論文98-35S-6-7

하중 혼합감도함수를 이용한 RTP 시스템의 H^∞ 제어기 설계

(H^∞ Controller Design for RTP System using Weighted Mixed Sensitivity Minimization)

李 相 慶 *, 金 鍾 海 *, 吳 道 昌 **, 朴 烘 培 *

(Sang Kyung Lee, Jong Hae Kim, Do Chang Oh, and Hong Bae Park)

요 약

산업현장에서는 반도체 공정의 산화막(oxidation)과 소둔(annealing) 공정에서 생산성을 향상시키기 위해 기존의 확산로(furnace)보다 RTP(rapid thermal processing) 시스템을 많이 사용하고 있다. 이러한 RTP 시스템의 주요 제어대상은 정확한 웨이퍼(wafer)의 온도조절과 웨이퍼 내의 균일성이다. 본 논문에서는 RTP 시스템의 온도변화와 같은 외란에 대한 견실안정성 문제를 해결하기 위해 하중 혼합감도함수를 이용하여 H^∞ 제어기를 설계하고, 온도추적 및 웨이퍼 내의 균일성 등의 견실성능 개선은 루프쉐이핑 방법을 이용한다. 온도에 따른 선형화된 모델은 차수문제로 인하여 실 시스템 구현시 제약조건이 있으므로 한켈(Hankel), 자승근 균형(square-root balanced) 및 슈어 균형(Schur balanced) 방법을 사용하여 모델 차수축소를 하여 제어기를 설계한다. 원래의 모델과 축소된 모델에 대해 성능을 비교하고 시뮬레이션을 통하여 설계한 제어기의 견실안정성과 성능을 확인한다.

Abstract

In industrial fields, RTP(rapid thermal processing) system is widely used for improving the oxidation and the annealing in semiconductor manufacturing process. The main control factors are temperature control of wafer and uniformity in the wafer. In this paper, we propose an H^∞ controller design of RTP system satisfying robust stability and performance using weighted mixed sensitivity minimization and loop shaping technique. And we need reduction technique because of the difficulty of implementation with the obtained high order controller. We deal with robust stability and performance of RTP system by the design of H^∞ controller for original model and reduced models, namely, Hankel, square-root balanced, and Schur balanced methods. An example is proposed to show the validity of the proposed method.

I. 서 론

RTP 시스템은 반도체 웨이퍼를 반응로에서 웨이퍼별로 가열, 가공, 냉각한다. 고속 열처리 가공기술은 집적회로를 세척(cleaning), 소둔(annealing), 산화(oxidation), 질화(nitridation), 화학적 증기 증착(chemical vapor deposition)을 하기 위해 웨이퍼 가공공정에 다양하게 사용되는 새로운 기술이다. 현재 집적회로 가공에서 웨이퍼의 열처리는 배치가공(batch process) 방법을 사용하여 큰 오븐에서 많은 웨이퍼

* 正會員, 慶北大學校 電子電氣工學部
(School of Electronic & Electrical Eng., Kyungpook Nat'l Univ.)

** 正會員, 建陽大學校 情報電子工學部
(Dept. of Elec. Information, Konyang Univ.)

接受日字: 1998年2月24日, 수정완료일: 1998年5月27日

를 동시에 작업하고, 수십분에서 수시간이 소요되므로 산업현장에서는 생산량에 많은 제약을 받는다. 이에 비해 RTP 시스템은 좁은 공간에서 웨이퍼별로 가공 온도에서 가열되고 냉각되며, 반응실 벽은 물로 냉각되어 상온을 유지한다. 따라서 가공단계가 완료될 때까지 수십초만이 필요하다. RTP 시스템을 설계할때 가장 중요한 문제는 온도제어를 위한 시스템 모델링인데, 1969년 Hu[7]에 의해 열방사, 열전달, 열응력 등에 대한 이론들이 발표되면서 1988년 Lord[9]와 Hill 등[6]에 의해 RTP 모델링에 대한 상세한 연구가 발표되었다. 특히 1992년 스탠포드 대학의 Norman 등[11]에 의해 RTP 시스템에 대한 모델링 방법이 완성되었고, 이를 바탕으로 RTP 시스템의 온도제어에 대한 제어기 설계 연구가 가속되었다. 제어기를 설계할 때 고려할 사항은 RTP 시스템의 복잡한 비선형 열특성에 따르는 온도제어이다[8]. 온도제어의 주요한 점은 웨이퍼내의 온도 균일성을 유지하는 것과 주어진 규격대로 따라가는 온도 추적성이다. 기존의 제어기 설계는 단일 입출력 시스템의 PID 제어기로 되어 있어서, 차수가 높고 상태(state)간의 상호결합(coupling)이 심하며 다변수 시스템인 경우에는 제어기 설계가 어려울뿐만 아니라 외란에 대한 견실안정성 보장이 어렵기 때문에 다변수 시스템에 대한 제어기 설계기법의 필요성이 대두된다. Elia[3]는 가열 램프와 측정부 사이의 복잡한 역학관계로 인한 다변수 온도제어기를 설계하였으며, Emami-Naeini 등[4]은 구동부의 포화를 가지는 제어기 설계로 온도추적성의 해결방법을 제시하였다. 그러나 외란, 온도변화, 그리고 웨이퍼 내의 균일성에 대한 견실안정성은 다루지 않았다. 따라서, 온도변화와 같은 외란에 대한 견실안정성과 온도에 대한 추적성능 등을 동시에 만족하는 다변수 RTP 시스템에 대한 견실 H^{∞} 제어기 설계기법, 즉 기존의 감도 최소화 문제에 다른 문제를 포함하는 혼합감도를 최소화하는 설계기법이 필요하다[2]. 또한 실제 구현에 있어서 제어기의 차수가 높을 때는 하드웨어 구성이 복잡하고, 소프트웨어의 에러 발생 등 신뢰성이 떨어지는 단점이 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 제어기 차수축소가 필요하다. 제어기의 차수를 줄이는 기법은 제어기 설계에 앞서 RTP 시스템의 모델차수를 줄인 후 제어기를 설계하는 방법[12,13]과, 제어기 설계후에 제어기의 차수를 줄이는 방법[1]이 있다. Safonov 등[12,13]은 모델 차수축소방법으로 한켈(Hankel), 자승근 균형(square-root balanced) 및 슈어 균형(Schur balanced) 방법을 제시하였다. 따라서, 선형화된 RTP 시스템의 고차의 제어기를 Safonov 등이 제시한 모델 차수 줄임 방법을 이용하여 저차의 H^{∞} 제어기를 설계한다.

