

전기로 온도공정제어에 관한 연구

오진석* · 김윤식* · 오세준* · 최순만** · 신명철***

A Study on Temperature Process Control of Electric Furnace

J. S. Oh · Y. S. Kim · S. J. Oh · S. M. Choi · M. C. Shin

Key words : Electric furnace(전기로), Auto tuning control(자동동조제어), Process monitoring(공정감시)

Abstract

In this paper, a controller with monitoring functions is proposed for controlling temperature of an electric furnace system. The controller includes holding and ramp control functions, and the control program for the temperature process monitor of the electric furnace.

For this purpose, the implementation and performance of auto tuning algorithms in a computer-based controller is studied in relation to control of a nonlinear electric furnace system which is characterized with large time delay. The communicator of a control and detection signals, between the controller and the electric furnace is implemented by an I/O data card.

Experiments for the practical electric furnace are performed to illustrate the performance of the proposed controller.

1. 서 론

전력을 공급하여 물체를 가열하는 노를 총칭하여 전기로라 한다. 전기로는 연소로에 비하여 높은 온도를 얻을 수 있고, 온도조절이 정확하고 정밀하며 효율이 높은 특징이 있다. 열을 발생시켜 노내의 원하는 온도분포를 얻기 위한 전기로는 화학, 기계, 금속 등의 일반산업용에 널리 이용되고 있으며, 청수히터, 도자기 전용로 등에도 이용된다. 전

기로의 분류는 가열방식, 전원, 구조, 온도공정에 따라 나누어지며, 가열방식으로 분류하면 저항로, 아크로, 유도로 등으로 분류된다. 저항로는 저항가열을 이용한 전기로이며, 가열방식에 따라 직접식 저항로, 간접식 저항로로 분류된다.

본 논문에서는 발열체의 열을 방사, 대류하여 피열물을 가열하는 간접식 저항로로 도자기용 전기로를 연구대상으로 한다. 이 전기로는 원료에 따라 소성온도, 냉각온도, 적정가열온도를 유지해야한

* 한국해양대학교 (원고접수일 : 97년 1월)

** 한국해기연수원

*** 한국해양대학교 대학원

다. 더불어 사용자가 온도공정의 추이를 화면을 통하여 확인하고, 화면상에서 온도공정을 제어할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 전기로 온도공정을 제어하기 위하여, 제어알고리즘을 경사제어, 유지제어, 화면제어, 화면감시기능이 포함되도록 구축하고자 한다. 또한, 도자기 전용로는 다양한 온도공정 및 정밀한 온도공정이 요구되므로 자동동조제어기를 제안하고, 이를 이용하여 온도제어기를 설계하고, 하드웨어의 기능화를 접목시켜 우수한 성능의 온도제어기를 설계하고자 한다. 스위칭소자의 제어기법은 PWM(Pulse Width Modulation) 방식이며, PWM 신호의 전송체계를 범용화하기 위하여 범용 I/O카드를 설계제작하여 실험에 이용하였으며, 스위칭순간에 발생하는 고조파가 PC에 영향을 미치지 못하도록 광전송시스템을 신호전송시스템으로 이용하고자 한다.

특히, 산업안전측면에서는 장시간에 걸쳐 진행되는 온도공정을 오동작 없이 수행하고, 수행결과를 화면감시 하는 기능을 갖춘 제어기를 산업용 온도공정 제어기로 적용하면, 인간의 불안정한 행동 및 감시업무를 제어기가 대신함으로써, 각종 산업재해를 예방할 수 있고, 감시기능이 있으므로 기기의 오동작에 대한 원인분석이 가능하다. 이상의 과정을 통하여 설계한 전기로 온도제어기를 산업현장에 적용하기 위하여 PC에 탑재하여 범용성, 신뢰성, 안정성, 실용성에 관련된 실험을 수행하였다.

