

# 구조적 불확실성 접근을 이용한 RTP 시스템의 견실제어기 설계

## Robust Controller Design for RTP System using Structured Uncertainty Approach

이 상 경, 김 종 해, 김 해 근, 박 흥 배

(Sang Kyung Lee, Jong Hae Kim, Hae Kun Kim, and Hong Bae Park)

**Abstracts** : In this paper, we propose a robust controller design of RTP (Rapid Thermal Processing) system using structured uncertainty approach. Using the weighted mixed sensitivity function, we solve the robust stability problem against disturbance and temperature variation, and design a  $\mu$  controller using curve fitting method against structured uncertainty. Also the reduction method should be required 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  $\mu$  controller for original model and Schur balanced reduced model. Finally the simulation results are proposed to show the validity of the proposed method

**Keywords** : structured uncertainty, RTP system,  $\mu$  controller, model reduction

### I. 서론

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 웨이퍼를 동시에 작업하고, 수심본에서 수시간이 소요되므로 산업현장에서는 생산량에 많은 제약을 받는다. 이에 비해 RTP 시스템은 좁은 공간에서 웨이퍼별로 가공온도에서 가열되고 냉각되며, 반응실 벽은 물로 냉각되어 상온을 유지한다. 따라서 가공단계가 완료될 때까지 수심초만이 필요하다. RTP 시스템을 설계할때 가장 중요한 문제는 온도제어를 위한 시스템 모델링인데, 1969년 Hu[7]에 의해 열방사, 열전달, 열용량 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 설계연구가 가속되었다. 제어기를 설계할때 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 시스템

의 PID 제어기로 되어 있어서, 차수가 높고 상태(state) 간의 상호결합(coupling)이 심하며 다변수 시스템인 경우에는 제어기 설계가 어려울뿐만 아니라 외란에 대한 안정성 보장이 어렵기 때문에 다변수 시스템에 대한 제어기 설계기법의 필요성이 대두된다. Elia[3]는 가열 램프와 측정부 사이의 복잡한 역학관계로 인한 다변수 온도 제어기를 설계하였으며, Emami-Naeini 등[4]은 구동부의 포화를 가지는 제어기 설계로 온도추적성의 해결방법을 제시하였다. 그러나 외란, 온도변화, 그리고 웨이퍼내의 균일성에 대한 견실안정성은 다루지 않았다 따라서, 이 등[17]은 온도변화와 같은 외란에 대한 견실안정성과 온도에 대한 추적성능 등을 동시에 만족하는 다변수 RTP 시스템에 대한 견실  $H^\infty$  제어기 설계기법을 제시하였다. 즉 시스템의 불확실성에 대한 모델링 문제는  $H^\infty$  최적화 이론에서 중요한 부분을 차지하고 있다. 시스템의 불확실성은 공칭플랜트와 실제플랜트 사이의 차이를 말하고 흔히 시스템의 섭동이라고 하며 크게 비구조적 불확실성과 구조적 불확실성으로 구분한다.  $H^\infty$  제어기 설계기법을 사용할 때는 비구조적 불확실성으로 표현하며 견실안정화 문제의 해를 구하는 과정에서 제어기의 설계과정의 간략화, 혹은 수학적 표현의 편의를 위해서 불확실성의 노음 한계치만 이는 단일한 섭동으로 간주한다. 하지만 실제시스템에 있어서 많은 시스템은 불확실성의 원인이나 위치로 인해서 다르게 나타나는 다중 불확실성 구조를 가지는 경우가 많으며 이러한 경우 하나의 통합된 단일 노음의 제한된 비구조적 불확실성으로 처리할 경우에는 실제적인 측면에서 제한된(conservative) 해를 얻는다[15][16]. 따라서 실제 시스템에 나타나는 모든 불확실성을 통합된 형태가 아닌 다중섭동 구조로 나타내는 구조적 불확실성 이론이 Doyle[16]에 의해 제안되었으며 구조적 불확실성을 이용한 제어기 설계기

접수일자 : 1999. 2. 01., 수정완료 : 1999. 4. 28.

이상경 : 두원공과대학 컴퓨터응용제어과

김종해 : 경북대학교 센서기술연구소

김해근 : 전자통신연구소 차세대 교환 전송실

박흥배 : 경북대학교 전기전자공학부

법은 구조적 특이치를 정의함에 따라서 비구조적 불확실성에 비해 비제한적인 해를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 불확실성을 구조화 시킴으로써 건실안정성 문제와 동시에 성능문제도 고려한 건실성능 문제까지도 해결할 수 있다[15][16]. 그러므로 기존의 비구조적 불확실성 구조에 대한 감도 최소화 문제에 구조적 불확실성의 문제를 포함하는 혼합감도를 최소화하는 설계기법이 RTP 시스템에서 필요하다[2][16]. 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 방법과, 제어기 설계 후에 제어기의 차수를 줄이는 방법이 있다[1][12][13]. Safonov 등[12][13]은 모델 차수 축소방법으로 한켈(Hankel), 자승근 균형(square-root balanced) 및 슈어 균형(Schur balanced)방법을 제시하였다. 따라서, 선형화한 RTP 시스템의 고차의 제어기를 Safonov 등이 제시한 모델 차수축소방법 중에서 슈어 균형방법을 이용하여 저차의  $\mu$  제어기를 설계한다.

