

Generalized predictive control with exponential weight to control temperatures in ceramic drying furnace

T.K. Im, W.J. Sung, Y.T. Keum*[†] and C.S. Song

Hanyang Graduate School, Seoul 133-791, Korea

*Hanyang University, CPRC, Seoul 133-791, Korea

(Received September 29, 2003)

(Accepted October 17, 2003)

Abstract The electric furnace, inside which the desired temperature is kept by the generated heat, is known to be a difficult system to control and model exactly because system parameters and response delayed time are varied as the temperature and positions are changed. In this study, the GPCEW (generalized predictive control with exponential weight), which always guarantees the stability of the closed loop system and can be effectively applied to the internally unstable system, was introduced to the ceramic drying electric furnace and was verified by showing its temperature tracking performance experimentally.

Key words Ceramic drying electric furnace, Adaptive predictive control, Temperature tracking, Generalized predictive control with exponential weight

세라믹 건조로 온도 제어를 위한 가중계수를 갖는 일반형 예측 제어

임태규, 성원준, 김영탁*[†], 송창섭

한양대학교대학원, 서울, 133-791

*한양대학교 세라믹공정연구센터, 서울, 133-791

(2003년 9월 29일 접수)

(2003년 10월 17일 심사완료)

요약 내부에 열을 가하여 원하는 온도를 유지하는 전기로는, 정확하게 제어하고 모델링을 하기 힘든 시스템이다. 왜냐하면 시스템 변수와 응답 지연 시간이 온도와 위치가 변함에 따라 변하기 때문이다. 이번 연구에서 항상 폐루프 시스템에서 안정성을 보증하고, 내부가 불안정한 시스템에 효과적으로 적용될 수 있는 가중계수를 갖는 일반형 예측 제어가 세라믹 전기로에 적용되었고, 실험을 통해 온도 추적 이행을 보임으로서 확인하였다.

1. 서론

세라믹 제품은 일정한 온도와 습도가 유지되는 항온, 항습의 조건에서 건조되어야 한다. 건조 속도가 매우 빠르거나 혹은 불균일 할 때 차등적 수축이 균열을 일으킬 수 있고, 차등적 수축 혹은 기체 압력에 의해 발생된 응력이 제품 안에 결함을 일으킬 수도 있다. 이러한 기계적 특성의 결함을 방지하기 위해서는 생산공정중의 온도 특성이 정확히 파악되고, 이를 바탕으로 한 온도제어가 이루어져야 한다.

전기로는 전열 장치에 의하여 열을 발생시켜 전기로 내부를 원하는 온도 분포로 얻기 위한 시스템이다. 이

전기로는 주위의 온도와 동작 점의 변화에 따라 시스템의 계수와 응답지연 시간이 변하는 특성을 가지고 있기 때문에 정확한 모델링과 제어가 어려운 시스템이다. 온도를 제어하는 일반 공정이나 및 일반 산업분야에서 PID기법이 주로 제어방식으로 채용되고 있지만, 공정의 동특성이나 환경의 변화가 있을 때마다 작업자가 경험적으로 PID 파라미터들을 튜닝(tuning)하여야 하는 단점이 있다. 그러나 Adaptive control은 공정의 동특성이나 외란등의 변화에 따라 그 기능을 자체적으로 튜닝(tuning)한다.

1970년대 이후로 모델 예측 제어에서 공통적으로 사용하는 LRPC(long range predictive control)[1-6]은 이동 구간 제어(receding horizon control)기법을 사용한다. 한편, 일반형 예측 제어(generalized predictive control : GPC)[7-8]는 예측 제어 분야에서 효과적인 제어 기법으로 알려져 있다. 특히 GPC는 실제 프로세스가 가질 수

[†]Corresponding author

Tel: +82-2-2290-0433

Fax: +82-2-2293-9450

E-mail: ytkeum@hanyang.ac.kr

있는 제어하기 어려운 요소들에 대해서도 잘 동작할 수 있다. 이러한 실용성에도 불구하고 GPC의 안정도 해석은 예측 구간이 거의 무한한 극한 경우에만 가능하며 검출 가능하지 않거나 안정화 가능하지 못하는 플랜트에 대해서는 적용할 수 없다. 이러한 관점에 대해 많은 학자들이 GPC의 안정도를 유한 예측 구간에서 보장하기 위해 많이 연구해 왔다. 이에 가중 계수를 가지는 일반형 예측 제어(generalized predictive control with exponential weight : GPCEW)는 페루프 시스템의 안정도를 보장하며 내부적으로 불안정한 시스템에 대해서도 효과적으로 적용할 수 있다.

