

상업용 12인치 급속가열장치의 제어계 설계를 위한 모델인식

윤우현 · 지상현* · 나병철* · 원왕연 · 이광순†

서강대학교 화학생명공학과
121-742 서울시 마포구 신수동 1
*코닉 시스템(주)
445-813 경기도 화성시 동탄면 중리
(2007년 12월 15일 접수, 2008년 1월 24일 채택)

Model Identification for Control System Design of a Commercial 12-inch Rapid Thermal Processor

Woohyun Yun, Sang Hyun Ji*, Byung-Cheol Na*, Wangyun Won and Kwang Soon Lee†

Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Sogang University, 1, Shinsoo-dong, Mapo-gu, Seoul 121-742, Korea

*KORNIC Systems Co., Ltd., Jung-ri, Dongtan-myun, Hwasung, Kyungki 445-813, Korea

(Received 15 December 2007; accepted 24 January 2008)

요 약

상업용 12인치 급속가열장치(RTP)의 다변수 고급제어기를 개발하기 위하여 열전대가 부착된 웨이퍼를 대상으로 다변수 모델인식을 수행하였다. 웨이퍼에는 7개의 열전대가 설치되어 있으며 10개의 텅스텐-할로겐 램프 그룹으로 가열을 할 수 있다. 모델인식 실험과정에서 웨이퍼의 휨을 최소화하며 최종적으로 10-입력 7-출력의 균형 잡힌 상태공간 모델을 얻기 위한 모델인식방법을 제안하였다. 또한 넓은 온도영역에서 복사에 의한 비선형성을 가장 효과적으로 상쇄시킬 수 있는 출력변수 정의방법을 제안하였다. 600, 700, 800 °C 부근의 정상상태에서 실험을 수행하여 모델을 추정할 결과 상태의 차수는 80~100, 모델출력은 $y=T(K)^2$ 으로 결정하는 것이 바람직하며, 이때 one-step-ahead 온도예측 오차의 제곱평균은 0.125~0.135 K 정도로 나타났다.

Abstract – This paper describes a model identification method that has been applied to a commercial 12-inch RTP (rapid thermal processing) equipment with an ultimate aim to develop a high-performance advanced controller. Seven thermocouples are attached on the wafer surface and twelve tungsten-halogen lamp groups are used to heat up the wafer. To obtain a MIMO balanced state space model, multiple SIMO (single-input multiple-output) identification with high-order ARX models have been conducted and the resulting models have been combined, transformed and reduced to a MIMO balanced state space model through a balanced truncation technique. The identification experiments were designed to minimize the wafer warpage and an output linearization block has been proposed for compensation of the nonlinearity from the radiation-dominant heat transfer. As a result from the identification at around 600, 700, and 800 °C, respectively, it was found that $y=T(K)^2$ and the state dimension of 80-100 are most desirable. With this choice the root-mean-square value of the one-step-ahead temperature prediction error was found to be in the range of 0.125-0.135 K.

Key words: Identification, High-Order ARX Model, Balanced Realization, Balanced Truncation, Rapid Thermal Processing

1. 서 론

급속가열장치(Rapid Thermal Processor, RTP)는 실리콘 웨이퍼를 빠른 시간 내에 원하는 온도까지 상승시킨 후 annealing, 산화막 형성, 질화막 형성, CVD 등의 가공을 짧은 시간 내에 수행하기 위한 반도체 가공장치로 실리콘 웨이퍼 생산 및 반도체 공정에서 많이 사용되고 있다. 기존의 furnace에서 이러한 공정을 수행하는 경우,

고온상태에서 장시간 웨이퍼가 노출됨으로 인하여 dopant들의 TED(transient enhanced diffusion)가 심하게 나타나는 문제들이 있었다. 반도체 선폭이 지속적으로 또한 빠른 속도로 줄어 들며 허용 가능한 TED도 매우 낮아져 RTP는 기존의 furnace 공정을 대부분 대체하고 있는 것이 현재 반도체 산업에서의 상황이다.