2. 전기로 특성

2.1 개요

본 연구의 연구대상인 전기로는 교육, 실험, 취미용 도자기 전용로로 주로 사용되며, 이러한 전기로는 산업용 전기히터보다 우수한 제어특성이 요구된다. 일반적으로 도자기용 전기로가 가장 복잡한 온도공정을 가지고 있으며, 정밀한 온도제어가 요구된다. 이러한 전기로는 소성조건, 온도, 시간, 냉각속도, 결정성장 온도를 변화시켜 도자기를 제작한다. 소성온도를 결정하기 위하여 도자기 시편의 흡수율, 선수축율 등을 고려하여 결정한다. 또

한, 소성과정에서 일어나는 열적변화를 검사하고 소성온도를 추정하기 위하여 시차열분포 실험을 수행하여야 하며, 이러한 실험을 수행하기 위해 온도상승속도를 정확히 제어할 수 있어야 한다. 그리고 원하는 결정을 얻기 위하여 정해진 시간동안 소성온도를 일정히 유지할 수 있어야한다. 일반적으로 소성공정에 걸리는 시간은 20시간 이상 걸리는 경우도 있으므로 이러한 운전특성¹⁾은 반드시 고려되어야 한다. 전기로는 단열재로 구성되어 열손실이 적고 최고온도까지의 승온이 단시간에 일어나는 특징을 가지고 있지만, 전기기기 시스템에 비하여 목표치 추종속도는 매우 느린 시스템이다. 이상의 전기로 운전특성을 원활히 수행하기 위하여 작업의 전체공정을 작업자가 의도하는 온도로 제어가 가능해야 하고, 소성공정의 제어가 무인화 되어야 한다. 그리고 소성온도를 정확히 파악하기 위하여 온도제어과정을 화면을 통하여 감시가 가능해야 한다. Fig.1은 일반적인 소성공정의 온도상태를 도시한 것이다.

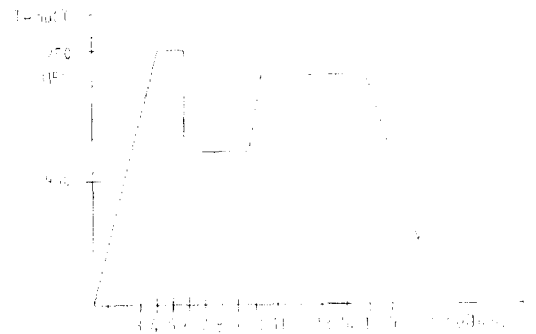


Fig. 1 Temperature processing curve

2.2 시스템 특성

대부분의 사용 전기로는 ON-OFF제어로 온도를 제어한다. 즉, ON-OFF 제어용 릴레이의 듀티비 $\alpha (=T_{ON}/T)$ 에 의해 전류량이 제어되고, 이 전류량이 전기로의 온도의 증감을 제어한다. 전기로에 이용되는 온도제어기 회로는 매우 간단하다. 그러나 회로의 동작변수에 대한 표현식을 유도하는 것은 간단하지 않으며, 전기로와 같은 유도성 부하를 포함하는 회로는 여러 가지 해석의 어려운 점이 있

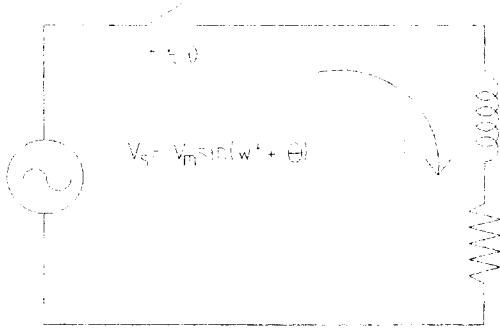


Fig. 2 Equivalent RL circuit of an electric furnace

다. 저항성 부하 R과 유도성부하 L이 직렬로 연결된 전기로 회로는 Fig.2와 같이 나타낼 수 있다.

Fig.2로 부터 $t=0$ 인 순간에 교류전압 V_s 가 인가될 때 전류 i 가 흐른다면 회로방정식은

$$L \frac{di}{dt} + Ri = V_m \sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

식(1)의 일반해는

$$i = Ae^{-\frac{R}{L}t} + I_m \sin(\omega t + \theta - \phi) \quad (2)$$

이고, $t=0, i=0$ 일 때 A, 최대전류 I_m , 부하역률 각 ϕ 는 각각 다음과 같다. 그리고 θ 는 $t=0$ 에서 위상이다.

$$A = -I_m \sin(\theta - \phi) \quad (3)$$

$$I_m = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \quad (4)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} \quad (5)$$

식(2)는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i = I_m \sin(\omega t + \theta - \phi) - I_m e^{-R/Lt} \sin(\theta - \phi) \quad (6)$$

식(6)에서 과도항은 $\theta = \phi$ 일 때 영이고, $\theta = \phi + \frac{\pi}{2}$ 일 때 최대가 된다.