본 논문에서는 먼저 RTP 시스템의 구조적 불확실성에 대한 불력을 설정하고, 하중 혼합감도함수와 루프쉐이핑 방법을 이용한다. 또한 곡선조정(curve fitting)을 통하여 건실안정성과 성능을 보장하는  $\mu$  제어기의 설계방법을 제시한다. 그리고 슈어 균형모델 차수축소와 차수축소된 모델을 이용하여  $\mu$  제어기를 설계하여 원래의 모델과 성능을 비교하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 구조적 특이치(structured singular value)의 변화과정 및 곡선조정과정을 보이며, 시스템의 건실안정성과 성능을 확인한다.

본 논문에서 사용하는 기호는

- $T$ [K] 온도
- $T_i$ [K]  $i$ 번째 요소의 온도
- $t$ [sec] 시간
- $I$ [개] 웨이퍼 동심원 갯수
- $m_i$ [kg]  $i$ 번째 동심원의 질량
- $k$ [W/mK] 열전도도
- $\rho$ [kg/m<sup>3</sup>] 질량밀도
- $C_p$ [J/kgK] 비열
- $q_b$ [W] 웨이퍼 밑면에서 방사되는 열
- $q_i$ [W] 웨이퍼 윗면에서 방사되는 열
- $q_e$ [W] 웨이퍼 가장자리에서 방사되는 열
- $q_i^{em}$ [W]  $i$ 번째 요소의 웨이퍼에서 발생하는 방사열
- $q_i^{ab}$ [W]  $i$ 번째 요소의 웨이퍼로 흡수되는 열
- $q_i^{cond}$ [W]  $i$ 번째 요소의 웨이퍼 반지름 위치에 따른 전도열

- $q_i^{con}$ [W]  $i$ 번째 요소의 웨이퍼와 반응실 내로 주입되는 가스사이의 발생되는 대류열
- $q_i^{dist}$ [W]  $i$ 번째 요소의 외란
- $r$ [mm] 웨이퍼 반지름
- $Z$ [mm] 웨이퍼 두께
- [K] 켈빈 온도(Kelvin)
- $W_s(s)$  감도최소화를 위한 하중함수
- $W_r(s)$  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
- $G_s$  웨이퍼된 플랜트( $G_s = W_2 G W_1$ )
- $K_\infty$   $H^\infty$  제어기
- $K$  최종제어기( $K = W_1 K_\infty W_2$ )
- LLFT lower linear fractional transformation
- ULFT upper linear fractional transformation
- $\mu_d(M)$   $M$ 의 구조적 특이치

와 같다.

## II. RTP 모델

RTP 기술은 반도체 제조공정 중에서 가장 중요한 첨단기술의 하나이며 기존의 전기 튜브 방식과 비교할때 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 블록선도는 그림 1과 같다.

RTP 시스템은 등온조건의 대기압 또는 저압에서 빠르게 웨이퍼를 가열한다. 반응실은 석영, 실리콘 카바이드, 스테인레스 스틸, 또는 석영 창문을 가진 알루미늄으로 구성되어 있다. 램프와 반응실사이에 투명한 창문이

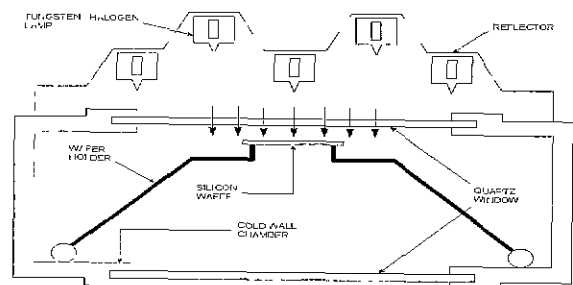


그림1.RTP 시스템  
Fig.1.RTP System.

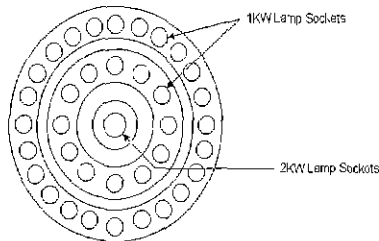
있으며, 윗창은 램프에서 웨이퍼로 빛을 통과하게 하고, 아랫창은 웨이퍼 온도의 원거리 측정 또는 자외선 빛을 웨이퍼에 사용할 수 있게 한다 웨이퍼는 강력한 램프어레이에 의해 발생하는 가시광선과 적외선에 의해 가열된다. 램프어레이에 요구되는 전력은 전형적으로 수십KW이며 단면도는 그림 2에 주어진다.

온도측정 시스템은 웨이퍼 온도를 정하기 위해 제어 루프내에 위치하며, 여러점에서의 온도측정은 시스템 파라미터 추출 및 온도 프로파일의 제한제어를 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 한개 이상의 고온계를 사용하는 것이다. 빛은 반응실의 창문을 통해 고온계로 지나간다. 최근 여러개의 램프어레이 및 고온계 센서를 가진 시스템에 대한 RTP 모델이 연구되었으며, 본 논문에서는 Norman 등이 제시한 모델로부터 Jacobian 방정식을 이용하여 선형화한 모델을 구하고 하중 혼합감도함수와 루프쉐이핑 방법을 이용하고 구조적 불확실성을 가지는  $\mu$  제어를 설계한다. 본 논문에서는 반지름  $R$ 과 웨이퍼 두께  $Z$ 의 차원은 상수이고 웨이퍼에 대한 열팽창은 무시하고, 불츠만 상수  $k$ 와 비열  $C_p$ 는 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

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (kr \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{q_b(r) + q_l(r)}{z} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

Bottom View of Lamp Head/Reflector



Cross Section of System

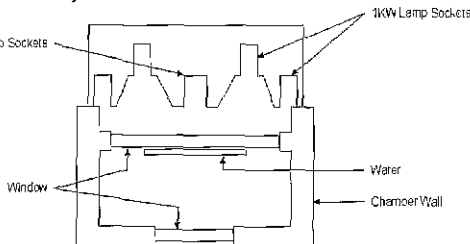


그림 2. 동심원 링으로 배열된 텅스텐-할로젠 램프를 이용한 가열 단면도.