RTP의 운전에서 가장 중요한 것은 웨이퍼 표면의 온도를 균일하게 유지시키는 것이다. RTP에서 웨이퍼 온도는 대표적으로 Fig. 1과 같이 상승, 유지 및 냉각의 세 구간으로 구분된 간단한 궤적을 따른다. 웨이퍼 가공은 대부분 유지 구간에서 수행되며 따라서 이 구간에서 높은 온도 균일도를 유지하여야 하는 것이 매우 중요하다.

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kslee@sogang.ac.kr

‡이 논문은 서강대학교 최청송 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

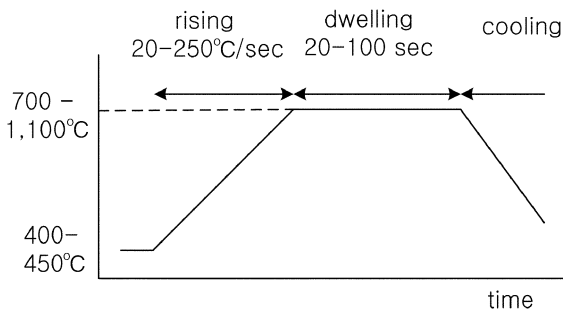


Fig. 1. Typical temperature trajectory of RTP system.

온도 균일도는 상승구간에서도 중요한데 이것은 균일도를 잃는 경우 웨이퍼의 휨 현상이 일어나기 때문이다. 웨이퍼 휨은 온도 균일도를 위해 웨이퍼를 회전시키는 RTP 장비에서 위험한 상황을 초래할 수 있을 뿐 아니라, lithography 공정에서 패터닝오차를 유발하는 중요한 원인이 되기도 한다[1, 2]. Spike annealing 경우, 상승속도는 250 K/sec 이상, 그리고 유지시간은 가능한 한 짧은 매우 까다로운 궤적이 요구되기도 한다.

8인치 웨이퍼에서는 웨이퍼 면적이 넓지 않고 또한 선폭도 비교적 커서 허용되는 온도분포 편차가 여유가 있었으며 이 요구사항을 다중 PID 제어만으로도 만족시킬 수 있었다. 그러나 12인치 웨이퍼에서는 넓어진 면적에 더하여 선폭도 미세해짐에 따라 허용 온도분포 편차도 작아져 PID제어기가 성능에 한계를 보이게 된다. 따라서 12인치 RTP에서는 다변수 고급제어 기능을 장착한 AMT 사나 Mattson사의 장비들이 시장을 지배하고 있는 것이 현 상황이다. AMT 사는 다변수 LQG 제어기를 통하여 정밀제어를 구현하고 있으며, Mattson 사는 1점 온도제어를 수행하고 있지만 RTO를 통한 산화막 두께 분포를 run 단위로 피드백 시키는 일종의 다변수 회분제어를 통하여 정밀제어를 수행하고 있다[3].

RTP의 온도제어는 몇몇 그룹에 의해 꾸준히 연구되어왔다. 먼저 LQG 제어는 Stanford 대학교의 Kailath 그룹에서 Texas Instrument의 4인치 RTP 장비를 대상으로 많은 연구가 수행된 바 있다[4, 5]. Univ. of Texas at Austin의 Edgar 그룹도 RTP 제어연구 선도그룹 중의 하나이며 Texas Instrument의 4인치 RTP 장비를 대상으로 현재까지 꾸준한 연구를 수행하고 있다[6, 7]. 서강대학교의 Lee 그룹은 RTP 장비의 회분운전 특성을 이용한 다양한 다변수 회분제어 방법을 개발하고 이를 8인치 RTP 장비에 적용하여 괄목할 만한 연구결과를 얻은 바 있다[8, 9].

본 논문에서는 국내의 RTP 장비 제조업체인 Koric Systems사의 12인치 웨이퍼용 RTP 장비인 Korona™ RTP 1,200 Plus 모델을 대상으로, 고급제어기 개발을 위한 모델인식 연구결과를 보고하고자 한다. Korona™ RTP 1,200 Plus는 웨이퍼 회전 기능을 가지고 있으며, pyrometer를 이용하여 4-5 지점의 웨이퍼 온도를 측정하며, 10개의 동심원을 따라 설치된 220개의 tungsten-halogen 램프를 이용하여 웨이퍼 온도를 제어하는 장비이다. 다변수 고급제어기를 이용한 정밀온도 제어를 위하여 먼저 열전대가 설치된 TC-웨이퍼를 이용하여 모델인식연구를 수행하였으며 그 과정과 해석결과를 기술하고자 하였다.

