

소결 공정에서의 안전 소결점 위치 제어에 관한 연구
 A Study on Burnthrough Point Control in Sintering Process

이상정* 김정근 고명삼 권옥연

서울공대 제어계측공학과

ABSTRACT

A state-space model of a burnthrough point control system of an industrial sintering process is derived. The model is then used in designing a self-tuning controller which consists of the receding horizon control law and a least-squares prediction algorithm.

By applying this adaptive controller to POSCO sintering process IV, satisfactory experimental results have been obtained. Some of these practical results are presented in this paper.

1. 서론

소결은 세립의 분철 광석을 부분 용융에 의하여 과성광을 만드는 과정으로 그로에 장입되는 원료의 전 처리 과정이다. 이 과정에서 만들어지는 소결광은 그로 조업의 향상과 경비 절감에 밀접한 관계가 있으며 소결광의 품위가 낮아지면 그로의 노함에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서, 소결 공정의 목적은 그로의 노함에 맞는 성상을 갖는 소결광을 그로에서의 선철 생산량의 요구에 맞추어 가능한 한 적은 에너지로써 효율적으로 생산하는 것이라 볼 수 있으며, 이에 관련된 기술로는 최적 원료 배합 기술 [1],[2], 수분을 첨가하고 적정통기도를 확보하는 의사 조립 기술 [1],[3],[4], 원료 장입 기술 [5], 성품 소결광의 성상을 제어하는 기술 [6],[7], 및 성에너지 기술 [8],[9] 등을 들 수 있다.

포철 제 4 소결 공정을 예로 들면 전체 제어 루우프는 상호 연계되어 동작하는 공급량 제어, 반광 및 코우크스비 제어, 수분 제어, 안전소결점 위치 제어 및 총유제어로 구성되어 있으며 그 공정의 개통도를 그림 1에 보였다.

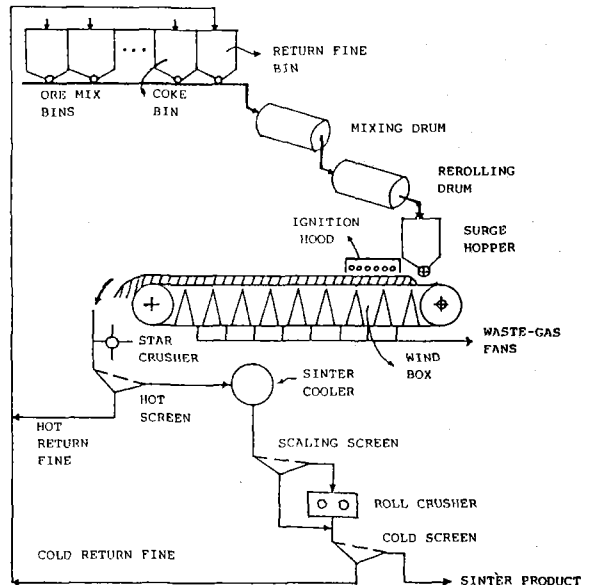


그림1. 소결공정의 개통도

이들 제어 루우프중 소결광의 품성 및 그 생산량에 가장 큰 영향을 미치는 것은 안전소결점 위치 제어 이므로 본 논문에서는 안전 소결점 위치 제어 시스템의 모델 및 제어 알고리즘을 개발하고 그 현장 실험 결과를 보인다.

제 2장에서 안전 소결점 위치 제어 시스템의 모델을 유도한 후 제 3장에서 안전 소결점 위치 제어를 위한 제어 알고리즘의 개발 및 그 성능 분석을

행한다. 마지막으로 제 4장에서 개발된 자기동조 제어기의 현장 실험 결과를 보이고 그 성능을 검토 한다.

2. 완전 소결점 위치제어 시스템의 모델화

소결 공정에서의 열 수지와 물질 수지에 근거해 소결 물질과 개스의 온도 및 각 성분들의 레벨 변화를 나타내는 수학적 모델은 여러 문헌들에 [10], [11] 보고 되고 있다.

