J. of Korean Inst. of Resources Recycling
Vol. 11, No. 3, 2002, 25-30
≫ 研究論文 ≪

回轉冷却器에서 고체와 가스의 溫度分布解析

†李晩承* · 崔柱錫 · 全哲均

*木浦大學校 工科大學 新素材工學科, 木浦大學校 工科大學 機械工學科

Analysis of Temperature Distribution of Solid and Gas in the Rotary Cooler

†Man-Seung Lee*, Ju-Seok Choi and Chul-Kyun Chun

*Department of Advanced Materials Science and Engineering, Mokpo National University, Chonnam 534-729, Korea
Department of Mechanical Engineering, Mokpo National University, Chonnamn 534-729, Korea

요 약

회전냉각기에서 일어나는 정상상태 열전달을 1차원으로 해석하였다. 회전냉각기로 입력되고 배출되는 공기온도를 경계조건으로 삼았다. 경계 및 조업조건으로부터 2개의 상미분방정식과 2개의 대수방정식을 동시에 만족시키는 해를 계산하여 고체, 공기, 벽의 온도분포를 구하였다. 본 연구에서 계산한 외벽온도는 실제 가동중인 회전냉각기에서 실측한 외벽온도와 서로 잘 일치하였다.

주제어: 회전냉각기, 온도분포, 열전달, 에너지수지

ABSTRACT

Heat transfer occurring in the rotary cooler was analyzed by applying a one- dimensional steady state. The temperature of inlet gas and the measured temperature of outlet gas were used as boundary conditions. Axial temperature distribution of solid, gas and wall were calculated by solving two differential equations and two algebraic equations under the constraint of two point boundary conditions and operating conditions. The temperatures of outer wall calculated in this study were in good agreement with those measured from running rotary cooler.

Key words: Rotary cooler, Temperature distribution, Heat transfer, Energy balance

1. 서 론

회전냉각기는 고온의 고체장입물을 저온가스로 냉각시키는 공업로이며, 고체와 가스가 서로 반대방향으로 흐르는 역류식 회전로(rotary furnace)의 일종이다. 이러한 회전로는 shaft furnace에 비해 가스와 고체장입물의 적은 접촉면적에 기인해 열전달효율이 낮은 단점은 있으나, 조업방법이 간단하여 금속과 비철금속제조분야에서 여러 용도로 이용되고 있으며,[1-3] 최근에는 폐전지 재활용업체에서 폐전지로부터 수은을 증류하기 위한 목적으로 회전로를 설치하여 시험가동중이다.

회전냉각기에서 고체장입물의 냉각온도를 최적으로 관리하기 위해서는 무엇보다도 온도제어기법이 가장 중요하다. 회전냉각기중 고체와 가스의 온도분포는 고체, 가스, 회전냉각기의 벽사이에 일어나는 열전달에 의존한다. 회전냉각기에서는 복사, 대류, 전도에 의한 열전달이 동시에 일어나며, 고체장입물이 가스 및 내벽과 접촉하는 부분이 계속 변하므로 열전대등을 이용하여 고체장입물과 가스온도를 계속 측정하는 것은 매우 어렵다. 이와 같은 측정상의 어려움으로 인해 회전로에서 일

† 2002년 3월 30일 접수, 2002년 5월 16일 수리
† E-mail: mslee@chungkye.mokpo.ac.kr

어나는 열전달 현상을 해석하는 모델에 대한 연구가 이루어져 왔다.[4-6]

본 연구에서는 회전냉각기에 별도의 측정장치없이 고체장입물, 가스, 벽의 온도분포를 예측할 수 있는 에너지수지를 이용한 정상상태 열전달을 해석하였다. 본 연구에서 수행한 회전냉각기 열전달해석의 타당성을 검토하기 위해 현재 가동중인 소결알루미나 냉각용 회전냉각기에 적용하여 계산결과와 실측치를 비교하였다.