2. 공정 개요

Fig. 2는 Korona RTP 장비의 외형을, Fig. 3는 가열 램프와 열전



Fig. 2. Photograph of Korona™ 1200Plus system from Koric System Co.

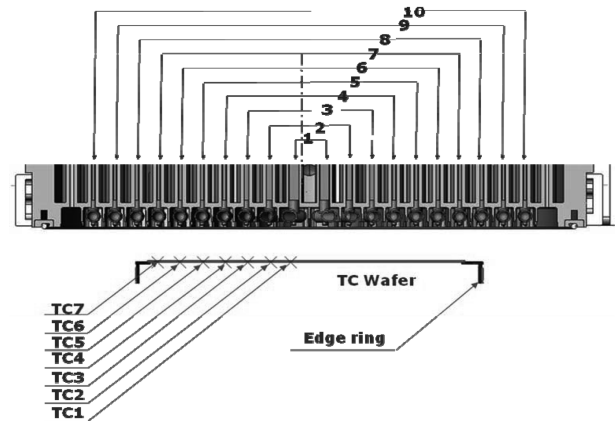


Fig. 3. Heating lamp array and temperature sensor locations.

대 배치를 보인 것이다. 최대 0.7 kw의 발열량을 갖는 텅스텐-할로젠 램프 벌브가 10개의 동심원 따라 총 220개 배열되어 있다. 온도 균일도를 향상시키기 위하여 운전 중에는 웨이퍼 회전이 가능하며 이때 pyrometer로 온도를 측정한다. Pyrometer는 설치할 수 있는 수가 제한되어 있어 먼저 열전대(TC)를 부착한 웨이퍼를 이용하고 회전하지 않는 상태에서 identification을 수행하였다. TC-웨이퍼에는 반경 방향을 따라 7개의 열전대를 설치하였다. 가열램프는 동심원 별로 독립적인 조작이 가능하다. 이러한 구조에 근거하여 대상 RTP 장비는 10-입력 7-출력을 갖는 7×10 다변수 공정이 된다.

3. 모델 인식 방법

3-1. 선형화 모델구조

RTP는 복사 열전달이 지배하므로 가열량과 웨이퍼 온도 사이의 관계는 비선형적일 수 밖에 없다. Cho 등[8]은 벽면의 온도와 반사율이 일정하다는 가정하에 수립한 RTP 공정의 정상상태 모델이 다음과 같음을 보인 바 있다.

$$T^d = MP + T_w^d, T = \text{vec}(T_i), P = \text{vec}(P_j) \quad (1)$$

여기서 vec 은 열벡터를 나타내며, T, P, T_w 는 각각 웨이퍼 온도(K), 가열 램프 열량과 chamber 벽면의 온도(K)로 모두 벡터변수이다. 만약 이 관계가 정확히 성립한다면 적어도 정상상태 모델링에 관한 한, 모델의 입출력 변수를 각각 T^4 과 P 로 정의할 때 모든 온도 영역에서 하나의 선형모델로 RTP 공정을 표현할 수 있게 된다. Cho 등은 T^4, P 를 입출력 변수로 갖는 선형 동특성 모델을 모델인식 방법으로 결정하여 제어를 수행한 결과 T, P 를 입출력 변수로 하는 경우에 비하여 제어성능이 크게 개선되는 것을 확인하였다[8]. T^4, P 를 입출력 변수로 정의한 선형 동특성 모델의 특성을 살펴 보기 위하여 다음과 같은 1차 모델을 생각하여 보자.

$$H \frac{dT^4}{dt} + T^4 = MP + b, H = \text{diag}(\tau_i) \quad (2)$$

시간에 대한 미분을 취하고 정리하면 다음의 식을 얻는다.

$$4H \frac{dT}{dt} + T = \text{diag}(T_i^3)^{-1} (MP + b) \quad (3)$$

따라서 T^4 를 출력으로 정의한 동특성 모델은 정상상태에서는 식 (1)의 관계를 만족하며 동적 상태에서는 식 (3)과 같이 T 에 대한 선형 동특성을 나타냄을 볼 수 있다. 모델의 차수가 2차 이상으로 증가되면 선형 동특성이 더 이상 지속되지 않지만, 위의 결과는 의미 있는 것이다.

