각각 별도의 식이 적용되었다.

기체상에 대한 에너지 보존식

$$(\dot{m} C_p T)_{g,x} - (\dot{m} C_p T)_{g,x+\Delta x} + (\dot{Q}_c + \dot{Q}_R)_{g-ew} + (\dot{Q}_c + \dot{Q}_R)_{g-sw} + \dot{Q}_h = 0 \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{c,g-ew} = h_1 A_{ew} \Delta x (T_w - T_g) \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{R,g-ew} = \sigma A_{ew} \Delta x (\alpha_g T_w^4 - \epsilon_g T_g^4) \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{c,g-sw} = h_2 A_{sw} \Delta x (T_s - T_g) \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{R,g-sw} = \sigma A_{sw} \Delta x (\alpha_g T_s^4 - \epsilon_g T_g^4) \quad (5)$$

이상의 식에서 \dot{m} 은 질량 유량, C_p 는 정압비열, T 는 온도, \dot{Q} 은 열전달율, \dot{Q}_h 는 연소발열율, h_1 은 기체와 로벽면 A_{ew} 간의 대류열전달율, h_2 는 기체와 고체 표면 A_{sw} 간의 대류열전달율, σ 는 Stefan-Boltzman 상수, α 는 복사 흡수율, ϵ 은 복사 방사율을 의미한다. 하첨자 g 는 기체상, w 는 로벽, s 는 장입 고체, c 는 대류열전달, R 은 복사열전달, ew 는 벽면 A_{ew} , sw 는 장입고체 표면 A_{sw} 를 의미한다.

고체상에 대한 에너지 보존식

병류형 :

$$(\dot{m}C_pT)_{s,x} - (\dot{m}C_pT)_{s,x+\Delta x} - (\dot{Q}_c + \dot{Q}_R)_{g-sw} + Q_{c,s-cw} + Q_{R,s-ew} = 0 \quad (6)$$

향류형 :

$$-(\dot{m}C_pT)_{s,x} + (\dot{m}C_pT)_{s,x+\Delta x} - (\dot{Q}_c + \dot{Q}_R)_{g-sw} + Q_{c,s-cw} + Q_{R,s-ew} = 0 \quad (7)$$

$$\dot{Q}_{c,s-cw} = h_3 A_{cw} \Delta x (T_w - T_s) \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{R,s-ew} = A_{sw} \Delta x \frac{\sigma(T_w^4 - T_s^4)}{1/\epsilon_w + 1/\epsilon_s - 1} \quad (9)$$

이상의 식에서 h_3 는 장입 고체와 로면 A_{cw} 간의 대류열전달 계수이다. 하첨자 cw 는 로면 A_{cw} 를 의미한다.

로 내벽에서의 에너지 보존

$$-(\dot{Q}_c + \dot{Q}_R)_{g-ew} - Q_{c,s-cw} - Q_{R,s-ew} + Q_{w-iw} = 0 \quad (10)$$

$$Q_{w-iw} = \frac{(T_w - T_{iw})}{R_{th1}} \quad (11)$$

$$R_{th1} = \frac{\ln(R_{iw}/R)}{2\pi k_b \Delta x} \quad (12)$$

이상의 식에서 k_b 는 내벽 열전도계수, 하첨자 iw 는 내벽과 외벽의 경계면을 나타낸다.

로 외벽에서의 에너지 보존

$$(\dot{Q}_c + \dot{Q}_R)_{ow-a} = \frac{(T_{iw} - T_w)}{R_{th2}} \quad (13)$$

$$= \frac{(T_{ow} - T_{iw})}{R_{th2}} \quad (14)$$

$$\dot{Q}_{c,ow-a} = h_4 A_{ow} \Delta x (T_a - T_{ow}) \quad (14)$$

$$\dot{Q}_{c,s-cw} = \sigma \epsilon_w A_{ow} \Delta x (T_a^4 - T_{ow}^4) \quad (15)$$

$$R_{th2} = \frac{\ln(R_{ow}/R_{iw})}{2\pi k_s \Delta x} \quad (16)$$

이상에서 k_s 는 외벽의 열전도계수, 하첨자 a 는 대기, ow 는 로의 외표면을 의미한다. 또한 h_4 는 로의 외표면 A_{ow} 와 대기간의 대류열전달계수를 의미한다.

로에 장입하는 고체의 량이 정해지면 이에 따라 A_{sw} 및 A_{ew} 의 크기를 정해야하며 이를 위해서는 각 면적이 차지하는 중심각의 크기를 구해야한다. 이 과정은 다음과 같다. 장입고체의 질량 유량은 다음과 같다.

$$\dot{m}_s = (1-\nu)\rho_s A_s V_s \quad (17)$$

윗 식에서 ν 는 공극율이며 ρ_s 는 장입고체의 밀도, A_s 는 장입 고체가 횡단면에서 차지하는 면적, V_s 는 장입고체의 이동속도이다. 이동속도는 다음과 같이 구한다.

$$V_s = 0.1754 \cdot R_{iw} \cdot \omega \cdot S \quad (18)$$

윗 식에서 ω 는 rpm 이며 S 는 로타리 킬른의 경사도이다. A_s 는 다음과 같다.

$$A_s = \frac{R^2}{2} (\theta - \sin\theta) \quad (19)$$

여기서 θ 는 radian이다. A_s 와 V_s 에 관한 두 식을 질량유량에 관한 식에 대입하면 주어진 질량 유량과 회전속도, 경사도, 공극율, 밀도 값으로부터 장입고체 점유 중심각 θ 를 구할 수 있다. 이 중심각으로부터 A_{sw} 및 A_{ew} 를 구할 수 있다.