본 연구에서는 GPCEW의 제어법칙을 세라믹 건조용 전기로의 온도제어 시스템에 적용하고, 실험을 통해 GPCEW의 온도 추적성능을 확인하였다.

2. 가중 계수를 갖는 일반형 예측 제어

모델 예측 제어는 사용한 모델을 근거하여 예측식을 구성한다. 또한 취한 모델을 얼마나 잘 표현하느냐에 따라 전체 시스템의 강인성에 영향을 끼치므로 효과적인 모델의 선정은 매우 중요하다. GPC에서는 다음과 같은 CARIMA(controlled auto-regressive integrated moving-average)모델을 고려한다.

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

여기서 $y(t)$ 는 프로세스의 출력, $u(t)$ 는 제어입력, t 는 sampling interval로서 $t=0, 1, 2, \dots$ 로 표시된다. 다항식 $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$, 그리고 $C(q^{-1})$ 는 다음과 같은 backward shift operator들로 표현된다.

$$A(q^{-1}) = a_0 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_nq^{-n} \quad (2)$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_mq^{-m} \quad (3)$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1} + c_2q^{-2} + \dots + c_nq^{-n} \quad (4)$$

그리고 식 (1)에서 $\Delta = 1 - q^{-1}$ 이고, $\xi(t)$ 는 uncorrelated random sequence이다.

(1)에 기초를 둔 j -단계 출력 예측 $\hat{y}(t+j/t)$ 는 Diophantine 방정식에 근거한다. 일반적인 CARIMA 모델에 대하여 Diophantine 방정식은 다음과 같다.

$$C(q^{-1}) = E_j(q^{-1})A\Delta + q^{-j}F_j(q^{-1}) \quad (5)$$

모델의 단순성을 위해 $C(q^{-1})$ 를 1로 선택하고 식 (5)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$1 = E_j(q^{-1})A\Delta + q^{-j}F_j(q^{-1}) \quad (6)$$

여기서, $E_j(q^{-1})$ 와 $F_j(q^{-1})$ 는 $A(q^{-1})$ 에 의해 유일하게 정해

지는 다항식이며 $E_j(q^{-1})$ 의 차수는 $j-1$ 이다. E_j 와 F_j 는 식 (6) 다음의 순환되는 Diophantine 방정식을 풀어서 얻을 수 있다. 즉,

$$1 = R_j(q^{-1})A\Delta + q^{-j}S_j(q^{-1}) \quad (7)$$

이다. 여기서 $R = E_{j+1}$, $S = F_{j+1}$ ($j = 1, 2, \dots, N$)이다.

식 (6)과 (7)을 연립하여 풀면,

$$0 = (R_j - E_j)A\Delta + q^{-j}(q^{-1}S_j - F_j) \quad (8)$$

이고, $\tilde{A} = A\Delta$ 이라면 식(8)은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\tilde{A}\tilde{R} + q^{-j}(q^{-1}S - F + \tilde{A}r_j) = 0 \quad (9)$$

여기서 $q^{-j}(q^{-1}S - F + \tilde{A}r_j)$ 는 q^{-j} , q^{-j+1} , ... 항을 포함하기 때문에 $\tilde{A}\tilde{R}$ 의 $(j-1)$ 번째 항은 0(zero)이고, $\tilde{R} = 0$, $q^{-j}(q^{-1}S - F + \tilde{A}r_j) = 0$ 이다.

그리고 식(9)로부터 S 를 구하면 다음과 같다.

$$S = q(f_0 + f_1q^{-1} + \dots + r_j + \tilde{a}_{1j}r_jq^{-1} + \tilde{a}_{na+1j}r_jq^{-(na+1)}) \quad (10)$$

따라서 식(10)의 q 항으로부터 $f_0 = r_j$, $S_i = f_{i+1} - a_{i+1}r_j$ 이고, 여기서 $i = 0 \sim \text{deg}S$ 이다.