Fig. 2. One-sided heating using tungsten-halogen lamps arranged in concentric ring.

여기서, 경계조건 
$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial r} = 0 & (\text{if } r = 0) \\ k \frac{\partial T}{\partial r} = q_e & (\text{if } r = R) \end{cases} \quad (1)$$

로 주어진다. 여기서 사용된 접근방식은 웨이퍼를  $L$ 개의 동심원으로 나누며, 한개는 원통이고 나머지는 동심원이다.  $i$ 번째 동심원에서 시간에 대한 온도의 변화율은

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

로 주어지고,  $i$ 번째 요소로 유입되는 전체 열량은

$$q_i = q_i^{cm} + q_i^{ab} + q_i^{cond} + q_i^{comp} + q_i^{dist} \quad (3)$$

과 같이 각 성분의 합으로 나타낼 수 있다[17]. 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. $\mu$ 온도제어기 설계

RTP에 대한 일반적인 규격은, 램핑(ramping) 동안  $\pm 2.5$ [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 유지하여야 한다. 선형화한 모델은 3개의 입력과 3개의 출력을 가지며 20개의 상태를 가지고 있다[11]. 입력은 3개의 다른 전력 크기를 가진 램프군이며 출력은 웨이퍼 3점의 다른 위치에서 측정된 온도이다. 본 논문에서 사용하는  $\mu$ 는 구조적 불확실성을 가진 시스템의 정확한 안정도와 성능 분석을 위해 요구되어지는 구조적 특이치(structured singular value)라 불리는 새로운 행렬함수이다. 구조적 특이치는 플랜트의 입력다중 불확실성이 출력에 반영되고, 반영된 불확실성의 크기는 플랜트의 상태비(condition number)에 비례한다. 일반적으로 반영된 불확실성은 본래의 위치와 반영된 위치사이의 전달함수의 상태비에 비례하기 때문이다. 그래서 구조적 특이치는 불확실성의 존재 유무 및 위치를 알아내는데 매우 유용하다. 따라서  $\mu$  제어기 설계시 사용되는 구조적 불확실성(structured uncertainty)은 외부입력이나 공칭플랜트의 섭동의 두가지 방법으로 모델링되며  $\Delta \in C^{n \times n}$  로 나타내며  $\Delta$ 는

$$\Delta = \{ \text{diag}[\delta_1 I_{n_1}, \dots, \delta_r I_{n_r}, \Delta_1, \dots, \Delta_F], \quad (4)$$

$$\delta_i \in C, \Delta_j \in C^{m_j \times m_j} \}$$

와 같이 정의되고[14], 여기서  $\sum_{i=1}^r n_i + \sum_{j=1}^F m_j = n$ 이며 첨자  $R$ 과  $F$ 는 음이 아닌 정수로서 각각 반복스칼라블록(repeated scalar block)과 완전블록(full block)의 수

를 나타낸다. 또한  $\Delta$ 의 노음제한된 부분집합은

$$B\Delta = \{\Delta \in A: \sigma(\Delta) \leq 1\} \tag{5}$$

와 같이 정의된다[15]. 또한 견실성능은 그림 3을 통해 알 수 있으며 이 구조는 견실제어기 설계문제에 대해서 일반적으로 가장 널리 사용된다. 입출력단, 플랜트  $P$ 와 제어기  $K$  및 섭동  $\Delta$ 로 구성되어 있으며 제어의 목적은 섭동  $\Delta$ 에 대해서 폐환시스템의 안정화와 성능을 만족하는 제어기를 설계하는 것이다. 즉 성능에 관계되는 외부 입력  $d$ 로부터 오차신호  $e$ 까지의 폐루프 전달함수의  $H^\infty$ -노음을 가장 작게 만드는 제어기  $K$ 를 설계하는 것이며 이러한 문제를 견실성능 최적화문제라고 한다. 설계된 제어기는  $F_L(P, K) = P_{11} + P_{12}K(I - P_{22}K)^{-1}P_{21}$ 의 LLFT에 의해서 플랜트와 결합되어 그림 4의 폐루프  $M$ 을 형성시키며, 이때 ULFT는 이다.

$$\begin{aligned} e &= F_U(M, \Delta)d \\ &= [M_{22} + M_{21}\Delta(I - M_{11}\Delta)^{-1}M_{12}]d \end{aligned} \tag{6}$$

또한  $\mu$ -최적제어기의  $\mu_\Delta(M(j\omega))$  곡선이 일정 주파수 대역에서 평탄하게 되는 경우가 있다는 것으로 유도된 방법으로 안정한 최소위상 실유리함수  $\mu(s)$ 를 이용하여

$$\|\mu(s)F_L(P, K)\|_\infty \tag{7}$$

을 최소화하는 제어기를 반복적으로 찾는 방법이다. 이 방법도 최적의 제어기를 찾기위해 식 (7)의 값이 줄지 않거나 견실성능조건을 만족할 때 혹은  $\mu_\Delta(M(j\omega))$  곡선이 일정주파수 대역에서 평탄하게 될 때까지 반복을 계속하는 방법이다. 즉 제어기 설계방법은 동등 하중함수  $W_\mu(s)$ 를 이용하여  $\mu$ -합성의 견실성능문제를  $H^\infty$  최적화문제로 변환하여 제어기를 설계하며 최대 특이치와  $\mu$ -노음값과의 차이로 나타나는 오차지수를 이용하여 최적의 제어기를 반복적인 방법으로 찾을 수 있다. 이 방법은 오차지수를 반복지수로 사용함으로써 체계적으로 최적의 제어기를 찾을 수 있고 같은 차수의 곡선조정 함수를 사용하여 제어기를 구할 수 있다. 이 알고리즘을 RTP 시스템에 적용하여 동작온도 1000[K]에서 얻어진 선형화한 모델에 대하여 제어기를 구조적 불확실성을 이용하여 설계한다. 구조적 불확실성  $\Delta$ 의 형태는 폐루프 시스템의 크기가  $M \in C^{6 \times 3}$ 이므로  $\Delta \in C^{3 \times 6}$ 의 구조적