2. 이론적 배경

회전냉각기에서 고체장입물, 가스, 내벽 및 외벽의 온도분포를 구하기 위해 정상상태조건에서 1차원 에너지수지를 세웠다. 이때 고체장입물층에서 장입물의 온도는 동일하다고 가정하였다.

회전냉각기에서 가스가 도입되는 위치를 x=0으로 선택하면, 정상상태에서 고체장입물과 가스의 에너지수지는 각각 다음과 같다.

$$m_S C_{PS} T_S|_{x+\Delta x} = m_S C_{PS} T_S|_x \quad (1)$$
$$+(q^*_{S\to G} A_{SG} + q^*_{S\to CW} A_{SCW} + q^*_{S\to EW} A_{SEW})\Delta X$$

$$m_G C_{PG} T_G|_x + (q^*_{S\to G} A_{SG} + q^*_{EW\to G} A_{EWG})\Delta x \quad (2)$$
$$= m_G C_{PG} T_G|_{x+\Delta x}$$

상기식에서 m은 질량유속을(g/sec), C_P는 열용량(cal/g/K)을, T는 온도를, q*는 열유속을(cal/cm^2/sec), A는 단위길이당 열전달이 일어나는 면적(cm^2/cm)을, x는 회전냉각기의 길이(cm)를 나타낸다. 또한 하첨자 G는 가스를, S는 고체장입물을, W는 벽을, CW는 고체장입물과 접촉하고 있는 벽을, EW는 가스와 접촉하고 있는 벽을 각각 나타낸다.

고체장입물로부터 내벽으로 전달된 열에 대해 정상상태를 적용하면 내벽과 외벽의 에너지수지는 각각 다음과 같다.

$$q^*_{S\to CW} A_{SCW} + q^*_{S\to EW} A_{SEW} = q^*_{EW\to G} A_{EWG} + q^*_{W\to W} A_{WW} \quad (3)$$

$$q^*_{W\to W} A_{WW} = q^*_{W\to A} A_{WA} \quad (4)$$

상기식에서 하첨자 A는 외부공기를 나타낸다.

회전냉각기의 단면을 Fig. 1 에 나타냈으며, 단위길이당 열전달이 일어나는 면적을 Fig. 1 로부터 구하여 다음에 나타냈다.

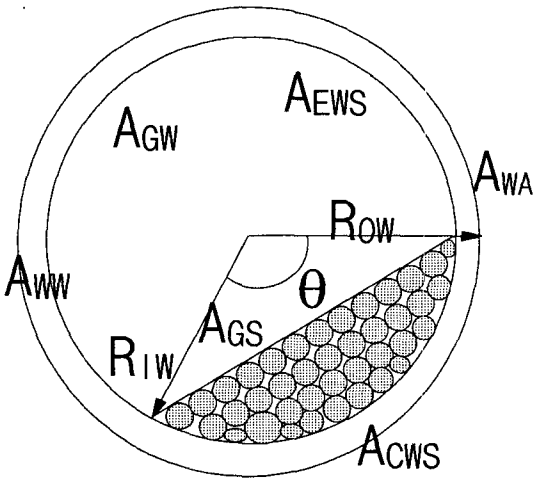

Fig. 1. Schematic diagram of kiln cross section.

$$A_{SG} = 2R_{IW}\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (5)$$

$$A_{SEW} = 2R_{IW}\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (6)$$

$$A_{SCW} = \frac{\theta\pi}{180}R_{IW} \quad (7)$$

$$A_{EWG} = \pi R_{IW}\left(2-\frac{\theta}{180}\right) \quad (8)$$

$$A_{WW} = 2\pi R_{OW} \quad (9)$$

$$A_{WA} = 2\pi R_{OW} \quad (10)$$

상기식들에서 R은 회전냉각기의 반경이며, θ의 단위는 degree이다.

