

적응최적시간제어를 사용한 전기로의 온도제어

Temperature Control of Electric Furnaces using Adaptive Time Optimal Control

전봉근¹, 송창섭², 김영탁²
BongKeun Jeon¹, ChangSeop Song² and YoungTag Keum²

¹ 한양대학교 메카트로닉스·시스템공학과 (Department of Mechatronics·System Engineering, Hanyang Univ.)

² 한양대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.)

✉ Corresponding author: hanlover69@naver.com, Tel: 02-2220-0433

Manuscript received: 2008.12.2 / Accepted: 2009.2.2

An electric furnace, inside which desired temperatures are kept constant by generating heat, is known to be a difficult system to control and model exactly because system parameters and response delay time vary as the temperature and position are changed. In this study, the heating system of ceramic drying furnaces with time-varying parameters is mathematically modeled as a second order system and control parameters are estimated by using a RIV (Recursive Instrumental-Variable) method. A modified bang-bang control with magnitude tuning is proposed in the time optimal temperature control of ceramic drying electric furnaces and its performance is experimentally verified. It is proven that temperature tracking of adaptive time optimal control using a second order model is more stable than the GPCEW (Generalized Predictive Control with Exponential Weight) and rapidly settles down by pre-estimation of the system parameters.

Key Words: Recursive Instrumental-variable Method (RIV 기법), Electric Furnace (전기로), Adaptive Time-optimal Control (적응최적시간제어), Modified Bang-bang Control (변형된 뱅뱅제어)

1. 서론

나노 세라믹 제품을 건조하는 경우, 건조 속도가 너무 빠르거나 불안정하면, 제품내의 불 균일한 수축과 압력에 의하여 균열이 발생하게 된다. 이러한 균열을 방지하기 위하여 건조온도를 안정하게 제어해 줄 필요가 있다. 하지만, 전기로 시스템은 전기로 주위의 온도와 동작 점의 변화에 따라 시스템 변수와 응답지연시간이 변화하는 특성을 가지고 있기 때문에 실질적으로 시스템을 모델링하고 제어 하기가 상당히 어려운 시스템이다.

일반적으로 온도 공정 및 일반 산업분야에서의 제어 방식으로 PID 제어가 많이 사용되고 있다. 하지만 공정의 동특성이나 환경의 변화가 있을 때

마다 작업자가 경험적으로 PID 제어 파라미터들을 다시 튜닝(tuning)하는 단점이 있다. 그래서 공정의 동특성이나 환경의 변화에 따라 그 파라미터를 자체적으로 튜닝 할 수 있는 적응제어 기법이 도입되었다.^{1,2}

그 동안 많은 학자들이 전기로의 온도제어에 대하여 연구하였다. 우선, Lee³ 와 Huh⁴ 는 연속시간에서의 STC(Self Tuning Controller)를 제안하였으며, Huh⁴와 Kim⁵ 은 RHPCEC(Receding Horizon Predictive Control with Equality Constraint)를 이용한 적응제어를 제안하였고, Kim⁵ et al. 은 GPCEW(Generalized Predictive Control with Exponential Weight)를 이용한 적응예측제어기법을 제안하였다. 앞서 언급한 기존의 연구자들은 공통적으로 전기로 시스템을 1차 시스템으로 모델링하고 있다.³⁻⁵ 하지만, 만약

전기로 시스템의 고유진동수가 아주 작다면, 전기로 시스템은 최소한 2 차 시스템으로 모델링 해야 한다.

본 연구에서는, 전기로 시스템을 2 차 시스템으로 모델링 하였으며, RIV(Recursive Instrumental-Variable) 기법과 작동점 부근에서 온도를 정밀하게 제어하기 위하여 최대크기를 보정한 변형된 뱅-뱅 제어 기법을 적용한 ATOC(Adaptive Time Optimal Control) 기법을 제안하였다.

마지막으로 본 연구에서 제시한 방법의 실험 결과와 기존의 GPCEW⁵ 방식의 실험 결과를 비교 분석하였다.

2. 전기로의 수학적 모델링

2.1 전기로의 특성

전기 가열로는 Fig. 1 과 같이 가열로의 주위를 싸고 있는 단열재(insulating material)와, 내화벽돌(firebrick)내에 위치한 6 개의 가열코일들, 가열로의 중앙에 위치한 시험시료의 3 부분으로 구성되어 있다.