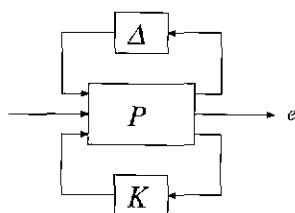


그림 3. 일반적인 견실제어기 설계에 대한 구조.  
Fig. 3. General framework for robust controller design.

불확실성으로 구성되며  $D$  행렬을 곡선조정하여 제어기를 구한다. 시뮬레이션을 할 때는 불럭구조를  $\Delta = C^{2 \times 2}$ ,  $\Delta_f = C^{1 \times 1}$ 로 설정하고 곡선조정을 통하여 구한 제어기를 800[K]와 1500[K]에서 선형화한 모델에 적용하여 비선형성에 대해서도 곡선조정을 통하여 견실성능을 비교한다. 제어기 설계시 고려할 사항은 전체 시스템에 대한 안정성, 내부 불확실성에 대한 안정적 여유, 외란과 측정 잡음의 영향제거 및 감쇠, 과도응답, 기준입력 추적성 등이다. 하중 혼합감도함수를 이용한  $\mu$  제어기 설계 알고리즘과 루프쉐이핑 방법으로 견실안정성과 성능을 동시에 보장하는 혼합감도  $\mu$  제어기 설계방법의 타당성을 제시한다[10][16]. 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  $\mu$  제어기법이 필요하다. 루프쉐이핑 방법은  $H^\infty$  설계방법의 안정성이 보장된 상태에서 얻어진 성능과 견실성을 시행착오방법으로 구하는 것이며, 저주파에서 성능을 그리고 고주파에서는 견실안정성을 위하여 적절한 하중함수를 이용한다.

감도최소화는 외란제거에 초점을 두므로 RTP 시스템은 감도최소화뿐만 아니라 견실안정성을 동시에 만족하는 혼합감도  $\mu$  제어기법이 필요하다. 루프쉐이핑 방법은  $H^\infty$  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 이용하고 RTP 시스템의 구조적 불확실성의 외란에 대해 견실안정성과 성능을 동시에 만족하는 곡선조정을 통한  $\mu$  제어기를 설계한다.

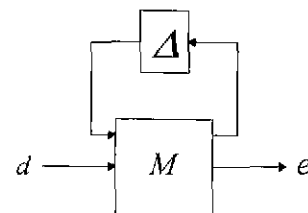


그림 4. 해석 구조.  
Fig.4. Analysis framework.

하중 혼합감도최소화 문제에 대한 폐루프 시스템은 그림 5에서 주어지며 루프쉐이핑을 위한 하중함수  $W_1(s)$ 와  $W_2(s)$ 는

$$W_1(s) = \begin{bmatrix} \frac{0.05s+1500}{0.001s+0.00001} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{0.01s+4000}{0.001s+0.00001} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{5.22s+25000}{0.001s+0.00001} \end{bmatrix} \tag{8}$$

$W_2(s) = I$

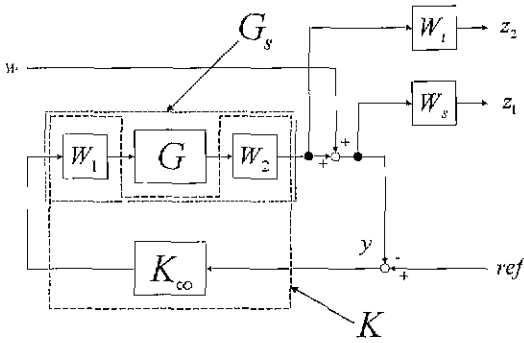


그림 5. 혼합감도 문제를 위한 페루프 시스템  
Fig. 5. The closed loop system for mixed sensitivity problem.

으로 선택하였으며, 본 논문에서 구성한 구조적 불확실성  $\Delta$ 의 형태는 페루프 시스템의 크기가  $M \in C^{6 \times 3}$ 이므로  $\Delta \in C^{3 \times 6}$ 의 구조적 불확실성으로 구성되며  $D$  행렬을 극선조정하여 제어기를 구한다. 시뮬레이션을 할 때는 블럭구조를  $\Delta = C^{2 \times 2}$ ,  $\Delta_f = C^{1 \times 4}$ 로 설정하고 그림 6에 나타내었다.

