

# 乾式 시멘트 燒成爐의 模寫

金 松 虎 · 李 元 奎

〈東洋세멘트 三陟工場〉 〈韓國科學技術院〉

## 1. 서 론

시멘트 제조 공정에 있어서 소성로(kiln)의 특성 파악이 중요한 문제이지만 소성로의 고온운전, 실험실 규모의 실험장치 곤란, 적절한 측정장치의 결여, 다변수 등으로 소성로에 대한 연구는 답보 상태를 면치 못하고 있다. 본 연구는 화학공학적인 면에서 소성로의 체계적인 연구를 위한 기초 연구에 그 목적이 있다.

우선 건식 시멘트 소성로의 운전 단계를 (1) 가열 단계(heat-up) (2) 전이 단계(transient state) (3) 정상 상태(steady state)로 나누고 이 중 해석이 비교적 용이한 가열 단계와 정상 상태에 대해서 검토하였다. 기준 자료는 동양세멘트 삼척공장 3호 소성로를 대상으로 취하였다.

## 2. 가열 단계

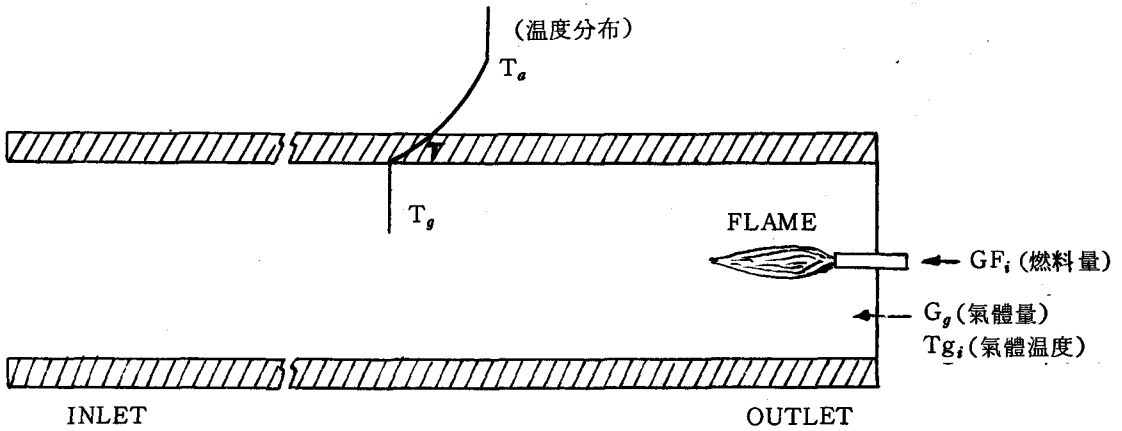
### 1) 동기 및 목적

연화에 손상을 주지 않으면서, 될 수 있는대로 연료를 적게 사용하여 원하는 상태까지 가열하는 최적 제어(optimum control)에 대해 검토하였다.

### 2) 수식 전개

가열 단계에서의 소성로의 개략적인 모양을 〈그림-1〉에 나타냈다. 버너(burner)에서 연료의 연소에 의해 생긴 열은 대부분 키른 Inlet 를 통해 Preheater 를 거쳐 빠져 나가지만 일부는 그림과 같은 온도 분포 곡선을 나타내면서 벽면을 통해 빠져 나간다. 즉 21cm 정도의 내화연화를 중심으로 고온(1500°C 이상)의 공기에서 찬 대기(약 20°C)로 열 전달이 일어나 연화내 온도 구배(temperature gradient)가 커서 열 팽창에 의한 연화 손상의 우려가 생긴다. 또한 다량의 연료가 소모되므로 가능한 한 연료를 적게 사용하여 가열 목적을 달성 할 필요가 생기게 된다.

주어진 계(system)에서 열 수지식(heat balance)으로부터 연료량 분포( $G_F$ ), 기체 온도( $T_g$ ), 벽 내부 온도( $T$ )에 대한 3개의 식을 얻게 된다. 이 식들은 비선형 편미분 방정식이므로 제어 이론에 이용하기 위해서는 선형 상미분 방정식으로 고치는 것이



<그림-1> 시멘트 燒成爐 概略圖(加熱段階)