정상상태에서 고체의 질량유속은 회전냉각기에서 고체층이 차지하는 단면적(A_S, cm^2)과 고체의 평균속도(V_{solid}, cm/sec) 및 고체층의 밀도(ρ_{bed}, g/cm^3)와 식 (11)의 관계에 있으며, 고체층의 밀도는 고체의 밀도(ρ_s)와 공극율(ε)을 식 (12)에 대입하여 구할 수 있다.

$$m_s = \rho_{bed} V_{solid} A_S \quad (11)$$

$$\rho_{bed} = (1-\varepsilon)\rho_s \quad (12)$$

회전냉각기에서 고체의 평균이동속도는 다음식으로 주어진다.[7]

$$V_{solid} = 0.175 R_{IW}(rpm)S \quad (13)$$

상기식에서 rpm과 S는 각각 회전냉각기의 회전수와 경사를 나타낸다.

Fig. 1 로부터 회전냉각기에서 고체층이 차지하는 단면적과 θ의 관계인 식 (14)를 구할 수 있다.

$$A_S=\pi R_{IW}^2\frac{\theta}{360}-R_{IW}^2\frac{\sin\theta}{2} \tag{14}$$

고체의 질량유속과 식 (11), (12), (13)으로 부터 고체층의 단면적을 구한 다음 식 (14)를 sinθ에 대해 전개한 식 (15)에 대입하면 θ를 구할 수 있다.

$$A_S=\frac{R_{IW}^2}{240}\left[20\left(\frac{\pi\theta}{180}\right)^3-\left(\frac{\pi\theta}{180}\right)^5\right] \tag{15}$$

본 연구에서 이용된 여러 열전달계수 상관식을 다음에 나타냈다.

$$h_{S\to G,C}=1.66\times10^{-3}\left(\frac{m_G}{A}\right)^{0.067} \tag{16}^{8)}$$

$$h_{S\to G,R}=\frac{\sigma\in_S(T_S^4-T_G^4)}{T_S-T_G} \tag{17}$$

$$h_{S\to EW,R}=\frac{\sigma(T_S^4-T_W^4)}{\left(\frac{1}{\in_S}+\frac{1}{\in_W}-1\right)T_S-T_W} \tag{18}$$

$$h_{RE\to G,C}=h_{S\to G,C} \tag{19}$$

$$h_{EW\to G,R}=\frac{\sigma\in_W(T_W^4-T_G^4)}{(T_W-T_G)} \tag{20}$$

$$h_{W\to A,R}=\frac{\sigma\in_{OW}(T_{OW}^4-T_A^4)}{T_{OW}-T_A} \tag{21}$$

$$h_{W\to A,NC}=\frac{0.11k_{AIR}}{2R_{OW}}\left[\left(0.5\left(\frac{4\pi R_{OW}^2\rho(rpm)}{60\mu}\right)^2+N_{Gr}\right)N_{Pr}\right]^{0.35} \tag{22}^{5)}$$

상기식들에서 h는 열전달계수(cal/cm^2/sec/K)를, k는 열전도도(cal/cm/sec/K)를, N_{Gr}은 Grashof수를, N_{Pr}은 Prandtl수를 나타낸다. σ는 Stefan-Boltzmann상수를, ∈는 방사율을, μ는 점도를 나타낸다. 또한 하첨자 C는 대류를, R은 복사를, cd는 전도를, NC는 자연대류를 각각 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

회전냉각기에서 T_S, T_G, T_W, T_{OW}의 온도분포를 구하기 위해서는 식 (1)부터 (4)까지 4개의 에너지수지를 동시에 만족하는 해를 구해야 한다. 식 (1)과 (2)를 정리하면 T_S와 T_G에 대한 2개의 비선형 상미분방정식이 얻어진다.