이상의 식을 사용하여 필요한 계산을 수행하기 위해서 열전달계수가 필요하다. 대류열전달계수는 로벽의 특성과 장입 고체의 특성에 따라 달라지며 석회석 소성로에 대한 문헌[16,17]으로부터 다음과 같이 취하였다. 식에서 V 는 속도를 의미하고 ρ 는 밀도, μ 는 점성을 의미한다.

$$h_1 = 0.029 \frac{k_g}{2R} \left(\frac{2V_g R \rho_g}{\mu_g} \right)^{0.8} \left(\frac{C_{pg} \mu_g}{k_g} \right)^{0.33} \quad (20)$$

$$h_2 = 0.058 \frac{k_g}{2R} \left(\frac{2V_g R \rho_g}{\mu_g} \right)^{0.8} \left(\frac{C_{pg} \mu_g}{k_g} \right)^{0.33} \quad (21)$$

$$h_3 = 0.145 \frac{k_g}{2R} \left(\frac{2V_g R \rho_g}{\mu_g} \right)^{0.8} \left(\frac{C_{pg} \mu_g}{k_g} \right)^{0.33} \quad (22)$$

$$h_4 = 0.11 \frac{k_a}{2R_{ow}} \left[\left(0.5 \left(\frac{4\pi R_{ow}^2 \rho_a \omega}{60\mu_a} \right)^2 \right) \right] \quad (23)$$

$$+ Gr) \left(\frac{C_{pa} \mu_a}{k_a} \right)^{0.35}$$

$$Gr = \frac{g \rho_a^2 (2R_{ow})^3 (T_{ow} - T_a)}{0.5 (T_{ow} + T_a) \mu_a^2} \quad (24)$$

이 밖에 복사량 계산에 필요한 흡수율과 방사율은 모두 0.75로 하였다. 계산을 위해서는 공급 공기, 연료, 장입고체들의 물성치와 로의 제원이 필요하다. 계산에는 석회석 소성로에 관한 문헌자료[13,18]를 적용하였다. 계산에 사용한 값들은 다음과 같다.

로의 길이는 48.36m, 로의 내경은 1.83m, 로의 외경은 2.04m, 내벽 두께 5.9cm, 로의 경사도 3/100으로 하고[13] 내 외벽의 열전도계수 및 장입물인 석회석의 비열은 다음과 같이 하였다[18].

$$k_s = 1.89 \text{ J/m.s.K} \quad (25)$$

$$k_b = 0.0201(1 + 0.000313T) \text{ J/m.s.K} \quad (26)$$

$$C_{ps} = 4.2(19.68 + 0.01189T - 307600/T^2) \text{ J/kg.K} \quad (27)$$

또한 석회석의 밀도는 1700kg/m^3 으로하고 공극율은 0.3으로 하였다. 로 내부기체의 물성치로는 공기의 값을 사용하였으며 연료는 COG로 하고 발열량은 22MJ/m^3 로 하였다.

이상과 같은 식들과 자료들을 토대로 로타리 킬른의 열분석을 위한 모델을 구성하고 계산을 수행하였다. 계산은 기체상 고체상 로벽 순으로 각각의 상에서 안정된 온도해를 얻을 때까지 반복계산하고 전 영역에서 안정된 수렴해를 얻을 때까지 전 과정을 반복하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 화염 가열 분포

계산 결과를 분석함에 있어 통상적으로 사용되는 향류형 로와 병류형 로를 비교하고 특성을 규명하고자 하였으며 공기비, 장입고체량, 공급공기 온도, 공급 고체 온도, 회전속도 변화 등이 로의 조업 특성에 미치는 영향을 검토하였다. 또한 화염의 구조가 변화 될 때 나타나는 장입물 가열특성의 변화를 파악하기 위하여 화염의 종방향 발열분포를 다음 그림과 같은 4가지 형태로 가정하여 동일 연료량에서 각각의 발열 분포에 따른 가열이 행해질 때 나타나는 조업 특성을 검토하였

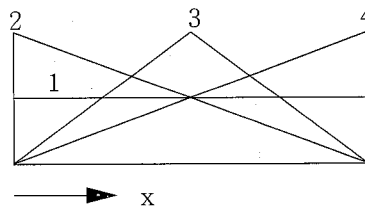


Fig.2 Distribution of heat release

다.