편리하다. 따라서 가열 최종 상태에서의 계산(simulation) 결과에 의해 여러 가정들에 대한 타당성을 검토한 후 식을 간단히 하여 외벽 온도가 공급연료량의 함수로 나타나도록 한 후, 최종적으로 반경 방향에 대해 orthogonal collocation 하였다. 그런데 이 식들을 최적 제어 이론에 이용하기 위해서는 가열 최종 상태에 대한 편차 변수로 나타내는 것이 편리하다. 즉 상태 함수는

$$\frac{dx}{dt} \equiv X = AX + BU + C \dots\dots\dots(1)$$

여기서 X : 상태 변수(축 방향 각 지점에서의 외벽 온도 편차) =  $T_3 - T_{3f}$

U : 제어 변수(공급 연료량) =  $G_{Fi}$

제약 변수 즉 내벽 온도 구배는

$$\frac{dx}{dr^*} \equiv \hat{X} = PX + DU + E \dots\dots\dots(2)$$

가 된다. 여기서 A, B, C, P, D, E 는 상수 행렬(constant matrix)이므로 (1)식에서 U를 제어(control)함에 따라 X(상태 변수=외벽 온도 편차 변수)가 시간의 함수로 나타나고 이렇게 정해진 U, X에 따라 (2)식에 의해 내벽 온도 구배 편차 변수  $\hat{X}$ 가 정해진다.

위 두 식을 이용하여 최초로 설정한 목적 즉, 연외에 손상을 주지 않으면서 최소의 연료를 사용하여 원하는 온도까지 가열하기 위해서 다음과 같은 형태의 목적 함수(objective function)를 최소화 시킨다.

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

여기서 Q, R, S : 비중 행렬(weighting matrix).

첫째항( $\hat{X}^T Q \hat{X}$ )은 연외에 손상을 주지 않기 위해 내벽 온도 구배를 최종 상태로 유

지하기 위한 항이고,

들췌항( $U^T R U$ )은 연료를 적게 사용하기 위한 항이고,

세췌항( $X^T S X$ )은 원하는 상태까지 가열하기 위한 항이다.

여기서 조절할 수 있는 것은  $t_f, Q, R, S$ 이고  $t_f$ 는 가열하는 시간을 나타내고,  $Q$ 는 연화에 대한 손상,  $R$ 은 최소 연료,  $S$ 는 가열 상태에 대한 비중을 나타낸다. 이렇게 주어진 (1), (2), (3)식에 의해 Hamiltonian 을 풀면 된다.<sup>[1][3]</sup>

### 3) 결과 및 검토

비중 행렬  $Q, R, S$ 는 상대적인 크기만 의미가 있으므로,  $t_f, S/R, Q/S$ 의 변화에 따른 제어 효과를 <그림-2> <그림-3> 및 <그림-4>에 나타냈다. 여기서 상태 변수 ( $X$ ) 및 제약 변수( $\hat{X}$ )는 화염대에서 중요하므로  $Z^* = 0.85, 0.90, 0.95$ 에서의 값을 취했다. 지면 관계상 다른 결과는 생략하고  $S/R = 1, t_f = 15 \text{ hr}$  일 때  $Z^* = 0.9$ 에서의 상태 변수(외벽 온도 편차,  $X$ )와 제약 변수(내벽 온도 구배 편차,  $\hat{X}$ ) 및 제어 변수(공급 연료량,  $U$ )를 시간의 함수로 나타냈다.<그림-2>에서 볼 수 있듯이 상태 변수 ( $X$ )는  $Q/S$ 가 커짐에 따라 0에 가까워진다. 즉 최종 상태에 빨리 도달하는 것보다 연화에 손상을 주지 않는 것에 비중을 많이 둔 경우가 오히려 최종 상태에 빨리 도달하게 된다. 그 이유는 (2)식에서 보듯이 제약 변수( $U$ )가 상태 변수( $X$ )의 함수이므로 연화에 손상을 주지 않는 것에 비중을 두면 동시에 최종 상태에 빨리 도달하는 것에도 비중을 두는 결과가 되는 것이다.

<그림-3>에서  $Q/S$ 가 커짐에 따라 제약 변수는 0으로 유지된다. 즉 외벽 온도 구배가 최종 상태로 유지된다.

