

Development of a Temperature Controller for a Semiconductor Test Handler

趙秀營* 金宰塔** 康泰三** 李鎬俊* 高光一***

(Su-Young Cho · Jae-Yong Kim · Taesam Kang · Hojoon Lee · Kwang-Il Koh)

Abstract - In this paper, a temperature controller for a semiconductor test handler is proposed. First, a hardware system for identification and control is established using RTD sensors, an A/D converter, solid state relays, a heater, and a computer system. Second, using ARMAX model and least square method, a chamber model for the design of a controller is identified through experiments. The identified model is verified to describe the real plant very well in the sense that it shows very similar input-output responses to those of the real system. With the identified model an LQG controller is designed. Frequency response of the designed controller shows that it has 15 dB of gain margin and $(-50^\circ, +50^\circ)$ of phase margin. Experiment with a real test handler demonstrates a good performance in the sense that its overshoot and steady state error are smaller and response time is faster, compared with those of a conventional PID controller.

Key Words : Test Handler, LQG, Temperature Control

1. 서 론

반도체 테스트 핸들러란 제조공정이 끝난 반도체 IC들의 불량 유무를 검사하는 후공정장비로서, 테스트 핸들러내의 항온조를 온도범위 $-30^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ 까지 변화시키면서 IC들을 등급에 따라 분류하는 장비이다. 항온조의 온도는 전도, 대류, 복사를 통한 열의 흐름에 의하여 변화한다. 그리고 다른 열원이 가까이 있을 때는 서로 영향을 주고 받는 매우 복잡한 시스템이다. 반도체 테스트 핸들러는 정확한 온도에서 IC를 검사해야 하기 때문에 항온조의 온도제어가 핵심 기술이다.

온도 제어는 실내의 온도제어에서부터 시작하여 각종 화학공정, 반도체 생산, 인공 위성용을 포함한 각종 첨단 장비의 동작 환경 유지 등에 광범위하게 응용되는 분야이다. 온도 제어 방법으로는 주로 PID 제어를 이용하였으며[1,2,3,5], 최근에 현대 제어 이론을 응용하려는 시도가 이루어지고 있다[4,6,7]. W.E. Kramer와 I.G. Thompson[1]은 계단 입력 응답으로부터 칼로리 측정기의 전달함수를 구한 후 실험을 반복

하면서 적당한 PID 이득을 구하는 방법으로 제어기를 설계하였다. I. Karaila[2]는 높은 구동 전류로 인한 측정잡음을 효과적으로 제거함으로써 결과적으로 유리섬유 노즐의 온도 제어기의 성능을 개선할 수 있음을 보였다. J. Yang 과 Jo Lue[3]은 마이크로 컴퓨터를 이용하여 열전쌍의 비선형성을 보강한 후 일정 범위에서는 비례 제어를, 그 이외의 범위에서는 온-오프 제어를 통하여 반도체 어닐링(annealing) 오븐의 온도를 제어하였다. J.S. Traynor 및 S. Chen 과 R. Klafter[4]는 외부 교란을 모델에 포함시킨후 상태 피드백 제어를 통하여 챔버의 온도를 제어하였다. 제어 이득은 페루프 시스템이 미리 주어진 시스템의 특성방정식과 같아지도록 하는 극점 지정 방법(pole assignment)을 이용하였다. X. Wang[5]은 PID 제어기를 마이크로 컴퓨터에 구현하여 spectrofluorometer의 온도 제어에 응용하였다. B.W. Surgenor and J.K. Pieper[6]은 LQ(Linear Quadratic) 제어기를 이용하여 보일러의 증기 온도를 제어하였으며, PID 제어기에 비하여 성능이 매우 우수함을 보였다. 최근 J. Yang[7]은 용접기에 응용할때의 PID 제어기, Fuzzy 제어기, $H-\infty$ 제어기의 성능을 비교분석하였으며, 시간 지연을 고려할 수 있는 $H-\infty$ 제어기가 용접기 온도 제어에서 우수한 성능을 가짐을 보였다. 그러나 시간지연을 고려하는 $H-\infty$ 제어기는 계산이 매우 복잡하다는 단점을 갖고 있다.

본 연구에서는 최적제어이론이 적용되면서도 비교적 계산이 간단한 단일 입출력 LQG(LTR) 제어기[14,15]를 이용하여 반도체 테스트 핸들러의 온도 제어 가능성을 타진하였

* 準會員 : 湖西大 情報通信工學部 碩士
 ** 準會員 : 湖西大 電氣電子制御工學部 碩士課程
 *** 正會員 : 湖西大 電氣電子制御工學部 助教授
 * 正會員 : 湖西大 情報通信工學部 副教授
 *** 正會員 : (株)未來産業 研究所 研究所長
 接受日字 : 1998年 4月 11日
 最終完了 : 1999年 4月 6日

