

반도체 테스트 핸들러의 온도제어 시스템 개발 II - 제어기 설계

Development of Temperature Control System for Semiconductor Test Handler II - Controller Design

김재용*, 강태삼*, 이석원*, 이호준*, 조수영*, 선기상*

* 호서대학교 전기전자제어공학부(Tel:0418-40-5485; Fax:0418-40-5480; E-mail:tskang@dogsuri.hoseo.ac.kr.)

† 호서대학교 정보통신공학부(Tel:0418-40-5199; Fax:0418-549-4715; E-mail:hojoon@dogsuri.hoseo.ac.kr.)

‡ (주)미래산업 부설연구소(Tel:0417-554-5070; Fax:0417-554-5090; E-mail:yrkim@miare.co.kr)

Abstract In this paper presented is a temperature controller for a semiconductor test handler. Using ARMAX model and least square method, the chamber model for the design of a controller is identified through experiment. With the identified model an LQG/LTR controller is designed. Experiment with a real test handler demonstrated good performance in that its overshoot is small and response time is fast.

Keywords Test handler, LQG/LTR, Temperature Control

1. 서론

반도체 테스트 핸들러란 제조공정이 끝난 반도체의 동작을 검사하는 장비이다. 반도체의 동작측정은 온도를 일정하게 유지하면서 이루어지는데 이 온도 제어시스템이 항온조이다. 항온조의 온도는 진도, 대류, 복사를 통한 열의 흐름에 의하여 변화한다. 그리고 다른 열원이 가까이 있을 때는 서로 영향을 주고 받는 매우 복잡한 시스템이다.

본 논문에서는 온도 모델을 정확히 알기 위해 실제 실험 데이터에 식별기법을 적용하여 모델을 추정하였으며 LQG/LTR제어기법을 응용하여 반도체 테스트 핸들러의 제어기를 설계 하였고, 실험을 통하여 그 성능을 검증하였다.

2. 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 결정되어야한다. 본 연구에서는 다음과 같이 주어지는 ARMAX(auto-regressive moving average with external input) 모델을 이용하였다.[1,3]

$$A(q)y(t) = B(q)u(t-n_k) + C(q)e(t) \quad (2.1)$$

여기서 A(q), B(q), C(q)는 식(2.2)와 같이 주어진다.

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{na}q^{-na}$$

$$B(q) = b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb+1} \quad (2.2)$$

$$C(q) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_{nc}q^{-nc}$$

다음으로 파라미터 식별을 수행하기 위해서는 오차 교정 방법이 정해져야하는데, 본 연구에서는 가장 보편적인 방법인 최소자승법을 통하여 파라미터 식별시 오차 보정을 하였다. 최소자승법을 사용하여 파라미터 식별을 위한 오차 보정은 구체적으로 다음과 같은

알고리즘을 이용한다. 식(2.3), 식(2.4)와 같이 추정하고자 하는 시스템의 계수 추정치로 이루어진 파라미터 벡터 $\hat{\theta}$ 와, 시스템의 출력 및 입력으로 이루어진 벡터 ϕ 를 정의하자.

$$\hat{\theta}^T(t) = [\hat{a}_1, \dots, \hat{a}_{na}, \hat{b}_1, \dots, \hat{b}_{nb}, \hat{c}_1, \dots, \hat{c}_{nc}] \quad (2.3)$$

$$\phi^T(t) = [-y(t-1), \dots, -y(t-na), u(t-1), \dots, u(t-nb), e(t-1), \dots, e(t-nc)] \quad (2.4)$$

여기서 $e(k) = y(k) - \hat{y}(k)$ 로 정의한다. 이때, 계수 추정치의 갱신은 식(2.5)와 같이 이루어지며, 초기치 $\hat{\theta}(0)$ 는 실제 값에 근사하게 잡아준다.

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + F(t+1)\phi(t)e(t+1) \quad (2.5)$$

여기서 e 는 출력 측정치와 추정치 사이의 오차를 나타내며 식(2.6)과 같이 정의 된다.

$$e(t+1) = y(t+1) - \hat{y}(t+1) \quad (2.6)$$

그리고 $F(t)$ 는 출력 오차 e 를 추정 계수에 반영하기 위한 교정 벡터(correcting vector)이며, 식(2.7)과 같이 정의 된다.

$$F(t+1) = F(t) - \frac{F(t)\phi(t)\phi(t)^T F(t)}{1 + \phi(t)^T F(t)\phi(t)} \quad (2.7)$$

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

3. 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 온도 챔버 시스템을 외란이 있는 2차 시스템으로 간주하였으며, ARMAX 방법을 적용하여 모델식별 실험을 하

였다. 실제 챔버의 입출력은 그림 1과 같다.