그리고 혼합감도최소화 문제는

$$\min_{K_\infty(s)} \left\| \begin{matrix} W_s(I - G_s K_\infty)^{-1} \\ W_r G_s K(I - G_s K_\infty)^{-1} \end{matrix} \right\|_\infty \quad (9)$$

로 나타낸다. Doyle[16]이 제시한  $\mu$  제어기 설계 알고리즘을 사용하기 위한 표준플랜트를 구성하여 상태공간으로 나타내어 시행착오법을 이용하여 제어기를 설계하였다[17]. 그림 5에서 시행착오법에 의해 선택된 하중함수는

$$\begin{aligned} W_s(s) &= \frac{0.002}{s+0.002} \\ W_r(s) &= \frac{s}{s+10000} \end{aligned} \quad (10)$$

이다.  $W_r(s)$ 와  $W_s(s)$ 는 설계사양을 만족시키는 제어기 설계를 위하여 선택되어지는 하중함수들이다.  $W_s(s)$ 는 외란의 영향을 최소화하기 위하여 저역통과 필터형태를 가지고  $W_r(s)$ 는 고주파수 영역에서의 모델 불확실성에 대한 견실안정성의 극대화를 위해 고역통과 필터형태를 취한다.  $H^\infty$  혼합감도문제에서 제어기를 설계할 때 페루프 시스템의 극점과 영점사이에서 원하지 않는 소거가

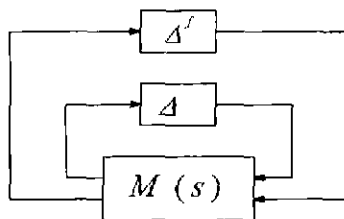


그림 6. 견실성능과 견실안정도  
Fig. 6. Robust performance and robust stability.

발생할 수도 있지만 여기서는 주파수 하중함수를 이용하여 이러한 현상이 발생하지 않도록 한다. 따라서 위의 하중함수와 공칭시스템  $G(s)$ 로부터 표준플랜트를 구성하면 Doyle[16]의 설계 알고리즘으로부터 견실안정성과 성능을 동시에 만족하는  $\mu$  제어기를 구할 수 있다.

본 절에서 견실성능 개선을 위해 동등 하중함수  $W_d(s)$ 와 오차지수  $d_e$ 을 이용하여 설계한  $\mu$ -최적제어기 설계 알고리즘을 정리하면 다음과 같다.

단계 1 :  $H^\infty$  최적제어기  $K_1$ 을 설계한다.

$$K_1 = \arg \inf_K \| F_L(P, K) \|_\infty \quad (11)$$

단계 2 : 제어하고자 하는 주파수영역에서  $\mu$ -노움 곡선을 찾는다.

$$\mu_1(j\omega) = \mu_\Delta(F_L(P, K_1))(j\omega) \quad (12)$$

단계 3 : 동일한 주파수 영역에서 최대 특이치 곡선을 찾는다.

$$\gamma_1(j\omega) = \bar{\sigma}(F_L(P, K_1))(j\omega) \quad (13)$$

단계 4 :  $\gamma_1(j\omega)$ 와  $\mu_1(j\omega)$ 의 차이로 나타나는  $d_{e1}$ 을 계산한다.

$$d_{e1} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} | \gamma_1(j\omega) - \mu_1(j\omega) | d\omega \quad (14)$$

단계 5 : 대략적인  $| W_{\mu 1}(j\omega) |$  곡선을 찾는다.

$$| W_{\mu 1}(j\omega) | = \frac{\mu_1(j\omega)}{\gamma_1(j\omega)} \quad (15)$$

단계 6 : 안정한 최소위상 실유리함수  $W_{\mu 1}(s)$ 를 구한다.

단계 7 :  $H^\infty$  최적제어기  $K_2$ 를 설계한다.

$$K_2 = \arg \inf_K \| W_{\mu 1}(s) F_L(P, K) \|_\infty \quad (16)$$

단계 8 :  $d_{e1}$ 가 더 이상 감소하지 않을 때까지 식(17)에 서식 (21)까지의 단계를 반복한다.

$$\mu_i(j\omega) = \mu_\Delta(F_L(P, K_i))(j\omega) \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \gamma_i(j\omega) &= \bar{\sigma}(W_{\mu i-1} W_{\mu i-2} \dots W_{\mu 2} W_{\mu 1} F_L(P, K_i))(j\omega) \end{aligned} \quad (18)$$

$$d_{ei} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} | \gamma_i(j\omega) - \mu_i(j\omega) | d\omega \quad (19)$$

$$| W_{\mu i}(j\omega) | = \frac{\mu_i(j\omega)}{\gamma_i(j\omega)} \quad (20)$$

$$K_i = \arg \inf_K \| W_{\mu i-1} W_{\mu i-2} \dots W_{\mu 2} W_{\mu 1} F_L(P, K) \|_\infty \quad (21)$$

IV. 모델 차수축소

산업현장에서 실제 시스템을 구현할때 상태수가 많으면 하드웨어적으로 구현하기 힘들뿐만 아니라 실시간처리시 많은 계산량이 필요하다. 본 논문에서 설계한 제어기의 차수는 55차이므로 구현이 용이하지 않고, 제어기 설계에 앞서 RTP 시스템의 모델차수를 줄인 후 제어기를 설계하는 방법을 사용한다[12][13]. 또한 한켄, 자승근 균형 및 슈어 균형의 모델 차수축소방법 중에서 출력특성이 잘 나타난 슈어 균형방법을 이용하여 RTP 시스템의 선형화한 모델을 20차에서 10차로 축소한다[17]. 그리고 구조적 불확실성을 가지는 RTP 시스템에 대해 곡선조정을 통한  $\mu$  제어기를 설계하고 설계한 제어기로 원래의 모델과 축소한 모델에 적용하여 건설성능을 비교한다.