다. 즉, 현재 사용되고 있는 1개의 히터와 1개의 온도 센서를 이용하여 한 지점의 온도를 일정하게 유지하는 방법을 다루었다. 그러나 실험시에는 다른 각 부분의 온도도 측정하여 열역학적으로 편차가 줄어드는 챔버를 설계하는데 도움을 줄 수 있게 하였다. 테스트 핸들러의 항온조 내의 온도를 일정하게 유지하기 위해서는 먼저 적절한 하드웨어와 개발 환경 그리고 온도 센서인 백금(RTD) 센서의 선정과 교정이 매우 중요하다. 2장에서는 항온조의 구성 및 동작 원리에 대한 상세한 설명을 하였다. 또한 온도 센서, 센서 신호 입력, SSR 신호 제어용 보드, VxWorks에 연결되어 제어되는 전체 시스템 구축에 대한 설명을 하였다. 3장에서는 온도 모델을 알아내기 위한 식별 기법 및 식별 실험 내용 및 결과를 기술하였다. 시스템 식별 모델로는 잘 알려진 ARMAX 모델을 사용하였으며, 최소자승법을 이용하여 파라미터를 추정하였다. 4장에서는 LQG 제어기법을 이용한 온도 제어기 설계에 대하여 다루었다. 또한 주파수 응답을 통하여 보장되는 안정도 여유를 확인하였으며, 반도체 테스트 핸들러의 제어기를 설계하였다. 5장에서는 설계된 제어기의 성능 실험에 대하여 기술하였으며, 끝으로 6장에서 결론을 맺었다.

2. 온도 제어 시스템

2.1 반도체 테스트 핸들러의 구조 및 동작 원리

테스트 핸들러 MR-5100의 항온조 부분은 히터, 팬, 그리고 테스트 사이트로 구성되어 있다. 이 구성을 그림으로 나타내면 그림 1과 같다. 이 항온조는 한꺼번에 32개의 IC들을 동시에 테스트할 수 있게 제작되어졌다. 패키징이 완료된 IC들은 테스트 핸들러 내의 항온조로 들어오게 되며, 들어온 IC들은 판으로 되어있는 프리 히터 부분에서 예열이 이루어진 후에 테스트부의 각 위치에 놓여지게 된다. 이렇게 위치되어진 IC들은 히터에 의해 가열된 공기를 팬으로 IC 테스트 부분까지 송풍하게 된다. 이때 테스트부의 온도를 센서로 읽어 들여서 히터의 온도를 제어하며, 제어된 32개 지점의 온도는 레코더와 동시에 화면에 출력시키고, 항온조 내에서는 제어된 온도 상태에서 IC들을 테스트한 후에 양·불량을 판정한다. 이때 상측 16개 지점(□)과 하측 16개 지점(×)에 위치된 IC들을 동일한 조건에서 테스트하기 위해서는 각 지점의 온도가 시간에 따라 일정하여야 한다. 또한 상·하측 지점과 좌·우측 지점, 그리고 각 지점 간의 온도 오차가 작을수록 좋다. 본 연구에서는 온도 오차 문제들 중에서 한 지점의 온도를 일정하게 유지하는 문제를 다루었다.

이 장비의 항온조는 단열이 잘 되어 있어서 외부의 영향을 비교적 작게 받는다. 그러나 냉각 수단을 따로 사용하지 않기 때문에 오버슈트를 가능한 줄여야 하고, 정착시간도 짧을수록 좋다. 그러나 복잡한 기계 시스템들로 이루어져 있기 때문에 물리적 모델링을 하는 것이 거의 불가능하고 기계 시스템이 시간에 따라 크게 변하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 항온조의 파라미터를 처음 시작할 때 구하고, 그 후로는 이 때 구하여진 파라미터를 사용하도록 하였다.

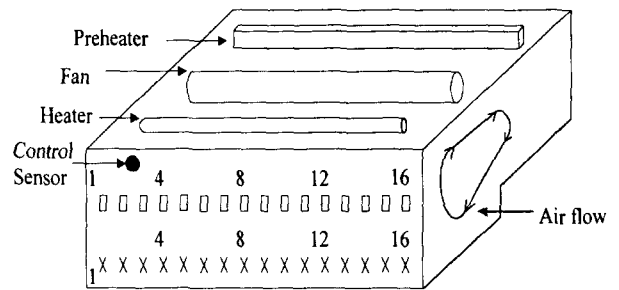


그림 1. 항온조의 구조

Fig. 1. Schematic of Chamber

2.2 시스템의 구성 및 개발 환경

먼저 온도 센서로는 RTD 센서를 이용하였다. 정밀한 측정을 위하여 각 센서의 파라미터를 측정한 후 온도 7차 방정식을 이용하여 보상하였다. 그리고 센서를 연결하는 도선의 저항의 영향을 줄이기 위해 3선 연결 보상법을 이용하였다[8,9].