$$\frac{dT_S}{dx}=\frac{[(h_{S\to G,C}+h_{S\to G,R})+(T_S-T_G)A_{SG}+}{m_S\left(a_S+2b_ST_S-\frac{c_S}{T_S^2}\right)}$$

$$\frac{h_{S\to CW}(T_S-T_W)A_{SCW}+h_{S\to EW,R}(T_S-T_W)A_{SEW}]}{m_S\left(a_S+2b_ST_S-\frac{c_S}{T_S^2}\right)} \tag{23}$$

$$\frac{dT_G}{dx}=\frac{[(h_{S\to G,R}+h_{S\to G,C})(T_S-T_G)A_{SG}}{m_G\left(a_G+2b_GT_G-\frac{c_G}{T_G^2}\right)}$$

$$\frac{+(h_{EW\to G,R}+h_{EW\to G,C})(T_W-T_G)A_{EWG}]}{m_G\left(a_G+2b_GT_G-\frac{c_G}{T_G^2}\right)} \tag{24}$$

식 (23)과 (24)에서 a, b 및 c는 열용량의 계수를 나타낸다. 식 (3)과 (4)를 내벽과 외벽의 온도에 대해 정리하면 다음과 같이 된다.

$$T_W=\frac{[h_{S\to CW}A_{SCW}T_S+h_{S\to EW,R}A_{SEW}T_S+(h_{EW\to G,R}+h_{EW\to G,C})A_{EWG}T_G+h_{W\to W,cd}A_{WW}T_{OW}]}{[h_{S\to CW}A_{SCW}+h_{S\to EW,R}A_{SEW}+(h_{EW\to G,R}+h_{EW\to G,C})A_{EWG}+h_{W\to W,cd}A_{WW}]} \tag{25}$$

$$T_{OW}=\frac{h_{W\to W,cd}A_{WW}T_W+(h_{W\to A,R}+h_{W\to A,NC})A_{WA}T_A}{(h_{W\to A,R}+h_{W\to A,NC})A_{WA}+h_{W\to W,cd}A_{WW}} \tag{26}$$

회전냉각기 가동업체에서는 회전냉각기로 입력되고 배출되는 공기의 온도를 측정하여 조업관리를 행하고 있다. 따라서 이와 같이 측정된 공기온도를 이용한다면 상기 4개의 식의 해를 구하는 것은 다음과 같은 경계값 문제가 된다.

경계조건 1 : x = 0에서 T_G = 공기 입력온도

경계조건 2 : x = L에서 T_G = 공기 배출온도

이와 같은 경계값 문제의 해를 구하기 위해 step을 10 cm로 하는 4차 Runge-Kutta법을 이용하였으며, 회전냉각기의 제원과 조업자료로부터 T_S, T_G, T_W, T_{OW}를 구하는 알고리즘을 Fig. 2 에 나타냈다.

회전냉각기에서 일어나는 열전달 현상중 고체장입물

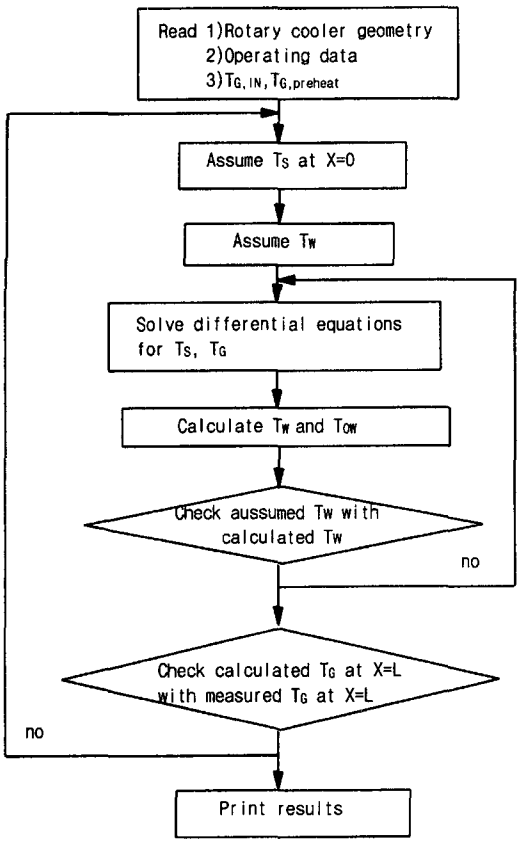

Fig. 2. Flowchart for the calculation of temperature.

