

正常狀態에서 시멘트回轉爐의 모델링

崔 昌 均

〈서울대학교 教授〉

본 연구는 정상상태에서 조업중인 시멘트 회전로를 수치모사 방법에 의거 이론적으로 해석한 것이다. 회전로에서 열전달, 화학반응, 화염의 특성을 고려하여 기체, 고형물, 벽면의 온도 분포와 반응물의 조성변화를 예측한 결과, 합리적인 결과들을 얻었다. 본 연구결과를 회전로의 조업특성을 좌우하는 인자들을 파악하는데 일차적인 도움이 될 것이다.

1. 서 론

시멘트 전체공정에서 가장 중요한 회전로는, 에너지를 많이 소모하는 열교환을 수반한 반응장치이다. 이에 대한 체계적인 연구는, 1938년 Gygi¹⁾에 의하여 시작된 이래 Lyons²⁾, Sass³⁾, Spang⁴⁾ 등에 의하여 수학적인 모델링 및 전산모사가 시도되어 왔다. 이들은 주로 습식공정 회전로를 그 주요대상으로 삼았다.

최근 에너지 절감을 목표로 시멘트 회전로에 대한 최적화를 위한 열전달 상관식들이 Frisch와 Jeschar⁵⁾에 의하여 검토된 바 있다. 나아가서 Kim과 Lee⁶⁾ 등은 건식 회전로에 대한 Spang⁴⁾의 모델식을 근거로 최적제어를 조사하여 현장조업 데이터와 비교한 바 있다.

본 연구에서는 회전로의 동특성을 조사하는데 기초가 되는 정상상태의 회전로에 대한 보다 엄밀한 특성을 조사하는데 그 목적을 두고 있다. 따라서 미분탄을 연료로 사용하고 있는 동양시멘트주식회사 삼척공장 제3호 건식회전로의 제원을 중심으로 회전로와 관련된 온도분포, 또한 반응물의 조성분포를 전산모사하여 보았다. 나아

가서 회전로 조업에 주요 변수로 작용하고 있는 화염길이의 영향, 미분탄의 주입량 및 회전로의 회전속도에 따른 온도변화 등을 조사하여 보았다.

2. 회전로의 모델링

2-1. 회전로의 개요

회전로는 Fig. 1에 보이는 바와 같이 수평면에 대하여 ϕ 의 각도를 가지고 경사를 이룬 상태에서 예열기로부터 공급되는 고형물과 석탄 연소기체 및 냉각용 공기가 가열되면서 서로 향류를 이루게 된다. $X=0$ 에서, 즉 예열기로부터 유입되는 고형물의 온도는 보통 $800\sim 850^\circ\text{C}$ 이며, X 의 증가에 따라 온도가 증가하며 반응을 일으키게 된다. 화염부근에서 고형물의 최고온도는 약 $1,450^\circ\text{C}$ 이고 회전로의 반응물 출구에서의 기체온도는 900°C 정도인 것으로 알려져 있다.

고형물은 회전로의 회전에 의하여 유동특성은 복잡하다. 그러나 본 연구에서는 문제의 단순화를 위하여 고형물은 Fig. 2에 보이는 바와 같

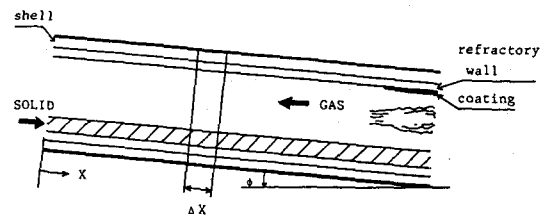


Fig. 1. Simplified Diagram of Rotary Kiln

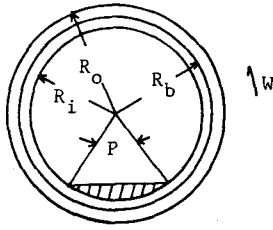


Fig. 2. Cross-section of Rotary Kiln

이 일정한 형태로 이동하고 있다는 일반적인 가정을 도입하였다. 본 연구에서는 고체의 속도를 다음과 같은 Khodorov⁷⁾의 식을 사용하여 구하였다.

$$V_s = \frac{20 W R_i \phi}{\Delta (P + 24)} \dots\dots\dots (1)$$

여기에서 W는 회전속도(rph), ϕ 는 회전로의 경사도(degree), R_i 는 내경(m), P는 Fig. 2에 나와 있는 "pouring angle"(degree)을 나타낸다. 화염부근에서는 심한 발열반응과 함께 잠정적인 액상이 형성되고 이로 인하여 고형물의 속도도 증가하게 된다. 따라서 일단 상변화가 발생되면 속도는 2.5배 증가된다고 가정하였다. 위의 식에 나와 있는 계수는 회전로 특성에 따라 결정되어야 하므로, 본 연구에서는 $\Delta = 3$ 으로 고정하였다.