본 실험을 위해서 IP(Industry Pack)-RTD 보드와 IP-Digital 24를 사용하였다. IP-RTD로 채널 선택 신호를 주어서 2곳의 온도 값을 읽어들이고, 0 ~ +5V의 아날로그 출력을 주게 구성하였다. 이 보드는 0.25mA의 여기전류를 사용한다. IP-Digital 24는 A/D 변환기로부터 입력받아서 히터의 제어신호로 사용하였다. 전체 시스템은 VME 486 PC를 사용하여 윈도우즈 상에서 온도 제어 보드를 제어한다. 임계 실시간 제어를 위하여 VxWorks라는 유닉스 체계의 운영체제를 사용하여서 네트워크를 이용하여 MC68040의 CPU를 동작하게 구성하였다[10,11]. 개발이 완성된 온도 제어 시스템은 ROM에 저장하여 필요시마다 단독으로 수행될 수 있게 하였다. IP-Digital 24로부터 출력되는 PWM 신호는 2초 단위로 200개의 펄스로 분할하여 제어하였다.

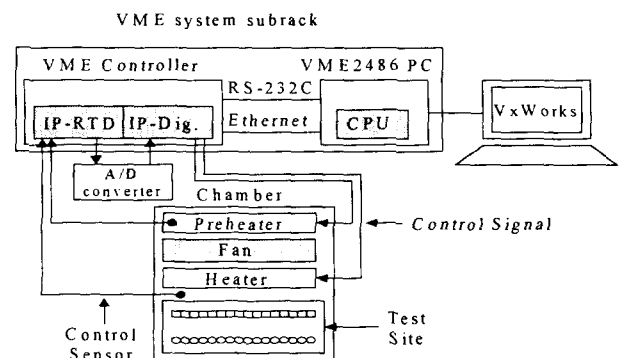


그림 2. MR-5100의 제어 회로

Fig. 2. Control circuit of MR-5100

출력 펄스는 오실로스코프 상으로 볼 수 있게 하였으며,

이 제어 신호는 항온조의 히터로 연결되어 있는 무접점 릴레이를 제어하고, 제어된 항온조내의 온도 분포는 항온조내에 고정시켜둔 온도 측정용 RTD 센서로부터 차트 레코더 상으로 출력이 된다. 또한, 온도 제어용 RTD 센서로부터 제어되는 온도값이 화면에 출력된다. 전체 시스템 구성은 그림 2와 같다.

3. 온도 모델의 식별

3.1 온도 모델의 식별 기법

정밀 온도 제어를 위해서는 온도 모델을 정확하게 알아내는 것이 매우 중요하다. 제어 입력은 항온조로 들어가는 전압이며, 출력은 항온조의 온도가 된다. 온도 제어를 위해서는 먼저 시스템의 파라미터를 추정하여야 하며, 파라미터를 추정하기 위해서는 모델과 추정 방법이 결정되어야 한다. 본 연구에서는 다음과 같이 주어지는 ARMAX(auto-regressive moving average with external input) 모델을 이용하였다 [12,13].

$$A(q)y(t) = B(q)u(t-n_k) + C(q)e(t) \quad (3.1)$$

여기서 $A(q), B(q), C(q)$ 는 식(3.2)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} A(q) &= 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{na}q^{-na} \\ B(q) &= b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb+1} \\ C(q) &= 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_{nc}q^{-nc} \end{aligned} \quad (3.2)$$

여기서 n_k 는 순수한 시간 지연을 나타내는 것인데 본 연구에서는 0으로 두었다. 보통 온도 제어 시스템은 간략하게 할 경우 1차 시스템으로도 많이 간주하지만 본 연구에서는 2차 시스템으로 모델링하여 보다 정밀한 온도 모델을 사용할 수 있게 하였다. 2차 시스템이므로 n_a, n_b, n_c 는 각각 2, 3, 3으로 두었다. 다음으로 파라미터 식별을 수행하기 위해서는 오차 교정 방법이 정해져야 하는데, 본 연구에서는 가장 보편적인 방법인 최소 자승법을 통하여 파라미터 식별시 오차 보정을 하였다. 최소 자승법에서 파라미터 식별을 위한 오차 보정은 구체적으로 다음과 같은 알고리즘을 이용한다. 식(3.3), 식(3.4)와 같이 추정하고자 하는 시스템의 계수 추정치로 이루어진 파라미터 벡터 $\hat{\theta}$ 와, 시스템의 출력 및 입력으로 이루어진 벡터 ϕ 를 정의하자.

$$\hat{\theta}^T(t) = [\hat{a}_1, \dots, \hat{a}_{na}, \hat{b}_1, \dots, \hat{b}_{nb}, \hat{c}_1, \dots, \hat{c}_{nc}] \quad (3.3)$$

$$\phi^T(t) = [-y(t-1), \dots, -y(t-n_a), u(t-n_k-1), \dots, u(t-n_k-n_b), \varepsilon(t-1), \dots, \varepsilon(t-n_c)] \quad (3.4)$$

여기서, $\varepsilon(t) = y(t) - \hat{y}(t)$ 로 정의한다. 이때, 계수 추정치의 갱신은 식(3.5)와 같이 이루어지며, 초기치 $\hat{\theta}(0)$ 는 실제 값에 근사하게 잡아준다.