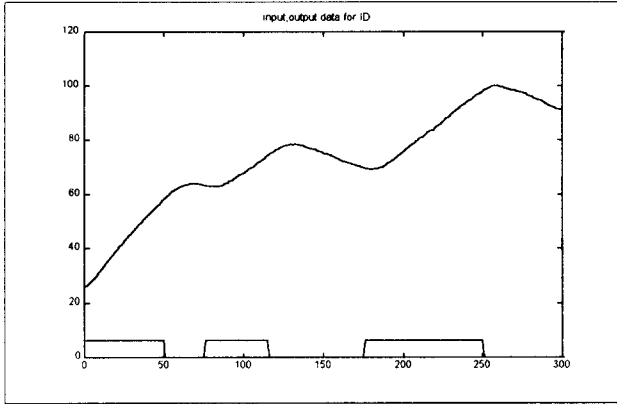


그림 1. 실제 챔버의 입출력 응답
Fig 1. Input, output response of chamber

이때, ARMAX기법에 의해 전달함수를 구하면 식(3.1)과 같다.

$$H(z) = \frac{10^{-4} * (0.1367 + 0.2134z^{-1} + 0.04691z^{-2})}{1 - 1.9781z^{-1} + 0.9781z^{-2}} \quad (3.1)$$

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(3.2)와 같다.

$$H(s) = \frac{10^{-4} * (-0.13375s^2 - 0.356s + 0.0083)}{s^2 + 0.0111s} \quad (3.2)$$

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 2와 같다.

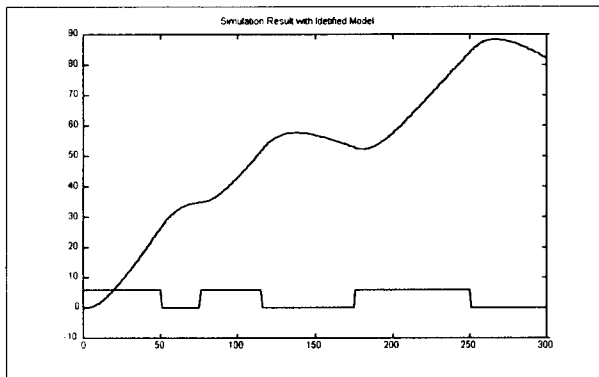


그림 2. 식별된 모델의 응답
Fig 2. Response of identification model

그림 1과 그림 2를 비교해 보면 초기치에 의한 성분을 빼고는 모양이 거의 비슷함을 알 수 있다.

여기서 초기치가 다른 것은 시뮬레이션에서는 초기 온도를 0°C로 하였는데, 실제 초기 온도는 대략 25°C 정도였기 때문이다. 따라서, 실험 결과와 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 비교해 볼 때,

구하여진 파라미터는 실제의 온도 시스템을 잘 모사하고 있다고 판단된다.

4. LQG/LTR기법을 이용한 제어기의 설계

제어기의 설계를 위해서는 가제어성, 안정도, 근계적, 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/LTR 제어기는 LQ조정기의 이득여유와 위상 여유인 $[1/2, \infty]$, $\pm 60^\circ$ 를 복구시켜 LQG제어기도 LQ조정기의 여유와 같은 여유를 갖도록 하는 제어기이다.[2,4]

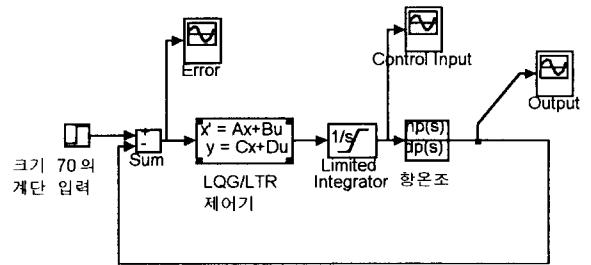


그림 3. 항온조 및 제어기의 흐름도
Fig 3. Block diagram of chamber & controller

항온조 및 제어 시스템의 흐름도는 그림 3과 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 4와 같다.

목표루프를 설계하기 위해서는 최적화하기 위한 기준이 필요한데, 여기서는 명령 추종 속도와, 가해지는 입력의 크기를 줄이는 것으로 한다. 비용 함수 $c(t)$ 는 식(4.2)과 같이 정의한다.

$$c(t) = x^T(t) Q x(t) + u^T(t) R u(t) \quad (4.2)$$

본 연구에서 Q, R은 다음과 같이 주었다.