본 논문에서는 하중 혼합감도함수와 루프쉐이핑 방법을 이용하여 RTP 시스템의 견실안정성과 성능을 보장하는 H^{∞} 제어기의 설계방법을 제시하고, 모델 차수축소와 차수축소된 모델을 이용하여 H^{∞} 제어기를 설계하여 원래의 모델과 성능을 비교하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 시스템의 견실안정성과 성능을 확인한다.

본 논문에서 사용하는 기호는

T : 온도

T_{gas} : 가스 온도

T_i : i번째 요소의 온도

t : 시간

I : 웨이퍼 동심원 갯수

m_i : i번째 동심원의 질량

k : 열전도도

ρ : 질량밀도

C_p : 비열

h : 반응실 벽면 높이

q_b : 웨이퍼 밑면에서 방사되는 열

q_t : 웨이퍼 윗면에서 방사되는 열

q_e : 웨이퍼 가장자리에서 방사되는 열

q_i^{em} : i번째 요소의 웨이퍼에서 발생되는 방사열

q_i^{ab} : i번째 요소의 웨이퍼로 흡수되는 열

q_i^{cond} : i번째 요소의 웨이퍼 반지름 위치에 따른 전도열

q_i^{conv} : i번째 요소의 웨이퍼와 반응실 내로 주입되는 가스사이의 발생되는 대류열

q_i^{dist} : i번째 요소의 외란

q_i^{wall} : i번째 요소의 반응벽에 의해 발생되는 열

σ : 스테판-볼쯔만 상수(5.67×10^{-8} [$Wm^{-2}K^{-4}$])

ε_i : i번째 요소의 평균방사율

P_j : 램프영역 j에의해 발생되는 전력

J : 시스템 전영역의 갯수

$L_{i,j}$: 램프영역 j에 의해 웨이퍼 i요소로 방사되는

전력 비율

$W_{i,i'}$: 웨이퍼의 i'요소에서 발생된 열이 i요소로 흡수되는 열의 비율

r : 웨이퍼 반지름

Z : 웨이퍼 두께

A : 웨이퍼 표면적($=2\pi rZ$)

[K] : 켈빈 온도 (Kelvin)

r_i : i번째 요소의 반지름

r_i^{cen} : i번째 요소의 심경

r_i^{out} : i번째 요소의 외경

r_i^{in} : i번째 요소의 내경

$G=(A,B,C,D)$: 플랜트 G에 대한 상태공간표현

$W_s(s)$: 감도최소화를 위한 하중함수

$W_t(s)$: 보조감도최소화를 위한 하중함수

w : 외부입력

y : 측정된 출력

ref : 기준 입력

z_1 : 감도함수 출력

z_2 : 보조감도함수 출력

W_1, W_2 : 루프쉐이핑을 위한 하중함수

G_s : 쉐이프된 플랜트($G_s = W_2GW_1$)

K_∞ : H^∞ 제어기

K : 최종제어기($K = W_1K_\infty W_2$)

와 같다.

Ⅱ. RTP 모델

RTP 기술은 반도체 제조공정 중에서 가장 중요한 첨단기술의 하나이며 기존의 전기 튜브 방식과 비교할 때 처리 기능이 다양하고 온도를 200℃/초 이상 증가시킬 수 있기 때문에 짧은 시간에 작업을 할 수 있어 경비를 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 RTP는 웨이퍼별로 작업되지만 좋은 균일성을 유지하는 장점이 있다. RTP 시스템의 블럭선도는 그림 1과 같다.

RTP 시스템은 등온조건의 대기압 또는 저압에서 빠르게 웨이퍼를 가열한다. 반응실은 석영, 실리콘 카바이트, 스테인레스 스틸, 또는 석영 창문을 가진 알루미늄으로 구성되어 있다. 램프와 반응실사이에 투명한 창문이 있으며, 윗창은 램프에서 웨이퍼로 빛을 통과하게 하고, 아랫창은 웨이퍼 온도의 원거리 측정 또는 자외선 빛을 웨이퍼에 사용할 수 있게 한다. 웨이퍼는 강력한 램프어레이에 의해 발생되는 가시광선과 적외선에 의해 가열된다. 램프어레이에 요구되는 전력은 전형적으로 수십 KW이며 단면도는 그림 2에 주어진다.

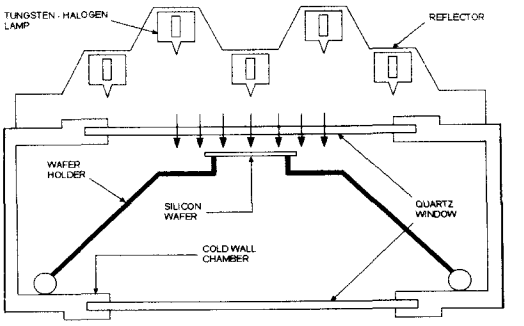


그림 1. RTP 시스템
Fig. 1. RTP System.

온도측정 시스템은 웨이퍼 온도를 정하기 위해 제어루프내에 위치하며, 여러점에서의 온도측정은 시스템 파라미터 추출 및 온도 프로파일의 궤환제어를 위해 필요하다. 웨이퍼 근처에 위치한 센서는 웨이퍼를 오염시킬 수 있고 반응실의 환경에 의해 기능이 떨어지기 때문에 웨이퍼의 온도를 측정할때 어려운 점이 있다. 온도 감지를 위해 사용하는 일반적인 방법은 반응실 밖에 한개이상의 고온계를 사용하는 것이다. 빛은 반응실의 창문을 통해 고온계로 지나간다.

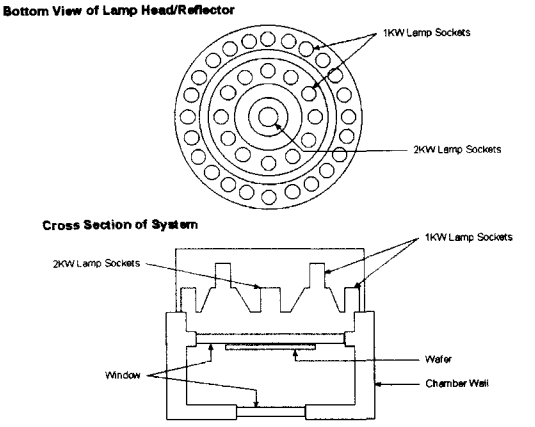


그림 2. 동심원 링으로 배열된 텅스텐-할로겐 램프를 이용한 가열 단면도
Fig. 2. One-sided heating using tungsten-halogen lamps arranged in concentric ring.