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + F(t+1)\phi(t+1)e(t+1) \quad (3.5)$$

여기서 e 는 출력 측정치와 추정치 사이의 오차를 나타내며 식(3.6)과 같이 정의 된다.

$$e(t+1) = y(t+1) - \hat{y}(t+1) \quad (3.6)$$

그리고 $F(t)$ 는 출력 오차 e 를 추정 계수에 반영하기 위한 교정 벡터(correcting vector)이며, 식(3.7)과 같이 정의된다.

$$F(t+1) = F(t) - \frac{F(t)\phi(t+1)\phi(t+1)^T F(t)}{1 + \phi(t+1)^T F(t)\phi(t+1)} \quad (3.7)$$

여기서 초기 추정 오차 $F(0) = \alpha I$, $\alpha \gg 1$ 로 둔다.

3.2 식별실험

식별실험에서의 가장 큰 관건은 입력에 대한 출력과의 관계에서 구하여진 파라미터가 실제 플랜트의 특성을 얼마나 근사하게 묘사하는가 이다. 제어기의 성능을 높이기 위해서는 정확한 파라미터의 식별이 필수적이며, 파라미터를 잘 모르면 그만큼 안정도 여유 및 성능이 떨어질 수밖에 없다.

본 연구에서는 먼저 온도 모델을 간략한 1차 시스템으로 간주한 후 식별실험을 하였다. 그러나 입출력을 비교한 결과 매우 큰 차이가 있었다. 따라서 차수를 1차 증가시킨 2차 시스템 모델에 기초한 식별실험을 수행하였다. 온도 항온조 시스템을 외란이 있는 2차 시스템으로 간주하였으며, ARMAX 방법을 적용하여 모델식별 실험을 하였다. 실제 항온조의 입출력은 그림 3의 점선 부분과 같다. 여기서 입력은 불규칙한 포화 입력을 줌으로써 가능한 많은 주파수 성분을 뽑아낼 수 있게 하였다. 입력은 그림 3의 밑부분에 나타낸 것처럼 불규칙한 구형파를 이용하였다. 실험은 30분 동안 수행하였다.

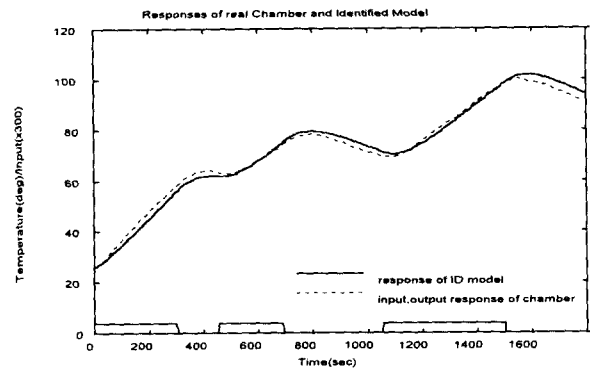


그림 3. 실제 항온조 및 식별된 항온조의 입출력 응답
Fig 3. Input, output responses of a real chamber and an identified model

이렇게 오랫동안 실험을 수행한 이유는 항온조의 반응이 워낙 느리기 때문이다. 즉 느리게 반응하는 모드까지 식별하기 위해서 30분이라는 비교적 긴 시간 동안 식별 실험을 수행하였다. 이때, ARMAX기법에 의해 전달함수를 구하면 식(3.8)과 같다.

$$H(z) = \frac{10^{-4} * (0.1367 + 0.2134z^{-1} + 0.04691z^{-2})}{1 - 1.9781z^{-1} + 0.9781z^{-2}} \quad (3.8)$$

여기서 Sampling time은 6초 이며, H(z)를 보면 극점은 $z_1 = 0.9987$, $z_2 = 0.9794$ 이며, z_1 이 우세극(dominant pole)이다. 이것을 연속 모델로 바꾸면 식(3.9)와 같다.

$$H(s) = \frac{10^{-4} * (-0.13375s^2 - 0.356s + 0.0083)}{s^2 + 0.0111s} \quad (3.9)$$

여기서 보면 극점이 0 및 -0.0111이며, 우세 극점은 0임을 알 수 있다. 식별된 파라미터의 타당성을 검증하기 위하여, 식별 실험에서와 똑같은 제어 입력을 식별된 모델에 가하여 응답을 구하여 보았는데 그 결과는 그림 3의 실선 부분과 같다. 그림 3의 실제 실험 출력과 식별된 시스템의 응답을 비교하여 보면 두 응답이 매우 일치함을 알 수 있다. 정량적으로 보면 오차의 평균이 -0.06°C 이고, 오차의 분산이 1.89°C 이다. 전체 온도 범위가 75°C 인 것을 감안하면 식별된 모델이 실제의 시스템을 매우 잘 모사하고 있다고 판단된다.

4. LQG기법을 이용한 제어기의 설계

제어기의 설계를 위해서는 가제어성, 안정도, 근궤적, 최대 오버슈트, 상승 시간, 정착 시간 등을 설계 파라미터로 해서 항온조의 성능에 적합한 제어기를 설계하여야 한다. 제어기 설계는 주어진 성능 지수를 최소화하면서 안정도 강인성을 유지하도록 제어 신호 $u(t)$ 를 결정하는 것이다.