이들 모델은 여러 물질들의 정성적인 관계, 개스 유량의 변화 및 배합 원료의 성분 변화에 따른 영향등의 소결 공정의 특성을 분석하는 데는 유용하다. 그러나, 이 모델들은 정지 상태의 실험도 가니(test pot) [11]에서의 동특성을 나타낸 것이므로 제어기의 설계에 사용하기는 부적당하다. 따라서, 완전 소결점의 위치 제어의 목적이 소결기 속도의 큰 변동없이 원하는 위치에 완전 소결점을 유지시켜 안정된 품질의 소결강을 요구되는 양만큼 생산하는 것이므로, 입력인 소결기 속도와 출력인 완전 소결점 사이의 관계를 규정짓는 모델의 유도가 필요하게 된다.

우선, 유도되는 모델에 타당성을 부여하기 위해 열 수지나 물질 수지 방정식의 유도 과정에서의 기본적인 가정들 [10], [11] 이외에 다음과 같은 몇가지 가정을 한다.

첫째, 소결기 속도로 이동하는 N개의 등간격 구간들로 베드가 구성된다고 생각한다. 즉, 소결 베드가 일련의 시험도 가니로 구성된다고 가정한다. 그리고, 각 구간에 가상적인 창문을 단다고 생각한다(그림 2-a) 이때 각 구간에서의 배합 원료가 겪는 소결 과정은 점화로부터 완전 소결에 이를 때까지의 온도 이력으로 나타내어진다.

(그림 3)

둘째, 풍상에서의 공기 흡입 속도가 소결기 속도보다 훨씬 빠르다고 가정한다. 이와 같은 가정 아래선 각 구간에서의 소결 물질의 온도 이력이 시험도 가니에서의 온도 동특성을 따른다고 볼 수 있게 된다.

배합 원료가 점화가 된 때부터 완전 소결이 될 때까지 소요되는 시간을 완전 소결 시간(burn-through time)으로 정의 한다.

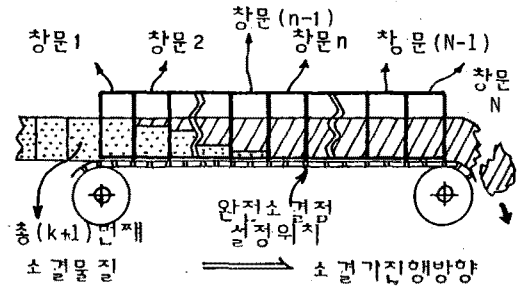


그림 2-a. 소결베드의 분할 및 창문구조

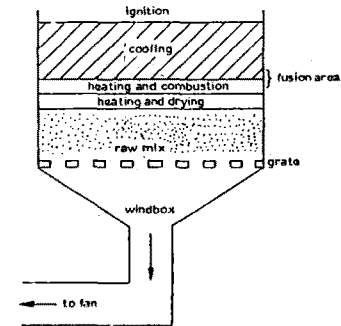


그림 2-b. 시험도 가니의 구조

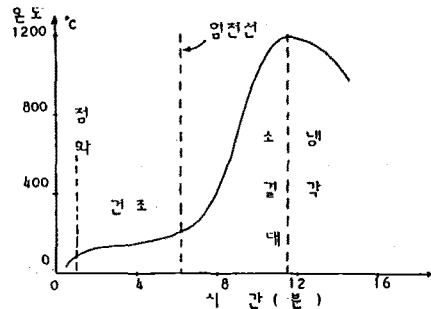


그림 3. 장입층내의 온도분포곡선

실제 소결 공정에서 측정할 수 있는 것은 풍상에서의 개스 온도이고, 이 온도 이력을 배합 원료가 겪는 소결 과정을 나타내는 것이라고 볼 수 있으므로(그림 3) 완전 소결 시간을 점화가 된 때부터 온도가 최고가 될때 까지 소요되는 시간으로도 정의할 수 있게 된다. 따라서, 완전 소결시간은 온도 이력으로 부터 계산되는 출력인 완전 소결점 위치와 입력인 소결기 속도의 과거 값들로 부터 산출해낼 수 있으며 주로 통기도의 영향을 받는다. 본 논문에서는 소결 물질이 소결기위에 실려 있는 시간을 상태 변수로 취하여 상태 공간 모델을 유도 하기로 한다. 그림 2-a 같이 소결기를 N개의 등간격 구간으로 나눈 우 가상적인 창문 구조를 생각 했을때 소결 물질이 창문 하나의 폭 만큼 이동할때 마다 소결기 속도를 변경하는 것으로 한다.