전기 가열로의 동특성을 파악하기 위하여, 개루프 상태에서 실험과 MATLAB 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 각각 1 차 시스템과 2 차 시스템으로 가정하여 수행하였으며, 시뮬레이션에 사용된 시스템 파라미터는 파라미터 추정기법을 사용하여 추정된 값을 사용하였다.

Fig. 2 는 0.0288kcal/s 로 계단함수를 사용하여 실험한 결과이다. Fig. 2 에서 시스템이 안정상태가 되는데 약 100000 초가 소요되는 것을 볼 수 있다. 하지만, 목표온도에 빨리 도달하기 위하여 전기로의 최대 출력으로 가열하는 경우 2000 초가 되기 전에 목표온도에 도달하게 된다.

Fig. 3 은 전기가열로를 최대 파워로 가열하는 경우의 동특성을 분석하기 위하여 초기 500 초 동안에 전기가열로에서 가능한 최대의 파워(0.72 kcal/s)로 가열한 경우의 실험과 시뮬레이션 결과이다.

Fig. 3 의 실험결과에서 다음의 2 가지 중요한 특성을 볼 수 있다.

가. 초기 가열시작 지점에서 실험 결과 그래프의 기울기가 점진적으로 증가하는 추세로 형성되는 것을 볼 수 있다. 그런데, 이런 현상은 2 차 이상의 시스템에서 나타나는 현상이다.

나. 500 초 이후에 실험 결과 그래프에서는

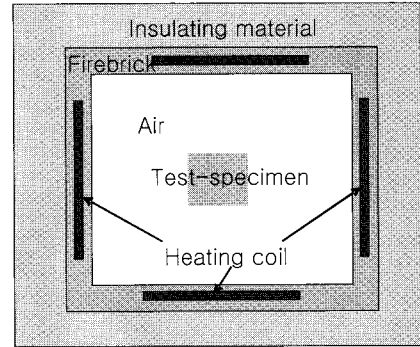


Fig. 1 Schematic diagram of an electric furnace

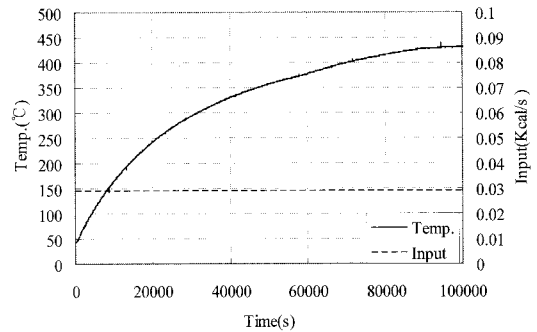


Fig. 2 Experimental result of step heating-input

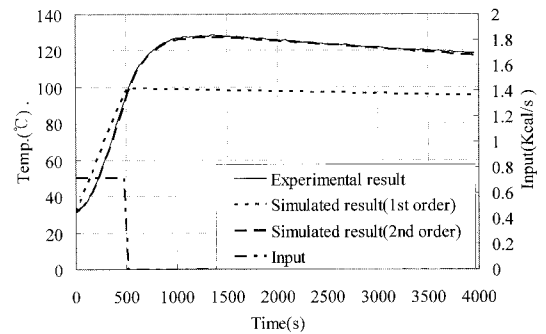


Fig. 3 Comparison between experimental and simulated results to heating-input with 500 second duration

1200 초까지 온도가 계속 상승하는 현상을 보이고 있다. 만약, 이 시스템이 1 차 시스템이면 500 초에서 입력이 0 가 되므로 500 초부터 온도가 감소되기 시작하여야 한다.

위의 2 가지 현상을 통하여 전기가열로 시스템은 최소한 2 차 이상의 시스템으로 과감쇠를 가지는 시스템인 것을 추론할 수 있다. 본 연구에서는 전기로 시스템을 2 차 시스템으로 가정하였다.

2.2 전기로의 수학적 모델링

전기로 시스템에 대하여 다음의 가정하에 모델링을 진행하였다.

첫째, 가열코일의 주위에 있는 내화벽들의 두께가 얇으므로 가열코일과 내화벽들의 온도가 전체적으로 동일한 것으로 가정한다.

둘째, 전기로 내부인 내화벽들과 시험시료의 사이에는 일반 공기로 채워져 있으며, 공기의 대류에 의하여 전체적으로 동일한 온도를 형성하는 것으로 가정한다.