Fig.2는 화염의 발열분포 모델을 도시한 것이다. 화염 전 길이에 걸쳐 공급연료가 가진 발열량이 어떻게 방출될지 명확히 알 수 없으므로 이를 4가지 경우로 단순 전형화 시키고 이를 적용하기 위한 것이다. x=0에서 버너로부터 화염이 형성된다고 보고 화염의 형성 구간, 즉 화염길이를 가로로 표현하고 각 위치에서 방출되는 열량을 높이로 나타내었다. 그림에서 나타나는 분포1은 화염 존재영역 전체에 걸쳐 발열이 균일한 경우이며 이를 균일분포라 호칭한다. 분포2는 화염의 형성 초기, 즉, 버너 분출구 부근에서 집중적으로 발열이 이루어지고 이후 선형적으로 발열량이 감소하는 경우로서 전방집중분포라 부르기로 하였다. 분포3은 화염영역의 중간에서 집중적인 발열이 이루어지는 경우로써 중앙집중분포라 부르기로 한다. 분포4는 화염의 끝단에서 집중적인 발열이 이루어지는 경우로써 후방집중분포라 부르기로 한다.

3.2 향류형과 병류형의 비교

Fig.3은 공기비 1.05, 가열영역은 전체의 10%로 하고 이 영역 내에서 화염의 발열은 균일하다고 보며 장입고체량 11.377kg/s , 공급 공기 유량 $5.222\text{Nm}^3/\text{s}$, 공급 연료인 COG 유량 $1.11\text{Nm}^3/\text{s}$, 공급공기온도 600°C , 장입고체온도 500°C , 회전속

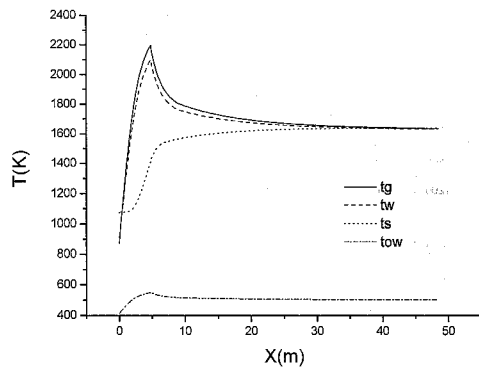


Fig.3 Temperature distributions for parallel-flow type

도 1.1rpm일 때 장입물과 기체 흐름의 방향이 동일한 병류형 로타리 킬른에 대하여 계산한 결과를 도시한 것이다. 그림에는 기체온도, 내벽온도, 장입고체온도, 외벽온도가 각각 나타나있다. 기체 및 장입고체가 로의 입구($x=0$ 인 지점)에서 동시에 투입되어 반대편 끝($x=48.36$)으로 배출되는 구조이다. 기체, 내벽, 고체 장입물 온도들은 모두 로의 입구로부터 화염가열영역을 진행하는 동안 급격한 온도 증가를 나타낸다. 이중 기체 및 내벽 온도는 화염가열영역 끝까지 증가를 계속하여 피크를 이룬 후 감소하고 있다. 기체 및 내벽 온도는 가열 영역을 벗어나면 급격 감소하지만 장입고체 온도는 급격 증가하던 경향에서 완만한 증가 경향으로 바뀌어 계속적으로 증가한다. 이는 기체 및 내벽 온도와 장입고체 온도와의 차이가 줄어들면서 가열량이 줄어들기 때문에 완만한 온도증가로 바뀌는 것으로 해석된다. 고체 온도 증가에 따라 온도차는 계속 적어지며 배출구에 가까워질수록 기체온도, 내벽온도, 장입고체온도는 큰 차이가 없는 상태로 됨이 나타난다. 장입고체의 최초온도와 배출온도를 비교해보면 로 입구의 가열영역 부근에서 최종 배출 온도에 가깝게 집중 가열이 이루어지고 나머지 로 길이의 50% 이상 영역에서 증가한 온도는 100도 미만인 것을 알 수 있다. 즉, 반 이상의 영역이 가열에 크게 기여하지 못하여 가열에 있어 효율적이지 못하다고 볼 수 있다. 하지만 열전달이 적은 로의 후반부 영역은 로 안에 온도변화가 적은 고체층을 긴 길이에 걸쳐 형성한다는 측면에서 의미를 찾을 수 있다. 즉, 특정 온도대를 유지하며 화학-물리적 변화를 피하거나 상당한 시간 동안 특정 물질과 접촉 가공이 필요한 경우 이 형식의 로는 적합한 기능을 제공해 줄 수 있다고 본다. 한편 외벽 온도는 전반적으로 값이 낮고 변화가 적은 온도분포를 보여준다. 온도 증가 및 감소하는 경향은 다른 온도분포들과 유사하다.