Fig.3은 실험용 전기로에 공급되는 전류특성변화를 도시한 것이다.

이러한 전기적인 특성을 가진 전기로의 전류량을 제어하기 위해서는 열전달 현상을 정립할 필요가 있다. Fig.4는 전기로 온도제어시스템의 블록선도(a)와 열시스템(b)를 도시한 것이다.

Fig.4에서 에너지보존법칙에 의거하여 열량관계식을 정리하면,

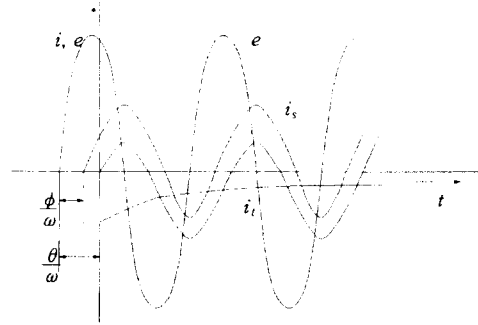
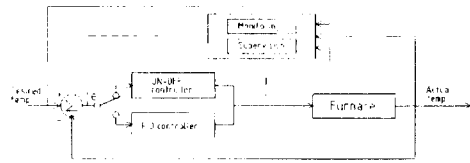
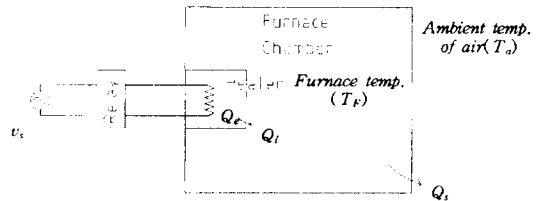


Fig. 3 Voltage and current for electric furnace circuit



(a) block diagram



(b) thermal system

Q_e : heat flow supplied by electric heater

Q_t : heat flow into chamber

Q_s : heat flow through tank surface

Fig.4 The temperature control of electric furnace

$$Q_e = Q_t + Q_s \quad (7)$$

$$Q_t = C \frac{dT_F}{dt} \quad (8)$$

이다. 여기서 Q_e 는 전기히터에 의해 공급되는 열량이고, Q_t 은 노내의 물체에 전달되는 열량이며, C는 노내에 있는 물체의 열용량(thermal capacity)이다.

Q_s 는 식(9)와 같이 주어진다.

$$Q_s = \frac{TF - T_a}{R_{FS}} \quad (9)$$

식(9)에서 R_{FS} 는 전기로 표면을 흐르는 열에 대한 열저항이며, T_F 는 노내온도이고, T_a 는 대기온도이다. 식(7)~식(9)로부터 식(10)을 유도할 수 있다.

$$Q_e = C \frac{dT_F}{dt} + \frac{T_F - T_a}{R_{FS}} \quad (10)$$

식(10)에서 Q_e 는 전류량에 의해 결정되는 전기로 히터의 열량으로 제어입력에 해당하고, T_a 는 왜란에 해당하는 대기온도이다. 이러한 일반적인 전기로특성을 기초로하여, 도자기 전용로의 온도제어기를 설계하고자 한다.

