

시멘트 소성로 가열 단계에서의 최적 제어

김 송호[○], 이 광순^{*}, 이 원규^{**}

○ 동양시멘트 (주) 기술연구소

* 서강대학교 화공과

** 오하이오 주립대 화공과

An Optimal Control in Cement Kiln Heat-up

Song-Ho Kim[○], Kwang-Soon Lee^{*}, Won-Kyoo Lee^{**}

○ R & D Part, Tongyang Cement Co.

* Department of Chemical Engineering, Seogang University.

** Department of Chemical Engineering, Ohio State University.

Abstract

An optimal control in heat-up operation was formulated for minimizing the quadratic performance criterion which is a function of temperature, temperature gradient in the wall and fuel flow rate. For optimal control law computations mathematical model was simplified with assumptions and then linearized by use of orthogonal collocation in radial direction. Effects of weighting function assigned to temperature and temperature gradient and final time were compared with industrial data.

하여 보고 그 결과를 실제 조업자료와 비교 검토하여 보았다.

2. 모델 및 열수지식

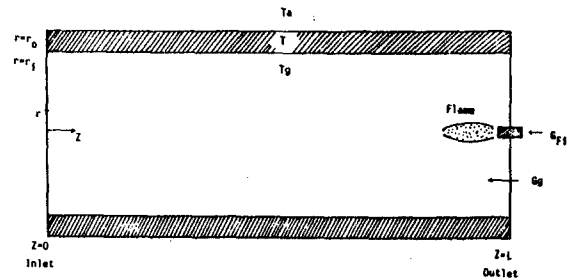


그림 1. 소성로 단면도

Fig. 1. Simplified geometry of a rotary cement Kiln in Heat-up

1. 서 론

최근의 시멘트 제조 공법인 건식 공정은 연료량 투입하기 전에 소성로를 미리 예열 시켜주는 가열 (Heat-up) 단계가 필요하다. 이 가열단계는 생산에 관계없이 막대한 연료만 투입하게 되므로 어떻게 하면 최소의 연료로 소성로의 연화에 부피를 주지 않으면서 원하는 상태까지 가열하는냐 하는 최적 제어의 문제가 제기 되게 된다. 따라서 본 논문에서는 소성로에 대한 일차적인 모델의 열수지식을 세운 후 최적 제어 이론을 적용

내부 온도 (T):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K}{\rho_w c_p w} (\nabla_r^2 T + \nabla_z^2 T) \quad (1)$$

B.C. $r=r_1, T = T_g$ (1-a)

$$r=r_o, \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{f_o}{K} (T_a - T) \quad (1-b)$$

$$z=0, T=T_g \quad (1-c)$$

$$z=L, T=T_g \quad (1-d)$$

기체 온도 (Tg):

$$G_g C_p g \frac{\partial T_g}{\partial z} = A_w K \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_1} + q_f \quad (2)$$

$$B.C. Z=L \quad Tg = Tg_i \quad (2-a)$$

$$q_f = (-\Delta H) \frac{dG_F}{dz} \quad (2-b)$$

연료량 (G_F) :

$$\frac{dG_F}{dz} = F(Tg, G_F) G_F \quad (3)$$

$$B.C. Z=L \quad G_F = G_{Fi} \quad (3-a)$$

$$\text{단, } F(Tg, G_F) = -sp \frac{Ag}{Gg} \left(\frac{4Mc}{\rho_F M_o^2} \left(\frac{FMa}{RTg} \right)^2 \right) K_F do \quad (3-b)$$

3. 선형화

최적 제어 이론을 적용하기 위하여 (1)-(3) 식을 다음과 같이 선형화 하였다.

첫째, (1)식에서 $\nabla_z^2 T$ 항을 무시하여도 계산 결과 오차가 없었다.

둘째, (2), (3)식에서 연료 분포 (G_F) 와 기체 온도 (Tg) 를 추 방방의 함수로만 가정하고, (2)식의 우변 첫째항 주 변편을 통한 업손실이 균일하다고 본 경우이다. 이 가정은 화염대를 벗어난 범위에서는 오차가 비교적 크나 제어에 중요한 화염대 부근에서는 큰 오차가 없었다. 따라서 이 두 가정을 적용하여 (1) - (3)식을 다시 정리하면

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K}{\rho_w C_{pw}} \nabla_r^2 T \quad (4)$$

$$G_F = G_{Fi} e^{F_0} (Z-L) \quad (5)$$

$$Tg = Tg_i + \gamma G_{Fi} \quad (6)$$

셋째, (4)식을 반경향으로 $r^* = \frac{r-r_i}{r_o-r_i} = 0, 0.5, 1.0$ 세점에 대해 2차식으로 orthogonal collocation 하면 소성로 표면 ($r^*=1$)의 온도 (T_3)는

$$\frac{dT_3}{dt} = aT_3 + bG_{Fi} + c \quad (7)$$

소성로 내벽의 온도 구배는

$$\frac{dT_1}{dr^*} = pT_3 + dG_{Fi} + e \quad (8)$$

의 형태가 된다.