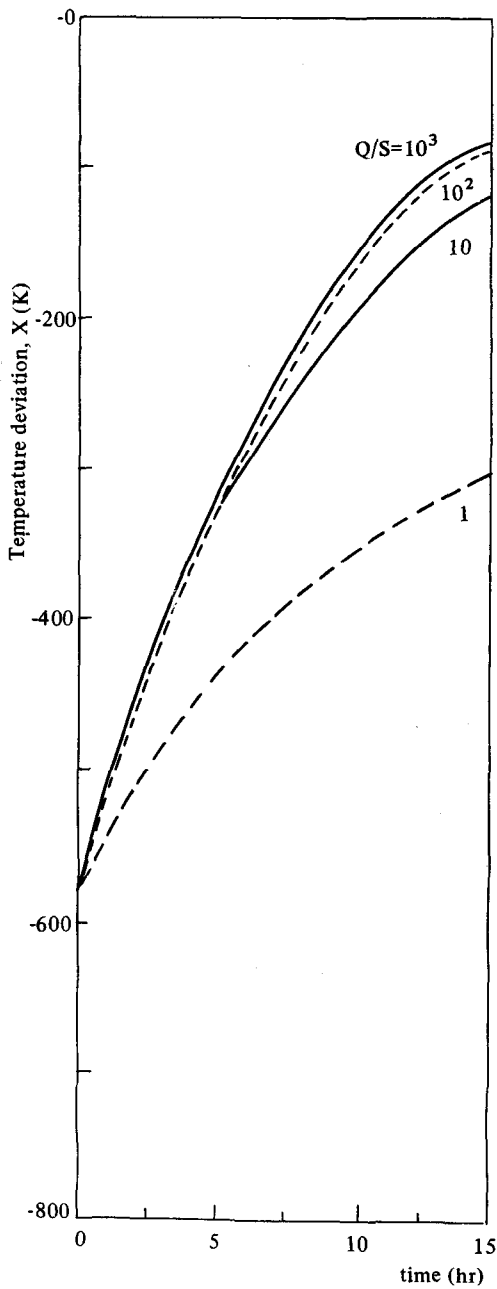
<그림-4>에서  $Q/S$ 가 커지면 연료가 많이 소모된다는 것을 알 수가 있다.

종합해 보면  $t_f$ 가 커지면 온도는 최종 상태에 가까워 지나 연료 소모가 많아지므로 허락되는 최소의 상태에 맞게  $t_f$ 가 정해져야 한다. 비중 행렬의 경우는 상대적으로  $Q$ 가 클 수록 즉 연화에 손상을 주지 않는 것에 비중을 많이 두는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다. 결론적으로  $t_f = 15 \text{ hr}, S/R = 1, Q/S = 10^3$ 인 경우를 바람직한 최적 제어 경우로 제시하고, 연료량 곡선에 대해 이를 공장 조업 자료와 비교한 것이 <그림-5>이다. 그림에서 실제 공장 조업은 최적 제어 곡선을 중심으로 많은 시행 착오를 범하고 있음을 알 수 있으며 특히 2~4시간, 11~14시간 사이에서는 연화에 손상을 입을 우려가 있다는 것을 알 수 있다.

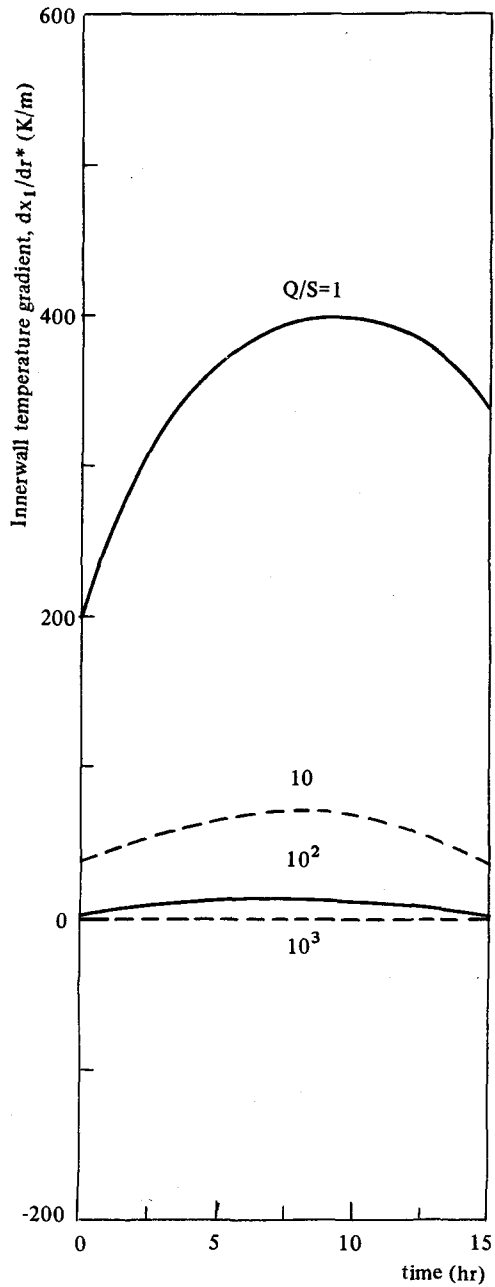
### 4) 음 용

최적 제어는 위의 결과에 의해서도 실제 조업에 응용 가능성이 충분히 있음을 알 수 있으나 다음 사항들의 개선에 의해 더욱 바람직한 결과를 얻을 수 있으리라 생각된다.