3. 제어기 설계

전파전기로의 열응답은 매우 느리고, 샘플링 주기도 일반적인 제어계보다 길다. 전기로의 샘플링 주기는 수초에서 수십분의 시간을 가지는 다양한 주기를 가지고 있다. 그러므로 전기로의 온도공정을 요구특성에 맞게 수행하기 위하여 온도제어기는 전기로의 특성²⁾을 반영하여 설계해야 한다. 본 논문에서는 전기로 온도제어를 위하여 자동동조 제어기(auto tuning controller)를 이용한다. 자동동조제어기는 온라인상태에서 제어기가 동작하는 영역을 보다 짧은 시간대에 모델링하고 구해진 모델을 근거로 제어기의 이득과 시간을 자동적으로 지정하는 방법이다. 본 논문에서 자동동조제어기는 전기로의 응답파형으로부터 지연시간 L 을 측정하는 것이 어렵다는 점을 보완한 방법이다. 자동동조제어기는 상승시의 특성과 목표값에 도달한 후의 정상상태의 특성에 대하여 별개의 파라미터를 적용한다. 파라미터 도출방법은 Fig.5와 같이 목표값(set-point)에 도달하기 전에 설정값을 정하고, 이 설정값에 대해 1주기만 ON/OFF 제어를 실행하여 그 때의 주기를 이용하여 PID 파라미터를 계산한다. 본 연구에서는 기울기, 지연시간을 외부 하드웨어에서 직접 읽어들이 지글러 니콜스가 제안한 방법을 응용하여 PID 파라메타(비례이득, 적분시간, 미분시간)를 2 구간에 걸쳐 계산한다. 본 연구의 파라메타 도출과정 및 제어시점의 산출 과정은 Fig.5를 이용하여 설명할 수 있다. 상승시의 파라미터 계산에 이용하는 기울기 R_s ³⁾는 Fig.5

에서 설정값에 이르기까지의 최대기울기 R'_s 와 ON/OFF 제어시 하강방향의 최대기울기 R''_s 중에서 절대값이 큰 것을 이용한다. 그리고 지연시간 L_s 는 ON/OFF 제어시 최초의 반주기 L_1 의 1/2을 이용한다. 이것은 지연시간이 큰 경우에 의사적으로 적용하는 방법이다.

정상시의 파라미터 계산에 이용하는 기울기 R_F 는 설정값에 대한 ON/OFF 제어가 종료된 후다시 상승할 때의 최대기울기 R_F 를 사용하고 지연시간 L_F 는 제어주기 L_2 의 1/4를 이용한다.

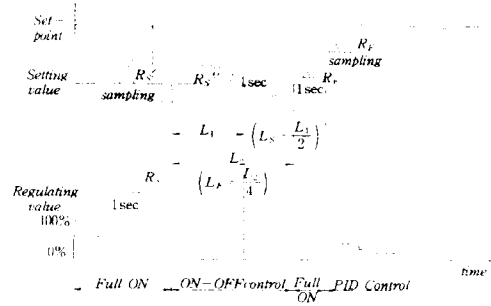


Fig.5 Response for setting parameter

본 논문에서 설정값은 경험적으로 목표값에서 $K \cdot T_{sp} \cdot R_s$ 를 뺀 값인 식 (11)을 이용한다.

$$S_v = G_v - K \cdot T_{sp} \cdot R_s \quad (11)$$

식 (11)에서 S_v 는 설정값이고, K 는 실험적으로 결정하는 상수값, G_v 는 목표값 T_{sp} 샘플링 주기가 다. 그리고 PID 제어에 들어가는 시점은 식(12)로 결정한다.

$$T_{PID} = G_v - K \cdot T_{sp} \cdot R_F \quad (12)$$

식 (12)에서 T_{PID} 는 PID 자동동조제어시점이고, R_F 는 기울기이다. 자동동조제어시점은 설정값의 $\pm 0.5\%$ 이내에 들었을 때를 기준으로 하였다.

이상의 과정을 통하여 도출한 파라미터를 식(13)에 대입하여 원하는 제어량을 구하고, 이 값을 이용하여 전기로 온도제어기의 듀티비 α 를 조정한다.

$$u(k) = K_p [e(k) + \frac{T_{sp}}{T_I} \sum_{i=1}^k e(i-1) + \frac{T_D}{T_{sp}} (e(k) - e(k-1))] \quad (13)$$

식(13)에서 $k=1,2, \dots$ 이고, $e(kT)$ 는 오차신호이다.

4. 화면감시/제어 프로그램

4.1 알고리즘

도자기 전용로는 다양하고 정밀한 온도공정이 요구되며, 범용성이 있어야 하기 때문에 제어알고리즘은 전기로 온도공정을 원활히 제어하기 위하여 경사제어, 유지제어, 화면제어, 화면감시 기능이 포함되어야 한다.