위의 식을 본 연구의 대상인 제3호로의 정상 조업 조건에 대입한 결과 고형물의 체류시간은 52분인 것으로 나타났다. 이와 같은 물리적인 조업특성외에 고형물의 온도분포는 중요하다. 실제 주어진 X에 대하여 온도분포는 일정하지 않겠지만 Pasckis와 Jmber⁸⁾의 완전혼합 모델을 적용하여 반응물 내부에 온도구배가 존재하지 않는다고 가정하였다. 또한 조성도 일정할 것으로 가정하여 모델식을 설정하였다. 전열현상, 화학반응, 그리고 화염특성들을 살펴보면 다음과 같다.

2-2. 전열현상

반응에 따른 물질전달을 무시하고 벽면을 다른 열전도를 고려하지 않고 일차원적인 온도변

화를 가정하여 에너지식을 유도하면 다음과 같은 지배방정식들이 설정된다.

$$-\dot{M}_g C_{Pg} \frac{dT_g}{dx} = \beta_1(T_s - T_g) + \beta_2(T_w - T_g) + Q_t \dots\dots\dots (2)$$

$$\dot{M}_s C_{Ps} \frac{dT_s}{dx} = \beta_1(T_g - T_s) + \beta_3(T_w - T_s) + Q_d + Q_r \dots\dots\dots (3)$$

$$\beta_2(T_g - T_w) = \beta_3(T_w - T_s) + Q_d + Q_l \dots\dots (4)$$

여기에서 T는 온도, C_p 는 비열(Kcal/Kg-°C), \dot{M} 은 물질유량(Kg/hr)을 나타낸다. 하첨자 g, s, w는 각각 기체, 고체, 벽을 나타내고, Q_t , Q_d , Q_r , Q_l 은 각각 화염에서 발생열량, 고체와 벽면간의 열전달량, 반응열량, 대기로 방출되는 열손실량을 뜻한다.

위의 식에서 β_1 , β_2 , β_3 는 각각 기체와 고체, 기체와 벽면, 그리고 벽과 고체간의 열전달을 나타내는 계수로서 접촉면적(A_{ij})과 열전달계수(h_{ij})의 곱이다. 이들은 다음과 같이 주어진다.^{3),4)}

$$\beta_1 = A_{sg} \left\{ h_{sg} + (1 - F_0) F_1 \frac{(\epsilon_s T_s^4 - \epsilon_g T_g^4)}{(T_s - T_g)} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

$$\beta_2 = A_{wg} \left\{ h_{wg} + F_2 \frac{(\epsilon_w T_w^4 - \epsilon_g T_g^4)}{(T_w - T_g)} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

$$\beta_3 = A_{ws} \left\{ 1 + \frac{2h_0 \sin(P/2)}{A_{wg}} \right\} F_3 \frac{(\epsilon_w T_w^4 - \epsilon_s T_s^4)}{(T_w - T_s)} \dots\dots\dots (7)$$

여기에서 ϵ_i 는 i 에 대한 복사율(emissivity), F_0 는 기체에 흡수되지 않는 복사분율, F_1 , F_2 , F_3 는 해당되는 "view factor"를 나타낸다. 본 연구에서는 F_0 를 0.1로 고정하였다.

복사율 중 기체의 복사율 ϵ_g 가 온도에 가장 민감하기 때문에 Jenkins와 Moles⁹⁾가 사용한 "one-clear two-grey" 기체 근사법을 사용하여 예측하였다. 여기에서 "one-clear"는 복사에 관여하지 않는 기체성분, 그리고 "two-grey"는 복사에 관여하는 CO₂와 H₂O를 나타내며 관계식

은 아래와 같이 주어진다.

$$\epsilon_g = \sum_{i=0}^2 a_{gi} \{1 - \exp(-b_i P_b L_b)\} \dots\dots\dots(8)$$

$$\sum_{i=0}^2 a_{gi} = 1 \dots\dots\dots(9)$$

여기에서 P_b 는 압력, L_b 는 평균 beam 길이를 나타낸다. 해당되는 계수들은 Table 1에 주어져 있다.