LQG 제어기는 그 자체로는 안정도 여유를 보장할 수 없지만 LTR(Loop Transfer Recovery) 과정을 거치면 LQ조정기의 이득여유와 위상 여유인 $[1/2, \infty]$, $\pm 60^\circ$ 를 복구시킬 수 있다.

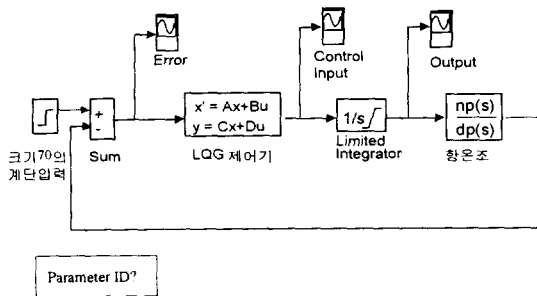


그림 4. 항온조 및 제어기의 흐름도

Fig. 4. Flow chart of chamber & controller

또한 목표 루프를 설계할 때 시스템의 상태 가중행렬인 Q 행렬과 입력 가중 행렬인 R 행렬의 상대적인 크기만 조정하면서 개념적으로 쉽게 원하는 루프의 형상을 만들 수 있다는 장점이 있다[14,15].

항온조 및 제어 시스템의 흐름도는 그림 4와 같다. 여기서 1/s는 계단 입력 응답에 대하여 정상 상태 오차를 영으로 만들기 위해 첨가된 적분회로이다. 적분기가 추가된 항온조의 운동 방정식은 식(4.1)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0.2518 & 0.4945 & -0.4945 \\ -0.2537 & 0.5055 & -0.5055 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} y(t) &= Cx(t) + Du(t) \\ &= 10^{-4} * [-0.13367 \quad -0.05103 \quad 0.08379] x(t) \end{aligned}$$

이때, 적분기가 추가된 모델 항온조의 특이치(singular value)는 그림 5와 같다.

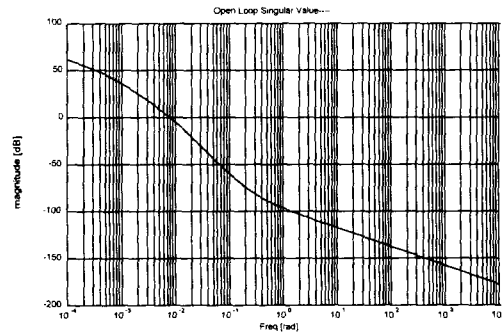


그림 5. 항온조 및 적분기의 특이치

Fig. 5. Singular value of chamber & integrator

비용 함수 $c(t)$ 는 식(4.2)과 같이 정의한다.

$$c(t) = x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t) \quad (4.2)$$

여기서 Q와 R의 상대적인 크기를 조정함으로써 원하는 루프의 형상을 만들 수 있다. 본 연구에서는 R의 크기를 일정하게 둔 후 Q의 크기를 조정하면서 루프의 형상을 관찰하였다. 여기서 우리가 원하는 것은 입력과 출력의 관계이므로 Q를 임의의 행렬로 두지 않고 pCC 로 둔 후 p의 크기를 변화시켰다. 여러 p에 대한 주파수 응답 분석 결과 $p=1$ 일 때가 루프 모양이 가장 바람직하게 나와서 $p=1$ 일 때 즉, Q와 R을 식(4.3)과 같이 두었을 때를 목표루프로 하였다.

$$\begin{aligned} Q &= p * C^T * C = 10^{-9} * \begin{bmatrix} 0.1787 & 0.0682 & -0.1120 \\ 0.0682 & 0.0260 & -0.0428 \\ -0.1120 & -0.0428 & 0.0702 \end{bmatrix} \\ R &= [1] \end{aligned} \quad (4.3)$$

이때 LQ 제어가 최소화해야 할 목적함수 J 는 식(4.4)과 같이 주어진다.

$$J = \int_0^{\infty} c(t)dt \quad (4.4)$$

이때, 목적함수 J 를 최소화하는 제어 입력 $u^*(t)$ 는 식(4.5)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} u^*(t) &= -Kx(t) \\ &= -R^{-1}B^T Px(t) \end{aligned} \quad (4.5)$$

여기서, P 는 식(4.6)과 같이 리카티 방정식(Riccati Equation)의 양의 정칙 해이다.

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (4.6)$$

본 연구에서 사용한 파라미터를 대입한 후 K 를 구하면 다음과 같이 주어진다.

$$K = [0.0112 \quad 0.0001 \quad -0.0001] \quad (4.7)$$

상태 변수 모두가 측정 가능하다고 가정할 때, 여기서 구한 제어 이득을 가지고 상태 피드백 제어를 구성하였을 때의 주파수 응답, 즉 목표 루프의 특이치는 그림 6의 맨 윗부분 직선과 같이 주어진다. 이 그림에서 제어 입력의 통과 대역은 약 10^{-2} rad/sec 정도임을 알 수 있다.