상기의 가정을 바탕으로 모델링하는 일 단계로 가열코일 주변의 에너지 보존 공식을 다음과 같이 표현할 수 있다.⁵

$$C_c \frac{dh(t)}{dt} = p(t) - \frac{\{h(t) - h_a(t)\}}{R_i} - \frac{\{h(t) - y(t)\}}{R_c} \quad (1)$$

$$= -\left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_c}\right)h(t) + \frac{1}{R_c}y(t) + u(t)$$

여기서, C_c 는 가열코일 주위에 위치한 내화벽들의 열용량이며, R_i 는 단열체의 열저항, R_c 는 내화벽들의 열저항, $p(t)$ 는 가열코일에 의하여 공급되는 열량, $h(t)$ 는 내화벽들 주위의 온도, $y(t)$ 는 전기로 내부의 온도, $h_a(t)$ 는 전기로 주위의 온도, $u(t)$ 는 전기로 시스템에 공급되는 총열량이다.

(1)의 라플라스 변환을 구하면 (2)와 같이 된다.

$$\left(C_c s + \frac{R_i + R_c}{R_i R_c}\right)H(s) - \frac{1}{R_c}Y(s) = U(s) \quad (2)$$

다음 단계로 전기로 내부의 공기층의 온도는 다음 식과 같이 모델링 되어진다.

$$C_a \frac{dy(t)}{dt} = \frac{\{h(t) - y(t)\}}{R_c} \quad (3)$$

여기서, C_a 는 가열코일 주위에 위치한 내화벽들의 열용량이다.

(3)의 라플라스 변환을 구하면 (4)와 같이 된다.

$$H(s) = (R_c C_a s + 1)Y(s) \quad (4)$$

그러므로 공급열량 $u(t)$ 와 시험시료의 온도 $y(t)$

사이의 전달함수, $G(s)$ 는 식(2)에 식(4)를 대입하여 계산하면 식(5)와 같이 구해진다.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5)$$

$$\text{여기서, } \omega_n = \frac{1}{\sqrt{R_i R_c C_a C_c}},$$

$$\xi = \frac{(R_i + R_c)C_a + R_i C_c}{2\sqrt{R_i R_c C_a C_c}},$$

$$K = \frac{1}{R_c C_a C_c}.$$

전달함수 $G(s)$ 를 ZOH (Zero Order Hold)를 사용하여 이산화하면, 이산전달함수 $G(z^{-1})$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$G(z^{-1}) = (1 - z^{-1})Z \left[\frac{\gamma_c^2 \psi^2 / C_c}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \right] \quad (6)$$

$$= \frac{b_0 z^{-1} + b_1 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}$$

제어온도가 바뀌는 경우, 열에 대한 재질의 물성치인 R_c 와 R_i 가 변하게 되며, 그로 인하여 (5)에서 감쇠계수 ξ 와 고유주파수 ω_n 이 변하게 된다. 즉, 시스템의 주요 파라미터가 온도에 따라 변하므로 정확한 모델링이 어렵다.

전기로 시스템은 매우 느린 시스템이므로 많은 연구에서 전기로 시스템을 1 차 시스템으로 모델링 하여 연구가 진행되었다. 하지만, 1 절에서의 실험 결과와 같이 시스템의 고유주파수 ω_n 이 전기로 내부 온도가 목표 온도까지 도달하는 시간의 역수보다 작은 경우, 가열로 시스템은 2 차 시스템으로 모델링 되어야 한다.

3. 가중계수를 가지는 일반형 예측 제어^{6,7}

모델 예측 제어는 모델을 근거하여 예측식을 구성한다. 또한, 취한 모델이 얼마나 잘 표현 하는냐에 따라 전체 시스템의 강인성에도 영향을 주므로 효과적인 모델의 선정은 중요하다. GPC

(Generalized Predictive Control)에서 고려한 입력 $u(t)$ 와 출력 $y(t)$ 사이의 모델은 다음과 같은 CARIMA(Controlled Auto-Regressive Integrated Moving Average)모델이다.

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-1) + C(q^{-1})\xi(t)/\Delta \quad (7)$$

여기서, $\xi(t)$ 는 상관관계가 없는 임의의 신호이며,

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_nq^{-n} \\ B(q^{-1}) &= b_0 + b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_mq^{-m} \\ C(q^{-1}) &= 1 + c_1q^{-1} + c_2q^{-2} + \dots + c_nq^{-n} \end{aligned}$$

그리고 $\Delta = 1 - q^{-1}$ 이다.