식 (2)의 관계는 여러 이상적인 가정하에서 얻어진 것이므로, 본 연구에서는 출력변수를 T, T^2, T^3, T^4 로 다양하게 정의하여 어느 형태가 더 넓은 영역에서 더 일관된 선형성을 보이는지 조사하였다.

3-2. 실험 설계

TC-웨이퍼 실험에서의 최종 목표는 10개의 램프 그룹을 모두 조작하여 7 지점 온도를 모두 제어하는 다변수 제어기 설계에 두었다. 따라서 7×10 모델을 모델인식 실험을 통하여 결정하여야 한다. 이를 위하여 다음의 사항들을 특별히 고려하였다.

- 온도에 따른 특성 변화가 심할 수 있으므로 600, 700, 800 °C의 세 온도 주변에서 각각 모델인식 실험을 수행한다.
- 각 정상상태 온도에 도달하는 것은 기존의 PID 제어를 이용한다.
- 샘플링 주기와 입력 여기신호는 각 온도 주변에서 step test를 수행하여 얻은 대략의 공정특성으로부터 결정한다.
- 모델인식 실험은 정상상태 주변에서 열린 루프 상태로 수행하며, 각 입력 별로 순차적으로 독립적인 입력 여기신호를 가하는 SIMO (Single-Input Multiple-Output) 모델인식으로 수행한다.
- 입력 여기신호는 PRBS (pseudo-random binary sequence)를 이용하여 신호의 크기는 warpage를 고려하여 웨이퍼의 온도 차가 줄어드는 방향으로 가한다.

Fig. 4에 600 °C 정상상태에서 3번 램프그룹에 계단변화를 가하여 얻은 응답을 보였다. 계단응답에 의하면 시정수가 온도에 따라 20-40 sec 정도로 나타나며 고온에서 시정수가 짧아지는 특성을 보였다. 이 시정수를 참조하여 샘플링 간격은 0.5 sec로 결정하였다. Fig. 5에는 모델인식 실험에 사용한 입력 여기신호를 예시하였다. PID 제어를 이용하여 웨이퍼 온도가 목표 값에 안정되면 이 정상상태 값에 각 램프 그룹별로 순차적으로 3 min 동안의 PRBS 신호가 가해진다. 한 램프그룹에서 다른 그룹으로 전환될 때 정상상태를 다시 회복하기 위하여 2 min을 기다렸으며 이렇게 하여 하나의

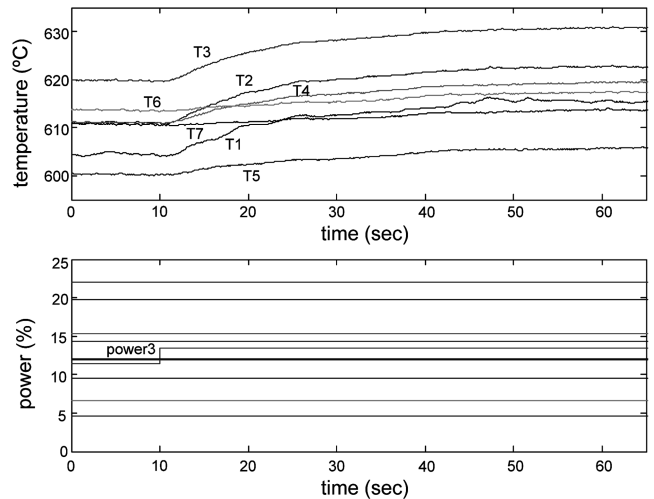


Fig. 4. Typical step responses of TC temperature at 600 °C.