일반화된 예측 제어의 평가 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$J = \left\{ \sum_{j=0}^{N_2} \mu(j)[y(t+j) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=0}^{N_1} \lambda(j)[\Delta u(t+j-1)]^2 \right\} \quad (11)$$

여기서 $y(t+j)$ 는 plant 결과, $w(t+j)$ 는 설정 값, N_1 은 최소 예측구간, N_2 는 최대 예측구간, N_0 는 제어구간, 그리고 λ , μ 는 제어 가중치이다. 간단한 시스템의 경우 $N_0 = 1$ 을 선택함으로써 계산을 상당히 줄일 수 있다. 식 (11)을 벡터 형태로 변형하여 다시 표현하면,

$$J = E\{J(N_1, N_2)\} = E\{(Y - W)^T(Y - W) + \lambda U^T U\} \quad (12)$$

이다. 여기서 추적 오차와 제어 입력에 대한 지수적 가중치를 주기 위해 각 예측 구간동안 아래와 같은 형태를 생각할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mu(i) &= \bar{\mu} \beta^i && \text{for tracking error} \\ \rho(i) &= \bar{\rho} \beta^i && \text{for control increments} \end{aligned} \quad (13)$$

성능 개선을 위해 $\bar{\mu} = 1$, $\alpha = \beta^{-1/2}$ 를 정의하면 위의 식은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\mu(i) = \bar{\mu} \beta^{-2i}, \rho(i) = \bar{\rho} \beta^{-2i} \quad (14)$$

식(12)에서

$$Y = \Gamma \Delta U + F \quad (15)$$

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

로 나타낼 수 있다. 식(15)과 식(16)의 각 항들은 다음과 같이 구체적으로 기술될 수 있다.

$$Y = [y(t + N_1) \ y(t + N_1 + 1) \ \dots \ y(t + N_2)]^T \tag{17}$$

$$\Delta U = [\Delta u(t) \ \Delta u(t + 1) \ \dots \ \Delta u(t + N_2 - 1)]^T \tag{18}$$

$$F = [f(t + N_1) \ f(t + N_1 + 1) \ \dots \ f(t + N_2)]^T \tag{19}$$

$$M = \text{diag}[\alpha^{-2}, \dots, \alpha^{-2i}, \alpha^{-2N_u}] \tag{20}$$

$$\Lambda = \rho \cdot \text{diag}[1, \alpha^{-2}, \dots, \alpha^{-2i}, \alpha^{-2(N_u - 1)}] \tag{21}$$

식(13)에서 $G\Delta U$ 와 F 는 각각 프로세스의 강제 응답과 자유 응답이다. 강제 응답은 아직 정해지지 않은 제어 입력에 의해 생성되고, 자유 응답은 이미 알고 있는 과거의 u 와 현재 및 과거의 y 에 의해 발생한다.

G 는 $N_2 \times N_u$ 차원인 lower-triangular이며 다음과 같이 표현된다.

$$G = \begin{bmatrix} g_{N_1-1} \dots g_0 & \dots & 0 \\ g_{N_1} & \dots & g_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ g_{N_2-1} & \dots & \dots & \dots & g_{N_2-N} \end{bmatrix} \tag{22}$$

여기서 $g_j = -\sum_{i=0}^j a_i g_{j-1} + \sum_{i=0}^{j-1} b_i$ $j = 1, 2, \dots, N_2$ 이다.

3. 가열 시스템의 수학적 모델링

3.1. 모델링

열 시스템(thermal system)의 모델링은 열전달의 기본 개념인 전도(conduction), 대류(convection), 복사(radiation)에 의해 가능하다. 그러나 전도, 대류, 복사의 세가지를 모두 고려할 경우에 상당히 복잡한 모델링이 되어 제어 알고리즘을 적용하기에는 부적합한 모델링이 된다. 여기에서는 열원인 가열로 벽과 피 가열물인 내화벽들 사이의 대류(convection)만을 고려하여 모델링을 하였다.

에너지 평형 방정식은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$C \frac{dy(t)}{dt} = p(t) - \frac{\{y(t) - y_c(t)\}}{R} \tag{23}$$

여기서 C 는 열용량, R 은 열저항, $p(t)$ 는 가열기로부터 공급되는 열량, $y(t)$ 는 로 내부 온도, $y_c(t)$ 는 주위 온도이다.