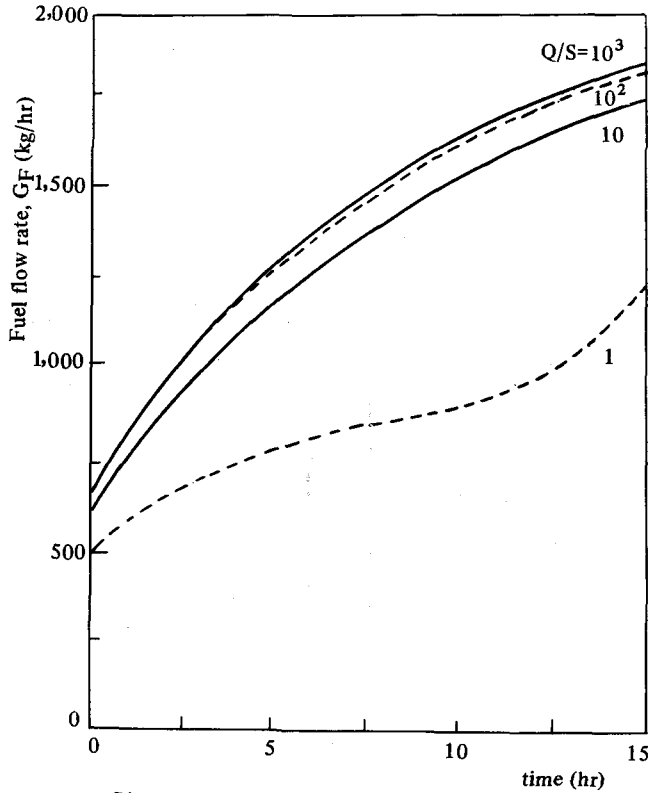
① 식의 유도에 있어서 도입된 많은 가정들을 개선하고,



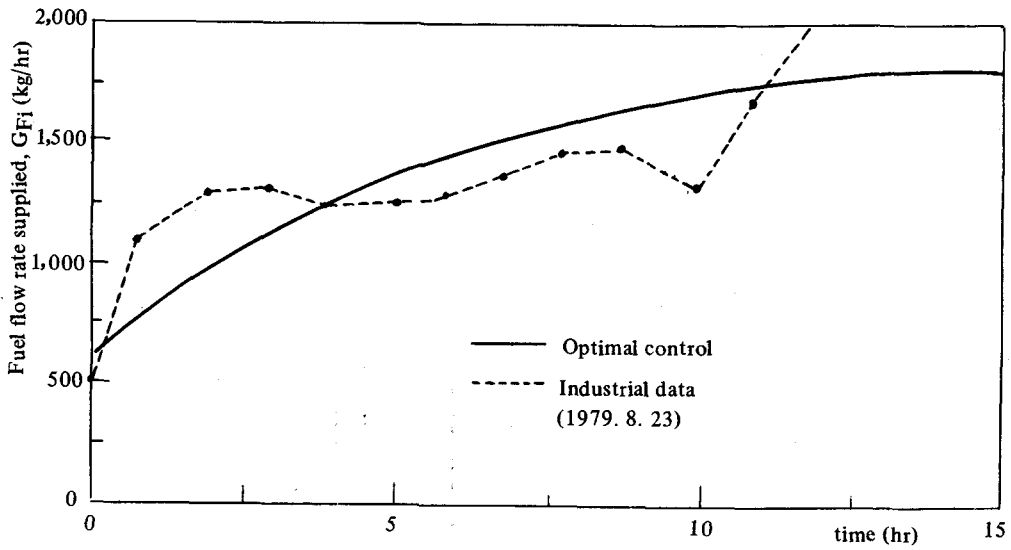
<그림 - 2> Temperature deviation from final state at  $z^*=0.9$  when  $S/R=1$  and  $t_f=15$  hr.