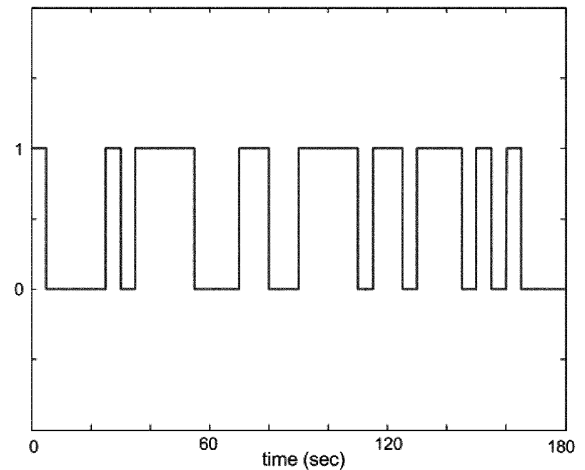


Fig. 5. Input excitation signal (PRBS).

온도에서 50 min 동안 모델인식 실험을 수행하였다.

3-3. 모델 추정 방법

SIMO 모델인식은 사실상 각각의 입력에 대하여 7개의 독립된 SISO 모델을 추정하는 것이다. 이렇게 얻은 SISO 모델을 모두 모아 MIMO 상태공간 모델을 얻었다. 이 과정을 기술하면 다음과 같다.

1. 각 SISO 모델을 다음과 같은 고차 ARX 모델로 추정한다. 고차 ARX 모델은 moving average항의 동특성이 포함될 수 있으며, 선형 최소자승법으로 파라미터 계산이 가능하다는 이점이 있다.

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_n y(t-n) = b_1 u(t-1) + \dots + b_n u(t-n) + f + e(t) \\ \leftrightarrow A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + f + e(t) \quad (4)$$

여기서, y 는 T, T^2, T^3, T^4 중 하나이며, f 는 bias, 그리고 $e(t)$ 는 평균이 0인 백색잡음을 나타낸다. $\Delta u(t) = u(t) - u(t-1)$ 와 $\Delta y(t) = y(t) - y(t-1)$ 의 관계에 대하여 위 식을 다시 정리하면

$$A(q^{-1})\Delta y(t) = B(q^{-1})\Delta u(t) + e(t) \quad (5)$$

와 같이 bias 항이 소거된 $A(q^{-1}), B(q^{-1})$ 에 관한 모델이 얻어진다.

2. 식 (5)의 ARX 모델을 controllable(혹은 다른 형태의) canonical 상태공간 모델로 표현한다. 이 상태공간 모델의 시스템 행렬을 (a_{nm} , b_{nm} , c_{nm})라 하자. 여기서 nm 은 각각 n 번째 출력변수 Δy_n 과 m 번째 입력변수 Δu_m 사이의 모델임을 나타낸다.

3. 모든 n, m 에 대하여 이 모델을 확장하여 다음과 같이 MIMO 상태공간모델을 구성한다.

$$X(t+1) = \begin{bmatrix} a_{1,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{1,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{2,1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{7,10} \end{bmatrix} X(t) + \begin{bmatrix} b_{1,1} & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & b_{1,10} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{7,1} & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & b_{7,10} \end{bmatrix} \Delta U(t)$$

$$= \bar{A}X(t) + \bar{B}\Delta U(t)$$

$$\Delta Y(t) = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & \dots & c_{1,10} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{7,1} & c_{7,2} & \dots & c_{7,10} \end{bmatrix} X(t) = \bar{C}X(t) \quad (6)$$

여기서

$$\Delta Y(t) = [\Delta y_1(t) \ \Delta y_2(t) \ \dots \ \Delta y_7(t)]^T,$$

$$\Delta U(t) = [\Delta u_1(t) \ \Delta u_2(t) \ \dots \ \Delta u_{10}(t)]^T$$

4. Balanced truncation을 이용하여 모델의 차수를 축소한다[10]. 차수의 결정은 balanced truncation시 계산되는 Hankel 특이치 값이 충분히 작아지는 지점으로 택한다. 그러나 차수의 결정은 주관적일 수 밖에 없다. 이렇게 얻어진 시스템 행렬을 $\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}$ 라 하자.

설계될 제어기에 적분동작을 손쉽게 포함시키기 위한 방편으로 이 상태공간 모델은 다음과 같이 재정리 된다.

$$\begin{bmatrix} X(t+1) \\ Y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{A} & 0 \\ \tilde{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X(t) \\ Y(t-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{B} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta U(t)$$

$$Y(t) = [\tilde{C} \ I] \begin{bmatrix} X(t) \\ Y(t-1) \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \begin{aligned} z(t+1) &= Az(t) + B\Delta U(t) \\ Y(t) &= Cz(t) \end{aligned} \quad (7)$$

위의 방법은 Won 등이 개발한 방법[11]을 부분적으로 변형한 것이다.