최근 여러개의 램프어레이 및 고온계 센서를 가진 시스템에 대한 RTP 모델이 연구되었으며, 본 논문에서는 Norman 등이 제시한 모델로부터 Jacobian 방정식을 이용하여 선형화된 모델을 구하고 하중 혼합감도함수와 루프쉐이핑 방법을 이용하여 제어기를 설계한다. 본 논문에서는 반지름 R과 웨이퍼 두께 Z의 차원은 상수이고 웨이퍼에 대한 열팽창은 무시하고, 볼쯔만 상수 k 와 비열 C_p는 시간과 위치에 따라 변하지 않고 온도에 대해서만 변하고, 또한 열이 천정이나 벽면에서 웨이퍼로, 웨이퍼에서 벽면으로, 웨이퍼 내에서 전달될 때 전달 각도에는 무관하며, 웨이퍼 두께에 대한 온도 의존성은 무시한다고 가정한다. 이러한 가정을 통한 열전도는 편미분에 의해

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(kr\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{q_b(r)+q_i(r)}{z}=\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

where, 경계조건 $\begin{cases}\frac{\partial T}{\partial r}=0 \ (\text{ if } r=0)\\ k\frac{\partial T}{\partial r}=q_e \ (\text{ if } r=R)\end{cases}$

로 주어진다. 여기서 사용된 접근방식은 웨이퍼를 I개의 동심원으로 나누며, 한개는 원통이고 나머지는 동심원이다. i번째 동심원에서 시간에 대한 온도의 변화율은

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{q_i}{m_i C_P(T_i)} \quad (2)$$

로 주어지고, i번째 요소로 유입되는 전체 열량은

$$q_i=q_i^{em}+q_i^{ab}+q_i^{cond}+q_i^{conv}+q_i^{dist} \quad (3)$$

과 같이 각 성분의 합으로 나타낼 수 있다. 열전도 모델은 시간에 대한 온도의 변화율로 근사화되며, $i=1,\cdots,I$에 대해 식 (2)와 (3)은 식 (1)과 같이 시간에 따른 미분방정식을 가지는 시스템으로 근사화된다. 외란은 모델에 포함되지 않고 전달되는 열과 모델 파라미터 또는 모델 구조의 오차에 의한 열을 나타낸다. 웨이퍼에 의해 방사되는 방사열은 스테판-볼쯔만(Stefan-Boltzmann) 법칙으로 구해지며 웨이퍼의 i번째 요소의 방사열은

$$q_i^{em}=-\varepsilon_i\sigma A_i T_i^4 \quad (4)$$

와 같이 표현되며, 웨이퍼에 의해 흡수되는 열은 램프와 웨이퍼에서 발생된다. i요소에 의해 흡수되는 열은

$$q_i^{ab}=\sum_{j=1}^{J}L_{i,j}P_j+\sum_{i=1}^{I}W_{i,i}'q_i^{em}+q_i^{wall} \quad (5)$$

으로 나타나며, 웨이퍼의 흡수율, 반사율 및 투과율은 온도에 매우 민감하다. 특히 실리콘 웨이퍼의 경우 600℃ 이상에서는 적외선 빛을 통과시키지 않는 성질을 가지고 있으며, $L_{i,j}$와 $W_{i,i}'$는 일정하다고 가정한다. 웨이퍼 내의 전도열은 웨이퍼 반지름에 따라 온도가 변하며, 온도가 반지름 r의 함수라면

$$q^{cond}=-kA\frac{\partial T}{\partial r} \quad (6)$$

로 표현되며, 요소 i의 내부 경계에서 열전도도는

$$k_{i,i-1}=kT_i+k\frac{(T_{i-1}-T_i)(r_i^{cen}-r_i^{in})}{r_i^{cen}-r_{i-1}^{cen}} \quad (7)$$

과 같이 근사화 되며, 요소 경계에서 $\frac{\partial T}{\partial r}$ 에 대한 한 정차등(finite difference) 근사화를 사용하면 전도열 방정식은

$$q_i^{cond}=-(2k_{i,i-1}\frac{T_i-T_{i-1}}{r_i^{cen}-r_{i-1}^{cen}}\pi r_i^{in}Z+2k_{i,i+1}\frac{T_i-T_{i+1}}{r_{i+1}^{cen}-r_i^{cen}}\pi r_i^{out}Z) \quad (8)$$

로 주어진다. 또한 웨이퍼와 주입가스 사이의 대류열 전달은 RTP 시스템에 있어서 중요한 요소이기 때문에 모델링에서 무시할 수 없다. 왜냐하면 대류는 방사손실에 의해 발생된 가장자리 냉각효과를 증대시키기 때문이다. 발생되는 대류손실은

$$q_i^{conv}=-h_iA_i(T_i-T_{gas}) \quad (9)$$

로 나타난다. 외란에는 모델에 포함되지 않은 열흐름 성분, 즉 반응실과 램프를 분리하는 창문을 통한 웨이퍼의 열전달과 모델 매개변수 및 구조에서 발생한 오차, 즉 모델에 사용된 값과 실제적인 값과의 차이에 의한 열흐름이 있다.

Ⅲ. H^∞ 온도제어기 설계

RTP에 대한 일반적인 규격은, 램핑(ramping)동안 ±2.5 [K] 이하의 온도편차를 가지는 공정 레시피(recipe)를 통해 균일한 온도 프로파일을 유지하고, 최대 1.5 [K] 와 평균 0.5 [K] 보다 작은 정상상태의 온도편차를 가지며 정상상태 도달시간을 빠르게 하고 램핑의 끝부분의 오버슈트는 5 [K] 이하로 유지하여

야 한다. 선형화된 모델은 3개의 입력과 3개의 출력을 가지며 20개의 상태를 가지고 있다[11]. 입력은 3개의 다른 전력 크기를 가진 램프군이며 출력은 웨이퍼 3점의 다른 위치에서 측정한 온도이다. 본 논문에서는 동작온도 1000 [K] 에서 얻어진 선형화된 모델에 대하여 제어기를 설계하고, 이를 800 [K] 와 1500 [K] 에서 선형화된 모델에 적용하여 비선형성에 대한 견실성능을 비교한다. 제어기 설계의 목적은 견실안정성과 좋은 성능을 보장하는 것이다. 하중 혼합감도함수를 이용한 H^∞ 제어기 설계 알고리듬[5]과 루프쉐이핑 방법[10]으로 견실안정성과 성능을 동시에 보장하는 혼합감도 H^∞ 제어기 설계방법의 타당성을 제시한다. 하중 혼합감도함수를 이용하는 이유는 비선형 RTP 모델을 선형화하는 과정에서 유발되는 모델오차를 고려하고, RTP 작업 영역내의 공기온도 및 압력변화와 같은 외란에 대해 견실성을 유지하기 위해서이다. 감도최소화는 외란제거에 초점을 두므로 RTP 시스템은 감도최소화뿐만 아니라 견실안정성을 동시에 만족하는 혼합감도 H^∞ 제어기법이 필요하다. 루프쉐이핑 방법은 H^∞ 설계방법의 안정성이 보장된 상태에서 얻어진 성능과 견실성을 시행착오방법으로 구하는 것이며, 저주파에서 성능을 그리고 고주파에서는 견실안정성을 위하여 적절한 하중함수를 이용한다. 따라서 루프쉐이핑을 위한 하중함수, 감도최소화를 위한 하중함수, 보조감도최소화를 위한 하중함수를 이용하여 RTP 시스템의 견실안정성과 성능을 동시에 만족하는 H^∞ 제어기를 설계한다.