기체와 고체, 기체와 벽면간의 열전달 계수들 h_{gs} 와 h_{ws} 는 기체의 유량, 회전속도의 영향을 받는다. 본 연구에서는 Tscheng과 Wakinson¹⁰⁾이 구한 다음 실험식들을 이용하였다.

$$h_{gs} = 20 \dot{M}_g^{0.575} W^{0.091} f_m^{-0.171} \dots\dots\dots(10)$$

$$h_{ws} = 4.1 \dot{M}_g^{0.475} f_m^{-0.297} \dots\dots\dots(11)$$

여기에서 \dot{M}_g 는 kg/hr의 단위, h_{gs} , h_{ws} 는 W/m-k의 단위를 갖는다. f_m 은 전면적 중 고형물이 차지하는 면적분율이다.

고체와 내벽면간의 열전달량은 아래와 같이 나타낼 수 있다.^{11), 12)}

$$Q_d = A_{ws} h_{ws} (T_w - T_s) \dots\dots\dots(12)$$

$$h_{ws} = \frac{0.884(\rho_s \rho_w C_{ps} C_{pw} k_s k_w)^{1/2}}{\theta_{ws}^{1/2} \{(\rho_s C_{ps} k_s)^{1/2} + (\rho_w C_{pw} k_w)^{1/2}\}} \dots\dots(13)$$

여기에서 ρ 는 밀도(kg/m³), k 는 열전도도(Kcal/m-k-hr)를 나타낸다. θ_{ws} 는 회전로의 회전에 따른 고체와 벽면간의 접촉시간으로 다음과 같다.

$$\theta_{ws} = \frac{A_{ws}}{W(A_{ws} + A_{wg})} \dots\dots\dots(14)$$

Table 1. Absorption Coefficient and Weighting Factor

i	b_i (m-atms)	a_{gi}
0	0.0	$1.002940 - 735.29 T^*$
1	0.7858	$0.011250 + 562.50 T$
2	13.65	$-0.001877 + 182.93 T$

* T in degree K

따라서, ($A_{ws} + A_{wg}$)는 회전로의 내부 표면적 전체를 뜻한다.

회전로 표면에서 대기로 방출되는 열손실량은 아래 식들로부터 예측된다.⁴⁾

$$Q_1 = \frac{2\pi \Delta L (T_w - T_{sh})}{\frac{1_n(R_b/R_i)}{k_w} + \frac{1_n(R_i/R_c)}{k_c} + \frac{1_n(R_o/R_b)}{k_{sh}}} \dots\dots\dots(15)$$

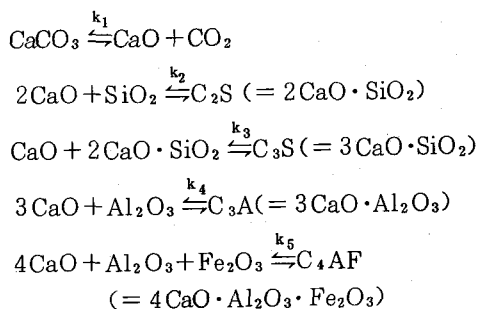
$$Q_1 = 2\pi R_o \Delta L \{ \epsilon_{sh} (T_{sh}^4 - T_a^4) + 0.27 (T_{sh} - T_a)^{5/4} \} \dots\dots\dots(16)$$

위의 식에서 ΔL 은 단위길이, 하첨자 sh는 회전로 겉표면, c는 코팅, a는 대기를 나타낸다. R_c 는 중심에서 코팅표면까지의 거리를 나타내고, 기타 반경들은 Fig. 2에 설명되어 있다. 정상상태에서는 위의 두 식들이 같으므로 쉽게 T_{sh} 를 구할 수 있다.

2-3. 화학반응

시멘트 원료는 예열기를 통과하는 과정에서 대부분 탈수되는 동시에 50~60% 정도의 소성반응이 이루어진다. 회전로에 유입된 후에도 계속하여 소성반응이 일어나며 화염 부근에서 시멘트 주구성분들이 형성된다.

고형물들에서 일어나는 주반응은 다음과 같다.



위의 반응들 중 C_3S 형성반응만이 발열반응이다. 본 연구에서는 위의 반응들이 기초반응들이라고 가정하고 Arrhenius 형태의 반응속도 상수를 사용하였다. 물질수지식들을 세우면 9개의 주요성분들에 대하여 아래와 같은 형태의 조성식들을 설정할 수 있다.