4. 결과 및 해석

모델인식 실험은 600, 700 및 800 °C 세 정상상태 온도 부근에서 수행하였다. 이 중 600, 800 °C 데이터는 각각 모델을 결정하는데 사용하였으며, 700 °C 데이터는 모델 검증용으로만 사용하였다.

4-1. 실험 데이터 예시

600 °C 정상상태에서 3번 램프 그룹에 PRBS를 가했을 때 얻은

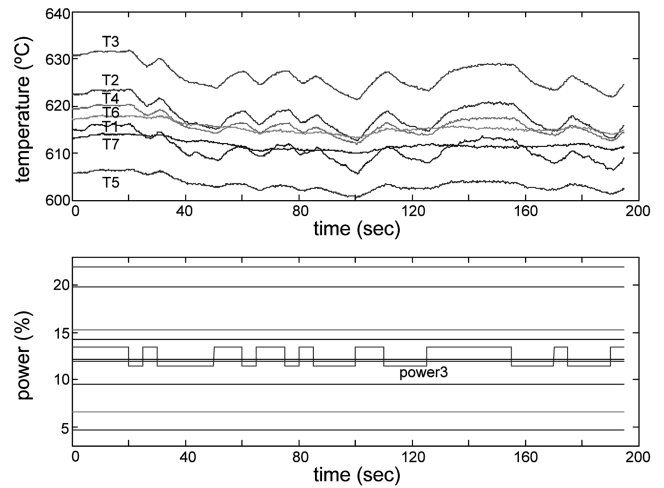


Fig. 6. Temperature trajectories for changes in third lamp group around 600 °C.

온도 측정치를 Fig. 6에 보였다. 3번 램프 그룹은 TC3 위치를 집중적으로 가열하도록 배열되어 있지만 다른 지점의 온도들도 심한 영향을 받는 것을 볼 수 있다.

4-2. 모델 인식

SISO 고차 ARX 모델은 AR항과 입력항이 각각 11개의 계수를 갖도록 하였다. 이 SISO 모델은 차수가 11인 controllable 상태공간 모델로 변환되었다. 이렇게 얻어진 70개의 상태공간 모델을 식 (6)으로 확장하면 상태의 차수가 770 인 상태공간 모델이 얻어지며, 이 모델은 많은 수의 uncontrollable, unobservable 상태를 가진 non-minimal realization이 된다. Balanced truncation 과정에서 얻어지는 이 모델의 Hankel 특이치를 Fig. 7에 예시하였다. 이 그림으로부터 차수감소 상태공간 모델의 차수는 80-100으로 결정하였다.

4-3. 모델 성능

Table 1은 600 °C 및 800 °C에서 인식된 모델을 이용하여 600, 700 및 800 °C에서의 one-step-ahead 온도예측오차의 rms 값을 다음과 같이 정의하여 계산한 것이다.

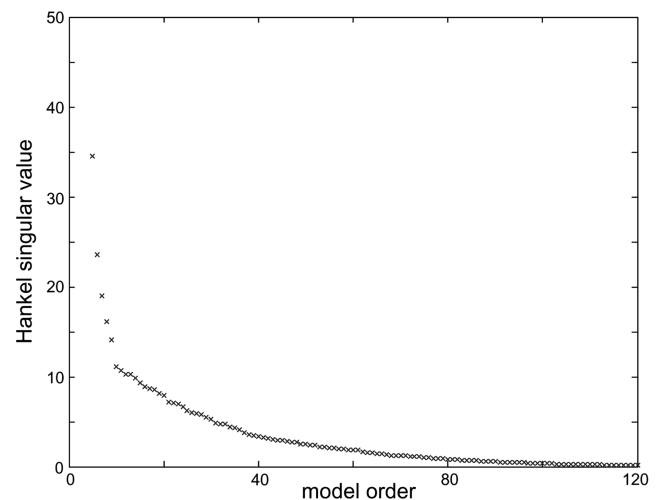


Fig. 7. Hankel singular values of MIMO state space model.