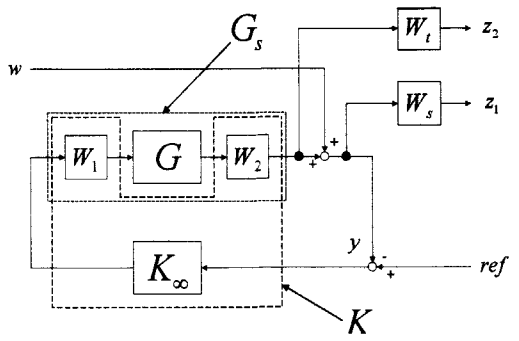


그림 3. 혼합감도 문제를 위한 폐루프 시스템
Fig. 3. The closed loop system for mixed sensitivity problem.

하중 혼합감도최소화 문제에 대한 폐루프 시스템은 그림 3에서 주어지며 루프쉐이핑을 위한 하중함수 $W_1(s)$와 $W_2(s)$는

$$W_1(s) = \begin{bmatrix} \frac{2.1s+1500}{0.0001s+0.00001} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2.7s+4000}{0.0001s+0.00001} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{5.22s+25000}{0.0001s+0.00001} \end{bmatrix}$$

$$W_2(s) = I \tag{10}$$

으로 선택하였으며, 루프쉐이핑 기법은 다음 세가지 단계로 요약될 수 있다. 첫째 단계, 플랜트의 전후에 적절한 하중함수를 곱하여 원하는 형태의 개루프 전달함수의 특성을 얻는다. 둘째 단계, 주파수 하중함수에 의해 변형된 플랜트 G_s에 대하여 H^∞ 제어기 K_∞를 설계한다. 셋째 단계, 설계된 제어기로부터 최종 제어기 $K = W_1 K_\infty W_2$를 얻는다. 이때 W_1, W_2는 숨어 있는 불안정 모드가 생기지 않도록 선택한다. 이득 특성도를 보면 그림 4, 그림 5와 같다.

그림 3에서 w에서 z_1으로 나타나는 감도함수 $S_{z_1 w}$는

$$S_{z_1 w} = W_s (I - G_s K_\infty)^{-1} \tag{11}$$

로 주어지고 w에서 z_2로 나타나는 보조감도함수 $T_{z_2 w}$는

$$T_{z_2 w} = W_t G_s K_\infty (I - G_s K_\infty)^{-1} \tag{12}$$

이다. 따라서 혼합감도최소화 문제는

$$\min_{K_\infty(s)} \left\| \begin{matrix} W_s (I - G_s K_\infty)^{-1} \\ W_t G_s K (I - G_s K_\infty)^{-1} \end{matrix} \right\|_\infty \tag{13}$$

로 나타난다. Glover[5] 등이 제시한 H^∞ 제어기 설계 알고리듬을 사용하기 위한 표준플랜트는

$$P = \begin{bmatrix} W_s & -W_s G_s \\ 0 & W_t G_s \\ I & -G_s \end{bmatrix} \tag{14}$$

로 표현되고, (14)를 상태공간으로 나타내면

$$P = \begin{bmatrix} A_g & 0 & 0 & 0 & -B_g \\ B_{ws} C_g & C_{ws} & 0 & B_{ws} & -B_{ws} D_g \\ 0 & 0 & A_{wtg} & 0 & B_{wtg} \\ D_{ws} C_g & C_{ws} & 0 & D_{ws} & -D_{ws} D_g \\ 0 & 0 & C_{wtg} & 0 & D_{wtg} \\ C_g & 0 & 0 & I & -D_g \end{bmatrix} \tag{15}$$

이고, 여기서

$$G_s = \begin{bmatrix} A_g & B_g \\ C_g & D_g \end{bmatrix}$$
$$W_t G = \begin{bmatrix} A_{wtg} & B_{wtg} \\ C_{wtg} & D_{wtg} \end{bmatrix}$$
$$W_s = \begin{bmatrix} A_{ws} & B_{ws} \\ C_{ws} & D_{ws} \end{bmatrix}$$

로 정의한다. 그림 3에서 시행착오법에 의해 선택된 하중함수는

$$W_s(s) = \frac{0.002}{s+0.002}$$
$$W_t(s) = \frac{s}{s+10000} \quad (16)$$

이다. $W_s(s)$, $W_t(s)$는 설계 사양을 만족시키는 제어기 설계를 위하여 선택되어지는 하중함수들이다. $W_s(s)$는 외란의 영향을 최소화하기 위하여 저역통과 필터형태를 가지고 $W_t(s)$는 고주파수 영역에서의 모델 불확실성에 대한 견실안정성의 극대화를 위해 고역통과 필터형태를 취한다. H^{∞} 혼합감도문제에서 제어기를 설계할 때 페루프 시스템의 극점과 영점사이에서 원하지 않는 소거가 발생할 수도 있지만 여기서는 주파수 하중함수를 이용하여 이러한 현상이 발생하지 않도록 한다. 따라서 식 (10)과 (16)의 하중함수와 공칭시스템 $G(s)$로부터 식 (15)와 같이 표준플랜트를 구성하면 Glover 등[5]의 설계 알고리듬으로부터 견실안정성과 성능을 동시에 만족하는 H^{∞} 제어기를 구할 수 있다.

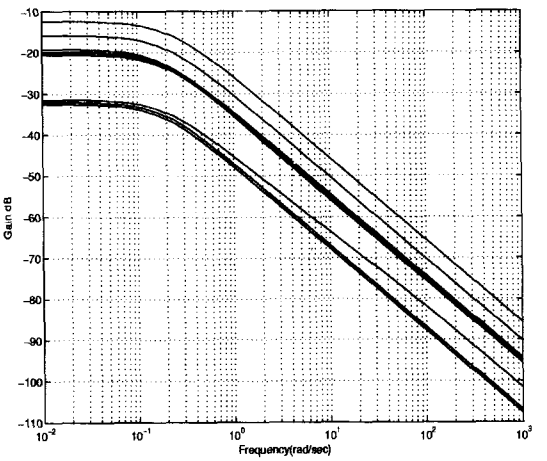


그림 4. 원래 플랜트의 이득 다이어그램
Fig. 4. Gain diagram of original plant.