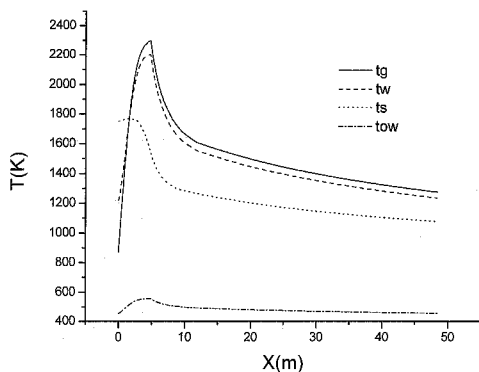


Fig.4 Temperature distributions for counter-flow type

Fig.4는 Fig.3과 유사한 조건에서 장입물과 기체 흐름의 방향이 서로 반대인 향류형 로타리 킬른에 대한 계산 결과를 도시한 것이다. 연료 및 공기가 로의 입구($x=0$)에서 투입되어 연소 후 반대편 끝으로 배출되고 고체 장입물은 로의 반대편 끝($x=48.36$)에서 장입된 후 로의 입구에서 배출된다. 역시 화염가열영역에서 기체 온도나 내벽온도가 크게 증가한다. 병류형 로의 후반부는 기체, 고체 모두 수평적 온도분포를 나타낸다. 하지만 향류형에서는 이 영역에서 로 끝으로부터 화염을 향하여 가며 지속적인 고체 온도 증가가 나타난다. 장입고체는 기체온도 피크 부근에서는 온도가 급격하게 증가하고 고체 배출점인 로 입구 부근에서는 다시 완만한 온도 감소 분포를 보이고 있다. 가열영역 외에는 고체와 기체 사이에 큰 온도차가 나타나지 않는 병류형과 비교하면 향류형은 기체와 장입고체 사이에 전 영역에 걸쳐 상당한 온도차가 유지되어 활발한 열전달이 이루어지는 것으로 파악된다. 외벽의 온도는 역시 가스 온도 분포와 유사한 형태를 보이고 있다. 병류형과 비교할 때 로 후반부의 온도가 비교적 낮다. 이는 로 후반부의 가스 및 고체 온도가 병류형보다 향류형에서 낮기 때문에 나타나는 현상으로 보인다.

Fig.4에서 장입 고체 온도 최고점은 기체온도 최고점과 이들과 일치하지 않고 보다 좌측에 나타나며 로 입구와 고체온도 최고점 사이에는 좁은 영역이지만 온도변화가 적은 영역이 나타난다. 이 같은 경향은 고체 장입물의 열용량 특성과 향류적 특성의 영향으로 보인다. 향류형에서 장입 고체는 그림의 우측에서 좌측으로 이동한다. 가열영역에 우측으로부터 접근하여 기체 최고온도로 가열된다 해도 막 가열이 시작된 고체는 한 순간에 최고온도에 도달할 수 없다. 장입 고체가 로 입구를 향해 좀 더 좌측으로 전진하면 접촉하는 기체 온도는 낮아지고 가열량도 적어지겠지만 아직도 양자 사이에는 큰 온도차가 존재하므로 가열은 계속된다. 따라서 우측으로부터 가열되어 전달된 고체가 기체 최고 온도 지대를 지나도 열량을 더 흡수하여 온도가 증가하고 결국 기체온도 최고점 좌측에 최고온대를 형성한다. 장입고체가 좀 더 좌측으로 전진하면 양자 사이의 온도차가 적어져서 고체 온도 증가가 현저히 줄어들고 기체온도가 고체 온도보다 낮아지는 상황이 된다. 이때는 오히려 고체가 기체를 가열하는 상황이 된다. 이 과정은 열획득과 열손실이 교차되는 과정으로 이에 따라 최고온점 좌우로 온도변화가 적은 분포가 나타나는 것으로 분석된다.