Table 1. Comparison of root mean squares of one-step-ahead temperature prediction errors.

	600 °C MIMO				800 °C MIMO			
	n=1	2	3	4	n=1	2	3	4
600°C rms of prediction error	0.1388	0.1338	0.1312	0.1428	0.1410	0.1399	0.1493	0.1601
700°C rms of prediction error	0.1323	0.1275	0.1324	0.1379	0.1303	0.1277	0.1360	0.1431
800°C rms of prediction error	0.1401	0.1305	0.1327	0.1384	0.1295	0.1226	0.1306	0.1360

$$\text{rms} = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 \left(\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (T(t) - \hat{T}(t|t-1))^2 \right)^{1/2} \quad (8)$$

여기서 $\hat{T}(t|t-1)$ 은 $\hat{y}(t|t-1)$ ($y(t)$ 의 one-step-ahead 예측값)을 계산한 후 이를 온도로 환산한 값이며, N 은 10개의 램프그룹 각각을 모두 여기 시키는 전체 구간에서의 총 샘플 수이다.

이 표로부터 600, 800 °C 모델 모두 $y=T^2$ 가 세 온도에서 작고 고 큰 예측오차를 나타냄을 알 수 있다. 이것은 Cho 등[8]의 모델과 다른 결과로 Cho 등은 복사 열전달의 이론에 근거하여 모델을 택한 것이며 실험적으로 찾아낸 것은 아니었다. 식 (1)의 모델은 챔버의 열질량(thermal mass)과 이에 따른 동특성을 무시하고 유도된 것인데, 실제 RTP 장비에서는 챔버의 열질량이 웨이퍼의 그것과는 비교할 수 없이 크고, 챔버 벽면의 온도가 정확히 일정한 값을 유지하는 것은 아니기 때문에 이에 따른 영향의 결과가 아닌가 생각된다. Fig. 4의 계단응답에서 나타난 20-40 sec의 시정수도 웨이퍼만을 생각했을 때에는 상상하기 힘든 의외로 큰 값이다. 이러한 값도 챔버 열질량 때문에 나타난 것으로 추정된다.

5. LQG 모사 실험

Fig. 8은 추정된 모델 식 (7)을 공정으로 생각하고, 또한 동일한 모델로 LQG (Linear Quadratic Gaussian)제어기를 설계하여 제어를 수행한 수치모사의 결과이다. 이 모사 이전에 PID 제어기를 이용하여 추적제어 실험을 수행한 결과가 주어졌 있었다. LQG 가동을 위해서는 먼저 상태변수를 적절히 초기화 시켜야 한다. 이를 위하여 먼저 영역 1에서 PID 제어 때에 가해진 램프 파워 $u(t)$ 와 온도 측정치 $y(t) = T^2(t)$ 를 각각 입출력 변수로 하여 Kalman filter 만을 가동

하였다. 이렇게 상태변수를 초기화시킨 후 영역 2에서 수치공정을 가동시키고 LQG를 적용하였다. 그림에서 보는 것과 같이 매우 부드럽고 정교한 제어가 가능하였으며 600 °C 정상상태 구간에서 7 지점 측정온도 사이의 최대 편차가 2 °C 이내로 나타났다.

6. 결 론

RTP 장비에서는 웨이퍼 온도 균일도를 얼마나 높게 얻을 수 있는가 하는 것이 장비성능의 가장 중요한 사양이다. 이를 위하여 세계 시장을 주도하는 AMT 사는 LQG에 근거한 다변수 제어기를 개발하여 이를 적용하고 있다. 본 연구에서는 국내 상업용 12인치 회전식 RTP 장비를 대상으로 LQG 제어기법을 개발하여 적용하고자 하였으며, 이 개발과정 중 TC-웨이퍼를 이용하여 모델인식을 수행한 부분을 보고하였다. RTP의 모델인식 기법은 다음에 주안점을 두며 개발되었다.