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

이때 LQ 제어기가 최소화해야할 목적함수 J는 식(4.3)과 같이 주어진다.

$$J = \int_0^{\infty} c(t) dt \quad (4.3)$$

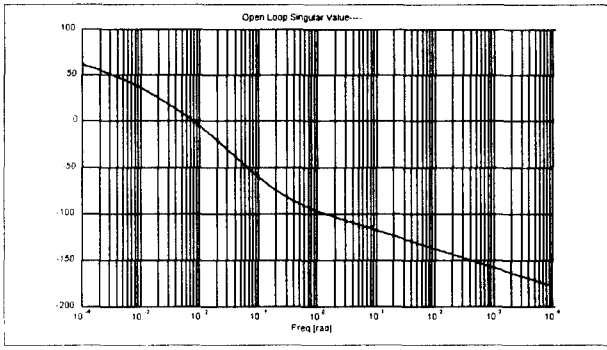


그림 4. 항온조 및 적분기의 특이치
Fig 4. Singular value of chamber & integrator

이때, 목적함수 J 를 최소화하는 제어 입력 $u^*(t)$ 는 식(4.4)과 같이 주어진다.

$$u^*(t) = -Kx(t) \quad (4.4)$$

$$= -R^{-1}B^T P x(t)$$

여기서, P 는 식(4.5)과 같이 리카티 방정식(Riccati Equation)의 양의 정칙 해이다.

$$PA + A^T - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (4.5)$$

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

$$K = [0.0112 \quad 0.0001 \quad -0.0001]$$

상태 변수 모두가 측정 가능하다고 가정할 때, 여기서 구한 제어 이득을 가지고 상태 피드백 제어기를 구성하였을 때의 폐루프 주파수 응답, 즉 목표 루프의 특이치는 그림 5와 주어진다. 이 그림에서 제어 입력의 통과 대역은 약 10 rad/sec 정도임을 알 수 있다. 상태 추정기는 칼만 필터를 이용한다. 원래 칼만 필터는 상태를 정확하게 추정하는 것이 주목적이나, 제어기의 입장에서는 상태의 추정보다는 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(4.6)과 같이 두었다.

$$W = B^T B + \rho I, \quad (4.6)$$

$$V = I$$

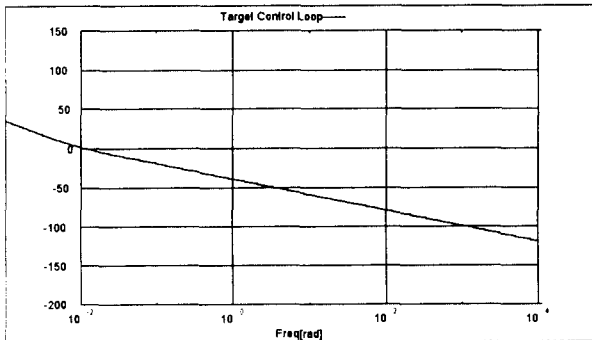


그림 5. 목표 루프
Fig 5. Target loop

여기서 ρ 를 조정하면서 주파수 특성을 분석한 결과, ρ 를 1000000으로 두었을 때 루프가 충분히 회복됨을 알 수 있었다.

이때 칼만 필터를 포함한 최종 제어기의 상태 방정식은 식(4.7)과 같이 주어진다. 여기서 T_c 는 온도 기준 입력 즉, 온도

명령을 나타내며, $y(t)$ 는 온도 출력을 나타낸다.

$$\dot{x}_e(t) = A_f x_e(t) + B_f (y(t) - T_c) \quad (4.7)$$

$$u^*(t) = -[C_f x_e(t) + D_f (y(t) - T_c)]$$

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

$$A_f = \begin{bmatrix} 0.0022 & 0.0050 & -0.0083 \\ 1.4630 & 0.9569 & -1.2537 \\ 0.7991 & 0.9075 & -1.1655 \end{bmatrix}$$

$$B_f = 10^{-4} * \begin{bmatrix} 0.1 \\ 9.0608 \\ 7.8762 \end{bmatrix}$$

$$C_f = [0.0112 \quad 0.0001 \quad -0.0001]$$

$$D_f = [0]$$

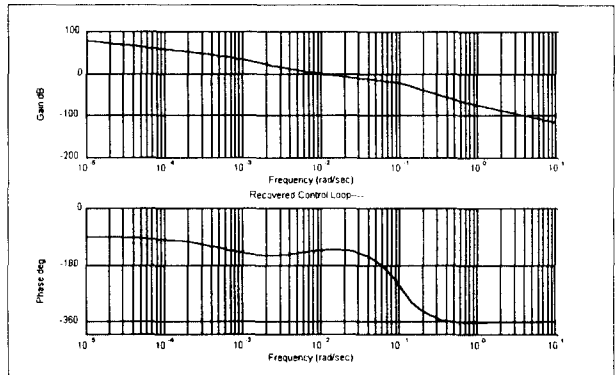


그림 6. 항온조 및 제어기의 보우드 선도
Fig 6. Bode plot of chamber & controller

이때, 제어기를 포함한 개루프의 보드(bode) 선도는 다음 그림 6과 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

본 논문에서 설계된 제어기의 성능을 검증하기 위하여, 실제 시스템인 미래산업(주)의 MR5300 반도체 테스트 핸들러에 제어기를 탑재하여 실험을 수행하였다. 본 논문에서 설계된 제어기는 빠른 응답과 작은 오버슈트(overshoot)를 고려하여 설계되었다. 그림 7은 95°C의 안정상태에 이르기까지의 온도를 나타내는 그림으로써 항온조의 상승시간은 8분이고, 정정시간은 35분, 최대 오버슈트는 6°C, 백분율 최대오버슈트는 5.9%이다.