로부터 장입물과 접촉하고 있는 내벽으로의 열전달은 회전냉각기의 회전과 함께 복사, 대류 및 전도에 의한 열전달이 동시에 일어나므로 열전달계수의 정량화가 매우 어렵다. Sass는 시멘트 소성용 회전로에서 고체층과 접촉하고 있는 내벽으로부터 고체층으로의 열전달계수는 고체와 접촉하는 영역에서 전도에 의한 열전달과 복사에 의한 열전달의 합과 같다고 생각하여 $h_{CW\rightarrow S}$의 값으로 $h_{G\rightarrow W,C}$의 값의 5배를 가정하였다.[9] 따라서 본 연구에서도 고체장입물층으로부터 장입물층과 접촉하고 있는 내벽으로의 열전달계수를 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$h_{S\rightarrow CW}=5h_{S\rightarrow G,C} \quad (27)$$

현재 국내에서 가동중인 회전냉각기를 대상으로 삼아 본 연구에서 수행한 회전냉각기의 열전달 해석결과의 타당성을 검토하였다. (주)대한세라믹스에서는 알루미나를 회전로에서 약 1750°C까지 소결시킨 다음, 회전냉각기로 냉각한 후 분쇄하여 고온용 알루미나 내화재를 제조하고 있다. Table 1 에는 대한세라믹스에서 가동중인 회전냉각기의 제원과 조업조건을, Table 2 에는 계산에 이용된 여러 상수들의 값을 나타냈다.

Table 1. Specification and operating conditions of the rotary cooler for the sintered alumina

Total length (cm)	2770
Inner radius (cm)	78.5(68.5)
Outer radius (cm)	80
Inclination (cm/cm)	3.5/100
Thickness of steel shell (cm)	1.5
Thickness of Fire-Clay (cm)	10
Alumina production rate (Ton/H)	2.6
Air flow rate (Nm^3/min)	200
Rpm	1.5

Table 2. Input parameters used in the calculation

Parameter	Value
Density of alumina (g/cm^3)	3.97
Bed voidage	0.3
Conductivity of steel shell (cal/cm/s/K)	$0.17\text{-}1.0\times10^{-4}T$
Conductivity of Fire-Clay (cal/cm/s/K)	2.38×10^{-3}
Emissivity of alumina	0.7
Emissivity of Fire-clay	0.7
Emissivity of steel shell	0.7

알루미나 장입속도 2.6 Ton/H, 공기유량 200 Nm^3/min, 회전냉각기의 회전속도가 1.5인 조업조건에서 회전냉각기로부터 배출되는 공기온도를 실제로 측정한 값은 300°C이었다. 따라서 공기의 입력온도는 25°C, 공기의 배출온도는 300°C인 경계조건에서 식 (23), (24), (25), (26)을 동시에 만족하는 해로부터 알루미나, 공기, 내벽의 온도분포를 구하여 Fig. 3 에 나타냈다. 상기 경계조건에서 소결알루미나는 약 1510°C정도의 고온상태에서 회전냉각기로 입력된 후 156°C로 냉각되어 배출되는 것을 계산결과로부터 알 수 있었다.