- (1) 웨이퍼 warpage를 극소화하도록 가능하면 웨이퍼 위의 온도차를 작게 유발하는 방안
- (2) 정교하고 효율적인 다변수 상태공간 모델인식 알고리즘
- (3) 복사 열전달이 지배하는 RTP의 비선형 특성을 고려한 출력변수 선형화 방안: T^2 을 출력변수로 취하여 넓은 온도에서 가장 적은 모델오차를 주는 n 을 결정

이를 위하여 600, 700 및 800 °C 정상상태 주변에서 각각 실험을 수행한 후 600 °C 및 800 °C 데이터로 추정된 두 모델을 검증한 결과 $n=2$ 가 가장 우수한 특성을 보였으며 샘플링 주기를 0.5 sec로 하였을 때에 상태공간 모델의 상태의 차수는 80-100으로 결정되었다.

감 사

우리나라의 화학공학, 특히 산업화에 큰 족적을 남기셨으며 학문과 기술에 대한 누구보다 더 큰 열정을 가지신 존경하는 최청송 교수님의 정년퇴임을 기념하며 이 논문을 바칩니다.

참고문헌

1. May, G. S. and Sze, S. M., *Fundamentals of Semiconductor Fabrication*, John Wiley, & Sons, NJ(2004).
2. Xiao, H., *Introduction to Semiconductor manufacturing Technology*, Prentice-Hall(2001).
3. Private communication with engineers in Kornic Systems Co.
4. Cho, Y. M. and Gyugyi, P., "Control of Rapid Thermal Processing: A System Theoretic Approach", *IEEE Trans. Contr. Sys. Tech.*, **5**, 644(1997).
5. Schaper, C. D., Moslehi, M. M., Sarawat, K. C. and Kailath, T.,

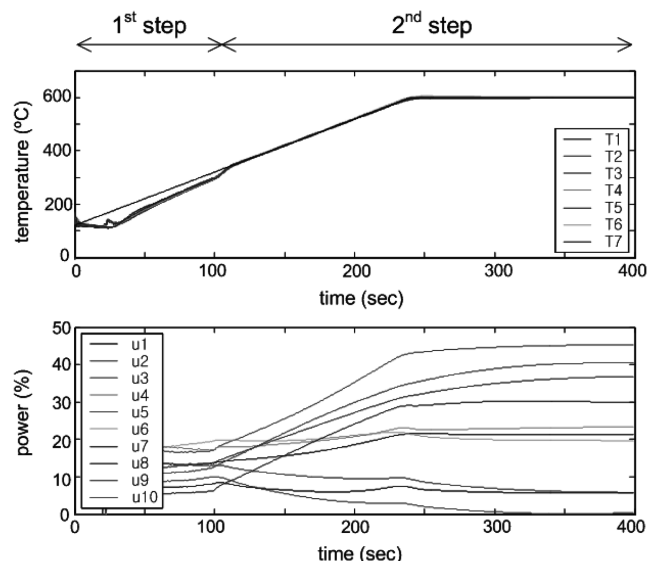


Fig. 8. Closed-loop responses under LQG control with 600 °C model.

- Modeling, "Identification, and Control of Rapid Thermal Processing Systems," *J. Electrochem. Soc.*, **141**, 3200(1994).
6. Balakrishnan, K. S. and Edgar, T. F., "Model-based Control in Rapid Thermal Processing," *Thin Solid Films*, **365**, 322-333 (2000).
7. Cho, W., Edgar, T. F. and Lee, J., "Nonlinear Model Identification for Temperature Control in a Single Wafer Rapid Thermal Processing," submitted to *I&ECR*(2007).
8. Cho, M., Lee, Y., Joo, S. and Lee, K. S., "Semi-empirical Model-based Multivariable Iterative Learning Control of an RTP System," *IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing*, **18**, 430(2005).
9. Lee, K. S., Lee, J., Chin, I., Choi, J. and Lee, J. H., "Control of Wafer Temperature Uniformity in Rapid Thermal Processing Using an Optimal Iterative Learning Control Technique," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **40**, 1661(2001).
10. Zhu, K., *Robust and optimal control*, Prentice-Hall, NJ(1996).
11. Won, W., Yoon, J., Lee, K. S. and Lee, B., "Identification of MIMO State Space Model Based on MISO High-order ARX Model: Design and Application," *Korean Chem. Eng. Res.*, **45**(1), 67-72 (2007).