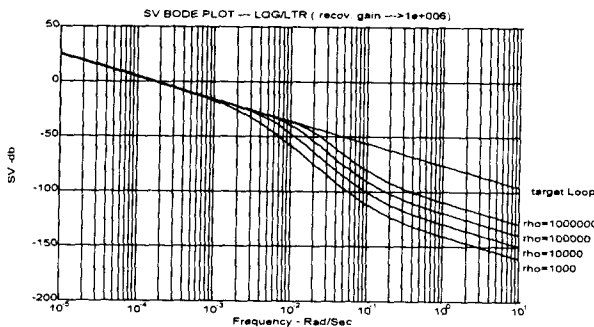


그림 6. 목표 루프의 특이치 및 ρ 의 변화에 따른 루프의 회복
Fig. 6. Singular value of target loop and loop recovery with change of ρ

상태 추정기는 칼만 필터를 이용한다. 원래 칼만 필터는 상태를 정확하게 추정하는 것이 주목적이거나, 제어기의 입장에서는 상태의 추정정보는 제어기의 안정도 및 성능 유지에 주목적이 있으므로, 칼만 필터의 프로세스 잡음 및 측정 잡음은 임의로 조절하여 원하는 성능을 나타내도록 하면 된다. 본 연구에서는 프로세스 잡음과 측정 잡음을 식(4.8)과 같이 두었다.

$$\begin{aligned} W &= B^T B + \rho I, \\ V &= I \end{aligned} \quad (4.8)$$

그림 6은 ρ 의 변화에 따라 루프 형상이 회복되는 과정을 보여준다. 그림에서 밑부분부터 ρ 가 각각 1000, 10000, 100000, 1000000일 때의 주파수 응답을 보여 주고 있다. 그림에서 ρ 가 1000000일 때 루프가 충분히 회복됨을 알 수 있으며, 따라서 이 값을 채택하였다.

이때 칼만 필터를 포함한 최종 제어기의 상태 방정식은 식(4.9)과 같이 주어진다. 여기서 T_c 는 온도 기준 입력 즉, 온도 명령을 나타내며, $y(t)$ 는 온도 출력을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_e(t) &= A_f x_e(t) + B_f (y(t) - T_c) \\ u^*(t) &= -[C_f x_e(t) + D_f (y(t) - T_c)] \end{aligned} \quad (4.9)$$

여기서 A_f, B_f, C_f, D_f 는 주어진 파라미터를 대입하면 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} A_f &= \begin{bmatrix} 0.0022 & 0.0050 & -0.0083 \\ 1.4630 & 0.9569 & -1.2537 \\ 0.7991 & 0.9075 & -1.1655 \end{bmatrix} \\ B_f &= 10^{-4} * \begin{bmatrix} 0.1 \\ 9.0608 \\ 7.8762 \end{bmatrix} \\ C_f &= [0.0112 \quad 0.0001 \quad -0.0001] \\ D_f &= [0] \end{aligned} \quad (4.10)$$

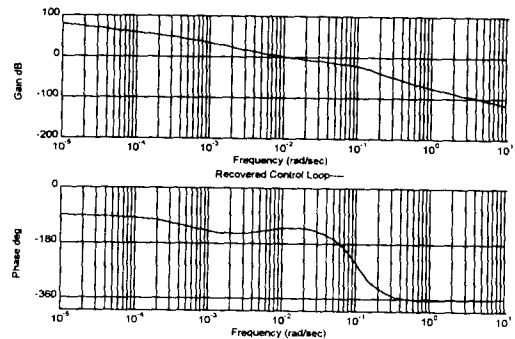


그림 7. 항온조 및 제어기의 보우드 선도
Fig. 7. Bode plot of chamber & controller

이때, 제어기를 포함한 개루프의 보드(bode) 선도는 다음 그림 7과 같다. 여기서 이론적 이득 여유는 약 15 dB 정도이고, 위상 여유는 약 $(-50^\circ, +50^\circ)$ 정도임을 알 수 있고, 따라서 안정도 여유도 충분함을 알 수 있다.

5. 실험 결과

설계된 제어기의 성능을 검증하기 위하여, 실제 시스템인 (주)미래산업의 MR-5100 반도체 테스트 핸들러에 기존의 제어기와 빠른 응답과 작은 오버슈트(overshoot)를 고려하여 설계된 제어기를 탑재하여 같은 환경에서 실험을 수행하였

다. 그림 8은 기존 제어기가 80℃의 정상상태에 이르기까지의 온도를 나타내는 그림으로써 항온조의 상승시간이 15분이며, 정상상태에서의 최대오차가 ±0.6℃이다. 그리고 정정시간은 54분이며, 최대 오버슈트는 6.4℃이고, 백분율최대 오버슈트는 7.5%이다.