연산을 간단하게 하기 위하여, $C(q^{-1})=1$ 로 가정하면, 일반적인 CARIMA 모델에 대한 Diophantine 방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$1 = E_j(q^{-1})A(q^{-1})\Delta + q^{-j}F_j(q^{-1}) \quad (8)$$

$$1 = R_j(q^{-1})A(q^{-1})\Delta + q^{-(j+1)}S_j(q^{-1}) \quad (9)$$

여기서,

$$\begin{aligned} E_j(q^{-1}) &= e_0 + e_1q^{-1} + e_2q^{-2} + \dots + e_{j-1}q^{-(j-1)} \\ F_j(q^{-1}) &= f_0 + f_1q^{-1} + f_2q^{-2} + \dots + f_nq^{-n} \\ R_j(q^{-1}) &= E_{j+1}(q^{-1}) = r_0 + r_1q^{-1} + r_2q^{-2} + \dots + r_jq^{-j} \\ S_j(q^{-1}) &= F_{j+1}(q^{-1}) = s_0 + s_1q^{-1} + s_2q^{-2} + \dots + s_nq^{-n} \end{aligned}$$

(8)에서 j 단계 뒤의 출력을 예측하는 다음과 같은 식이 유도된다.

$$y(t+j|t) = G_j\Delta u(t+j-1) + F_jy(t) \quad (10)$$

여기서, $G_j = E_j(q^{-1})B(q^{-1})$.

(8)과 (9)를 연립하여 풀면, 다음 (11)과 (12)를 구하게 된다.

$$R_j(q^{-1}) = E_j(q^{-1}) + r_jq^{-j} \quad (11)$$

$$S_j(q^{-1}) = q(f_0 + f_1q^{-1} + \dots + r_j + \tilde{a}_1r_jq^{-1} + \tilde{a}_{na+1}r_jq^{-(na+1)}) \quad (12)$$

여기서, $\tilde{A} = A(q^{-1})\Delta = 1 + \tilde{a}_1q^{-1} + \tilde{a}_2q^{-2} + \dots + \tilde{a}_{na+1}q^{-(na+1)}$ (12)에서 q 항에 대하여 정리하면, $f_0=r_j$, $s_i=f_{i+1}-a_{i+1}r_j$ ($j=0\sim\text{deg } S_j$)의 관계식을 구하게 된다. 위의 관계식에서 초기 조건을 구하기 위하여, $j=1$: $1 = E_1\tilde{A} + q^{-1}F_1$ 을 적용하고, \tilde{A} 의 첫 번째항을 1로 두면 $E_1=1$, $F_1 = q(1 - \tilde{A})$ 이 된다.

제어 입력을 구하기 위한 평가함수는 다음과 같이 정의되어 진다.

$$\begin{aligned} J &= \left\{ \sum_{j=N_1}^{N_2} \mu(j)[y(t+j) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=0}^{N_u} \nu(j)[\Delta u(t+j-1)]^2 \right\} \\ &= E \left\{ \tilde{\mu}(Y-W)^T(Y-W) + \tilde{\nu}(\Delta U)^T(\Delta U) \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,

$$\begin{aligned} Y &= G\Delta U + F \\ &= [y(t+N_1) \ y(t+N_1+1) \ \dots \ y(t+N_2)]^T, \\ \Delta U &= [\Delta u(t) \ \Delta u(t+1) \ \dots \ \Delta u(t+N_2-1)]^T, \\ F &= [f(t+N_1) \ f(t+N_1+1) \ \dots \ f(t+N_2)]^T \end{aligned} \quad (14)$$

$y(t+j)$ 는 미래의 플랜트 출력이며, $w(t+j)$ 는 미래의 목표값, N_1 은 최소예측 구간, N_2 는 최대 예측 구간, N_u 는 제어 구간, $\mu(j)$, $\nu(j)$ 는 제어 가중치이다. $N_u=1$ 이면 프로세스는 상당히 간단하게 된다.

추적 오차와 제어 입력에 대한 지수적 가중치를 주기 위해, $\mu(i) = \tilde{\mu}\beta^i$ 와 $\nu(i) = \tilde{\nu}\beta^i$ 의 관계식을 생각할 수 있다. 성능 개선을 위해 $\tilde{\mu}=1$, $\alpha = \beta^{-1/2}$ 을 정의하면 다음 (15)를 구할 수 있다.

$$\mu(i) = \alpha^{-2i}, \nu(i) = \tilde{\nu}\alpha^{-2i} \quad (15)$$

(13)을 최소화하는 조건으로부터 (16)을 구할 수 있다.