이렇게 했을 경우 새로운 소결기 속도를 계산하여 인가하는 순간에 n 개의 창문들 사이로 보이는 소결 물질들의 온도 변화는 n 개의 일련의 시험도가 가나내의 그것에 따른다고 볼 수 있다.

소결기가 가동하여 소결기에 소결 물질이 실리기 시작하여 총 $(k+1)$ 번째로 창문 하나의 폭을 채울 만큼의 양의 소결물질이 소결기에 실리려는 순간을 현재 시점으로 생각한다. (편의상 이 소결 물질을 총 $(k+1)$ 번째 소결 물질이라 부른다.)

완전 소결점 설정 위치를 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 창문 n 의 위치로 두고, 총 $(k+1)$ 번째 소결 물질이 소결기에 실리려는 순간에 창문 i 를 통해 보이는 소결 물질이 소결기에 실려서 그 위치까지 이동해오는데 소요된 시간을 상태변수 $x_i(k+1)$ 로 정의하면 ($i=1,2,\dots,n$)

$$\begin{aligned} x_1(k+1) &= u(k) \\ x_2(k+1) &= x_1(k) + u(k) \\ &\vdots \\ x_n(k+1) &= x_n(k) + u(k) \end{aligned} \quad (2.1)$$

의 관계가 성립함을 알 수 있다.

식 (2.1)에서 $u(k)$ 는 소결기 속도 $ps(k)$ 에 의하여 창문 하나의 폭 l 만큼 소결기가 이동하는 데 소요된 시간 즉, $u(k) = \frac{l}{ps(k)}$ 로 주어진다. 또, 완전

소결점 설정 위치를 창문 n 의 위치로 두었으므로 출력은 $y(k) = x_n(k)$ (2.2)

와 같이 된다.

식 (2.1)과 식 (2.2)를 벡터 표기법으로 나타내면

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{b}u(k) \\ y(k) = \mathbf{c}\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 00 & \dots & 00 \\ 10 & \dots & 00 \\ 01 & \dots & 00 \\ \vdots & & \\ 00 & \dots & 01 \end{bmatrix} \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{c} = (00 \dots 01)$$

와 같은 선형 시불변 이산 시간 상태공간 모델 을 얻게 되며 이는 가관측 정규형임을 알 수 있다.

3. 제어 알고리즘

(1) 가변 HORIZON 제어 법칙 [13][14]

총 $(k+1)$ 번째 소결 물질이 소결기에 실리려는

순간에 창문 i 를 통해 보이는 소결 물질의 완전 소결시간은 $m_i(k)$ 라 두면, 식(2.3)과 같은 시스템의 제어 목적은 출력 $y(k)$ 가 $m_n(k)$ 와 같도록 하는 것이다. 이는 추적 문제로도 볼 수 있으나 본 논문에서는 종점에 제한이 있는 LQ (linear quadratic) 문제로 보아 가변 HORIZON 제어 법칙을 유도한다.