Table 2. Frequency Factor and Activation Energy for Rate Constants

rate constant		Lyons et al. ²⁾	Spang ⁴⁾	Kim et al. ⁶⁾	Present study
k ₁	F. F.*	1.393 E 27	1.64 E 35	6.00 E 36	4.00 E 32
	A. E.**	1.450 E 05	1.36 E 04	1.93 E 05	1.65 E 05
k ₂	F. F.	5.245 E 22	1.48 E 09	5.28 E 17	1.15 E 18
	A. E.	4.58 E 04	4.61 E 04	1.03 E 05	1.10 E 05
k ₃	F. F.	2.78 E 07	4.80 E 08	1.20 E 03	1.82 E 07
	A. E.	6.12 E 04	6.11 E 04	9.00 E 04	4.47 E 04
k ₄	F. F.	-	3.00 E 10	4.00 E 19	4.00 E 19
	A. E.	-	4.62 E 04	1.11 E 05	1.25 E 05
k ₅	F. F.	-	3.00 E 12	4.20 E 25	4.20 E 25
	A. E.	-	4.41 E 04	1.33 E 05	1.45 E 05

* F. F. (Frequency Factor) = 1/hr

** A. E. (Activation Energy) = Kcal/Kg - mol

$$V_s \frac{dC_i}{dx} = \frac{M_i}{M_{CaO}} r_i \dots\dots\dots(17)$$

위에서 C_i는 i 성분의 농도(Table 3 참조), r_i는 i 성분의 반응속도식이다. r_i에 사용되는 속도상수와 관련된 빈도인자와 활성화에너지 값들은 시행오차법으로 Table 2와 같이 결정하였다. 표에 기존 이론들에서 사용된 값들이 참고로 수록되어 있다.

2-4. 석탄연소에 의한 화염

화염에 대하여는 많은 연구가 진행되고 있다. Spang⁴⁾의 경우에도 관련된 모델이 제시되어 있지만, 보다 편리한 Frish와 Jeschar⁵⁾의 경험식을 본 연구에서는 사용하였다. 이들의 식은,

$$Y_X' = 1 - \exp(-aX') \dots\dots\dots(18)$$

$$a = -\ln(1 - Y_f) / L_f \dots\dots\dots(19)$$

이다. X'는 연소기로부터의 거리, Y_{X'}는 X'에서의 연소율, L_f는 화염길이, 그리고 Y_f는 L_f에서의 연소율이다. 본 연구에서는 Y_f = 0.999로 고정하여 사용하였다.

2-5. 계산방법

앞에서 유도된 모든 식들을 근거로, Runge-

Kutta-Gill 적분방법을 사용하여 정상상태에서 회전로 길이에 따른 온도와 반응물의 조성분포를 구하였다. 본 목적을 위하여 길이는 회전로 전체길이(L)로, 조성은 중량 분율로 무차원화시켰다. 필요한 유입자료들은 동양시멘트주식회사 삼척공장 제3호 소성로의 규격과 조업자료들을 근거로 하였다. 또한 냉각기쪽(X=L) 기

Table 3. Boundary Conditions of Temperature and Inlet Conditions of Composition Used for Simulation.

x (=X/L)	0.0	1.0
T _g	-	900.0
T _s	830.0	-
C _{CaO} *	0.62	
C _{CaCO₃}	0.6786	
C _{C₂S}	0.0	
C _{C₃S}	0.0	
C _{C₃A}	0.0	
C _{C₄AF}	0.0	
C _{Fe₂O₃}	0.0507	
C _{Al₂O₃}	0.0925	
C _{SiO₂}	0.3302	

* Temperatures in °C and Compositions in Kg - Ci / Kg - CaO.

체온도를 기준점으로 정하여 슈팅방법에 의거 필요한 값들을 결정하였다. 이는 회전로내의 최고 온도를 기준으로 설정한 기존 모델링과의 근본적인 차이점이다. 사용된 온도의 경계조건, 또한 조성의 유입조건은 Table 3에 수록되어 있다. 전산기 프로그램을 비롯한 세부적인 과정은 별도의 보고서¹³⁾로 작성되어 있다.

3. 결과 및 검토

본 연구에서는 회전로의 길이 63 m, 화염길이 12.5 m, 회전속도 210 rph, 석탄연소량 7,800 kg/hr, "pouring angle" 90°인 조업조건을 표준으로 정하고 이를 중심으로 회전로에 대한 이론적인 검토를 하였다. 편의상 $x(=\frac{X}{L})$ 가 0.7 이상에 외경의 4.8%에 해당되는 코팅이 생성되어 있고 이곳으로부터는 고형물의 이동속도가 이 지점전보다 2.5배 빠르다고 가정하였다. 본 회전로의 제원은 $R_o=4.14$ m, $R_b=3.94$ m, $R_i=3.74$ m로 정하였다. 이때 고형물의 유입온도는

830 °C, 공기의 유입온도는 900 °C로 정하고, 표준조건은 물론 화염길이, 석탄연소량, 회전속도 그리고 "pouring angle"의 값들을 개별적으로 변화시켜 이러한 인자들이 온도 및 조성의 분포에 미치는 영향을 살펴 보았다.