$$\Delta U = (G^T M G + \Lambda I)^{-1} G^T M (W - F) \quad (16)$$

여기서,

$$M = \text{diag}[\alpha^{-1}, \dots, \alpha^{-2i}, \alpha^{-2N_u}],$$

$$\Lambda = \nu(j) \cdot \text{diag}[1, \alpha^{-2}, \dots, \alpha^{-2i}, \alpha^{-2(N_u-1)}].$$

(14)에서 $G\Delta U$ 와 F 는 각각 프로세스의 강제 응답과 자유 응답이다. 강제 응답은 아직 정하지 않을 제어 입력에 의해 발생되고 자유 응답은 이미 알고 있는 과거의 u 와 현재, 과거의 y 에 의해 발생한다.

G 는 $(N_2-N_1+1) \times N_u$ 차원인 lower-triangular 이며 다음과 같이 표현된다.

$$G = \begin{bmatrix} g_{N_1-1} & \dots & g_0 & \dots & 0 \\ g_{N_1} & \dots & g_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ g_{N_2-1} & \dots & \dots & \dots & g_{N_2-N_u} \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서,

$$g_k = -\sum_{i=1}^k a_i g_{k-i} + \sum_{i=0}^{k-1} b_i \quad k = 1, 2, \dots, N_2$$

4. 적응 최적 시간 제어

4.1 전체 알고리즘

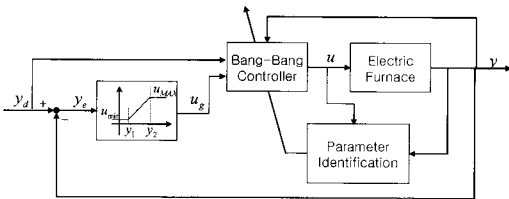


Fig. 4 Block diagram of adaptive time optimal control system

적응 최적 시간 제어(adaptive time optimal control, ATOC)의 블록 다이어그램은 Fig. 4 와 같이 나타난다. 적응 최적 시간 제어는 전기로 시스템을 나타내는 플랜트 부분과 RIV(Recursive Instrumental Variable)기법을 채용한 파라미터 추정 부분, 최적 시간 제어를 위하여 크기를 조정하는 변형된 뱅뱅 제어기법의 3 부분으로 구성되어 있

다.

4.2 파라미터 추정

동적 제어 시스템을 설계하기 위해 시스템의 동특성을 충분히 표현할 수 있는 모델을 설정하는 것이 필요하다. 실험적 데이터 값으로 모델을 설정하는 방법으로 시스템 추정(system identification) 기법이 사용된다.

본 연구에서는 전기로의 가열 시스템을 ARMAX(Auto Regressive Moving Average with exogenous inputs)모델로 가정하고 시변 시스템에 대하여 RIV 방법을 이용하여 시스템 매개변수를 추정하고, 추정된 매개변수를 이용하여 제어기 설계에서 제어 입력을 결정하였다.⁸ ARMAX 모델을 표현하면 다음과 같다.

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + c(q^{-1})e(t) \quad (18)$$

여기서, $y(t)$ 는 출력, $u(t)$ 는 입력, $e(t)$ 는 추정 에러이다.

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n},$$

$$B(q^{-1}) = b_0q^{-1} + b_1q^{-2} \dots + b_mq^{-m},$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n}.$$

IV(Instrumental Variable)방법에서 추정된 매개변수 $\hat{\theta}$ 는 다음 식으로 표현된다.⁹

$$\hat{\theta}_N^{IV} = \left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \zeta(t) \phi^T(t) \right]^{-1} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \zeta(t) y(t) \quad (19)$$

여기서,

$$\hat{\theta}^T = [\hat{a}_1 \quad \hat{a}_2 \quad \dots \quad \hat{a}_n \quad \hat{b}_0 \quad \hat{b}_1 \quad \dots \quad \hat{b}_m],$$

$$\phi = \begin{bmatrix} -y(t-1) \\ -y(t-2) \\ \dots \\ -y(t-n) \\ u(t-1) \\ u(t-2) \\ \dots \\ u(t-m) \end{bmatrix}, \quad \zeta(t) = L(q^{-1}) \begin{bmatrix} -z(t-1) \\ -z(t-2) \\ \dots \\ -z(t-n) \\ u(t-1) \\ \dots \\ u(t-m) \end{bmatrix},$$

$L(q-1)=1/C(q-1)$, $A(q-1)z(t)=B(q-1)u(t)$, $\zeta(t)$ 는 instrumental variable 이며, L 은 선형 필터, $z(t)$ 는 입력이 선형시스템을 통과하여 형성된 값이다.