<그림 - 3> Innerwall temperature gradient from final state at  $z^*=0.9$  when  $S/R=1$  and  $t_f=15$  hr



<그림 - 4> Fuel flow rate when  $S/R=1$  and  $t_f=15$  hr



<그림 - 5> Comparison of fuel flow rate supplied between optimal control and industrial data

- ② 단순화·선형화 과정 등에서 생기는 오차를 줄일 수 있는 방법을 모색하고,
  - ③ 실제제를 반영(adaptation)시킬 수 있는 제어방법에 대한 연구가 있어야 하겠다.
- 이들 중 ①, ②항은 복잡성에 비해 큰 효과를 기대할 수 없으므로 ③항에 대한 연구가 바람직하다고 생각된다.

3. 정상 상태

1) 반응<sup>[2]</sup>

온도(°C)	반응	반응열
100	水分 증발	흡열
> 850	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$	흡열
1200	$2CaO + SiO_2 \rightarrow C_2S$	발열
1250	액상형성	
	$4CaO + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \rightarrow C_4AF$	흡열
	$3CaO + Al_2O_3 \rightarrow C_3A$	흡열
>1250	$2CaO + SiO_2 \rightarrow C_2S$	발열
	$C_2S + CaO \rightarrow C_3S$	흡열

2) 수식<sup>[4]</sup>

(가) 가정

- ① 클링커(clinker) 주요 성분만 다룬다.
- ② 플러그 플로우 모델(plug flow model)
- ③ 코우팅(coating) 현상 무시—소성로 내경 일정
- ④ 물리 화학적 성질=일정
- ⑤ 반응 속도: Arrhenius 식
- ⑥ 기타

(나) 물질 및 열 수지식

$$* 13 \text{ 개 식 } \left\{ \begin{array}{l} \cdot \text{ 원료 성분 } \dots C, A, S, F, CaCO_3 \\ \cdot \text{ clinker 성분 } \dots C_2S, C_3S, C_3A, C_4AF \\ \cdot \text{ 온도 } \dots \text{ 기체, 벽, 고체} \\ \cdot \text{ 연료} \end{array} \right.$$

3) 결과 및 검토

① 정상 상태에서의 온도 및 농도 분포는 <그림-6> 및 <그림-7>에 나타났다. <그림-6>에서 화염 길이는 약 10 m 정도가 되고, 온도 변화는 이 화염대 부근에서 가장 심하고, 그 전 부분에서는 단순한 열 교환만 일어난다는 것을 알 수 있다. <그림-7>

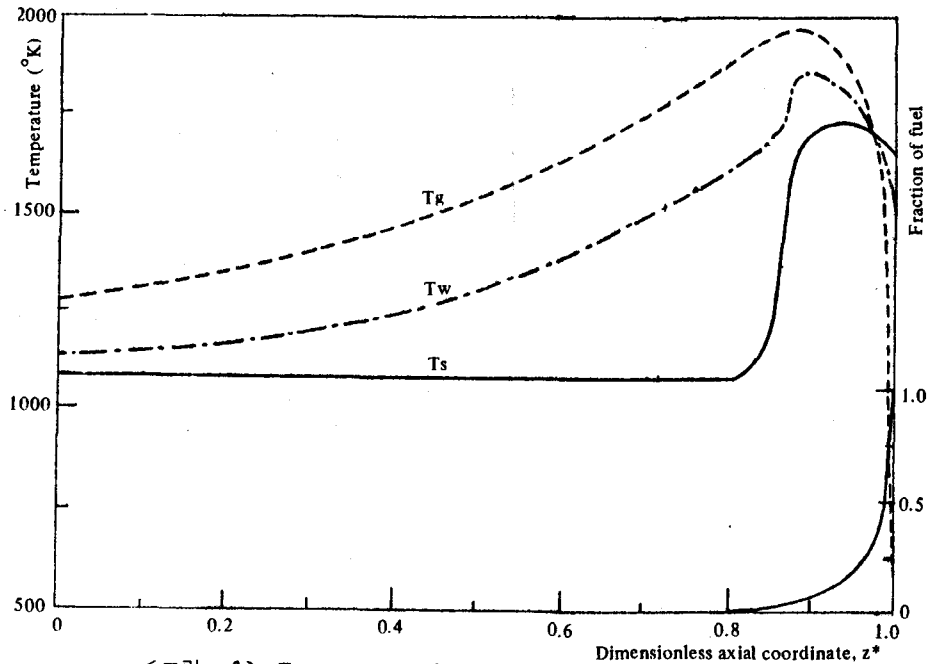
에서 대부분의 반응은 화염대 부근에서 일어나고 그 전 부분에서는 단순히  $\text{CaCO}_3$  분해반응만이 일어난다는 것을 알 수 있다.