식(23)을 라플라스 변환(Laplace transform)하면

$$\begin{aligned} Y(s) &= \frac{1}{C\left(s + \frac{1}{RC}\right)} \left(P(s) + \frac{Y_c(s)}{R} \right) \\ &= \frac{1}{C\left(s + \frac{1}{RC}\right)} U(s) \end{aligned} \tag{24}$$

이고 식(24)에서

$$U(s) = P(s) + \frac{Y_c(s)}{R} \tag{25}$$

이다. 따라서 전달함수 $G(s)$ 는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{R}{RCs + 1} = \frac{R}{Ts + 1} \tag{26}$$

식(26)에서 전기로 시스템의 입력 $U(s)$ 는 열량이고, 출력 $Y(s)$ 는 온도이며, 시정수(time constant) T 는 R 과 C 의 곱이다.

따라서 ZOH(zero order hold)를 사용하면 가열로 시스템의 이산화 전달함수(z^{-1})는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} G(z^{-1}) &= (1 - z^{-1}) Z \left[\frac{1}{C\left(s + \frac{1}{RC}\right)} \right] \\ &= (1 - z^{-1}) \left[R \left(\frac{1}{1 - z^{-1}} - \frac{1}{1 - e^{-T/RC} z^{-1}} \right) \right] = \frac{bz^{-1}}{1 + az^{-1}} \end{aligned} \tag{27}$$

여기서 $b = R(1 - e^{-T/RC})$ 이고 $a = e^{-T/RC}$ 이다.

3.2. 파라미터 추정(Parameter Identification)

동적 제어 시스템을 설계하기 위해 시스템의 동특성을 충분히 표현할 수 있는 모델을 설정하는 것이 필요하다. 실험적 데이터 값으로 모델을 설정하는 과정을 시스템 인식이라 하며, 이 인식의 단계는 다음의 3가지를 고려해야 한다. 첫째로 최소의 파라미터를 가져야 하며, 둘째로 관측된 데이터의 값에 의해 파라미터가 유일하게 결정되어야 하고, 셋째로 제어 설계가 쉽고 단순해야 한다.

일반적으로, 파라미터를 추정하기 위한 평가함수는 다음과 같이 표현된다.

$$J = \sum_{k=1}^N f(e(k, \theta)) \tag{28}$$

본 논문에서는 2절에서 언급한 전기로 시스템을 1차 ARMAX(Auto Regressive Moving Average with exogenous input)모델로 가정하고, 회귀최소 제곱(Recursive Least Square : RLS)방법으로 시스템 매개변수를 추정했다. 그리고 추정된 매개변수를 이용하여 제어기

설계에서 제어 입력을 결정하였다. 가정한 ARMAX 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + c(q^{-1})e(t) \quad (29)$$

여기서 $e(t)$ 는 예측오차이고,

$$A(q^{-1})y(t) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n} \quad (30)$$

$$B(q^{-1})y(t) = b_0q^{-1} + b_1q^{-2} + \dots + b_mq^{-m} \quad (31)$$

이다. 그리고 식(29)에서 $C(q^{-1})$ 를 0(zero)으로 가정하면, 식(29)은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$y(t+1) = -a_1y(t) - a_2y(t-1) - \dots - a_ny(t-n+1) + b_0u(t) + b_1u(t+1) + \dots + b_mu(t-m) \quad (32)$$

플랜트의 이산화 전달함수를 1차 시스템으로 가정하고, 식 (32)을 행렬 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$y(t+1) = [-a \ b] \begin{bmatrix} y(t-1) \\ u(t-1) \end{bmatrix} = \theta^T \phi(t-1) \quad (33)$$

식(33)에서 파라미터 벡터 $\hat{\theta}$ 와 측정 벡터 $\hat{\phi}$ 는 다음과 같다.

$$\hat{\theta}^T = [a_1, a_2, \dots, b_1, b_2, \dots] \quad (34)$$

$$\hat{\phi}^T = [u(t-1), u(t-2), \dots, y(t-1), y(t-2), \dots] \quad (35)$$

4. 실험 및 고찰

전기로 온도 제어 시스템은 Fig. 1과 같이 전기로, 온도센서와 계측부, A/D 변환과 디지털 출력을 위한 DAQ board, 각 발열면에 파워를 제어하기 위한 SSR(solid state relay)의 4부분으로 구성된다. PC는 SSR의 출력을 조정하게 된다. SSR은 전기로에 들어가는 교류전류의 위상각에 따라서 파워를 제어하게 된다.