설계된 제어기를 같은 환경에서 80℃의 정상상태에 이르기까지의 온도를 측정된 결과 그림 9와 같았다. 그림 9를 살펴보면 항온조의 상승시간은 8분이고, 정정시간은 35분, 최대오버슈트는 5℃, 백분율 최대오버슈트는 5.9%임을 확인할 수 있다.

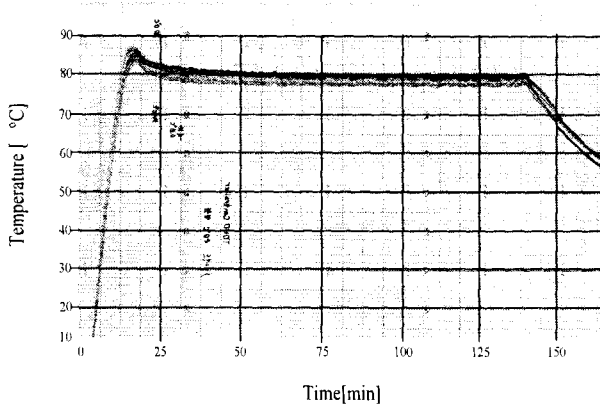


그림 8. 기존 제어기의 온도 응답
Fig. 8. Temperature response of existing controller

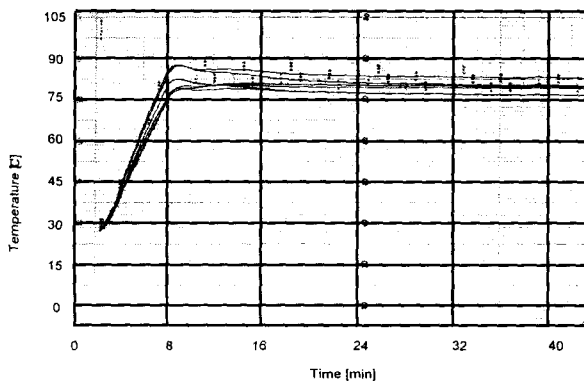


그림 9. 제안된 제어기의 온도 응답
Fig. 9. Temperature response of R.R.C. controller

그림 9에서 안정상태에 도달한 후에도 온도출력을 보면 약간의 미동(약 ±0.3℃정도)이 있는데, 이것은 온도센서의 잡음 때문으로 보인다. 그림 8과 그림 9를 살펴보면 항온조에 온도편차가 존재하고 있음을 알 수 있는데, 이와같은 온도편차의 원인은 반도체 테스트 핸들러의 항온조에는 히터가 하나이므로, 여러 지점의 온도 편차를 제어기의 개선을 통해서 줄일 수 없기 때문이다. 이 문제를 해결하기 위해서는 열역학적으로 편차가 작게 나도록 설계를 개선함으로써 각 지점간의 편차를 줄일 수 있다. 즉 온도편차를 줄이는 것은 제어의 문제라기 보다는 항온조의 기구학적인 문제이

므로 열해석을 통해 개선할 수 있다. 그림 8과 그림 9의 실험 결과를 요약하면 본 연구에서 개발된 제어기가 기존 제어기에 비하여 최대 오버슈트는 21.9%가 줄어들었고, 상승시간은 46.7%가 감소되었으며, 정상상태 오차는 50%가 감소되었다는 면에서 우수한 성능을 보임을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 MC68040 CPU를 이용한 VME 시스템, Industry Pack 모듈, RTD 온도 센서, 컨트롤러 보드, I/O 시스템, VxWorks를 이용하여 시스템을 구축하였으며, A/D 변환기 회로를 설계제작 하였다. 그 결과로써 기존의 시스템은 MC68040 CPU의 기능을 활용하지 못하고, 부수적인 수입 컨트롤러를 추가로 장착하는 문제점이 있었지만, 본 실험에서는 MC68040 CPU를 채용한 VME 시스템 제어기만으로 모든 것을 제어하였다. 또한, 항온조 내의 온도 분포를 파악함으로써 항온조의 성능을 개선하기 위한 방향을 제시하였고, 식별기법을 적용하여 실제 반도체 테스트 핸들러의 모델을 추정하였으며, 시뮬레이션 결과와 실험 결과의 비교를 통해서 근사하게 일치하는가를 검증하였다. 제어기는 LQG 제어기법을 적용하여 반도체 테스트 핸들러의 제어기를 설계하였고, 실제 시스템에 적용하여 그 성능을 검증하였다. 그 결과로써 기존 온도 제어기의 최고치와 최저치의 온도 오차가 ±0.6℃인데 비하여, R.R.C. 제어기는 ±0.3℃ 범위 내의 오차를 갖게하므로써 온도 오차가 1/2 가량 줄어들었다. 그리고 모든 프로그램을 모듈화하는 작업을 동시에 실시하여 다른 구조의 항온조에도 적용이 가능하게 하였다. 실험결과 빠른 응답과 작은 오버슈트의 면에서 설계된 제어기가 우수한 성능을 나타내었다. 본 연구의 결과는 파라미터 식별까지를 포함하므로 테스트 핸들러 뿐 아니라 임의의 온도 제어 시스템에 쉽게 응용될 수 있다.