화염길이에 따른 온도분포의 변화를 살펴보면 Fig. 3과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 기체와 벽면의 온도는, $x < 0.5$ 에서 고형물의 온도에 비하여 높은 구배로 증가를 하게 된다. 표준상태의 경우, 기체는 $x=0.86$ 에서 최고온도 1,656 °C를 보이게 된다. 화염길이를 표준상태인 12.5 m로부터 15.0 m로 증가시켰을 때는 $x=6.84$ 에서 최고온도 1,652 °C, 10.0 m로 감소시켰을 때는 $x=0.90$ 에서 1,659 °C를 보였다. 따라서 일정량의 연료가 공급되는 경우, 화염길이에 따른 온도분포의 변화는 작음을 알 수 있었다.

다음에는 표준조건에서 고형물의 조성분포를 중심으로, 회전로의 길이에 따른 조성변화를 살펴 보았다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이, $x=0.5$ 주위에서 CaO의 생성이 최고에 도달하였다가

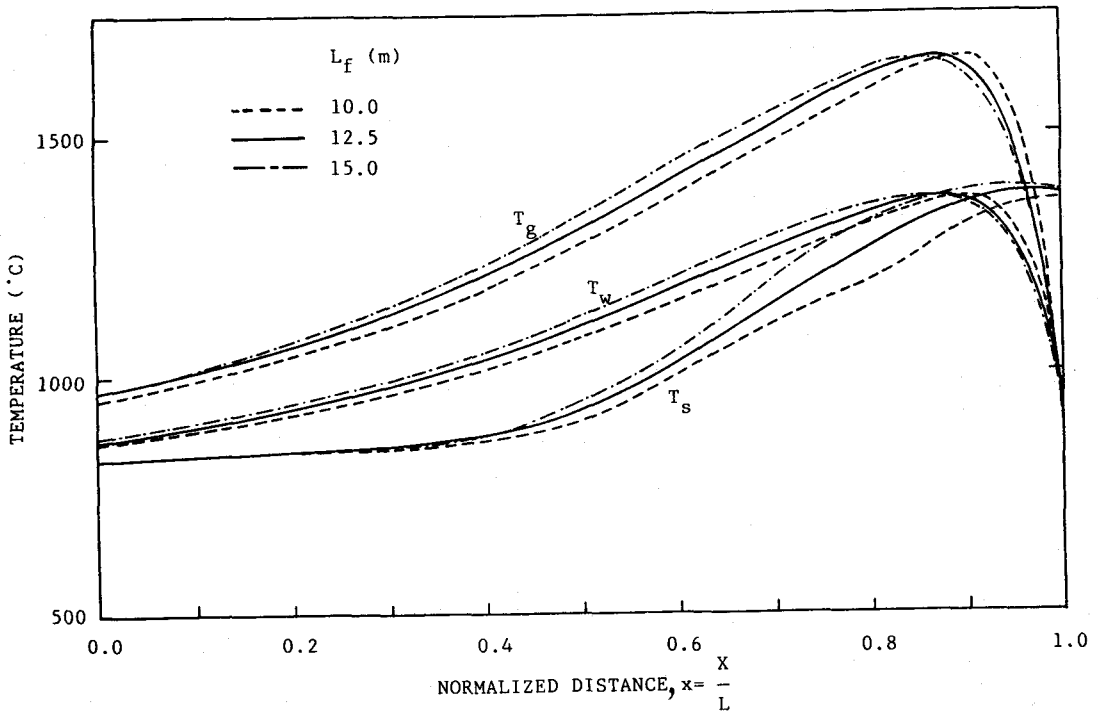


Fig. 3. Temperature Profile Changes according to Changes in Flame Length.

