

## Q-ILC를 이용한 고속 열처리 공정의 온도 제어

정영석 · 최진훈 · 이광순<sup>†</sup>

서강대학교 화학공학과  
(1998년 9월 28일 접수, 1998년 11월 30일 채택)

### Temperature Control in Rapid Thermal Processing Using Q-ILC

Young Suk Jung, Jinhoon Choi and Kwang Soon Lee<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, Sogang University  
(Received 28 September 1998; accepted 30 November 1998)

#### 요 약

RTP는 짧은 가공시간으로 열적 결함을 줄일 수 있는 단일 웨이퍼 가공 공정으로 현재 반도체 산업에서 많이 적용되고 있다. 그러나 웨이퍼 표면의 온도 균일도 유지가 아직도 어려운 문제로 남아 있다. 본 연구에서는 모델 오차가 있는 경우에도 점진적으로 제어 오차를 최소화시킬 수 있는 Q-ILC(Quadratic criterion-based Iterative Learning Control)를 이용한 열린 루프 제어방법을 제안하였으며, 8 inch 웨이퍼용 RTP 모델을 대상으로 그 성능을 검증하였다. Q-ILC의 설계에 필요한 시변 선형 모델은 subspace 방법을 통해 구한 각 온도별 시불변 선형 모델의 조합으로 유도하였다. 또한 계산량을 줄일 수 있는 차수 감소 Q-ILC를 설계하고 그 성능을 Q-ILC와 비교하였다.

**Abstract**—Although RTP(rapid thermal processing) has gained popularity recently in the semi-conductor industry due to its low thermal budget by the short processing time, attaining temperature uniformity across the wafer surface still remains a difficult problem. In this study, as an open-loop control technique for RTP temperature distribution, we propose to use Q-ILC(quadratic criterion-based iterative learning control), which can asymptotically attain the minimum achievable control error even under a significant model error, and investigate the performance with an 8-inch silicon wafer RTP model. The time-varying linear model required in the design of Q-ILC was derived by combining the time-invariant linear models identified using the subspace method at each temperature zone. In addition, in order to reduce the heavy computational burden, a reduced-order Q-ILC algorithm was designed and its performance was compared with that of full-order algorithm.

**Key words:** Rapid Thermal Processing, Iterative Learning Control, Q-ILC, Batch Process Control

#### 1. 서 론

반도체 생산의 일부 핵심 공정(annealing, oxidation, chemical vapor deposition, nitridation, epitaxial growth 등)들은 웨이퍼의 대규격화로 인해 기존의 다중 웨이퍼 가공 공정인 furnace 공정(Fig. 1)을 쓸 경우 구조적 문제로 열적 결함이 발생하게 되어 이에 따라 새로운 가공 기술을 요구하게 되었다. 반도체 가공 온도인 약 1,000 °C까지의 급속 가열과 함께 웨이퍼 표면온도의 불균일을 없애는 일은 웨이퍼 표면의 열적 결함을 없애는 필수적인 요구 조건이며, 이와 같은 요구에 부응하기 위하여 80년대 중반부터 단일 웨이퍼 가공 기술인 RTP(Rapid Thermal Processing)가 빠르게 발전되어 왔다[1].

RTP의 주요 특징은 빠른 온도상승과 하강(40-60 °C/sec)으로 furnace 공정보다 가공시간을 단축시킴에 의해 웨이퍼의 열적 결함을 감소시킬 수 있고, 단일 웨이퍼 처리공정으로 크기가 작아 가스성분 분포의 균일성 유지 및 가스투입/제거를 쉽고 일관성있게 할 수 있다는 것이다. 이러한 이유에 주로 기인하여 상당 부분 furnace를 이

용하던 반도체 공정이 RTP로 교체되고 있는 것이 최근의 추세이다.

그러나 여전히 RTP에 대한 많은 연구가 수행되고 있는 것은 여러 램프군으로부터 가열되는 웨이퍼의 표면온도를 균일하게 유지하는 것이 어렵고, 특히 웨이퍼의 가장자리가 중심부와는 다른 가열/냉각 속도를 가지기 때문에 웨이퍼 표면에 열적충이 발생하는 문제 등이 남아 있기 때문이다. 이러한 문제점은 웨이퍼 표면에 불균일 반응을 야기시키므로 반도체 생산수율을 낮추는 결과를 낳게 되어, RTP의 최적설계와 정밀 제어로 웨이퍼 표면온도가 설정된 기준체적을 잘 추적해 나가도록 하는 것이 중요한 과제가 되고 있다[2, 3].