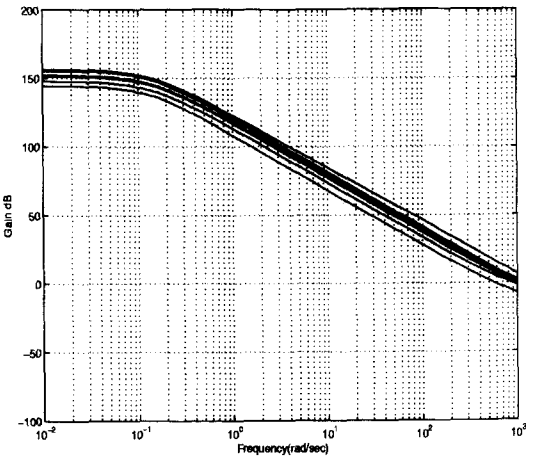


그림 5. 쉐이프된 플랜트의 이득 다이어그램
Fig. 5. Gain diagram of shaped plant.

Ⅳ. 모델 차수축소

산업현장에서 실제 시스템을 구현할때 상태수가 많으면 하드웨어적으로 구현하기 힘들뿐만 아니라 실시간처리시 많은 계산량이 필요하다. 본 논문에서 설계한 제어기의 차수가 55차이므로 구현이 용이하지 않으므로, 제어기 설계에 앞서 RTP 시스템의 모델차수를 줄인 후 제어기를 설계하는 방법[12,13]을 사용한다. 또한 한켈, 자승근 균형 및 슈어 균형의 모델 차수축소 방법을 이용하여 RTP 시스템의 선형화된 모델을 20차에서 10차로 축소한다. 이는 그림 4의 막대그래프에서 알 수 있는 바와 같이 한켈특이값이 상태수가 10차 이후에 현저히 줄어듬에 기인한다. 모델 차수축소

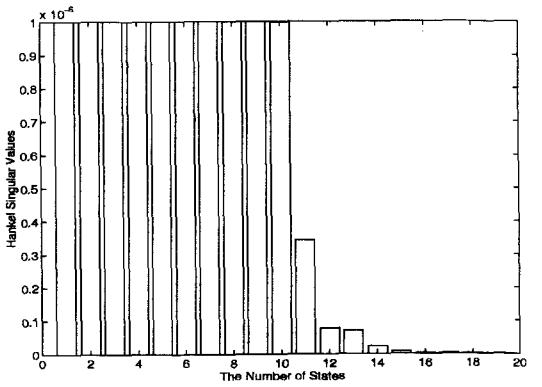


그림 6. 상태수에 대한 한켈 특이값
Fig. 6. The Hankel singular values for number of states.

방법은 균형 변형이 가지는 제약조건을 무시하므로 비최소(non-minimal) 시스템을 쉽게 처리할 수 있고, 중간단계에서 요구하는 고유공간(eigen space)에 대해 직교기저(orthogonal basis)를 계산하기 위해 슈어 분해를 이용할 수 있고, 축소된 모델의 상대오차나 절대오차의 무한대 노옴은 모든 주파수 영역에서 제한된다.

V. 컴퓨터 시뮬레이션

RTP 시스템에 대한 제어기 $K(s)$의 차수는 55차이며 안정 여유도(stability margin) γ값은 0.0078로 매우 작은 값으로 나타났다. 외란제거 효과 및 외란에 대한 출력파형은 그림 7와 8에 주어진다. 외란은 단위 계단입력신호에서 2초 지연을 가진 1 [K]의 계단입력을 사용한다. 온도가 계단형태로 변하기 때문에 외란으로 계단 입력을 사용한다. 3개의 외부 입력신호중 2번째의 신호에만 외란을 인가하였을 경우, z_1에서 측정한 제어기의 외란제거 능력은 그림 7에서 알 수 있다. 외란이 인가된 2초에서 외란의 영향을 받음을 알 수 있으나 곧 외란의 영향이 감쇠되었다. 또한 그림 8~10에서는 외란 인가시 기준입력 신호에 대한 계단응답 특성이 3절에서 언급한 규격과 온도편차 및 오버슈트를 만족하고 있음을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과에서 H^∞ 제어기는 외란제거 효과와 좋은 출력 추적성을 나타낸다.

그리고 축소된 모델을 이용하여 설계한 제어기의 차수는 29차로 되었다. 그림 11~14로부터 원래의 모델과

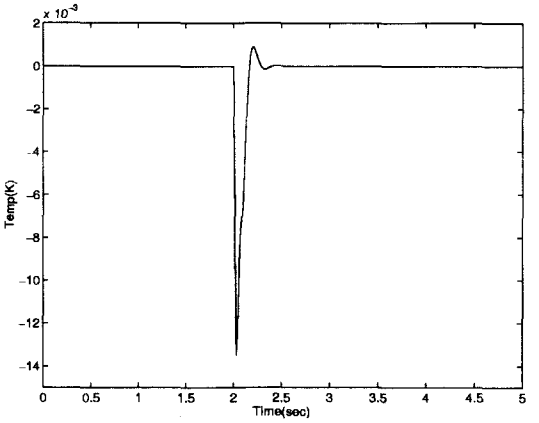


그림 7. 외란제거 효과
Fig. 7. The effect of disturbance rejection.

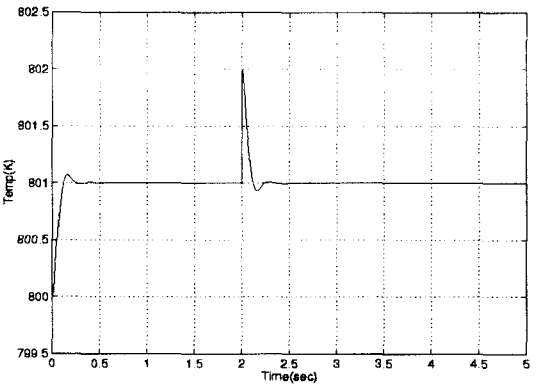


그림 8. 800 [K] 모델의 외란 인가시 계단응답
Fig. 8. The step response of 800 [K] model with disturbance.

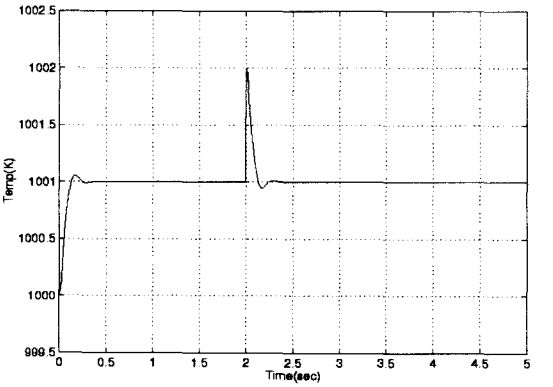


그림 9. 1000 [K] 모델의 외란 인가시 계단응답
Fig. 9. The step response of 1000 [K] model with disturbance.