전기로 내부에는 가열대상으로 내화벽돌로 정하고, 크기는 $9.5 \times 11.5 \times 6.5$ [cm]이며 각 면의 중앙에 센서로

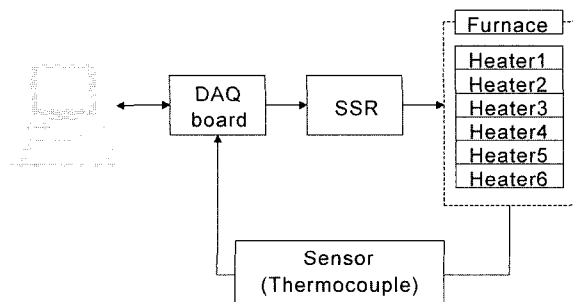


Fig. 1. Schematic diagram of a furnace control system.

서 Thermocouple을 위치시켰다. Thermocouple은 길이를 조정할 수 있어서 원하는 위치의 온도 감지가 가능하게 하였다.

일반적으로 온도 제어는 순간적으로 일어나는 것이 아니고 긴 시간을 요구한다. 따라서 제어입력을 주었을 때 시스템의 응답이 매우 느리고, 본 시스템에서는 열을 방출시키는 냉각기(cooler)가 없기 때문에 냉각 방식은 전적으로 자연 냉각에 의존하였다.

본 실험에서 사용한 샘플링 주기는 10초로 정하고 데이터 수집시 온도 측정치는 센서 오차를 줄이기 위해 100개의 입력을 받아 평균값을 내어 결정하였다. 여러 번의 실험을 통해 샘플링 시간이 10초일 때 가장 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

전기로의 입·출력 파라미터 계수를 알지 못하므로 계수 추정을 위해 1개의 a 파라미터와 1개의 b 파라미터를 추정한다. 설계 요소 (design parameters)인 N_u, N_1, N_2 의 영향을 알기 위해 실험을 하였다. 이 실험에서 $\lambda = 1, P(0) = 1000I, \hat{\theta}(0) = 0$ 로 정하였다.

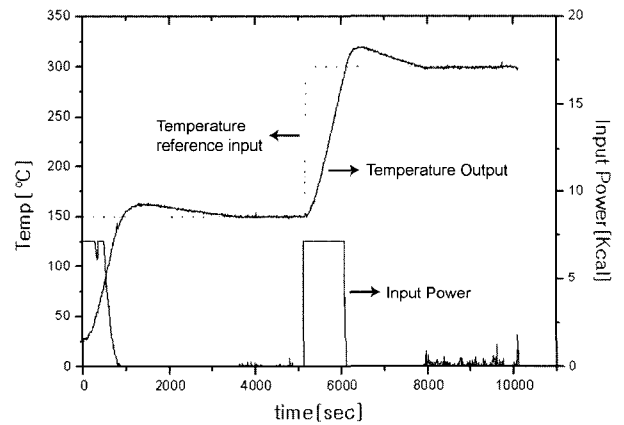


Fig. 2. GPC response for tuning parameters : $N_1 = 1, N_2 = 1, N_u = 1, \lambda = 1$.

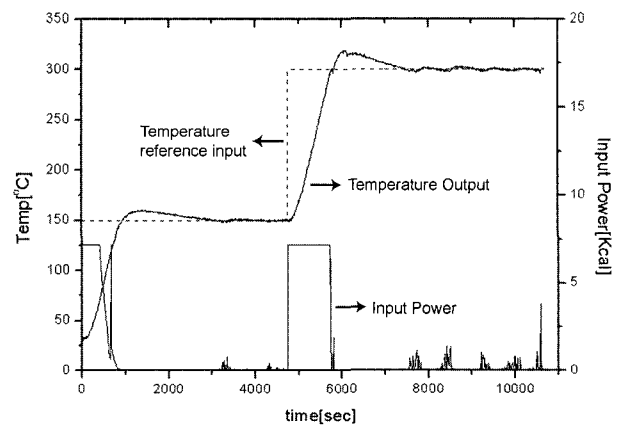


Fig. 3. GPCEW response for tuning parameters : $N_1 = 1, N_2 = 1, N_u = 1, \lambda = 1$, and weighting parameters : $\alpha = 1, \rho = 0$.