4. 최적 제어

최적 제어의 목적이 최소의 연료 (G_{Fi})로,

소성로의 내화면외에 무리한 열팽창 (dT_1/dr^*) 을 주지 않으면서 일정한 시간 ($t_0 - t_f$) 안에 원하는 상태 (T_3) 까지 올리는 것이므로, 각 상태 변수에 대한 편차 변수 ($X_3 = T_3 - T_{3f}$, $X_1 = T_1 - T_{1f}$) 를 정의하고 제어 변수 ($U = G_{Fi}$) 를 도입하여 (7), (8)식을 matrix 형태로 다시 정리하면,

$$\frac{dx_3}{dt} = \dot{X} = AX + BU + C \quad (9)$$

$$\frac{dx_1}{dr^*} = \hat{X} = PX + DU + E \quad (10)$$

가 된다.

최소화시키고자 하는 목적 함수를

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (\hat{X}^T Q \hat{X} + U^T R U + X^T S X) dt \quad (11)$$

로 잡으면 Hamiltonian 은

$$H = \frac{1}{2} (\hat{X}^T Q \hat{X} + U^T R U + X^T S X) + \lambda^T (AX + BU + C) + \beta^T (X - PX - DU - E) \quad (12)$$

가 되어 이를 풀면 된다.

5. 계산 결과 및 검토

$t_f \rightarrow Q, R, S$ 를 변경시키면서 계산한 결과 $t_f = 15hr$ $Q/S = 10^3$, $S/R = 1$ 인 경우 비교적 좋은 경우로 나타났으며, 그 결과와 실제 조업상의 소성로 입구 기체온도와 연료량을 비교한 결과를 그림 2와 3에 나타냈다.

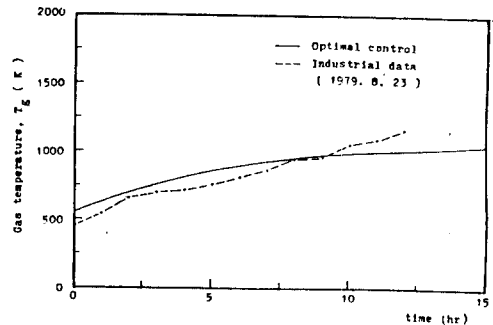


그림 2. 소성로 입구 기체 온도 비교

Fig. 2. Comparison of Kiln inlet gas temperature between optimal control & industrial data

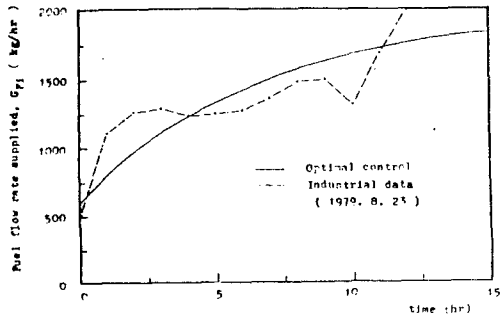


그림 3. 연료량 비교

Fig.3. Comparison of fuel flow rate supplied between optimal control and industrial data

소성로 입구 기체온도는 최적 제어의 경우 약간 높게 나타났는데 이는 실험회 과정에서 상권 오차이며, 연료량은 실제 조업이 최적 제어 곡선을 중심으로 상당한 시행 착오를 범하고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

소성로의 가열에 있어서 연료량을 크게 쓰면서, 연화에 손상을 주지 않고, 원하는 상태까지 온도를 올리는 최적 제어와 실제 공장 조업자료를 비교한 결과 실제 조업은 최적 제어 곡선을 중심으로 많은 시행 착오를 하고 있음을 볼 수 있었다. 이로부터 최적 제어는 보사식에 대한 계산 중, 실험회에 따른 오차를 줄이면 실제계에 응용이 가능하다고 생각된다.

(참고 문헌)

1. Ames, W.F., "Numerical Methods for Partial Differential Equations", Barnes & Noble Inc., New York, 1969.
2. Athans, M. and P.L. Fald, "Optimal control", Mc Graw-Hill, New York, 1966.
3. Duda, W.H., "Cement Data Boo", Barverlag

GmbH, Wiesbaden and Berlin, 1977.

4. IBM Application Program System/ 360 Scientific Subroutine Package(360 A - CM -03X) version III Programmer's Manual, 4th ed., IBM cooperation, New York, 1968.
5. Sages, A.P. and C.C. White , III, "Optimum System Control", Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1977.
6. Spang, H.A., " A Dynamic Model of a Cement Kiln", Automatica, 8, 309-323 (1972).