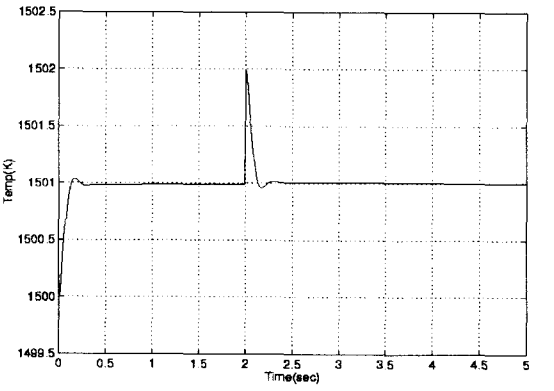


그림 10. 1500 [K] 모델의 외란 인가시 계단응답
Fig. 10. The step response of 1500 [K] model with disturbance.

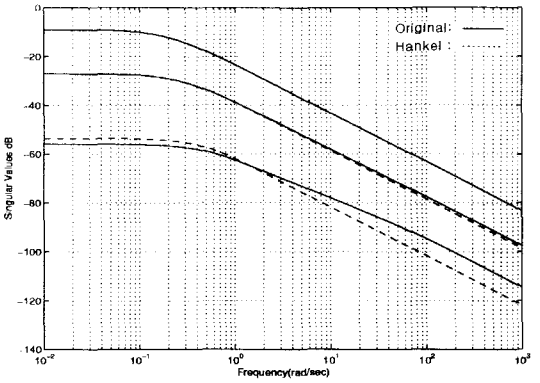


그림 11. 원래의 모델과 한켈 축소된 모델의 주파수에 대한 특이값

Fig. 11. The singular values of original and reduced model by Hankel method.

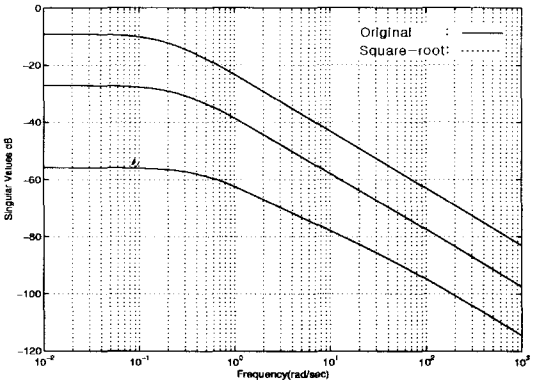


그림 12. 원래의 모델과 자승근 균형 축소된 모델의 주파수에 대한 특이값

Fig. 12. The singular values of original and reduced model by square-root balanced method.

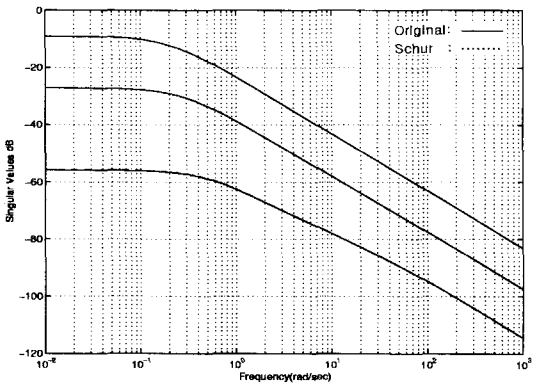


그림 13. 원래의 모델과 슈어 균형 모델 축소된 모델의 주파수에 대한 특이값

Fig. 13. The singular values of original and reduced model by Schur method.

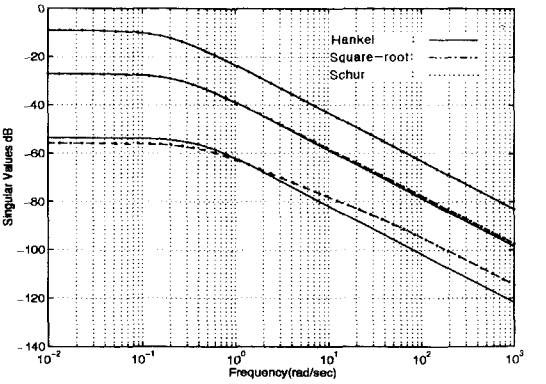
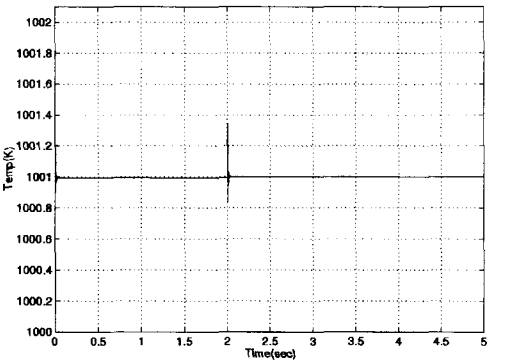
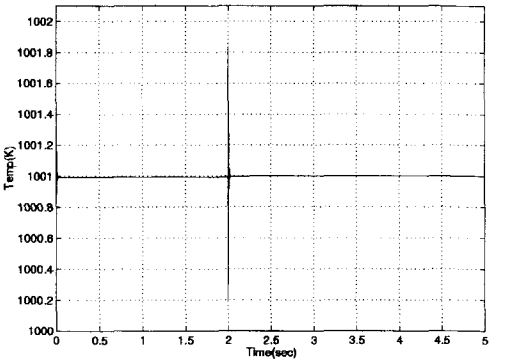


그림 14. 한켈, 자승근 균형, 슈어 모델축소의 특이값

Fig. 14. The singular values for Hankel, square-root balanced, and Schur balanced model reduction.



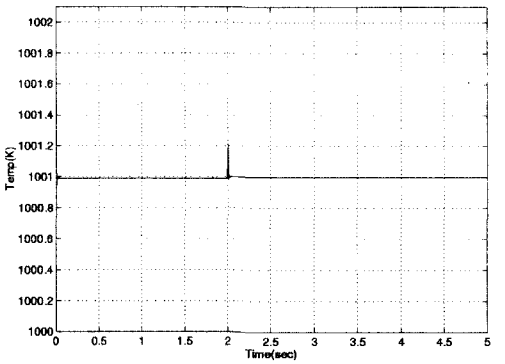
(a) 축소된 모델



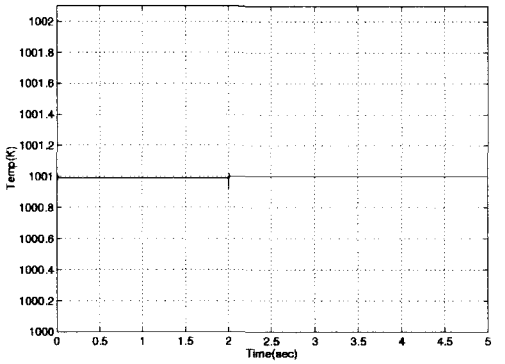
(b) 원래의 모델

그림 15. 한켈 모델축소를 이용한 페루프 시스템의 계단응답

Fig. 15. The step response of closed loop system using Hankel model reduction.