(19)에서 RIV 방법은 다음식과 같이 구해진다.⁹

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + K(t)[y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1)] \quad (20)$$

$$K(t) = \frac{P(t-1)\zeta(t)}{\lambda + \varphi^T(t)P(t-1)\zeta(t)} \quad (21)$$

$$P(t) = \frac{1}{\lambda} \left[P(t-1) - \frac{P(t-1)\zeta(t)\varphi^T(t)P(t-1)}{\lambda + \varphi^T(t)P(t-1)\zeta(t)} \right] \quad (22)$$

4.3 최적 시간 제어

본 연구에서는 전기로 시스템이 PC 기반으로 소프트웨어를 사용하여 제어 됨으로 플랜트 모델링과 파라미터 추정 방법으로 RIV 방법의 디자인이 이산화된 공간에서 전개 되었으므로 샘플링 시간과 제어를 위한 단위 시간이 고정되어 있으며, 또한 전기로 시스템이 매우 느린 시스템이기 때문에 샘플링 시간과 제어를 위한 단위 시간이 길다. 상기의 이유로 목표 온도에 근접한 구간에서 미세한 온도제어를 위한 뱅뱅 제어의 제어시간 조정이 난해한 문제점을 가지고 있다. 그래서 본 연구에서는 크기를 조정하는 변형된 뱅뱅 제어기법(modified bang-bang control with magnitude tuning, MBCMT)을 제안한다. 변형된 뱅뱅 제어기법은 최적 시간 제어를 위한 뱅뱅 제어모듈과 목표온도 근처에서 미세 제어를 위한 크기조정 모듈로 구성되어 있다. 변형된 뱅뱅 제어기법에서 뱅뱅 제어의 크기 u_g 는 다음 식과 같이 정의 된다.

$$u_g = \begin{cases} u_{\min} & y_e(t) \leq y_1 \\ \frac{u_{MAX} - u_{\min}}{y_2 - y_1} \{y_e(t) - y_1\} + u_{\min} & y_1 < y_e(t) \leq y_2 \\ u_{MAX} & y_e(t) > y_2 \end{cases} \quad (23)$$

여기서, $y_e(t)=y_d-y(t)$, u_{\min} , u_{MAX} 는 변형된 뱅뱅 제어의 최소와 최대 크기이며, y_d 는 목표온도, y_1 , y_2 는 크기가 변형되는 구간에서 목표온도와 현재 온도의 차이인 $y_e(t)$ 의 낮은 경계와 높은 경계 값이다.

뱅뱅 제어는 미래의 입력 $u(t+k)$ 가 0 으로 주어진다고 가정되는 경우 예상 되어지는 최대 온도 $\hat{y}_{MAX}(t)$ 를 RIV 방법으로 추정된 시스템 매개변수와 Kalman 필터에 의해 추정된 값 $\hat{y}(t)$ 를 사용하여 구한 후, $\hat{y}_{MAX}(t)$ 와 목표온도 y_d 를 비교하여 입력 $u(t)$ 를 다음 식과 같이 결정하게 된다.^{9,10}

$$u(t) = \begin{cases} u_g, & \hat{y}_{MAX}(t) < y_d \\ 0, & \hat{y}_{MAX}(t) \geq y_d \end{cases} \quad (24)$$

5. 실험 결과 및 고찰

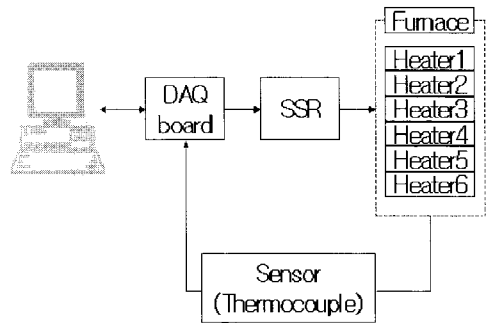


Fig. 5 Experimental setup of furnace control system

전기로 온도 제어 시스템은 Fig. 5 와 같이 가열 부를 포함한 전기로와, 가열 열량을 조절하기 위한 SSR(Solid State Relay), K-type thermocouple 로 구성되어 있는 온도 센서 모듈, A/D 변환과 디지털 출력을 위한 DAQ 보드, SSR 의 출력을 조정하고 진행을 그래픽으로 보여주기 위한 PC 의 다섯 부분으로 구성되어 있다.