Fig.5는 Fig.3,4에 나타난 병류 및 향류 회전로

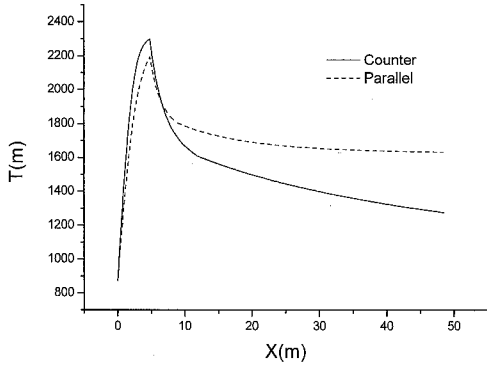


Fig.5 Gas temperature distributions for parallel and counter-flow type

기체온도 분포를 서로 비교 도시한 것이다. 가열 영역에서는 향류형 회전로 기체온도가 보다 높은 값을 유지하고 있으나 가열 영역 바깥에서는 병류 회전로 기체온도가 높은 것을 알 수 있다. 향류형에서는 가열영역에 접근하면서 가열되어 온도가 증가한 장입고체가 우측으로부터 가열영역에 투입되므로 가열역역의 기체온도가 높은 것으로 해석된다. 반면 병류형에서는 가열되지 않은 낮은 온도의 장입고체가 좌측 입구에서 바로 가열영역에 투입되므로 장입고체로의 열손실이 커서 가열영역 기체온도가 낮다. 가열영역 후반부에서 병류형의 기체온도가 높은 것은 로 끝으로 진행할수록 장입 고체 온도가 높아지며 양자의 온도차가 계속 작아짐에 따라 기체로부터의 열손실이 작기 때문으로 해석된다. 반면 향류형은 가열영역을 지난 기체가 로의 끝에서 막 투입된 가장 낮은 온도의 장입고체를 가열한다. 따라서 온도가 낮아도 양자 간에 큰 온도차가 유지되므로 상당한 열전달이 이루어지고 이에 따라 기체로부터의 열손실이 커져서 기체온도가 낮아지는 것으로 파악된다. 또한 로의 끝 기체 배출 온도는 병류형에 비해 향류형이 현저히 낮다. 이것은 향류형에서 로를 통과하는 동안 기체가 가진 열량이 보다 활발하게 전달되었음을 의미한다.

Fig.6은 Fig.3.4에 나타난 병류 및 향류 회전로 장입고체 온도 분포를 비교 도시한 것이다. 로의 입구로부터 로의 끝으로 가면서 병류형 회전로는 입구 가열영역에서 온도가 크게 증가한 뒤 그다지 큰 온도 증가를 보이지 않는 상태로 지속되다가 1600K 정도의 온도로 배출된다. 반면 향류형 회전로는 로의 끝에서 장입되어 가열영역을 향해 진행하며 꾸준한 온도 증가를 보이다가 가열영역에서 크게 온도가 증가되어 1750K 정도의 온도로 배출된다. 두 회전로의 장입고체 배출온도를 살펴보면 향류형의 경우가 현저히 높은 것을 알

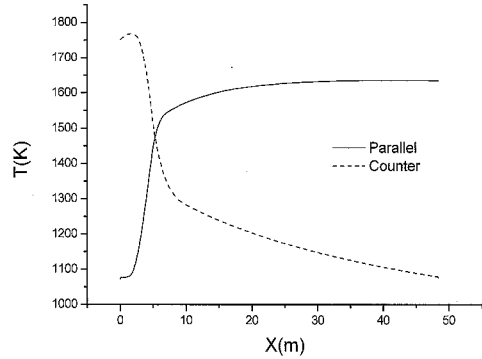


Fig.6 Solid temperature distributions for parallel and counter-flow type

수 있다. 이로부터 향류형의 열전달이 보다 효율적인 것을 알 수 있다.

반면 병류형은 가열대를 통과한 후 넓은 영역에 걸쳐 고온대를 형성하지만 향류형은 좁은 영역에 고온대가 형성되는 것을 알 수 있다.

3.3 조업 인자 변화의 영향

Fig.7은 Fig.3과 같은 조건에서 공기비만을 변화시켰을 때의 장입고체 온도 변화를 비교한 것이다. 공기비 증가에 따라 장입고체의 온도는 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 공기비 증가에 따른 기체 온도 변화의 영향이 나타난 것으로 해석된다. 공기비가 증가함에 따라 기체 온도는 감소한다. 이 같은 기체 온도 감소는 열전달을 감소시키는 효과를 가져 온다. 반면 공기량 증가에 따라 기체량이 증가하므로 기체 유속이 증가하며 이에 따라 열전달은 증가하는 효과가 나타날 수 있다. 공기비가 1.0일 때와 1.25일 때에 비하여 공기비 1.25와 1.5일 때의 장입고체 간 온도

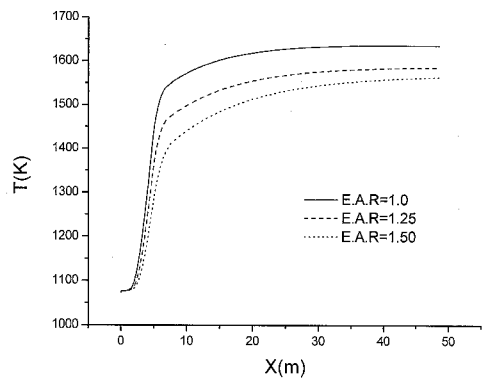


Fig.7 Effects of excess air ratio (E.A.R.) variation on solid temperature

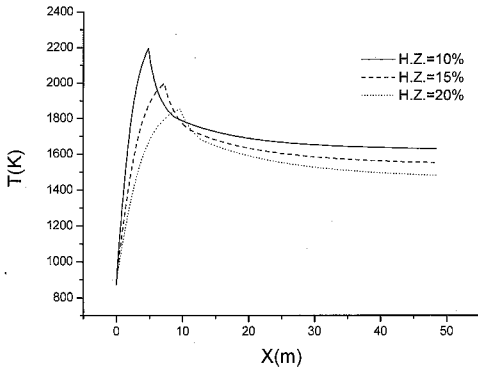


Fig.8 Effects of heating zone(H.Z.) variation on gas temperature

차이는 줄어들며 고체 배출 온도 차이 또한 공기비가 커질수록 줄어드는 것을 알 수 있다. 이상과 같이 공기비가 일정비율로 증가하는 것에 따라 장입고체 온도감소량이 비례적으로 커지지 않는다는 것이 나타난다. 이는 기체 온도 저하에 따른 열전달 감소 효과가 유속 증가에 따른 열전달 촉진 효과에 의하여 일정 부분 상쇄되고 있음을 나타내는 것으로 해석된다. 따라서 공기비가 증가하면 장입고체의 온도는 감소하지만 공기비 증가에 따른 온도 감소율은 점점 감소한다고 볼 수 있다.