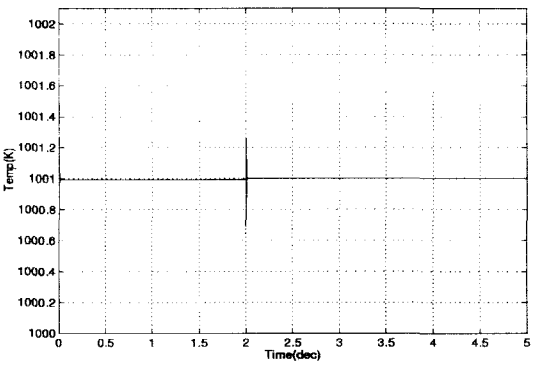
(a) 축소된 모델



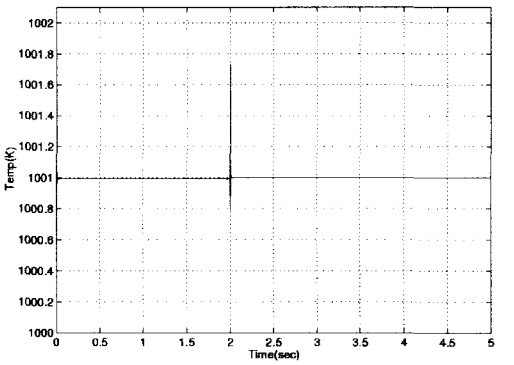
(b) 원래의 모델

그림 16. 자승근 균형 모델축소를 이용한 페루프 시스템의 계단응답

Fig. 16. The step response of closed loop system using square-root balanced reduction.



(a) 축소된 모델



(b) 원래의 모델

그림 17. 슈어 균형 모델을 이용한 페루프 시스템의 계단응답

Fig. 17. The step response of closed loop system using Schur balanced reduction.

한켈, 자승근 균형, 슈어 균형 방법을 이용한 축소된 모델은 유사한 특이값을 가짐을 알 수 있다. 그림 15~17은 축소한 모델을 이용하여 설계한 제어기를 축소된 모델과 원래의 모델에 적용시 유사한 특성을 가지므로 견실성능과 모델축소의 타당성을 보여준다.

VI. 결 론

본 논문에서는 RTP 시스템에서 온도변화와 같은 외란에 대한 견실안정성과 온도추적 및 웨이퍼 내의 균일성 등의 견실성능을 개선하기 위하여 하중 혼합감도함수를 이용하여 H^{∞} 제어기를 설계하고, 모델 차수 축소방법을 이용하여 제어기의 차수를 55차에서 29차로 줄였다. 제어기는 스탠포드 대학의 모델링 결과와 1000 [K] 에서 선형화된 상태변수값을 이용하여 제어기를 설계하였고, 이를 800 [K] 와 1500 [K] 에 적용하여 비선형성에 대한 견실성능을 비교하고, 뛰어난 외란제거 효과와 좋은 추적성을 가짐을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 또한 한켈, 자승근 균형, 슈어 균형 축소방법을 사용하여 20차의 모델을 10차로 축소하였으며, 축소된 모델에서 H^{∞} 제어기를 설계하여 축소된 모델과 원래의 모델에 적용시 유사한 특성을 가지므로 견실안정성 및 성능이 보장됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] B. D. O. Anderson and Y. Liu, "Controller reduction: Concepts and approaches," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 34, no. 8, pp. 802-812, Aug. 1989.

[2] J. C. Doyle, B. A. Francis, and A. R. Tannenbaum, *Feedback Control Theory*, Macmillan Publishing Co., New York, pp. 105-155, 1992.

[3] C. F. Elia, "RTP multivariable temperature controller development," *Proc. of ACC*, pp. 907-911, 1994.

[4] A. Emami-Naeini, M. G. Kabuli, and R. L. Kosut, "Finite time tracking with actuator saturation: application to RTP temperature trajectory following," *Proc. IEEE CDC*, pp. 73-78, 1994.

[5] K. Glover and J. C. Doyle, "State-space formula for all stabilizing controllers that satisfy an H^{∞} norm bound and relations to risk sensitivity," *Syst. & Contr. Lett.*, vol. 11, pp. 167-172, 1988.

[6] C. Hill, S. Jones, and D. Boys, "Rapid thermal annealing-theory and practice," In R. A. Levy, editor, *Reduced Thermal Processing for ULSI*, pp. 143-180, Plenum Press, 1988.

[7] S. M. Hu, "Temperature distribution and stress in circular wafers in a row during radiative cooling," *J. Appl Phys.* 40: pp. 4413-4423, 1969.

[8] M. G. Kabuli and L. Kosut, "Improving static performance robustness of process," *Proc. IEEE CDC*, pp. 62-66, 1994.

[9] H. A. Lord, "Thermal and stress analysis of semiconductor wafers in a rapid thermal processing oven," *IEEE Trans. Semicond. Manufact.*, 1(3): pp. 105-114, August, 1988.

[10] D. McFarlane and K. Glover, *Robust Controller Design using Normalized Coprime Factor Plant Descriptions*, Springer-Verlag, 1990.

[11] S. A. Norman, "Wafer temperature control in rapid thermal processing," *Ph.D. Dissert.*, Stanford Univ., July, 1992.

[12] M. G. Safonov, R. Y. Chiang, and D. J. N. Limebeer, "Hankel Model Reduction without Balancing-A Descriptor Approach," *Proc. IEEE CDC*, pp. 112-117, 1987.

[13] M. G. Safonov and R. Y. Chiang, "A Schur Method for Balanced Model Reduction," *Proc. of ACC*, pp. 1036-1040, 1988.