가변 HORIZON 제어 문제

$$\text{시스템} \quad \begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{b}u(k) \\ y(k) = \mathbf{c}\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\text{상징 지표} : J = \sum_{i=k}^{k+M} u^T(i)R u(i) \quad (3.2)$$

$$\text{제한조건} : y(k+M) = m_n(k+M) \quad (3.3)$$

$$\text{HORIZON} : 0 < M \leq n \quad (3.4)$$

이와 같은 제어 문제의 해는 다음과 같이 주어진다 :

$$u(k) = R^{-1} \mathbf{b}^T \mathbf{A}^{T^{M-1}} \mathbf{c}^T \mathbf{W}^{-1} (\mathbf{c} \mathbf{A}^M \mathbf{x}(k) - m_n(k+M)) \quad (3.5)$$

$$\mathbf{W}(M) = \sum_{i=0}^{M-1} \mathbf{c} \mathbf{A}^{M-i-1} \mathbf{b} R^{-1} \mathbf{b}^T \mathbf{A}^{T^{M-i-1}} \mathbf{c}^T \quad (3.6)$$

식(3.5) 및 (3.6)으로 주어지는 가변 HORIZON 제어 법칙은 일견 아주 복잡해 보이거나 시스템 행렬 $\mathbf{A}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ 가 정규 행태이므로 이 제어법칙은 간단한 형태로 표현할 수 있다.

$$\text{즉, 무게 행렬 } R \text{을 단위 행렬로 두면 식(3.6)은} \quad \mathbf{W}(M) = M \quad (3.7)$$

으로 주어지며, 식 (3.5)는

$$\begin{aligned} u(k) &= -\frac{1}{M} (\mathbf{c} \mathbf{A}^M \mathbf{x}(k) - m_n(k+M)) \\ &= -\frac{1}{M} (\mathbf{x}_{n-M}(k) - m_n(k+M)) \end{aligned} \quad (3.8)$$

으로 된다. 또, $m_n(k+M) = m_{n-M}(k)$ 이므로, 식(3.8)은

$$u(k) = \frac{1}{M} (m_{n-M}(k) - \mathbf{x}_{n-M}(k)) \quad (3.9)$$

로 주어진다.

따라서, 소결기 속도 $ps(k)$ 는

$$PS(k) = \frac{M \cdot l}{m_{n-M}(k) - x_{n-M}(k)} \quad (3.10)$$

으로 주어지며, 이의 의미는 안전 소결점 설정 위치인 창문 n 의 위치에서 HORIZON M 앞의 창문인 창문 (n-M)을 통해 보이는 소결 물질이 그 물질의 안전소결 시간 $m_{n-M}(k)$ 에 안전 소결점 설정위치 까지 이동해 가기 위해 필요한 소결기 속도이다.

(2) 가변 HORIZON 제어 법칙의 성질

안정성 (stability):

가변 HORIZON 제어법칙을 사용했을 경우의 폐회로 시스템은 다음과 같다.

$$x(k+1) = [A - \frac{1}{M}bcA^M]x(k) + \frac{1}{M}bm_{n-M}(k) \quad (3.11)$$

이 시스템의 특성 다항식은 다음과 같음을 보일수 있다.

$$P(z) = \det(zI - A + \frac{1}{M}bcA^M) \\ = \frac{1}{M}z^M (Mz^{n-M} + z^{n-M-1} + z^{n-M-2} + \dots + z + 1)$$

따라서,

$$Mz^{n-M} + z^{n-M-1} + z^{n-M-2} + \dots + z + 1 = 0 \quad (3.12)$$

의 근이 단위원 내에 존재하는 것만 보이면 폐회로 시스템(3.11)의 안정성이 증명된다.

Jury의 방법을 이용하면

$$\begin{array}{cccccccc} M & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & & \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & M & & \\ \hline M - \frac{1}{M} & 1 - \frac{1}{M} & 1 - \frac{1}{M} & \dots & 1 - \frac{1}{M} & & & \\ 1 - \frac{1}{M} & 1 - \frac{1}{M} & 1 - \frac{1}{M} & \dots & M - \frac{1}{M} & & & \\ \hline M - \frac{1}{M} - \frac{(1 - \frac{1}{M})^2}{M - \frac{1}{M}} & 1 - \frac{1}{M} - \frac{(1 - \frac{1}{M})^2}{M - \frac{1}{M}} & \dots & 1 - \frac{1}{M} - \frac{(1 - \frac{1}{M})^2}{M - \frac{1}{M}} & & & & \\ \vdots & & & & & & & \end{array} \quad \left(k_0 = \frac{1}{M} \right)$$

$M \geq 2$ 이면 $|k_i| < 1$ ($i=0, 1, \dots, n-M-1$)이 된다. 즉, HORIZON M의 크기가 $2 \leq M \leq n$ 이면 폐회로 시스템은 안정(stable)하게 된다.