본 연구에서 구성한 제어알고리즘은 여러 단계의 경사제어가 가능하고, 각 단계별 온도를 유지제어할 수 있고, 이러한 제어상태를 화면상에서 수행이 가능하고, 동시에 감시가 가능하도록 하였다.

오버슈터를 억제하고 PID파라미터 설정을 용이하게 하기 위하여 ON/OFF 제어와 PID제어 모드를 갖도록 하였으며, PID모드에서는 자동동조기법을 알고리즘에 적용하여 PID파라미터를 수치해석으로 산출하여 자동적으로 산정이 되도록 하였다. 지령한 목표값에 대하여 오버슈터가 원하는 범위를 벗어나지 않도록 설정한 설정값은 실험을 통하여 도출한 결과를 알고리즘에 반영하였다.

그리고, 온도공정을 실시간 모니터링 하도록 온도공정의 천이상태를 화면상에서 볼 수 있도록 알고리즘을 구축하였다. 수행된 온도공정에 관련된 데이터를 저장할 수 있으며, 저장된 데이터를 재생할 수 있도록 하였다.

4.2 제어함수

본 논문에서 구성한 알고리즘을 원활히 수행하기 위한 제어프로그램용 제어함수는 다음과 같다.

- Graph_Init
- Slop
- Temp_In
- Auto
- Graph_Dis
- CAL
- Cal_Uk
- Main_Menu

Graph_Init 함수는 현재의 PC의 그래픽카드에 적합하게 그래픽드라이버를 초기화하는 함수로서 자동검출기능을 이용하였다.

Graph_Dis 함수는 전기로 온도공정을 시간과 온도를 축으로하여 실시간 도시하는 함수이다.

Slop 함수는 수치해석학으로 제어용 파라미터 계산에 필요한 R_s, R_f 값을 도출하기 위한 함수이다.

CAL 함수는 계산된 R_s 및 R_f 값에 따라 제어용 파라메타(K_p, K_i, K_d)계산하는 함수로서, 도출된 파라메타는 Cal_Uk 함수에 이용된다.

Temp_In 함수는 온도센서에서 감지된 신호를 전송하는 트랜스미터를 거쳐서 A/D컨버터에 전달된 아날로그 온도신호의 변환과정을 제어하고, 제어결과 도출된 디지털화된 온도신호를 입력하는 함수이다.

Cal_Uk 함수는 순환알고리즘으로 제어함수를 구성하였으며, 입력된 온도신호가 목표한 온도값에 추종하도록 최적의 제어신호 Uk를 출력하는 함수로서, CAL 함수에서 구한 제어 파라메타를 이용한다.

Auto 함수는 1차 제어구간에서 설정치의 오차한계내에 들어가면 그때부터 자동동조제어과정이 수행된다. 이러한 제어과정을 수행하기 위하여 필요한 제어함수로서, 정밀한 온도제어를 위하여 필요한 함수이다.

Main_Menu 함수는 프로그램의 전체적인 모듈을 형성하기 위한 함수이고, 다양한 제어패턴과 제어파라메타, 샘플링시간 등의 전체적인 제어기 구성을 보여준다.

Fig.6은 제어함수의 전체 구조를 도시한 것이고, Fig.7은 설계한 제어기의 초기화면을 나타낸 것이다.