Fig. 2는 $N_1=1$, $N_U=1$, $N_2=1$ 일 때 GPC 제어의 응답결과이다. 초기온도 28°C 이고, 측정시간 5200초까지 기준온도가 150°C 일 때에는 초기 오버슈트(overshoot)가 11.4°C , rising time은 930초, 정상상태 오차는 0.81°C , 정착 시간은 3430초이었고, 측정시간 5200초에서 기준온도 300°C 으로 변화시켜 300°C 를 유지한 상태에서는 초기 오버슈트(overshoot)가 19.29°C , rising time은 990초, 정상상태 오차는 0.91°C , 정착 시간은 2740초이었다.

Fig. 3는 $N_1=1$, $N_U=1$, $N_2=1$ 일 때 GPCEW 제어의 응답결과이다. 초기온도 27.6°C 이고, 측정시간 5000초까지 기준온도가 150°C 일 때에는 초기 오버슈트(overshoot)가 10.14°C , rising time은 940초, 정상상태 오차는 0.75°C , 정착 시간은 2920초이었고, 기준온도 300°C 으로 변화 시켰을 때에는 초기 오버슈트(overshoot)가 18.55°C , rising time은 1070초, 정상상태 오차는 0.8°C , 정착 시간은 3350초이었다.

Fig. 4는 $N_1=1$, $N_U=2$, $N_2=10$ 일 때 GPC 제어의 응답결과이다. 초기온도 29.9°C 이고, 측정시간 5100초까지 기준온도가 150°C 일 때에는 초기 오버슈트(overshoot)가 5.57°C , rising time은 1570초, 정상상태 오차는 0.68°C , 정착 시간은 3030초이었고, 기준온도 300°C 으로 변화 시켰을 때에는 초기 오버슈트(overshoot)가 15.38°C , rising time은 1000초, 정상상태 오차는 0.9°C , 정착 시간은 2350초이었다.

Fig. 5는 $N_1=1$, $N_U=2$, $N_2=10$ 일 때 GPCEW 제어의 응답결과이다. 초기온도 29.94°C 이고, 측정시간 4300초까지 기준온도가 150°C 일 때에는 초기 오버슈트(overshoot)가 5.85°C , rising time은 1140초, 정상상태 오차는 0.48°C , 정착 시간은 2700초이었고, 기준온도 300°C 으로 변화 시켰을 때에는 초기 오버슈트(overshoot)가 6.61°C , rising time은 1140초, 정상상태 오차는 0.67°C , 정착 시간은 1960초이었다.

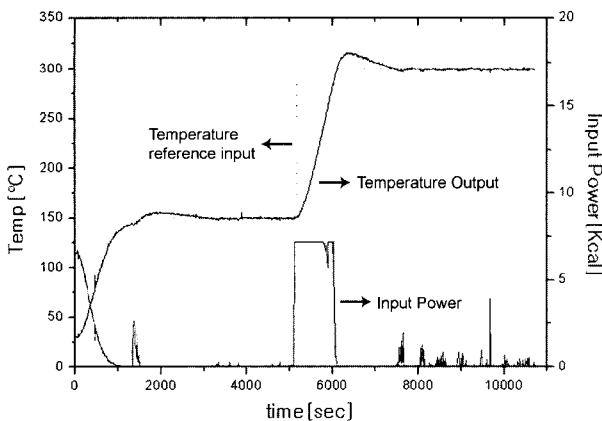


Fig. 4. GPC response for tuning parameters : $N_1=1$, $N_2=10$, $N_U=2$, $\lambda=1$.

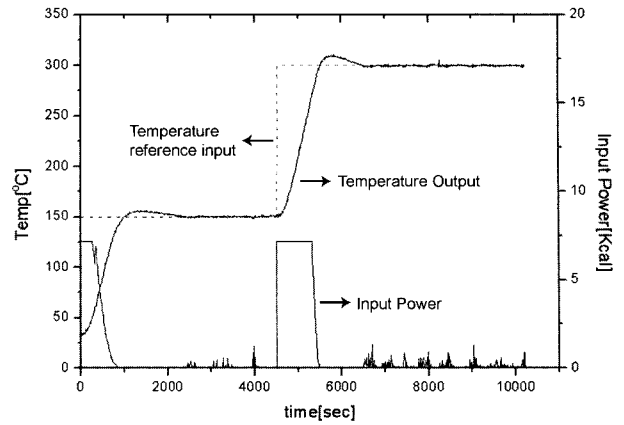


Fig. 5. GPCEW response for tuning parameters : $N_1=1$, $N_2=10$, $N_U=2$, $\lambda=1$ and weighting parameters : $\alpha=1$, $\rho=0$.