Fig.8은 Fig.3과 같은 조건에서 화염가열영역의 크기만을 변화시킬 때 기체온도분포의 변화를 비교 도시한 것이다. 화염가열영역의 크기가 클수록 기체온도가 낮은 것을 알 수 있다. 이는 동일한 발열량이 보다 넓은 영역에 걸쳐 방출됨에 따라 가열되어야 할 단위 부피당의 가열량이 작아져서 기체온도가 감소하는 것으로 해석된다.

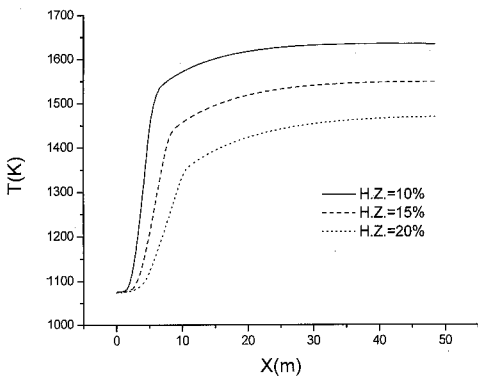


Fig.9 Effects of heating zone(H.Z.) variation on solid temperature

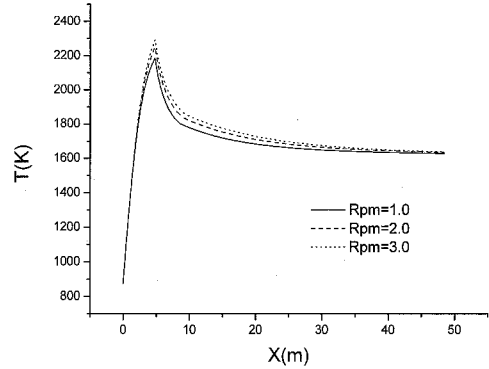


Fig.10 Effects of revolution speed(rpm) variation on gas temperature

Fig.9는 Fig.8과 동일한 경우의 장입고체 온도 분포를 비교 도시한 것이다. 화염가열영역의 크기가 증가할수록 장입고체 온도가 감소하는 것이 나타난다. 여기서 화염가열영역 10%와 15% 간 온도 차이와 15%와 20%간 온도 차이가 거의 동일함을 볼 수 있다. 고체의 배출온도 감소 경향도 유사하다. 이는 공기비 변화와는 다른 경향을 나타내는 것이다. 화염가열영역이 커진다 해도 투입 기체량은 동일하여 유속에 큰 차이가 없다. 따라서 공기비 증가에 따른 기체 유속이 증가로 열전달 촉진 효과를 나타낼 수 없기 때문에 나타나는 현상으로 분석된다.

Fig.10은 Fig.3과 동일한 계산조건에서 회전로의 회전속도만을 변화시켰을 때 나타나는 기체 온도분포를 비교한 것이다. Rpm 1.0, 2.0, 3.0은 각각 장입물 체류시간 84.0분, 42.5분, 27.8분에 해당한다. 회전속도가 클수록 기체온도가 높게 나타나지만 그 차이는 그리 크지 않다.

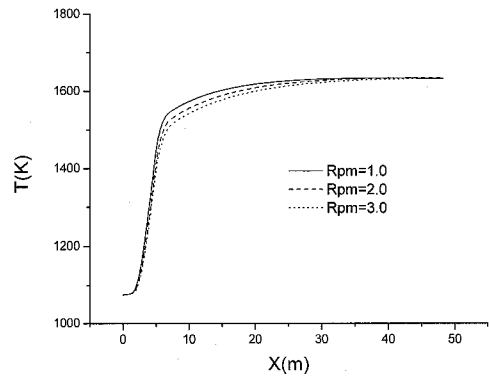


Fig.11 Effects of revolution speed(rpm) variation on solid temperature

장입고체의 질량 유량이 일정한 상태에서 회전수를 증가시키면 장입고체 진행속도가 증가하여 기체접촉시간이 감소하고 장입고체 흐름의 유동 단면적 및 기체접촉 면적이 감소한다. 따라서 접촉 면적의 감소로 인하여 열전달이 감소하고 기체로부터의 열손실이 줄어들어 기체의 온도는 회전수가 클수록 높게 나타난다. 그러나 그 영향은 그리 크지 않음을 알 수 있다.