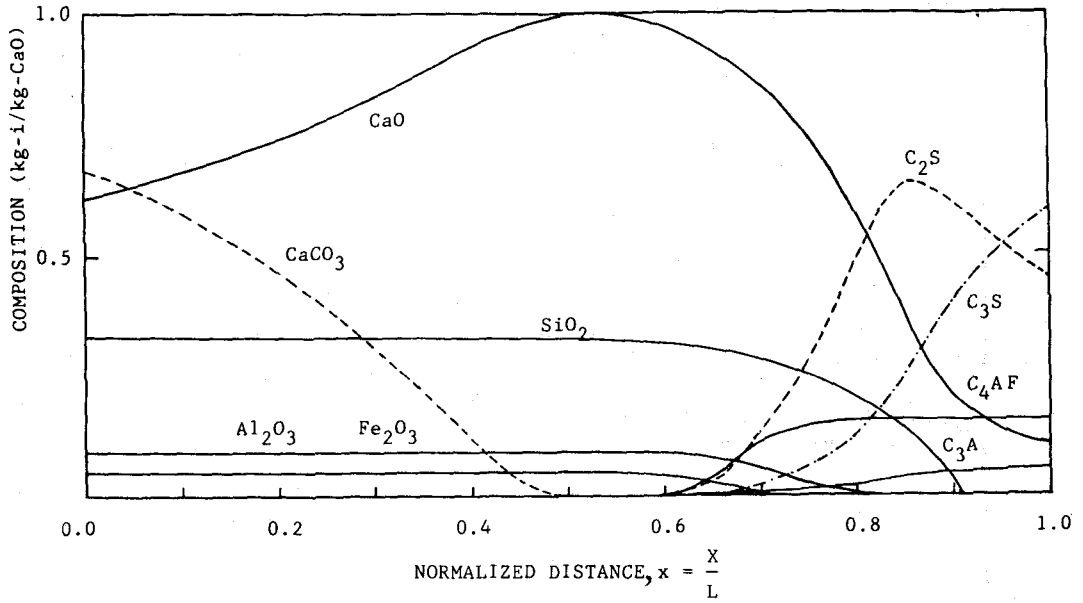


Fig. 4. Composition Profile along Length at Standard Condition.

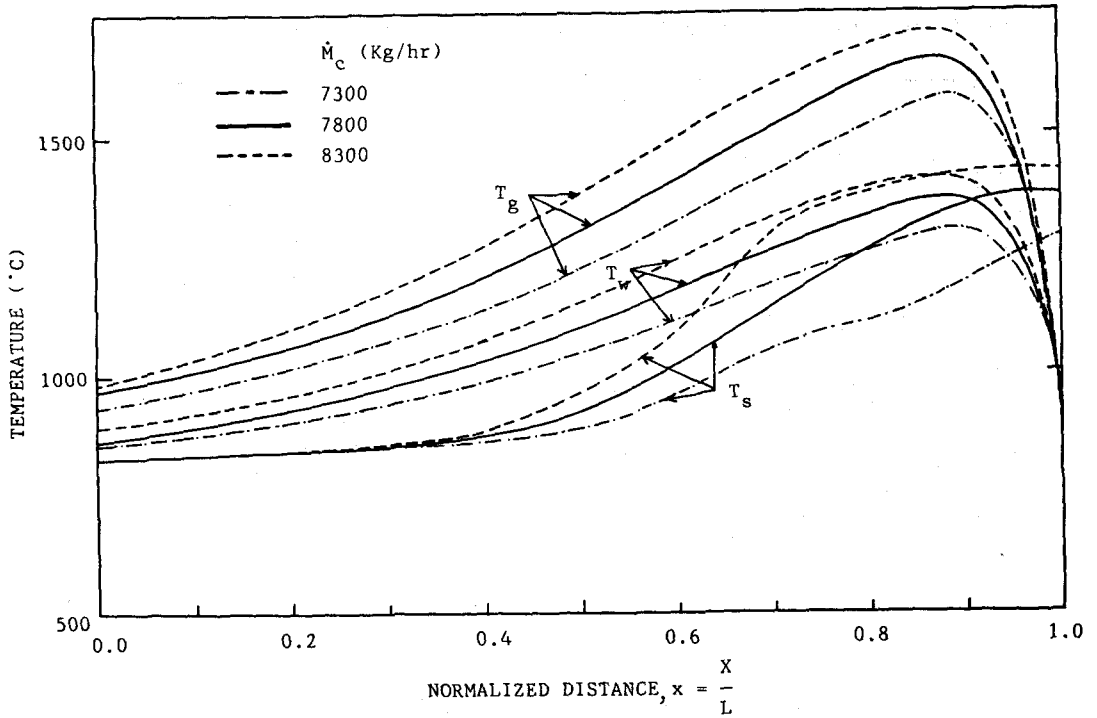


Fig. 5. Temperature Profile Changes according to Changes in Coal Mass Flow Rate.