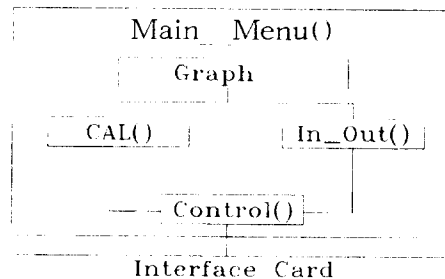


Fig.6 Structure of the overall control function

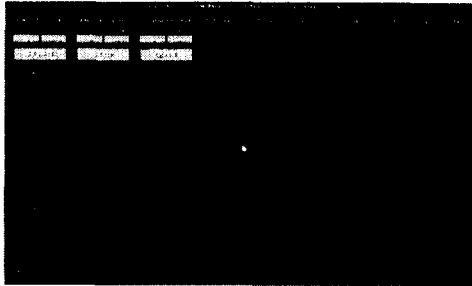


Fig.7 Menu for controlling and monitoring an electric furnace

5. 실험 및 실험결과

5.1 실험장치

실험에 이용한 전기로는 정밀한 온도공정제어가 요구되는 도자기 전용로이고 제어회로도 Fig.8 와 같다. 도자기용 전기로는 ramp제어, holding제어가 가능해야 하고, 화면상에서 온도공정의 진행과정을 감시 및 제어가 가능해야 한다.본 연구에서는 제어량 $u(kT)$ 를 릴레이에 원활히 전달하기 위하여 I/O 카드를 설계제작하여 실험에 이용하였다. I/O 카드^{4,5,6,7)}는 제어량을 제어회로에 전달하고, 온도센서에 감지된 아날로그신호를 디지털신호로 바꿀 수 있는 A/D 컨버전 기능을 가지고 있으며, 입·출력신호를 래치하는 기능도 가지고 있다.

Table.1 Ratings and specifications of the furnace and the relay for experiment

Items	Electric furnace	Relay	Triac
Rated voltage	110 V	Coil	110V
		Contact	250V
Rated current	14 A	25A	35A
Temp.	1600 ℃	-	125℃(OJT)
Inductance(60Hz)	124.74 μH	-	
Resistance(60Hz)	7.29 Ω	-	

제어신호는 I/O 카드의 8253 카운터에 의해서 전기로에 공급되는 전류량을 제어하는 듀티비 $\alpha(T_{on}/T)$ 로 변환된다. 전기로의 온도는 R형 열전대 온도센서에 의해 감지되어, 전송기에 의해 0-10V 전압으로 바뀌어 I/O 카드의 A/D 변환기에 입력된다. 전송기는 열전대 온도센서의 비선형을 선형적으로 출력되도록 보정기능을 갖춘 것을 이용하였다.

온도설정 및 제어는 대화적으로 할 수 있고, 온도는 모니터상에서 확인이 가능하다. 또한 스위칭순간의 고조파에 의해 제어신호가 영향을 받는 것을 억제하기 위하여 광전송시스템을 이용하였다. Table.1은 실험용 전기로 및 릴레이 사양이다.

5.2 실험결과

실험은 2가지 측면에서 수행하였다. 첫째는 자동동조기법으로 도출한 2가지 파라미터를 적용한 자동동조 제어기로, k값 변화에 따른 전기로 온도

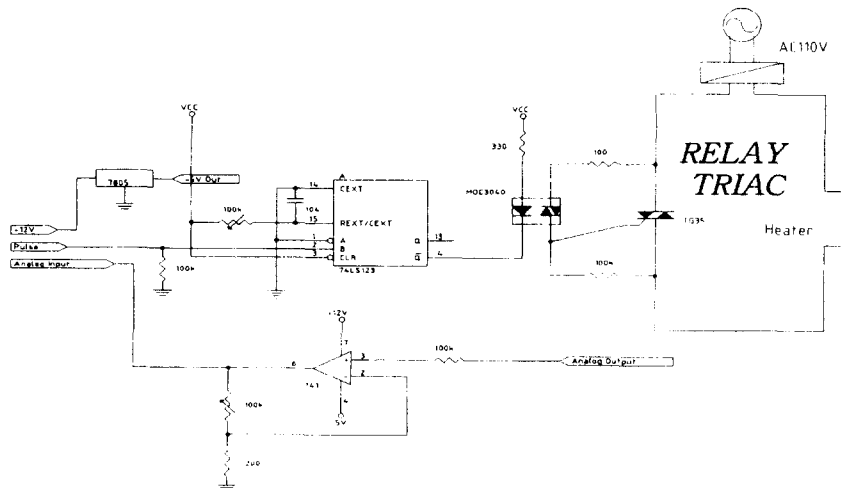
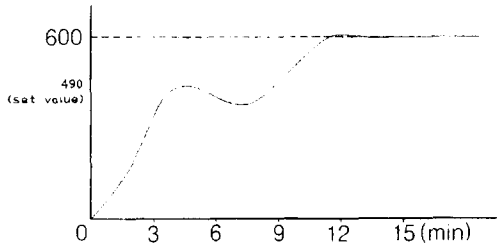
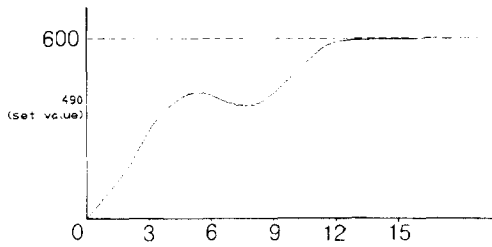