정상상태오차 (steady-state error):

폐회로 시스템 (3.11)의 블록선도는 그림4와 같다.

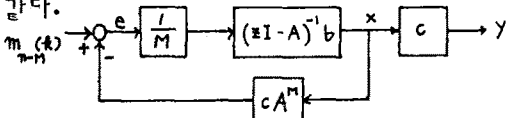


그림4. 폐회로 시스템의 블록선도

그림 4에서 명령신호 $m_{n-M}(k)$ 와 오차 $e(k)$ 의 관계는

$$e = F(z)m_{n-M} \quad (3.13)$$

$$F(z) = \frac{1}{1 + \frac{1}{M}cA^M(zI - A)^{-1}b} \quad (3.14)$$

로 주어짐을 알수 있다.

따라서, 안정한 시스템 (3.11)의 정상상태 오차는

$$\lim_{z \rightarrow 1} (1-z^{-1})F(z) \\ = \lim_{z \rightarrow 1} (1-z^{-1}) \frac{M \cdot z^{n-M}}{M \cdot z^{n-M} + z^{n-M-1} + z^{n-M-2} + \dots + z + 1} \\ = 0$$

가 됨을 알수 있다.

(3) 안전 소결시간 추정 알고리즘

실제 소결 공정에서 소결기를 다 통과한 소결 물질의 안전소결시간은 그 물질의 안전 소결점 위치와 과거 소결기 속도로 부터 계산해 낼 수 있지만, 제어 대상인 소결 물질 즉, 안전 소결이 아직 이루어지지 않은 소결물질의 안전소결 시간은 알 수 없는 값이다. 따라서, 본 논문에서는 Least-squares with covariance resetting^[15] 방법을 사용하여 안전 소결시간을 추정한다.

이를 위해 안전 소결 시간이 다음과 같은 AR 모델에서 생성되는 것으로 생각한다.

$$m(k+1) - m_0 = \alpha(k)(m(k) - m_0) + \beta(k)(m(k-1) - m_0) + w(k) \quad (3.15)$$

식 (3.15)에서 m_0 는 과거 안전 소결시간들의 평균치이고 $w(k)$ 는 백색잡음이다.

안전 소결시간의 추정치는 다음과 같다:

$$m(k+1) = \hat{\alpha}(k)(m(k) - m_0) + \hat{\beta}(k)(m(k-1) - m_0) + m_0 \quad (3.16)$$

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{P(k-2)\phi(k-1)}{1 + \phi(k-1)^T P(k-2)\phi(k-1)} (m(k) - \phi(k-1)^T \hat{\theta}(k-1)) \quad (3.17)$$

$$P(k-1) = P(k-2) - \frac{P(k-2)\phi(k-1)\phi(k-1)^T P(k-2)}{1 + \phi(k-1)^T P(k-2)\phi(k-1)} \quad (3.18)$$

$$\phi(k)^T = [m(k) - m_0, m(k-1) - m_0] \quad (3.19)$$

$$\theta(k) = \begin{bmatrix} \alpha(k) \\ \beta(k) \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

4. 현장 실험

본 논문에서 개발된 제어기의 블록선도는 그림5와 같다. 그림5의 제어기를 포철 소결공정에

적용한 현장 실험 결과는 그림 6 과 그림 7 에서 보 이고, 실험시 사용된 매개변수 값들을 표 1 에 보 였 다.