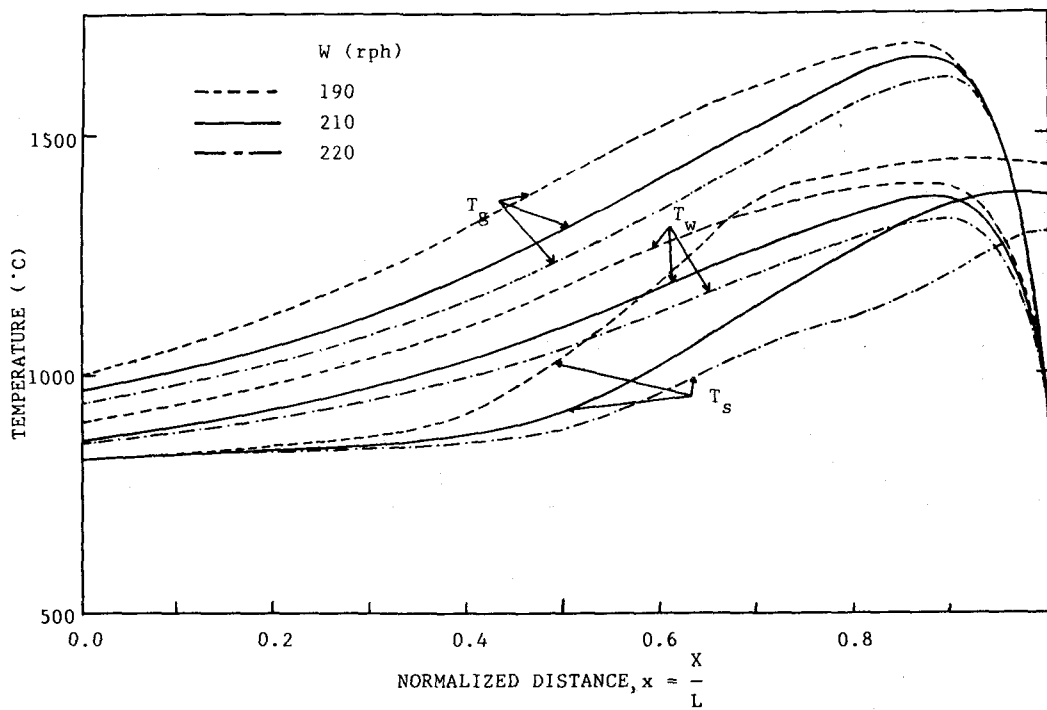


Fig. 6. Temperature Profile Changes according to Changes in Rotational Speed.

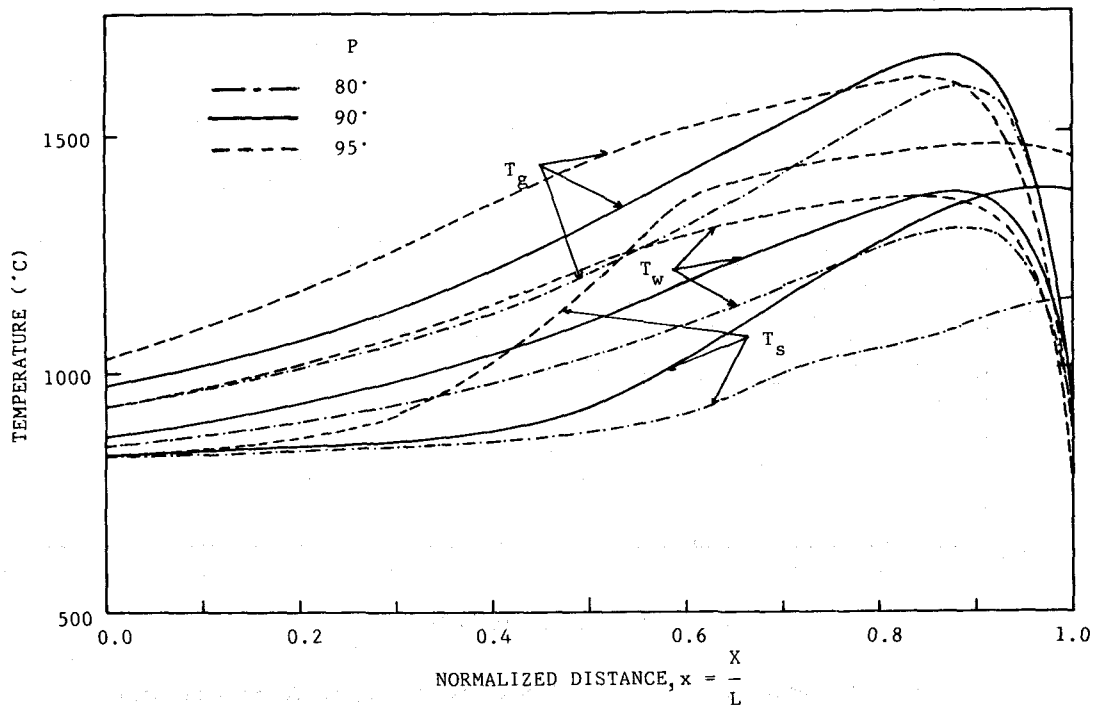


Fig. 7. Temperature Profile Changes according to Changes in Pouring Angle.