9.5cm×11.5cm×6.5cm 의 시험 시료가 가열되어지며, 6 개의 thermocouple 이 시험 시료의 각 방향의 중심에 위치한다.

일반적으로, 온도제어는 온도제어 시스템의 응답 지연 특성 때문에 긴 시간을 요구한다. 그리고 본 연구에서 사용한 시스템에서 냉각은 자연냉각에 의존하였다.

측정된 데이터는 센서의 에러에 의한 영향을 줄이기 위하여 디지털 로우패스 필터를 거치도록 하였으며, 필터링 된 데이터는 2 초마다 샘플링 하였다.

본 실험에서 초기 300 초 동안은 최대 전력의 20%를 인가하여 선행추정 구간으로 활용하였다.

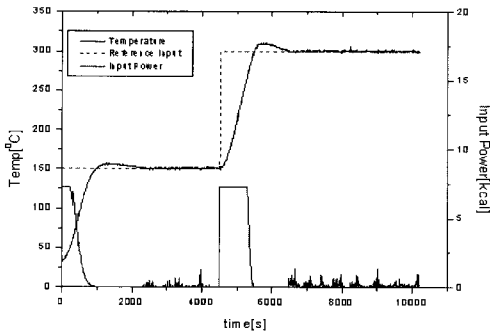


Fig. 6 Experimental result of GPCEW

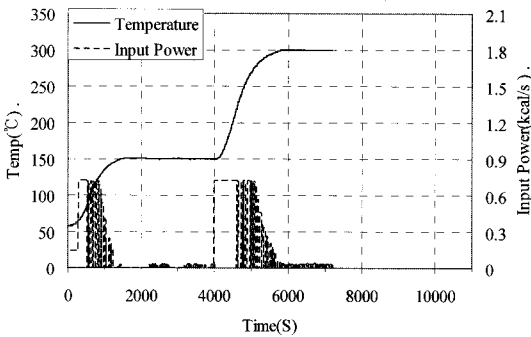


Fig. 7 Experimental result of ATOC

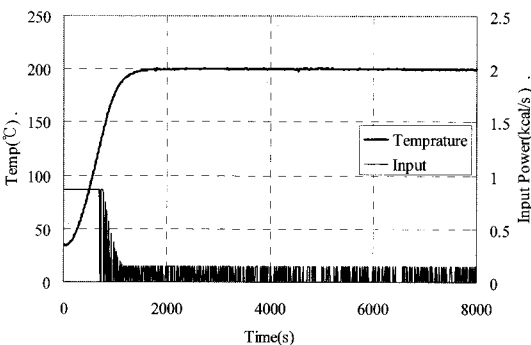


Fig. 8 Experimental result of ATOC using parameter estimation result at Fig. 7

300 초 되는 지점에서 IV 방법을 사용하여 $P(300)$ 과 $\hat{\theta}(300)$ 을 구한 후 300 초부터 $P(300)$, $\hat{\theta}(300)$ 와 $\lambda=1$ 을 사용하여, RIV 방법으로 시스템 매개변수를 추정하였다.

Fig. 6은 $N_1=1, N_2=10, N_u=2, \lambda=1$ 인 경우 GPCEW 기법으로 실험한 결과 그래프이다. 가중계수는

$\alpha=1, \nu=0$ 으로 두었다. 목표온도가 150°C일 때, 초기 오버슈트와 rising time, 정상상태오차, 정착시간이 각각 5.6°C, 1020 초, 0.6°C, 2360 초이며, 5200 초에서 목표온도를 300°C로 변경한 경우, 초기 오버슈트와 rising time, 정상상태오차, 정착시간이 각각 10.4°C, 1010 초, 0.8°C, 1990 초이다.⁵

Fig. 7은 적응 최적 시간 제어(adaptive time optimal control, ATOC)기법을 RIV 방법과 수정된 뱁뱁 제어방법(modified bang-bang control with magnitude tuning, MBCMT)을 사용하여 실험한 결과 그래프이다. 실험 초기 300 초 동안 최대 출력의 20%인 0.144kcal/s로 가열을 하면서 파라미터에 대한 예측을 수행하였다. 목표온도가 150°C일 때, 초기 오버슈트와 rising time, 정상상태오차, 정착시간이 각각 1.8°C, 743 초, 0.07°C, 2280 초이며, 4000 초에서 목표온도를 300°C로 변경한 경우, 초기 오버슈트와 rising time, 정상상태오차, 정착시간이 각각 0.5°C, 1010 초, 0.06°C, 1904 초이다.