내벽의 경우 회전냉각기 입구부터 13 m지점까지는 steel shell이고, 이후부터 알루미나 투입구까지는 steel shell에 내화재인 fire clay가 부착되어 있다. 내벽이 steel shell로만 구성되어 있는 부분에서 벽을 통한 열전

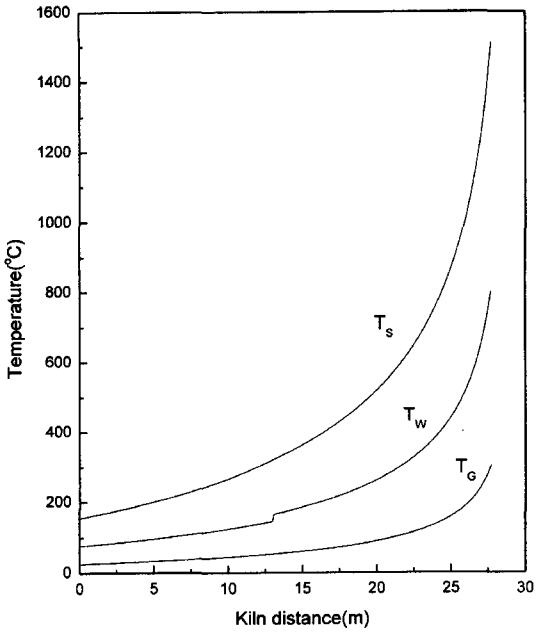

Fig. 3. Calculated temperature profiles of alumina, wall and air.

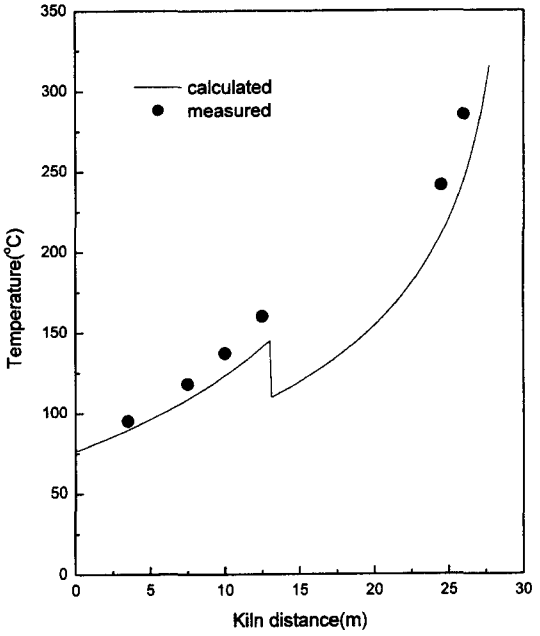

Fig. 4. Comparison between the outer wall temperatures calculated and those measured.

달속도는 식 (28)과 같고, fire clay와 steel shell로 구성되어 있는 복합벽에서 열전달속도는 식 (29)와 같다.

$$h_{W\rightarrow W,cd}=\frac{k_s}{R_{OW}\ln\left(\frac{R_{OW}}{R_{IW}}\right)} \tag{28}$$

$$h_{W\rightarrow W,cd}=\frac{1}{\left[\frac{\ln\left(\frac{R_{IW}+t_F}{R_{IW}}\right)}{k_F}+\frac{\ln\left(\frac{R_{OW}}{R_{IW}+t_F}\right)}{k_S}\right]} \tag{29}$$

상기식에서 k는 열전도도를, t는 내화재의 두께를 나타낸다. 또한 하첨자 F와 S는 각각 fire-clay와 steel shell을 나타낸다.

Steel shell로만 되어 있는 내벽부위에서는 내벽과 알루미나가 직접 접촉하나, steel shell표면에 fire clay가 부착되어 있는 복합벽에서는 알루미나와 fire clay가 직접 접촉한다. 복합벽의 경우에는 열전달에 대한 저항이 증가하는 효과가 있으므로 steel shell로만 되어 있는 내벽보다 온도가 높으며, 이러한 사실을 Fig. 3 에서 확인할 수 있다.