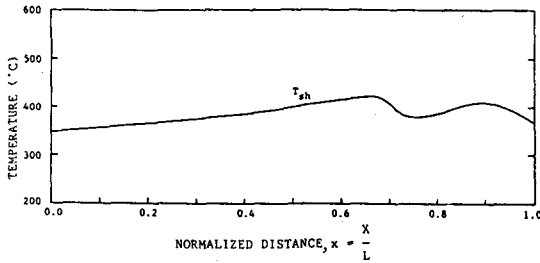


Fig. 8. Outer Shell Temperature Profile at Standard Condition.

온도가 급진적으로 증가함에 따라 C_3S 의 증가가 이루어지게 됨을 알 수 있었다. 연료인 미분탄 투입량의 영향을 살펴보면 Fig. 5와 같다. 예상한 대로 연료량의 증감에 따라 표준상태인 7,800 kg/hr의 유량을 전후로 온도의 증감이 비례하여 이루어지고 있음을 보이고 있다. 회전속도(표준 210 rph) 증감에 따른 영향, 또한 “pouring angle”(표준 90°)의 증감에 따른 영향을 살펴보면, Fig. 6과 Fig. 7에 보이는 바와 같다. 회전속도의 증가는 식(1)에서 알 수 있듯이 고체유입량의 증가를 나타내므로, 다른 조건들이 표준상태로 고정되어 있을 때, 그림에 보이는 바와 같이 전반적으로 온도의 저하를 가져오게 된다. 반면 “pouring angle”의 증가는 유입고형물량의 감소를 가져오므로 온도증가를 초래한다.

끝으로, 회전로의 외부표면 온도를 살펴 보았다. 표준상태에서 Fig. 8에 보이는 바와 같이 온도가 완만히 증가하다가 $x \approx 0.67$ 부터 온도분포에 기복이 있게 된다. 이는 $x \geq 0.7$ 범위에 코팅이 존재한다고 가정하였기 때문이다. 이와 같이 회전로의 표면온도분포는 코팅의 영향을 살펴보는데 중요한 역할을 할 가능성이 있다.

4. 결 론

시멘트 회전로에 대한 이론적인 모델링을 통하여 기체 및 고형반응물의 조성분포를 조사하여 보았다. 기존 열전달 상관식, 또한 화염에 대한 경험식을 복합적으로 활용함으로써 다소 타당성있는 결과들을 얻을 수 있었다. 본 결과는 고형물이 상변화가 일어나는 지점부터 고형물의

이동속도가 증가된다는 가정이 상당히 합리적임을 보여주고 있다.

앞으로 보다 정밀한 이론적인 해석은 물론 전산제어시스템의 개발을 위하여는 다양한 현장 조업조건들이 알려져야 하겠다. 본 연구결과가 다소나마 회전로의 성능평가에 도움이 되기를 바란다.

후 기

본 연구는 동양시멘트주식회사의 재정적 지원에 의하여 이루어진 것이다. 본 연구진은 동양시멘트주식회사의 후의에 깊은 감사의 뜻을 표한다.

< 參 考 文 獻 >

- 1) Gygi, H., *Cement and Lime Manufacture*, 11, 82 (1938).
- 2) Lyons, J. W., Min, H. S., Parisot, P. E. and Paul, J. F., *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. and Dev.*, 1, 29 (1962).
- 3) Sass, A., *Ibid.*, 6, 532 (1967).
- 4) Spang, H. A., *Automatica*, 8, 309 (1972).
- 5) Frisch, V. and Jeschar, R., *Zement-Kalk-Gips*, Nr. 10, 549 (1983).
- 6) Kim, S. H., Lee, K. S. and Lee, W. K., *Zement-Kalk-Gips*, Nr. 7, 364 (1984).
- 7) Khodorov, E. P., *Khim. Prom.*, 416 (1961).
- 8) Paschkis, V. and Imber, M., *Int. J. Heat Transfer*, 5, 623 (1962).
- 9) Jenkins, B. G. and Moles, F. D., *Trans. IChemE.*, 59, 17 (1981).
- 10) Tscheng, S. H. and Wakinson, A. P., *Can. J. Chem. Eng.*, 57, 433 (1979).
- 11) 大西利夫, ほカソ セメント 製造技術 シンポ ウム報告, No. 28, 35 (1971).
- 12) Folliot, A., *Revue des Materiaux de Construction*, No. 473, 31 (1955).
- 13) 최창균, 이재성, 윤인섭, 이승중, 정상돈, 최홍영, 한종훈, 최문규, “시멘트제조공정의 개선에 관한 연구”, 서울대학교 공과대학 연구보고서 (1986).