V. 컴퓨터 시뮬레이션

RTP 시스템에 대한  $\mu$  제어기  $K(s)$ 의 차수는 55차이며 안정 여유도(stability margin)  $\gamma$ 값은 0.1001로 매우 작은 값으로 나타났다. 1000[K] 모델을 이용하여 구한 제어기의 외란에 대한 곡선조정을 통한 출력 파형은 그림 7, 외란제거효과는 그림 8에 각각 나타낸다. 1000[K] 모델에서 구한 제어기를 800[K] 및 1500[K]에 적용했을 때 외란에 대한 곡선조정을 통한 출력파형은 그림 9와 그림 11, 외란제거 효과는 그림 10과 그림 12에 나타낸다. 이 때 인가한 외란은 단위계단 입력신호에서 2초 지연을 가진 1[K]의 계단입력을 사용한다. 온도가 계단형태로 변하기 때문에 외란으로 계단입력을 사용한다. 3개의 외부 입력신호중 2번째의 신호에만 외란을 인가하였을 경우, 외란이 인가된 2초에서 외란의 영향을 받을 수 있으나 곧 외란의 영향이 감소되었다. 또한 그림 7, 그림 9와 그림 11에서는 외란 인가시 기준입력 신호에 대한 계단응답 특성이 3절에서 언급한 규격과 온도 편차 및 오버슈트를 만족하고 있음을 알 수 있다. 또한 곡선조정을 통하여 오버슈트가 줄어들고 있고, 1000[K]

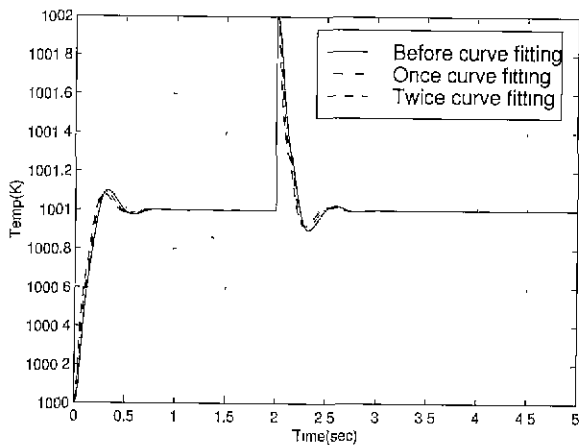


그림 7. 1000[K] 모델의 외란인가시 계단응답.  
Fig. 7. The step response of 1000[K] model with disturbance as curve fitting.

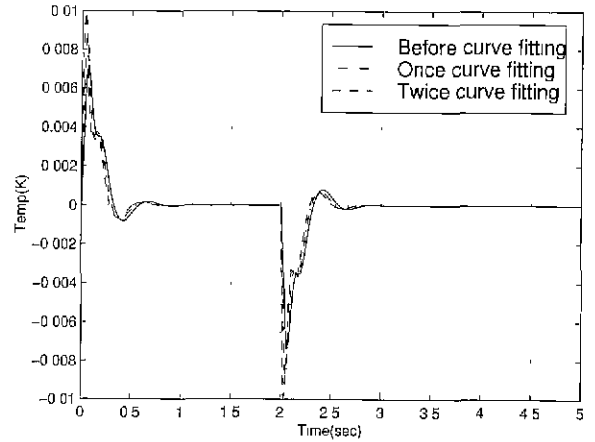


그림 8. 1000[K] 모델의 외란제거 효과.  
Fig. 8. Disturbance rejection effect of 1000[K] model as curve fitting.

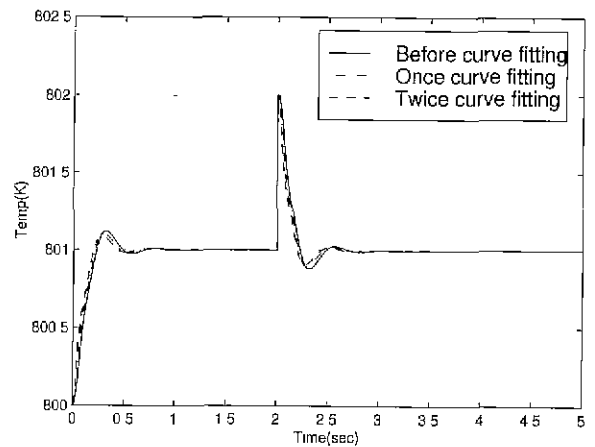


그림 9. 800[K] 모델의 외란인가시 계단응답.  
Fig. 9. The step response of 800[K] model with disturbance as curve fitting.

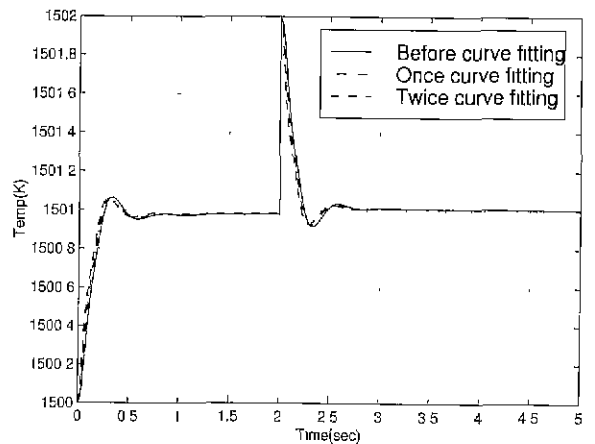


그림 10. 800[K] 모델의 외란제거 효과.  
Fig. 10. Disturbance rejection effect of 800[K] model as curve fitting.