Fig.11은 Fig.10과 동일한 경우에 대하여 장입고체의 온도 분포를 비교 도시한 것으로 회전수가 클수록 접촉시간 및 접촉면적 감소에 따라 장입고체의 온도가 낮게 나타난다. 그러나 그 차이는 크지 않으며 최종적인 장입고체 배출 온도는 거의 같게 나타난다. 실제 로타리 킬른의 장입물은 교반에 의하여 표면적이 증가한다. 그러나 본 계산에서 이런 변화는 고려하지 않았고 이에 따른 실제와의 차이가 있을 수 있다.

3.4 화염 가열 분포 변화의 영향

Fig.12는 Fig.3과 동일한 계산조건에서 화염의 가열형태만 5가지로 변화시켰을 때 나타난 기체 온도 분포를 비교 도시한 것이다. 후방집중 분포에서 기체온도 최고점 값이 가장 높게 나타나며 중앙집중, 전방집중 분포 순으로 낮아진다. 온도 최고점 위치는 후방집중, 중앙집중, 전방집중 순으로 입구에 가깝게 나타난다. 화염가열영역을 지난 후의 기체온도는 큰 차이가 나타나지 않는다. 하지만 균일분포는 화염가열영역 끝에서 온도 최고치를 나타낸 후 다른 분포에 비하여 가장 낮은 온도 값을 나타낸다. 기체 온도의 피크치가 상당히 높게 나타나는 것은 공급 공기온도가 600°C이므로 화염의 단열온도가 상승되며 특히 후방집중 분포는 기체온도가 높아진 발열영역 후반에 발열이 집중되기 때문에 나타나는 현상으로

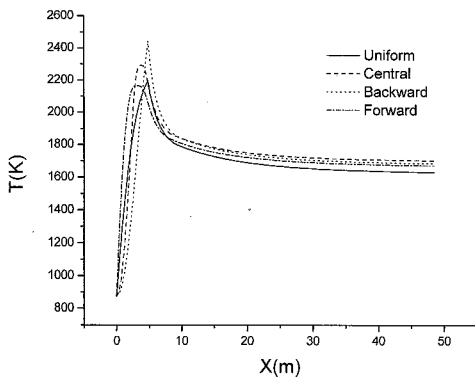


Fig.12 Effects of heating distribution variation on gas temperature

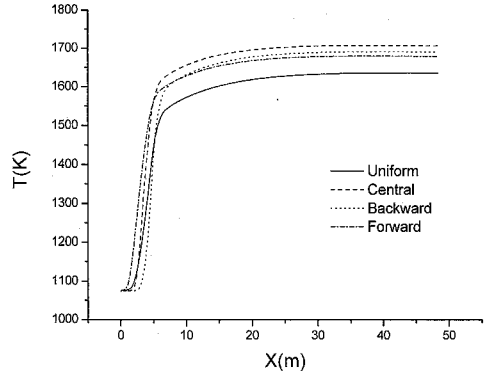


Fig.13 Effects of heating distribution variation on solid temperature

해석된다.

Fig.13은 Fig.12와 동일한 경우에 대하여 장입고체의 온도분포를 비교 도시한 것이다. 가열이 전방에 집중될수록 장입고체의 가열이 빠르게 나타난다. 그러나 전체적인 온도분포는 중앙집중형 가열에서 가장 높게 나타난다. 전방집중형이나 후방집중형은 가열집중점에서 큰 온도차로 가열된다 해도 그 외의 영역에서는 가열이 미미하여 전 영역에 걸쳐 효과적인 가열이 이루어지지 못하는 것으로 인해 나타나는 현상으로 파악된다. 그러나 중앙집중형 분포의 경우는 온도최고점 전후로 장입고체와 큰 온도차를 유지하는 고온대가 상대적으로 넓게 형성되어 가열에 효과적인 것으로 파악된다. 전방집중형은 낮은 온도의 장입고체를 로 입구에서 집중적으로 가열하여 온도를 증가시킨 뒤 후방으로 갈수록 가열능력이 줄어든다. 하지만 장입고체 온도는 입구 부근에서 크게 증가되어 있으므로 후방으로 갈수록 가열능력이 줄어든 기체와의 온도차는 작다. 따라서 이후의 가열이 원활치 못하다. 후방집중형은 낮은 온도의 장입고체가 가열영역에 도달할 때까지 효과적으로 가열하지 못하다가 가열영역 끝에서 집중 가열되지만 바로 가열영역을 벗어나게 되어 고온영역과의 열적 접촉시간이 짧아 가열에 효과적이지 못한 것으로 나타났다. 균일분포의 경우는 초기 가열도 느리게 진행되고 전 영역에 걸쳐 낮은 온도분포를 보여 온도 피크가 있는 집중적 화염 가열형태에 비하여 가열이 효과적이지 못한 것으로 나타났다. Fig.12에서 나타난 것과 같이 균일분포는 발열량이 분산되어 최고 온도가 높지 못하며 온도 최고점도 가열영역 끝에 위치하여 후방집중 분포와 유사한 열적 접촉시간 부족 현상이 나타나 가장 가열이 효과적이지 못한 것으로 분석된다.