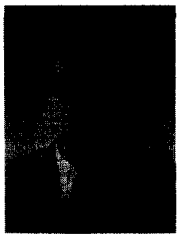
부 록

1000K에서 선형화된 상태공간 메트릭스

a= [-3.5423 3.3438 0.0004 0.0005 0.0007 0.0008 0.0010 0.0011 0.0012 0.0014
0.0015 0.0016 0.0017 0.0018 0.0009 0.0009 0.0005 0.0005 0.0005 0.0006;
1.1146 -3.3249 2.0123 0.0005 0.0007 0.0008 0.0010 0.0011 0.0012 0.0014
0.0015 0.0016 0.0017 0.0018 0.0009 0.0009 0.0005 0.0005 0.0005 0.0006;
0.0001 1.2074 -3.1838 1.7788 0.0007 0.0008 0.0010 0.0011 0.0012 0.0014
0.0015 0.0016 0.0017 0.0018 0.0009 0.0009 0.0005 0.0005 0.0005 0.0006;
0.0001 0.0002 1.2706 -3.1516 1.6838 0.0008 0.0010 0.0011 0.0012 0.0014
0.0015 0.0016 0.0017 0.0018 0.0009 0.0009 0.0005 0.0005 0.0005 0.0006;
0.0001 0.0002 0.0004 1.3097 -3.1390 1.6326 0.0010 0.0011 0.0012 0.0014
0.0015 0.0016 0.0017 0.0018 0.0009 0.0009 0.0005 0.0005 0.0005 0.0006;
0.0001 0.0002 0.0004 0.0005 1.3357 -3.1327 1.6006 0.0011 0.0012 0.0013
0.0015 0.0016 0.0017 0.0018 0.0009 0.0009 0.0005 0.0005 0.0005 0.0006;
0.0001 0.0002 0.0004 0.0005 0.0007 1.3543 -3.1291 1.5787 0.0012 0.0013
0.0014 0.0016 0.0017 0.0017 0.0009 0.0009 0.0005 0.0005 0.0005 0.0006;
0.0001 0.0002 0.0004 0.0005 0.0007 0.0008 1.3682 -3.1269 1.5629 0.0013
0.0014 0.0015 0.0016 0.0017 0.0009 0.0009 0.0005 0.0005 0.0005 0.0006;
0.0001 0.0002 0.0004 0.0005 0.0007 0.0008 0.0009 1.3790 -3.1255 1.5509
0.0014 0.0015 0.0016 0.0017 0.0009 0.0009 0.0005 0.0005 0.0005 0.0006;
0.0001 0.0002 0.0004 0.0005 0.0006 0.0008 0.0009 0.0010 1.3876 -3.1247
1.5414 0.0015 0.0016 0.0017 0.0009 0.0009 0.0005 0.0005 0.0005 0.0006;
0.0001 0.0002 0.0004 0.0005 0.0006 0.0008 0.0009 0.0010 0.0011 1.3946
-3.1242 1.5339 0.0016 0.0017 0.0009 0.0009 0.0005 0.0005 0.0005 0.0006;
0.0001 0.0002 0.0003 0.0005 0.0006 0.0007 0.0009 0.0010 0.0011 0.0012
1.4005 -3.1240 1.5276 0.0017 0.0009 0.0009 0.0005 0.0005 0.0005 0.0006;
0.0001 0.0002 0.0003 0.0005 0.0006 0.0007 0.0009 0.0010 0.0011 0.0012

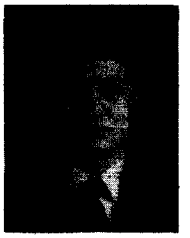
```
0.0013 1.4054 -3.1242 1.5224 0.0009 0.0009 0.0005 0.0005 0.0005 0.0006;
0.0001 0.0002 0.0003 0.0005 0.0006 0.0007 0.0008 0.0010 0.0011 0.0012
0.0013 0.0014 1.4097 -3.6479 2.0405 0.0009 0.0004 0.0005 0.0005 0.0006;
0.0001 0.0002 0.0003 0.0004 0.0006 0.0007 0.0008 0.0009 0.0011 0.0012
0.0013 0.0014 0.0015 3.8662 -10.0145 5.9491 0.0004 0.0005 0.0005 0.0006;
0.0001 0.0002 0.0003 0.0004 0.0006 0.0007 0.0008 0.0009 0.0011 0.0012
0.0013 0.0014 0.0015 0.0016 5.7475 -13.9080 7.9597 0.0004 0.0005 0.0006;
0.0001 0.0002 0.0003 0.0004 0.0006 0.0007 0.0008 0.0009 0.0010 0.0012
0.0013 0.0014 0.0015 0.0016 0.0008 15.5246 -39.3002 23.5739 0.0005 0.0006;
0.0001 0.0002 0.0003 0.0004 0.0006 0.0007 0.0008 0.0009 0.0010 0.0012
0.0013 0.0014 0.0015 0.0016 0.0008 0.0009 23.1905 -46.9637 23.5707 0.0006;
0.0001 0.0002 0.0003 0.0004 0.0006 0.0007 0.0008 0.0009 0.0010 0.0012
0.0013 0.0014 0.0015 0.0016 0.0008 0.0009 0.0004 23.1936 -46.9640 23.5678;
0.0001 0.0002 0.0004 0.0005 0.0007 0.0008 0.0010 0.0011 0.0013 0.0014
0.0016 0.0017 0.0019 0.0020 0.0011 0.0011 0.0006 0.0006 23.1966 -23.4875 ]

b= [0.0521 0.0177 0.0041;0.0514 0.0178 0.0041 ;0.0501 0.0179 0.0041;
    0.0482 0.0181 0.0042;0.0458 0.0182 0.0042;0.0431 0.0184 0.0042;
    0.0401 0.0186 0.0043;0.0370 0.0188 0.0043 ;0.0338 0.0190 0.0044;
    0.0308 0.0191 0.0045 ;0.0278 0.0191 0.0046;0.0251 0.0190 0.0047;
    0.0225 0.0188 0.0048;0.0202 0.0185 0.0049;0.0186 0.0181 0.0050;
    0.0176 0.0178 0.0050;0.0169 0.0176 0.0051;0.0164 0.0175 0.0051;
    0.0160 0.0173 0.0052 ;0.0166 0.0184 0.0083 ]

c= [1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 ]

d= [0 0 0;0 0 0;0 0 0 ]
```

저 자 소 개



李 相 慶(正會員)

1960년 3월 27일생. 1986년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업. 1986년 ~ 1997년 한국전자(주) 근무. 1991년 ~ 1993년 경북대학교 산업공학과 석사. 1994년 3월 ~ 현재 경북대학교 전자공학과 박사과정. 1998년 3월 ~ 현재 두원공과대학 컴퓨터응용제어과 전임강사. 주관심분야는 RTP, 견실 H^∞ 제어, 회로해석



金 鍾 海(正會員)

1970년 1월 10일생. 1993년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업. 1995년 2월 경북대학교 전자공학과 석사졸업. 1995년 3월 ~ 현재 경북대학교 전자공학과 박사과정. 주관심분야는 견실 H^∞ 제어, 혼합 H_2/H^∞ 제어, 산업응용제어, 시간지연시스템 해석 및 제어기설계

吳 道 昌(正會員) 第 33卷 B編 第 5號

현재 건양대학교 정보전자공학부 전임강사

朴 烘 培(正會員) 第 33卷 B編 第 5號 參照

현재 경북대학교 전자전기공학부 부교수