그림 7과 그림 8에서 안정상태에 도달한 후에도 온도출력을 보면 약간의 미동(약 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 정도)이 있는데, 이것은 온도센서의 잡음때문으로 보인다. 보통 상승시간 15분, 정상상태에서의 오차 $\pm 1^\circ\text{C}$ 정도의 정밀도를 요구하므로 본 연구에서 개발된 제어기는 실제 반도체 테스트 핸들러에 바로 이용될 수 있다.

반도체 테스트 핸들러는 크게 프리히터(preheater)와 항온조로 구성되어 있으며, 프리히터는 반도체가 항온조에 들어가기 전에 표면온도차를 줄이기 위해 온도를 항온조와 비슷하게 가열시키는 장치이다. 그림 7과 그림 8의 하단에 물려있는 선들은 프리히터의 온도를 나타내고, 상단의 선들은 항온조의 온도를 나타낸다.

[2] M, Green and D.J.N. Limebeer, Linear Robust Control, Prentice Hall Inc, 1995
 [3] I.D. Landau, System Identification and Control Design, Prentice-Hall Inc, 1990
 [4] 김 종 식, 선형 제어시스템 공학, 1993, 청문각

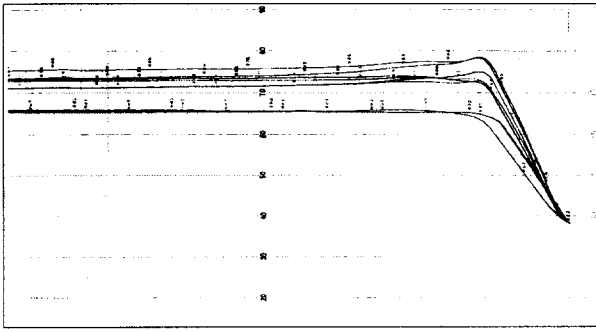


그림 7. 안정상태 이전의 온도곡선
 Fig 7. Temperature of before steadystate

그림 8은 안정상태에 도달한 후의 온도를 보여주는 그림으로써 온도가 일정하게 잘 제어되고 있음을 알 수 있다. 그림 8에서 항온조의 최대편차가 8℃이고, 프리히터의 최대편차가 4℃로 나타나는데 이렇게 실험에서 선이 여러개로 나타난 것은 항온조와 프리히터내의 여러 부분의 온도를 나타내는 것이며, 이것의 편차를 줄이는 것은 제어의 문제라기 보다는 항온조와 프리히터의 기구학적인 문제이며, 열해석을 통해 개선할 수 있다.

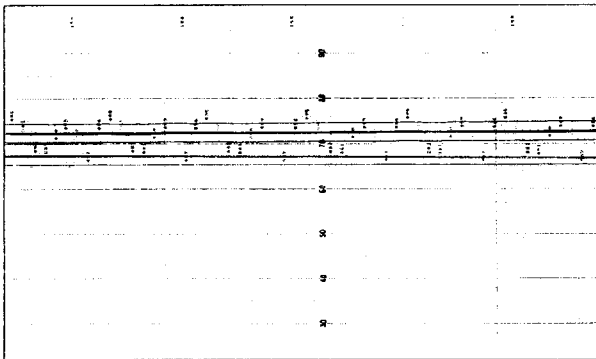


그림 8. 안정상태 이후의 온도곡선
 Fig 8. Temperature of after steadystate

6. 결론

본 논문에서는 식별기법을 적용하여 실제 반도체 테스트 핸들러의 모델을 추정하였고, 시뮬레이션 결과와 실험 결과의 비교를 통해서 근사하게 일치하는가를 검증하였다. 또한 LQG/LTR 제어기법을 적용하여 반도체 테스트 핸들러의 제어기를 설계하였고, 실제 시스템에 적용하여 그 성능을 검증하였다.

실험결과 빠른 응답과 작은 오버슈트의 면에서 설계된 제어기가 우수한 성능을 나타내었다.

[후기]

본 연구는 한국과학재단 지정 호서대학교 반도체 제조장비 국산화 연구센터와 미래산업(주)의 지원하에 수행되었음을 밝힙니다.

참고 문헌

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