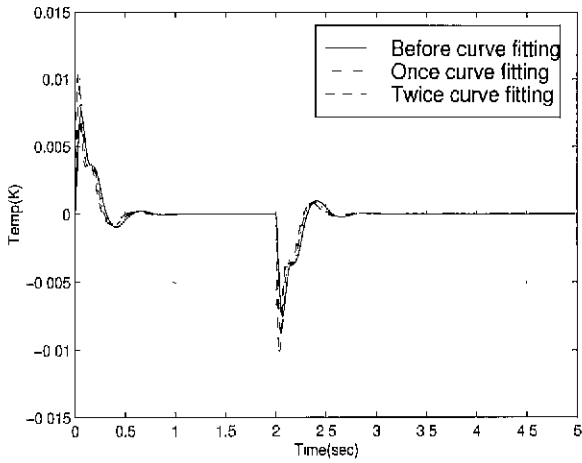


그림 11. 1500[K] 모델의 외란인가시 계단응답.  
Fig. 11. The step response of 1500[K] model with disturbance as curve fitting.

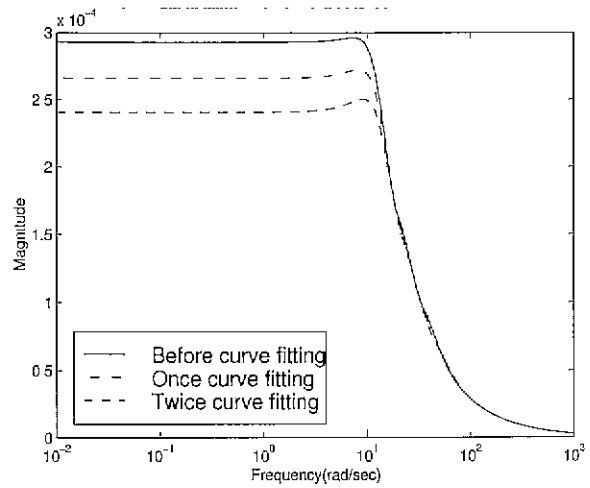


그림 14. 1회 곡선조정 결과.  
Fig. 14. The result of once curve fitting.

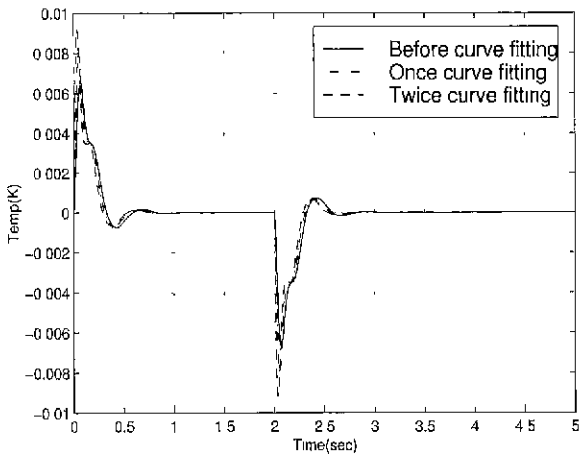


그림 12. 1500[K] 모델의 외란제거 효과.  
Fig. 12. Disturbance rejection effect of 1500[K] model as curve fitting.

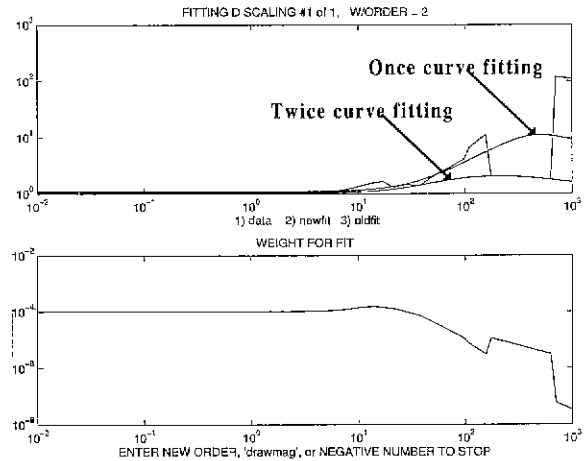


그림 15. 1회 곡선조정 결과.  
Fig. 15. The result of once curve fitting.

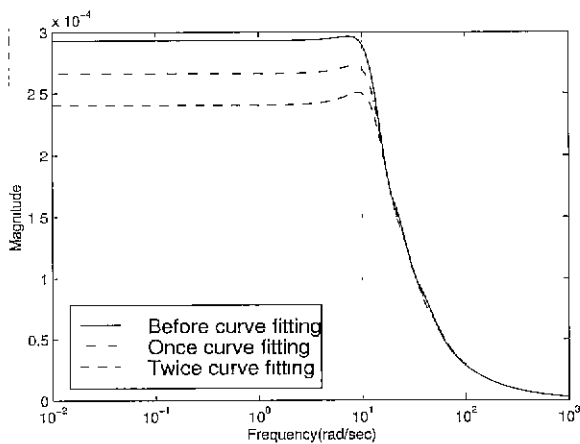


그림 13. 곡선조정에 따른 구조적 특이치의 변화.  
Fig. 13. The bound variation as curve fitting.

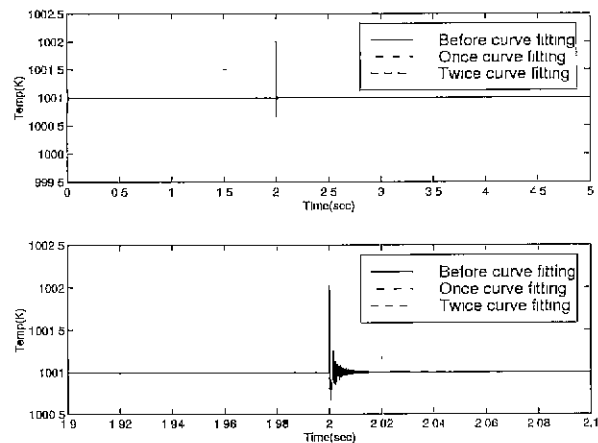


그림 16. 슈어 균형축소 모델의 외란인가시 계단응답.  
Fig. 16. The step response of Schur balanced model reduction with disturbance as curve fitting.