4. 결 론

이상과 같이 병류형 회전로에 대해 열적 특성을 파악할 수 있는 이론적 모델을 수립하고 이의 특성을 파악하기 위한 계산을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

병류형 회전로는 장입고체의 온도 증가가 로 입구 부근에서 집중적으로 이루어지며 로 후방에서의 온도 변화는 크지 않다. 또한 병류형 회전로는 향류형 회전로에 비하여 장입고체의 가열이 효과적이지 못하다. 그러나 병류형 회전로는 로 후반부에서 온도 변화가 작은 고체층을 오래 유지할 수 있어서 부가적인 가공을 위한 접촉시간을 확보에 유리하다. 병류형 회전로에서 공기비의 증가는 장입고체의 온도를 낮추지만 그 효과는 공기비가 증가할수록 감소한다. 병류형 회전로에서 회전수 증가는 장입고체 온도에 큰 영향을 미치지 못한다. 화염에 의한 가열이 중앙집중형에 가까울수록 가열은 효과적으로 이루어진다.

후 기

이 연구는 목포대학교 기성회연구비의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] Allan Sass, "Simulation of the heat-transfer phenomena in a rotary kiln", I & EC Process Design and Development, Vol. 6, No. 4, 1967, pp. 532-535
 [2] M. Imber and V. Paschkis, "A new theory for a rotary-kiln heat exchanger", International Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 5, 1962, pp. 623-638
 [3] J.K. Brimacombe and A.P. Watkinson, "Heat Transfer in a Direct-Fired Rotary Kiln: I, Pilot Plant and Experimentation", Metallurgical Transactions B, Vol. 9B, 1978, pp. 201-208
 [4] A.P. Watkinson and J.K. Brimacombe, "Heat Transfer in a Direct-Fired Rotary Kiln: II, Heat Flow Results and their interpretation", Metallurgical Transactions B, Vol. 9B, 1978, pp. 209-219
 [5] P.V. Barr, J.K. Brimacombe and A.P. Watkinson, "A heat-transfer model for the rotary kiln: Part I. Pilot Kiln Trials", Metallurgical Transactions B, Vol. 20B, 1989, pp. 391-402
 [6] P.V. Barr, J.K. Brimacombe and A.P.

Watkinson, "A heat-transfer model for the rotary kiln: Part II. Development of the cross-section model", Metallurgical Transactions B, Vol. 20B, 1989, pp. 403-419

[7] Kaustubh S. Mujumdar, K.V. Ganesh, Sarita B. Kulkarni and Vivek V. Ranade, "Rotary Cement Kiln Simulator (RoCKS): Integrated modeling of pre-heater, calciner, kiln and clinker cooler", Chemical Engineering Science, Vol. 62, Issue 9, 2007, pp. 2590-2607
 [8] Tahsin Engin and Vedat Ari, "Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems--A case study", Energy Conversion and Management, Vol. 46, Issue 4, 2005, pp. 551-562.
 [9] Ling Yun Hou, Wei Biao Fu and Yong Jun Zhang, "A theoretical analysis on combustion intensification for blended coal in rotary cement kiln", Fuel, Vol. 80, Issue 11, 2001, pp. 1645-1650.
 [10] F. Marias, "A model of a rotary kiln incinerator including processes occurring within the solid and the gaseous phases", Computers & Chemical Engineering, Vol. 27, Issue 6, 2003, pp. 813-825.
 [11] 박상일, 박영재, "로타리 킬른형 도시 쓰레기 소각로의 전열해석", 대한기계학회논문집 제 15권 제6호, 1991, pp. 2100-2108
 [12] M. Rovaglio, D. Manca and G. Biardi, "Dynamic modeling of waste incineration plants with rotary kilns: comparisons between experimental and simulation data", Chemical Engineering Science, Vol. 53, Issue 15, 1998, pp. 2727-2742.
 [13] 이만승, "석회소성 회전로에 대한 수학적 모델", 대한금속학회지, 제35권 제12호, 1997, pp. 1724-1733
 [14] A.P. Watkinson and J.K. Brimacombe, "Limestone calcination in a rotary kiln", Metallurgical Transactions B, Vol. 13B, 1982, pp. 369-378
 [15] X.X. Xiao, M. Kuwabara and I. Muchi, "Mathematical Modelling for process of direct reduction of iron ore by rotary kiln", Tetsu-to-Hagane, Vol. 72, No. 3, 1986, pp. 34-41
 [16] V. Venkateswaran and J.K. Brimacombe, "Mathematical Model of the SL/RN Direct reduction process", Metallurgical Transactions B, Vol. 8B, 1977 pp. 387-398
 [17] O.Kubaschewski and C.B.Alcock, "Metallurgical thermochemistry", Pergamon Press, 1979
 [18] R.H. Perry and D. Green, "Perry's chemical engineers handbook", McGRAW-HILL International Editions, 1984