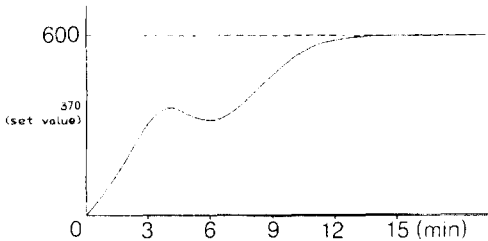
Fig.8 Control circuits



(a)



(b)



(c)

Fig.9 Responses to setting value changes
(Sv) (a)K=20 (b)K=30 (c)K=40

공정을 실험하였고, 둘째는 본 논문의 연구대상인 화면감시 제어기능을 갖춘 온도제어의 동작성, 신뢰성, 실용성 실험을 수행하였다. Fig.9는 설정값과 제어시점을 변경했을 경우의 실험결과이다.

Fig.10는 본 논문에서 설계제작한 온도제어의 화면제어, 화면감시기능을 확인하기 위해 실험한 결과이다.

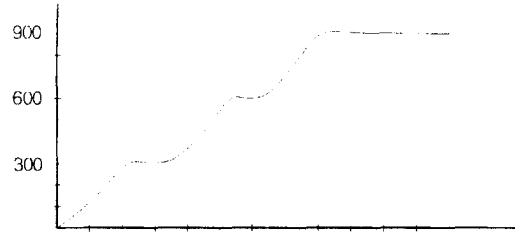


Fig.10 Response for controlling and monitoring of the proposed controller

step temp. : 300, 600, 900

holding time : 5min

ramp time : 10min

6. 결 론

본 연구에서 구성한 온도공정제어기는 ramp와 holding제어가 가능하며, 오버슈트를 최대한 억제하면서 목표치에 추종하도록 2 단계의 제어과정을 갖도록 하였다. 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 설정치를 결정하는 K값에 따라 제어특성이 변했으며, 25~35 구간의 K값이 온도공정제어에 양호한 것으로 판단된다.

2) 전기로에 가장 필요한 제어특성인 경사제어와 유지제어를 수행한 결과 원하는 제어특성을 얻었다. 그러나 전기로내의 잠열에 대한 영향을 고려하는 알고리즘 도출이 필요함을 알았다.

3) 감시와 제어기능을 모두 화면상에서 수행할 수 있으며 제어공정에 관련된 데이터를 기록하여 실험결과해석에 이용할 수 있다.

본 연구결과는 산업현장에 적용하기 위해 실용화 실험을 거친 것으로, 간단한 컴퓨터 조작기술만 가진 사람이라면 누구나 쉽게 운용할 수 있으므로 인간의 오조작을 방지할 수 있고, 더불어 기기의 동작상태를 실시간 확인할 수 있으므로 산업기에 적용시 산업재해 억제에 효과가 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) D.Jacobs and L. F. Donaghef, "Microcomputer Implementation of Direct Digital Control Algo-

- rithms for Thermal Process Control Applications", Journal of Dynamic Systems, pp.233~240, 1977.
- 2) 이봉국, 허욱열, "The Design of a Self-Tuning Controller for the Electric Furnace Temp Control", 대한전기학회지, Vol.42, No.2, pp.113-122, 1993.
 - 3) 오진석, "선박 보조추진용 전동기 제어기 설계", 국방과학연구소, 1991.
 - 4) 오진석, 김윤식, 노창주, "하이브리드 RSPWM 인버터의 스위칭기법에 관한 연구", 대한 전기 학회, Vol.44, No.9, pp1171~1176, 1995.
 - 5) 신정환, C가 미는 로봇트, 대창사, 1994.
 - 6) J. S. Oh, Y. S. Kim, C. J. Noh, "A Study on the Design and Analysis of Hybrid Inverter", ICPE '95, 1995.