본 연구는 한국과학재단 지정 “호서대학교 반도체 제조장비 국산화 연구센터(R.R.C.)”와 “(주) 미래산업”의 지원하에 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] W.E. Kramer and J.G. Thompson, "A Standard Device for Calibrating Calorimeter Test Rooms-Control System," ASHRAE Transactions, Vol. 92, Part 1A, pp. 362-376, 1986.
 [2] I. Karaila and J. Horelli, "Temperature Control at a High Interference Level: A Case Description," Temperature, Its Measurement and Control In Science and Industry, American Institute of Physics, pp. 1279-1281, 1982.
 [3] Jeng-Rern Yang and Juh Tzeng Lue, "A Microcomputer-Based Programmable Temperature Controller," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. IM-36, No. 1, March 1987.
 [4] John S. Traynor, Shih-Jiun Chen and Richard D.

Klafter, "State Feedback Control of Temperature in an Environmental Chamber," Proceedings of the American Control Conference, Published by American Automatic Control Council, pp. 2589-2594, 1990.

[5] Xiao Qui Wang, Computerized Temperature Control Instrumentation for a Spectrofluorometer, Thesis (M.S.), The Ohio State University, 1991.

[6] B.W. Surgenor and J.K. Pieper, "An Optimal Multivariable Controller with Application to Steam Temperature Control in Boiler," Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 114, pp. 733-736, December 1992.

[7] Jin Yang, Feedback Control of Temperature Fields in an Arc Welding Process, Thesis(M.S.), The Ohio State University, 1996.

[8] 강기훈, 박종철, 박찬복, 온도, 한국표준연구소 정밀측정 교재, 공업진흥청, 1985.

[9] 荒井由太郎 著, 김영해 譯, 센서 인터페이싱, No. 1, 기전 연구사, 1995.

[10] THE VMEbus SPECIFICATION, VMEbus international Trade Association, 1987.

[11] VxWorks Training Workshop, Wind River System, Inc, 1994.

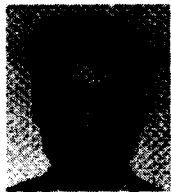
[12] P.Eykhoff, System Identification, John Wiley & Sons, 1974

[13] I.D. Landau, System Identification and Control Design, Prentice-Hall Inc, 1990

[14] M. Green and D.J.N. Limebeer, Linear Robust Control, Prentice Hall Inc, 1995

[15] 김종식, 선형 제어시스템 공학, 1993, 청문각

저 자 소 개



조수영 (趙秀營)

1971년 11월생. 1997년 호서대학교 정보통신 공학부 졸업(공학사), 1999년 동 대학원 졸업(공학석사), 1998년 12월 ~ 현재 (주)서울 다다 기술개발팀 연구원으로 재직중. 주 관심분야는 광통신 WDM 시스템 및 H/W 설계, 반도체 장비의 온도 제어, 철도 신호 제어 등임.

Tel : (02) 782-0021
E-mail : swim71@hitel.net



김재용 (金宰瑢)

1973년 10월생. 1997년 호서대학교 전기전자 제어 공학부 졸업(공학사), 1997년 3월 ~ 현재 호서대학교 대학원 석사 과정. 주 관심분야는 강인 제어, 유도제어 시스템, 온도제어시스템, 모터제어 등임.

Tel : (0418) 540-5434
E-mail : jy_kim@hanmail.net



이호준 (李鎬俊)

1955년 8월생. 1978년 성균관대학교 전자공학과 졸업(공학사), 1980년 동 대학원 석사, 1987년 동 대학원 박사. 1982년 6월 ~ 1983년 6월 육군사관학교 전자공학과 전임강사, 1987년 3월 ~ 현재 호서대학교 정보통신공학부 부교수. 1991년 7월 ~ 1992년 6월 Stanford University 교환교수. 주 관심분야는 광통신 시스템, 광센서, 광신호처리, 반도체 장비의 온도 제어 등임

Tel : (0418) 540-5434
E-mail : hojoon@dogsuri.hoseo.ac.kr



강태삼 (康泰三)

1963년 4월생. 1986년 서울대학교 제어계측공학과 졸업(공학사), 1988년 동 대학원 석사, 1992년 동 대학원 박사, 1998.2 ~ 1999.2 미국 OSU 방문연구, 1994년 ~ 현재 호서대학교 전기전자제어 공학부 조교수. 주 관심분야는 강인 제어, 온도제어 및 모터제어 응용, 항법센서 및 항법 시스템 등임.

Tel : (0418) 540-5485
E-mail : tskang@dogsuri.hoseo.ac.kr



고광일 (高光一)

1957년 8월생. 1980년 서울대학교 전기공학과 졸업(공학사), 1982년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(공학석사), 1989년 University of Pittsburgh 졸업(공학박사). 1983년 ~ 1997년 금성사 중앙연구소 LG산전 연구소에 재직. 1997년 ~ 현재 (주)미래산업 연구소장 상무이사.

Tel : (0342) 780-6901
E-mail : kikoh@nexgen.co.kr