위와 같은 문제를 해결하기 위해 RTP의 설계 및 온도분포 해석에 관한 연구 뿐 아니라 온도제어에 대해서도 많은 연구가 진행되어 왔다. 우선 전통적 제어방법인 PID제어는 RTP 공정에 성공적으로 적용되지 못하였다. 이를 개선하기 위하여 연속공정의 대표적인 고급 제어 기법인 QDMC[4]나 LQG제어[5] 등이 RTP 공정의 온도제어에 적용되어 좋은 결과를 보인 바 있다. 그러나 RTP가 회분식 공정이라는 특징을 이용하지는 못하였으며, 정확한 모델을 요구할 뿐 아니라 RTP가 많은 수의 입출력 변수를 갖는 다변수 공정이며 매우 짧은 샘플링 시간을 요구하기 때문에 피제어변수의 수를 늘리는 경우

<sup>†</sup>E-mail: kslee@ccs.sogang.ac.kr

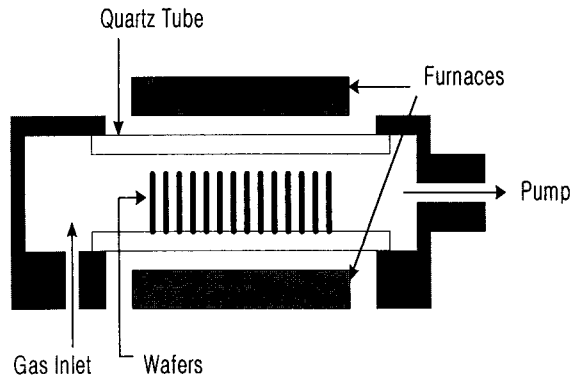


Fig. 1. A conventional furnace for semi-conductor wafer processing.

실제 적용에 무리가 따를 것으로 생각된다.

위에서 언급한 문제에 근거하여 본 연구에서는 RTP의 온도분포제어를 위해 이차 성능지수에 의한 반복학습제어(Q-ILC)[6, 7]기법을 응용하고자 하였다. Q-ILC는 RTP가 같은 형태의 운전을 매 웨이퍼에 대해 반복적으로 적용하는 회분공정이라는 성격을 이용하는 오프라인 제어기법으로, 다중 입출력 변수를 지닌 회분공정에 적용이 가능하며, 회분 수의 증가에 따라 모델오차에도 불구하고 제어오차를 가능한 최소값까지 감소시킬 수 있는 최적화 기능을 가진 학습제어방법의 하나이다. 최근 pyrometer를 이용하여 비접촉 방식으로 웨이퍼 온도분포를 측정하는 기술이 보급되고 있지만, 여전히 많은 RTP들이 온도센서를 장착한 보정용 웨이퍼를 이용하여 오프라인 제어입력 패턴을 결정된 후 실시간 온도제어를 수행하지 않고 운전되고 있다. 본 연구에서는 Q-ILC를 이러한 상황에서 최적제어입력 패턴을 결정할 수 있는 효율적인 방법으로 제안하고자 하는 것이다. Pyrometer를 이용하여 실시간 제어를 수행하는 경우에도, 최적 오프라인 제어입력 패턴이 앞먹임 방식으로 함께 사용되면 되먹임 제어기는 외란의 영향을 상쇄시키기 위한 약간의 보정동작만을 수행하면 되므로 제어성능을 크게 향상시킬 수 있다.

본 연구에서는 표준 Q-ILC의 응용과 함께, 계산량의 감소를 위하여 차수감소 Q-ILC를 설계하고 이를 RTP 수치모델에 적용하여 그 성능을 검토하였다.

## 2. RTP 공정의 모델화

### 2-1. 대상 RTP 공정

본 연구에서는 Stanford 대학의 Norman 등[8]이 연구해 온 것과 같은 형태의 RTP를 대상으로 하였다. 본 연구에서 가정한 RTP는 8 inch 웨이퍼를 가공하는 공정으로 Fig. 2에 기하학적 구조와 치수를 보였다.

웨이퍼를 가열하는 열원은 웨이퍼 상단에 동심원 형태로 배열된 할로겐 램프들이며 각 램프군의 최대전력은 각각 다르게 구성되어 있다. 웨이퍼는 반응기내 중심 부위에 석영유리 받침대 위에 놓이며 웨이퍼 표면의 온도측정은 웨이퍼 아랫면 중심부에서 반경방향으로 설치된 열전대로 측정하고 있다. 웨이퍼 가공온도는 600, 800, 1,000 °C의 세 경우를 가정하였다. 이것은 하나의 RTP 장비로 여러 다른 웨이퍼 가공을 할 수 있기 때문이다. 온도 기준계측은 400 °C에서 출발하여 직선적으로 급속가열(가공온도에 따라 20-60 °C/sec), 20 sec 동안 가공온도 유지 후 다시 급속 냉각되는 것으로 설정하였다.

### 2-2. RTP 공정의 모델링

본 논문에서는 열원으로부터 웨이퍼로의 열전달만을 고려하고 반

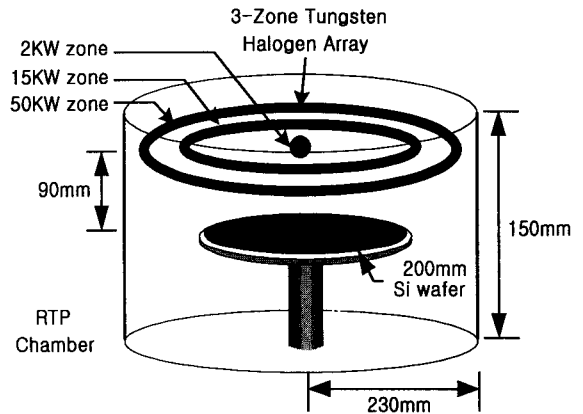


Fig. 2. Schematic diagram of the concerned RTP system.