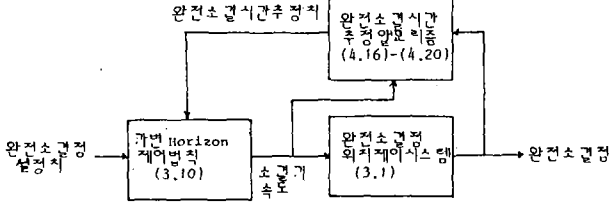


그림 5. 제어기의 구조

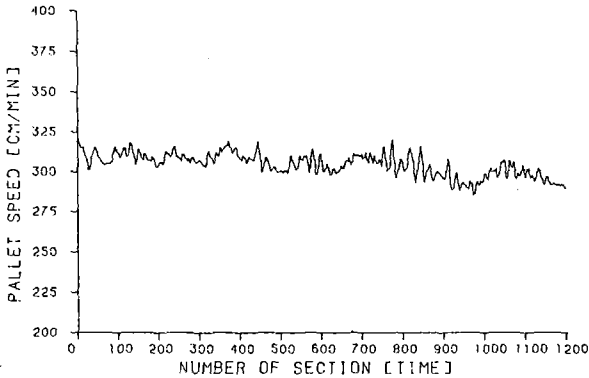


그림 6. 현장실험 결과 소결기 속도

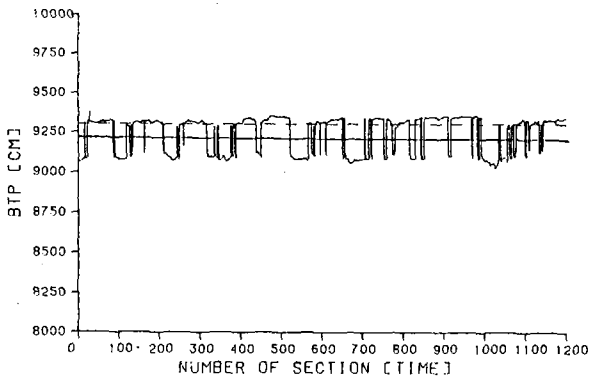


그림 7. 현장실험결과 안전소결점위치

표 1. 현장실험에 쓰인 매개변수 값

매개 변수	값	참 조
$\hat{\alpha}$ 초기값	0.6	식 (3.16)
$\hat{\beta}$ 초기값	0.3	식 (3.16)
P(1,1) 초기값	0.003	식 (3.18)
P(1,2) 초기값	0.001	식 (3.18)
P(2,1) 초기값	0.001	식 (3.18)
P(2,2) 초기값	0.002	식 (3.18)
covariance resetting 주기	20 단 개	식 (3.18)
창문 개수 N	50	그림 2-a
안전소결점설정 위치	92.2 m	그림 2-a

그림 6 및 그림 7 을 보면 소결기 속도는 약 2.85 m/min에서 3.2m/min 사이의 값을 갖고 변하고 있 으며, 안전 소결점은 설정위치인 92.2m 에서 $\pm 1.5m$ 폭 내에 발생하게 됨을 알 수 있다. 즉, 안전소 결점 위치 변동은 3m 정도이므로 풍상 하나의 폭 (4m) 밖으로 벗어나지 않으며 소결기 속도의 변화 폭도 약 0.35m/min 이므로 공급조레벨에 미치는 영향도 그리 크지 않을 것이라 예상되므로 전체 시스템의 안정확도 이룰 수 있다고 생각된다.

또, MANUAL 조업 결과와 비교해보면 MANUAL 조업 에서 생기는 현상인 DC 드리프트 현상도 없어짐을 알 수 있다.

그림 8 에 조업 데이터로부터 계산된 안전소결시간 실제 값과 추정 결과인 추정값을 보였다.

안전소결시간 실제값의 계단 변화는 일종의 개장 상의 이상상태 때문이며, 이 이상상태가 없어진 다 면 훨씬 나은 추정 성능을 보이리라 예상되며, 따 라서 소결기 속도 및 안전소결점 위치의 제어결과 도 훨씬 나아질 것이다.