다시 말해서  $\text{CaCO}_3$ 의 분해반응을 소성로와 같은 비효율적인 열 교환기를 쓰는 것보다, 효율적인 반응로를 사용하여 미리  $\text{CaCO}_3$  분해반응을 충분히 시킨다면 같은 생산량의 경우 소성로의 길이를 짧게, 같은 소성로의 경우 생산량을 훨씬 늘릴 수 있고, 생산 효율도 높일 수 있다.

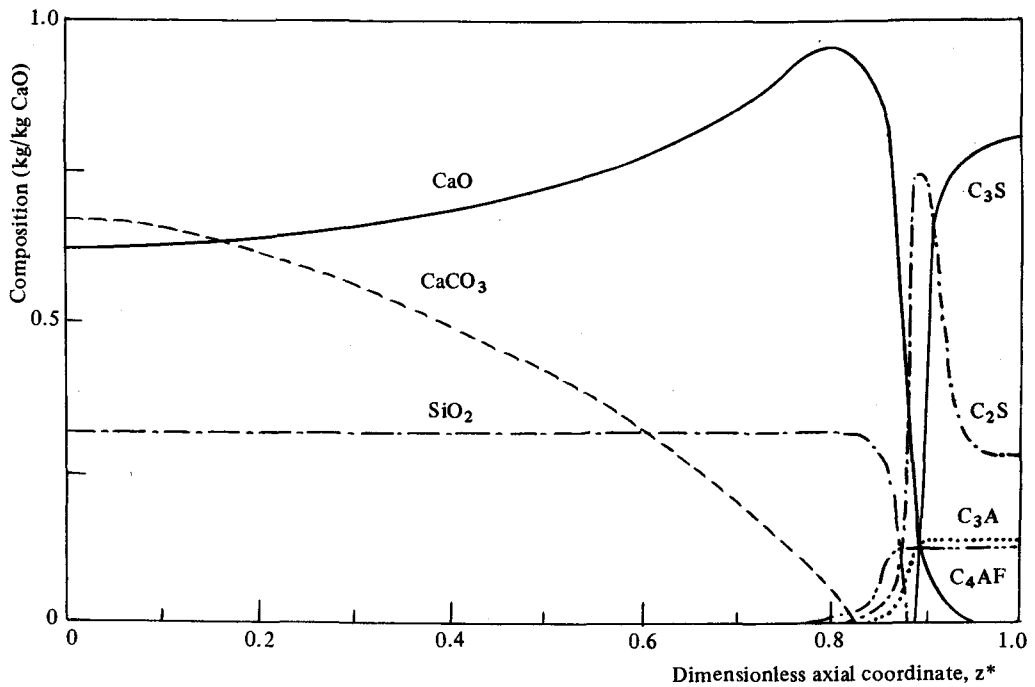
② 소성로의 특성 파악을 위해 여러가지 조건 변화에 따른 결과를 관찰하였으나 가정이 많은 탓으로 실제제와 잘 부합되지 못했다.

4) 용 용

- ① 정상 상태의 결과는 운전, 설계 및 공정개선 등에 이용 가능하고,
- ② 동 특성파악에 있어서는 제의 복잡성에 의해 실제제와 동떨어진 결과를 나타냈고, 또한 계산시간 과다로 인해 통제적인 방법에 의한 동 특성파악 및 제어가 바람직하고,
- ③ 아울러 통제적인 실험계획에 의해 운전 최적 조건을 찾는 문제도 고려될 수 있으며,
- ④ 소성로내 고체의 긴 체류시간(약 4 시간) 때문에 feed forward 제어 즉 원료제어가 최선의 방법이라 생각된다.



<그림 - 6> Temperature and fuel concentration profile at steady state



<그림 - 7> Chemical composition profile at steady state

### 參 考 文 獻

- 1) Athans, M. and P.L. Fald, "Optimal Control", McGraw-Hill, New York, 1966.
- 2) Lea, F.M., "The Chemistry of Cement and Concrete", 3rd ed., Chem. Pub. Co. Inc., New York, 1971.
- 3) Sages, A.P. and C.C. White, III, "Optimum System Control", Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1977.
- 4) Spang, H.A. "A Dynamic Model of a Cement Kiln", Automatica, 8, 309-323 (1972).
- 5) Taylor, H.F.W., "The Chemistry of Cements", 2nd ed., Vol. I & II, Academic Press, London, 1964.