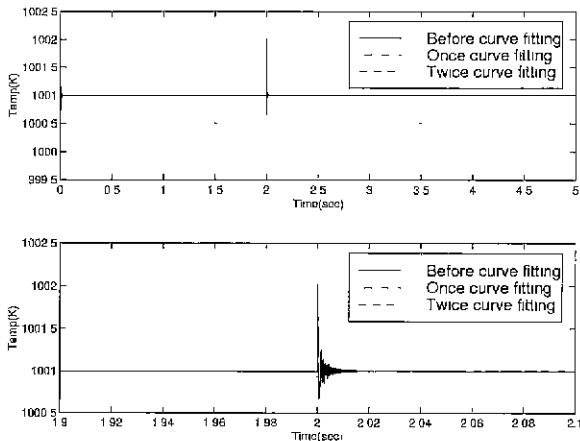


그림 17. 슈어 균형축소 제어기를 원래 모델에 인가 시 계단응답.

Fig. 17. The step response of original model using Schur reduced model controller as curve fitting.

모델에서 곡선조정을 통하여 외란제거효과가 뛰어난 것을 알 수 있다.  $D$ 로 곡선조정을 할 때의 구조적 특이치의 변화는 그림 13에서 곡선조정에 따른 값이 줄어들음을 알 수 있으며 곡선조정과정은 그림 14와 그림 15에 나타난다. 제어기 설계결과를 시뮬레이션을 통해  $\mu$  제어기는 뛰어난 외란제거 효과와 좋은 출력 추적성을 나타낸다. 그리고 축소된 모델을 이용하여 설계한 제어기의 차수는 29차이다. 그림 16에서 슈어 균형방법을 이용한 저차의 모델에 대해 곡선조정을 통한 외란인가시 출력특성을 나타내고, 그림 17은 축소된 모델을 이용하여 설계한 제어기를 원래의 모델에 적용시의 출력특성을 보이므로써 견실성과 모델축소의 타당성을 보여준다. 그리고 확대한 그림을 그림 16과 그림 17에서 동시에 나타낸다.

## VI. 결론

본 논문에서는 RTP 시스템에서 온도변화와 같은 외란에 대한 견실안정성과 온도추적성 및 웨이퍼 내의 균일성 등의 견실성능을 개선하기 위하여 하중 혼합감도합수를 이용하고, 구조적 불확실성에 대한 블록을 설정하여 곡선조정을 2회 한 후  $\mu$  제어기를 설계하였다. 그리고 슈어 균형 모델 차수축소방법을 이용하여 제어기의 차수를 55차에서 29차로 줄였다. 스탠포드 대학의 모델링 결과와 1000[K]에서 선형화한 상태변수값을 이용하여 제어기를 설계하였고, 이를 800[K]와 1500[K]에 적용하여 비선형성에 대한 견실성능을 비교하고, 곡선조정을 통해 오버슈트 및 구조적 특이치가 줄어들고 외란제거 효과가 개선되었다. 또한 시뮬레이션을 통하여 좋은 추적성과 뛰어난 외란제거 효과가 나타남을 확인하였다. 슈어 균형축소방법을 사용하여 20차의 모델을 10차로 축소하였으며, 축소된 모델에서 곡선조정을 통한  $\mu$  제어기를 설계하여 축소된 모델과 원래의 모델에 적용시 유사한 특성을 가지므로 견실안정성 및 성능이 보장됨을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] B. D. O. Anderson and Y. Liu, "Controller reduction: concept 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  $H^\infty$  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 Proc. 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.
- [14] A. Packard and J. Doyle, "The complex structured singular value," *Automatica*, vol. 29, no. 1, pp. 71-109, 1993.
- [15] J. C. Doyle, "Structured uncertainty in control system design," *Proc. IEEE Conf. Decision and Control*, Fort Lauderdale, FL, pp. 260-265, 1985.
- [16] J. C. Doyle, "Analysis of feedback systems with



structured uncertainties," *IEE Proceedings*, vol. 129, part D, no. 6, pp. 242-250, 1982.

[17] 이상경, 김종해, 오도장, 박홍배. "하중 혼합감도함

수를 이용한 RTP 시스템의  $H^\infty$  제어기 설계," 대한 전자공학회 논문지-S, vol. 35, no. 6, pp. 805-815, 1998, 6.



**이 상 경**

1960년 3월 27일생. 1986년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업. 1986-1997년 한국전자(주) 근무. 1991-1993년 경북대학교 산업대학원 석사. 1994년 3월 - 현재 경북대학교 전자공학과 박사과정. 1998년 3월-현재 두원공과

대학 컴퓨터응용제어과 전임강사. 주관심분야는 RTP, 견실  $H^\infty$  제어, 회로해석.



**김 종 해**

1970년 1월 10일생. 경북대학교 전자공학과 공학사(1993), 공학석사(1995) 및 공학박사(1998). 1998년 - 현재 경북대학교 센서기술연구소 전

임연구원. 주관심분야는 견실  $H^\infty$  제어, 퍼지  $H^\infty$  제어, 시간지연시스템 해석 및 제어기 설계, 산업응용제어 및 자동항법제어, 비약성(non-fragile) 및 신뢰성(reliable) 제어 등.



**김 해 근**

1955년 2월 20일생. 공학박사. 현재 전자통신연구소 차세대 교환전송실 책임 연구원. 주관심분야는 전자교환기 개발, 견실제어 등.

**박 홍 배**

제어 자동화 시스템 공학회 논문지 제2권 제1호 참조.