먼저 중요한 설계 요소인 control horizon N_U 가 증가하였을 때 응답 특성을 살펴보면, GPC는 오버슈트(overshoot)가 5.83°C 감소하였고 rising time이 640초 증가하였으며, 정착 시간은 220초 정도로 줄어들었다. GPCEW는 오버슈트(overshoot)가 1.3°C 감소하였고 rising time이 120초 감소하였으며, 정착 시간은 100초 정도로 감소하였다.

GPC와 GPCEW의 응답 특성을 비교해 보았을 때 예측 구간(N_U)을 증가시키고 가중계수 α 를 주었을 때 상승 시간(rising time)은 조금 늘어나지만, 오버슈트(overshoot)가 크게 줄어들고 정착 시간이 단축되는 것을 알 수 있었다. 또한 시간 지연(time delay)을 고려한 GPCEW에서는 고려하지 않았을 때보다 오버슈트와 상승시간, 그리고 정상상태 오차가 줄어들어 성능이 향상됨을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 세라믹 건조로의 온도 제어를 위해 가열 시스템으로 6면 발열 방식의 전기로를 사용하고 가중 계수를 갖는 일반형 예측 제어(GPCEW)를 적용시켰다. 실험을 통한 이러한 일련의 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) GPCEW는 GPC에 비해 rising time은 증가하지만 overshoot와 정상상태 오차가 감소하고 정착시간이 줄어들어 세라믹 전기로를 효과적으로 제어할 수 있다.
- 2) 응답이 느리고, 매개 변수가 시간에 따라 변하는 가열 시스템을 수학적으로 모델링하고, 회귀최소자승법(recursive least-square method)으로 매개변수를 추정하였다.

- 3) GPCEW에서 제어구간 N_U 를 키우면 rising time은

조금 증가하나, overshoot와 정상상태 오차가 감소하고 정착시간이 줄어든다.

감사의 글

본 연구는 한양대학교 세라믹공정연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] J. Richalet, A. Rault, J.L. Testud and J. Papon, "Model predictive heuristic control : applications to industrial process", *Automation* 14 (1978) 413.
- [2] C.R. Culter and B.L. Ramaker, "Dynamic matrix control: a computer control algorithm", *Joint Automatic Control Conf*, San Francisco, USA (1980).
- [3] B.E. Ydstie, "Extended horizon adaptive control", *IFAC 9th World Congress*, Budapest, Hungary (1984).
- [4] V. Peterka, "Predictor based self-tuning controllers", *Automatica* 20 (1984) 39.
- [5] E. Mosca, G. Zappa and C. Manfredi, "Multistep horizon self-tuning controllers : the musmar approach", *IFAC 9th World Congress*, Budapest, Hungary (1984).
- [6] R.M.C. De Keyser and A.R. Van Cauwenberghe, "Extended prediction self-adaptive control", *IFAC Identification and System Parameter Estimation*, York, UK (1985).
- [7] D.W. Clarke, C. Mohtadi, and P.S. Tuffs, "Generalised predictive control" Part 1: the basic algorithm and part 2: extensions and interpretations, *Automatica* 23(2) (1987) 137.
- [8] D.W. Clarke and C. Mothadi, "Properties of generalized predictive control", *Automatica* 25(6) (1989) 859.
- [9] Carlos Bordons and Eduardo F. Camacho, "A generalized Predictive controller for a wide class of industrial processes", *IEEE, Proc. D* (1998) 372.
- [10] H. Demircioglu and D.W. Clarke, "Generalised predictive control with end-point state weighting", *IEEE, Proc. D* 140 (1993) 278.
- [11] Astrom, Wittenmark, "Adaptive control", Addison Wesley (1995).
- [12] Lennart Ljung, "System identification", Prentice Hall (1992).
- [13] R. Isermann, "Adaptive control system", Prentice Hall (1992).
- [14] B.K Lee and U.Y. Huh, "Robust self tuning controller for electric furnace", *Proc. IEEE, ISIE I* (1992) 121.
- [15] U.-Y. Huh and J.-H. Kim, "Adaptive predictive control for electric furnace", *IEEE ProcD* (1995) 878.
- [16] Rubiyah Yusof and Shigeru Omatu, "Application of generalised predictive control to a temperature control process", *IEEE Proc. D* (1991) 1935.