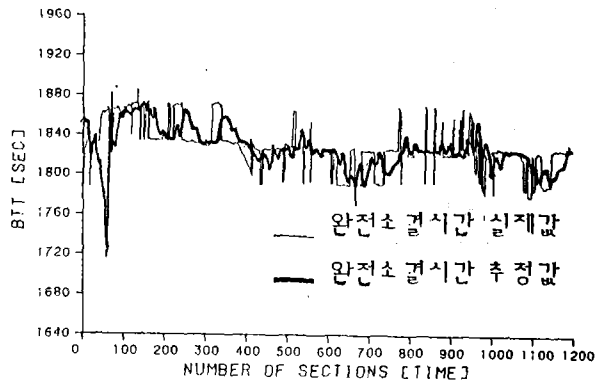


그림 8. 안전소결시간 실제값과 추정치의 비교

6. 결론

소결공정에서의 안전 소결점 위치제어 시스템의 모델 및 제어 알고리즘을 개발하고 현장 실험 결과 를 보였다.

안전 소결점 위치제어 시스템은 선형시불변 이산 시간 상태 공간 모델로 나타내어 짐을 보였다. 이 모델의 특징은 통기도 대신 안전 소결시간이라는 정보량을 사용하므로, 통기도의 측정이 필요없다는 것이다.

제어 알고리즘은 출력에 제한이 있는 가변HORIZON 제어법칙과 안전 소결 시간을 추정하기 위한 least-squares with covariance resetting 알고리즘의 결합으로 구성되며, 현장실험 결과로부터

만족할만한 성능을 보임을 알 수 있었다.

끝으로, 본 연구 수행과정에서 제어알고리즘의 실장 및 현장실험에 조언과 협력을 아끼지 않으신 포항 제철의 김신정, 김달연 부장, 신영만 공장장, 백기남 과장, 김대원 계장 그리고, 제 4 소결 운전팀 및 조업팀들께 깊은 감사를 드린다.

참 고 문 헌

1. P.W.Roller and B.A.Firth, " Granulation of iron ore sinter feeds", Trans. ISIJ, vol. 22, 1982, B78
2. G.S.Hegedus, " Improving sinter quality through raw material control ", I & SM, vol. 8, 1981, 41-45
3. 山田孝雄, "高炉低燃料比達成のための原料性状と原料処理技術について", 鉄と鋼, 66, 1980, A125
4. S.Sato, M.Yoshinaga, M.Ichidate and T.Kawaguchi, " Consideration on the granulation and the bed-permeability model of sinter raw material ", Tetsu-to-Hagae, 68, 1982, 2174-2181
5. 石川泰, 菅原欣一, 野坂席二, 仙崎武治, 津田勉久, "若松 DLにおける二段装入操について", 鉄と鋼, 65, 1979, S518
6. A.F.Ogg, P.I.Seaton and L.Hodgson; Preprint of AIME anual meeting 1980
7. Tatoeba, C.L.Corre, B.Kayser, D.Janlin, J.C.Celeski; Preprint of 3rd International Agglomelation Symposium 1981
8. E.Stephenson and P.Reid, " Low energy and power consumption for sintering at the redcar works of the British Steel Corporation ", I & SM, vol.9, 1982, 18-23
9. N.Tanaka, " Waste heat recovery from sintering plants ", Trans. ISIJ, vol.20, 1980, 200-203
10. R.W.Young, " Dynamic mathematical model of sintering process ", Ironmaking & Steel-making, 1978, 25-31
11. I.R.Dash and E.Rose, " Simulation of a sinter strand process ", Ironmaking and Steelmaking, 1977, 321-328
12. R.W.Lewis et al., Numerical Methods in Heat Transfer, vol. II, 1983, John Wiely & Sons Inc., 485-510
13. W.H.Kwon and A.E.Pearson, " A Modified Quadratic Cost Problem and Feedbach Stabilization o a Linear System ", IEEE Trans. Autom. Contr., vol. AC-22, 1977, 838-842
14. W.H.Kwon, A.M.Bruckstein and T.Kailath, " Stabilizing State-Feedback Design via the Moving Horizon Method ", Int. J. Contr., vol. 37, 1983, 631-643
15. G.C.Goodwin and K.S.Sin, Adaptive Filtering, Prediction and Control; 1984, Marcel Dekka, New-York