Fig. 8은 Fig. 7에서 예측한 결과를 초기 예측 결과로 설정하고 목표온도를 200°C로 변경하여 적응 최적 시간 제어 기법으로 실험한 실험 결과를 나타내는 그래프이다. 목표온도가 200°C일 때 초기 오버슈트와 rising time, 정상상태오차, 정착시간은 각각 1.17°C, 790 초, 0.09°C, 1810 초이다.

위의 결과에서 나타난 바와 같이 ATOC의 rising time과 정착시간이 각각 GPCEW보다 14%, 4% 빠르게 나타나고 있으며, GPCEW는 오버슈트가 확실하게 보이나 적응 최적 시간 제어 방식은 거의 보이지 않는다.

6. 결론

동작시간이 길고, 시간에 따라 변화하는 파라미터를 가진 전기 가열로 시스템을 수학적으로 모델링 하였다. 적응 최적 시간 제어(adaptive time optimal control, ATOC)기법을 이용하여 이 모델을 해석하기 위해, RIV 방법과 수정된 뱁뱁 제어 알고리즘(modified bang-bang control with magnitude tuning, MBCMT)을 제안하였고, 이에 세라믹 전기로의 온도 제어가 향상되었다. 본 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

일반적으로 전기로 시스템을 모델링 할 때 1차 시스템으로 모델링 한다. 하지만 시스템의 고유주파수 ω_n 이 전기로 내부의 온도가 목표온도까지 도달하는 시간의 역수보다 작은 경우, 가열로

시스템은 2 차 시스템으로 모델링 되어져야 한다. 실험 결과에서와 같이 2 차 시스템으로 모델링 된 ATOC 의 rising time 과 정착시간이 각각 1 차 시스템으로 모델링 된 GPCEW 보다 14%, 4% 빠르게 나타나고 있으며, 1 차 시스템으로 모델링 된 GPCEW 는 오버슈트가 확실하게 보이나, 2 차 시스템으로 모델링 된 ATOC 방식은 거의 보이지 않는다.

본 논문에서는 본 논문에 사용된 전기로 시스템이 2 차 이상의 시스템으로 모델링 되어져야 한다는 사실은 증명하였지만, 정확한 시스템의 차수는 구하지 못하였다. 하지만, 2 차 시스템으로 가정한 방식이 1 차 시스템으로 가정한 방식 보다 전기로의 제어 특성이 향상된 것을 확인 할 수 있었다.

그러므로, 전기로 시스템의 정확한 차수를 구하게 되면 보다 간단한 제어 알고리즘으로 보다 향상된 제어 특성을 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Radakovic, Z., Milosevic, V. M. and Radakovic, S. B., "Application of temperature fuzzy controller in an indirect resistance furnace," *Appl. Energy*, Vol. 73, No. 2, pp. 167-182, 2002.
2. Ramirez, M., Haber, R., Pena, V. and Rodriguez, I., "Fuzzy control of a multiple hearth furnace," *Comput. Industry*, Vol. 54, No. 1, pp. 105-113, 2004.
3. Lee, B. K. and Huh, U. Y., "Robust self tuning controller for electric furnace," *Proc. of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Vol. 1, pp. 121-125, 1992.
4. Huh, U. Y. and Kim, J. H., "Adaptive Predictive Control for Electric Furnace," *Proc. of the IEEE IECON 21st International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*, Vol. 2, pp. 878-883, 1995.
5. Kim, S. W., Keum, Y. T. and Song, C. S., "A temperature control system for ceramic drying furnaces," *Journal of Ceramic Processing Research*, Vol. 6, No. 4, pp. 276-280, 2005.
6. Clarke, D. W., Mohtadi, C. and Tuffs, P. S., "Generalised predictive control. Part 1: the basic algorithm and part 2: extensions and interpretations," *Automatica*, Vol. 23, No. 2, pp. 137-160, 1987.
7. Clarke, D. W. and Mothadi, C., "Properties of generalized predictive control," *Automatica*, Vol. 25, No. 6, pp. 859-875, 1989.
8. Ljung, L., "System Identification," Prentice Hall Inc., pp. 224-227, 369-370, 1992.
9. Burghes, D. N. and Graham, A., "Introduction to control theory including optimal control," John Wiley & Sons, pp. 245-266, 1980.
10. Mohinder, S. G. and Angus, P. A., "Kalman Filtering-Theory and Practice Using MATLAB," John Wiley & Sons, pp. 114-126, 2001.