회전냉각기에 장입된 알루미나의 온도는 약 1500°C 이상의 고온이므로 알루미나로부터 공기와 내벽으로의 복사에 의한 열전달이 중요하다. Fig. 3 으로부터 회전냉각기에 장입된 소결 알루미나의 온도가 급격히 감소하는 것을 알 수 있으며, 이에 따라 내벽의 온도도 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 이에 반해 공기의 온도는 서서히 증가하다 회전냉각기 끝부분에서 고온의 알루미나로 인해 공기의 온도가 많이 상승하였다.

회전냉각기의 외벽온도를 적외선온도계로 측정하여 본 연구에서 계산한 외벽온도와 함께 Fig. 4 에 나타냈다. 전반적으로 본 연구에서 계산한 외벽온도보다 측정온도가 높지만, 회전냉각기에서 일어나는 열전달현상이 매우 복잡한 점을 감안하면 두 온도가 서로 잘 일치한다고 생각할 수 있다. 또한 Fire clay가 부착된 회전냉각기의 외벽온도는 열전달속도가 감소하므로 steel shell 부위에 비해 외벽온도가 낮은 것을 알 수 있다.

4. 결 론

회전냉각기의 조업인자에 따른 고체장입물, 가스, 벽의 온도분포를 구하기 위해 에너지수지를 이용하여 회전냉각기에서 일어나는 열전달을 해석하고 다음의 결론을 얻었다.

1. 회전냉각기의 제원과 조업조건으로부터 회전냉각기

축길이에 따른 고체장입물, 가스, 내벽 및 외벽의 온도분포를 계산하였다.

2. 실제 가동중인 알루미나 냉각용 회전냉각기에서 실측한 외벽온도와 본 연구에서 열전달을 해석하여 계산한 외벽온도는 서로 잘 일치하였다.

참고문헌

1. A. P. Watikinson and J. K. Brimacombe : "Limestone calcinations in a rotary kiln", Met. Trans. B, 13B, 369-378 (1982).
2. P. K. Mukhopadhyay, A. V. Sathe and A. Chatterjee : "A mathematical model of direct reduction of iron oxides in rotary kilns using the TDR process", Trans. of the Indian Institute of Metals, 37(6), 721-729 (1984).
3. L. Formanek, H. Eichberger and H. Serbent : "Energy utilization in direct reduction using rotary kilns", Metallurgical Plant and Technology, 2, 9-16 (1988).
4. A. Mantius, E. Kurcyusz and W. Kawecki : "Mathematical model of the aluminum oxide rotary kiln", I & EC Process Design and Development, 13(2), 132-142 (1974).
5. V. Venkateswaran and J. K. Brimacombe : "Mathematical model of the SL/RN direct reduction process", Met. Trans. B, 8B, 387-398 (1977).
6. M. S. Lee : "A mathematical model of rotary kiln for the calcination of limestone", J. of the Korean Institute of Metals and Materials, 35(12), 1724-1733 (1997).
7. J. B. Riffaud, B. Koehret and B. Coupal : "Modelling and simulation of an alumina kiln", British Chem. Eng. & Process Technology, 17(5), 413-418 (1972).
8. V. Ramakrishnan and P. S. T. Sai : "Mathematical modeling of pneumatic char injection in a direct reduction rotary kiln", Met. and Materials Trans. B, 30B, 969-977 (1999).
9. A. Sass : "Simulation of the heat-transfer phenomena in a rotary kiln", I & EC Process Design and Development, 6(4), 532-535 (1967).

李 晩 承

- 1992년 고려대학교 공과대학 금속공학과 공학박사
- 현재 목포대학교 공과대학 신소재공학과 교수

崔 柱 錫

- 2000년 목포대학교 공과대학 기계공학과 공학석사
- 현재 목포대학교 공과대학 기계공학과 박사과정

全 哲 均

- 1990년 고려대학교 공과대학 기계공학과 공학박사
- 현재 목포대학교 공과대학 기계공학과 교수