응기내의 아로곤 가스나 질소가스의 유입은 고려하지 않았으며 모델링도 열수지식만을 고려하였다.

#### 2-2-1. 기본 열수지식

웨이퍼는 반경  $R$ 과 두께  $Z$ 인 완전한 원통의 구조를 갖는다고 가정하였다. 웨이퍼는  $Z \ll R$ 이므로 축방향으로의 온도분포를 상대적으로 무시하고, 회전각도에 따른 분포를 무시하면 에너지 수지식은 다음과 같은 편미분 방정식으로 표현된다.

$$\rho \frac{\partial (C_p T)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{q_{bottom}(r) + q_{top}(r)}{Z} \quad (1)$$

$$BC1: \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \text{ at } r = 0$$

$$BC2: k \frac{\partial T}{\partial r} = q_{edge}, \text{ at } r = R$$

여기서  $k$ ,  $\rho$ ,  $C_p$ 는 각각 실리콘의 열전도도, 밀도, 비열을 나타낸다.  $k$ 와  $C_p$ 는 온도의 함수이며  $\rho$ 는 상수라 가정하였다.  $q_{edge}$ ,  $q_{bottom}$ 과  $q_{top}$ 은 웨이퍼의 모서리, 하단면과 상단면의 단위면적에 작용하는 열유입/열출량이며, 이들은 열원으로부터의 복사열에 의한 열전달에 주로 지배를 받으나 대류도 일부 영향을 미친다[1]. 복사열은 RTP의 기하학적 구조에 의해 따라 달라지며 본 연구에는 Norman[8]이 유도한 4 inch 웨이퍼용 RTP 공정모델을 8 inch 웨이퍼 상황에 맞게 변환하여 사용하였다.

#### 2-2-2. 열수지식의 차분화

수치공정모델을 구성하기 위하여 Fig. 3과 같이 웨이퍼, 램프가 설치되는 반응기 상단면, 그리고 반응기 하단면을 같은 면적을 갖는 동심원 요소 40개, 10개 및 8개로 나누어 차분하였다. 전도가 지배하는 경우는  $r$ 이 증가하며  $\Delta r$ 이 더 커지도록 차분하는 것이 수치적으로

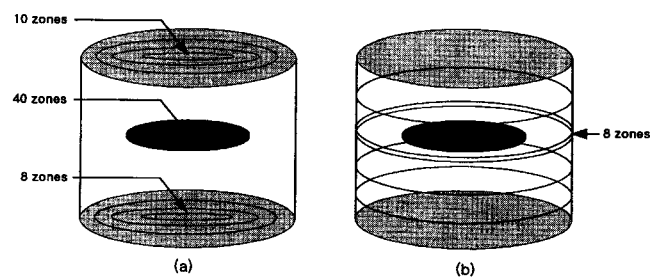


Fig. 3. Division of wafer and chamber surfaces into zones for radiative heat transfer computations.

(a) Division of wafer, chamber ceiling and floor, (b) Division of chamber wall.

안정한 방법이지만, RTP에서는 램프에 의한 복사가 지배하기 때문에 등면적으로 요소를 나누었다. 한편 벽면은 축방향으로 8개의 등간격으로 영역을 나누었다. 램프는 반응기 상단면의 3, 7, 8번째 환에 설치되며 최대 2 KW, 15 KW 그리고 50 KW의 에너지를 방사한다고 가정하였다.

이제 열전달항을 복사에 의한 방사열(emission) 및 흡수열(absorption), 전도열(conduction), 대류열(convection)로 세분하고, 웨이퍼  $i$  번째 중심환의 질량을  $m_i$ 라 할 때 각 요소에서의 열수지식은 다음과 같이 표현된다.

$$m_i \frac{d(C_p T_i)}{dt} = q_i^{\text{emission}} + q_i^{\text{absorption}} + q_i^{\text{conduction}} + q_i^{\text{convection}} \quad (2)$$

$i$  번째 요소의 표면적을  $A_{z,i}$ 라 하고, 반경방향의 열전도 면적을  $A_{r,i}$ 라 하면, 각각의 열전달 항목은 다음과 같이 표현된다.

$$q_i^{\text{emission}} = -\epsilon_i \sigma A_{z,i} T_i^4 \quad (3)$$

$$q_i^{\text{absorption}} = \sum_{j=1}^3 L_{i,j} P_j + \sum_{j=1}^{40} W_{i,j} q_j^{\text{emission}} + q_i^{\text{wall}} \quad (4)$$

$$q_i^{\text{conduction}} = -k A_{r,i} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (5)$$

$$q_i^{\text{convection}} = -h_i A_{z,i} (T_i - T_{\text{gas}}) \quad (6)$$

웨이퍼를 회색체(gray body)로 가정하면 식 (3)에서 방사율  $\epsilon$ 는 상수가 된다.  $P_j$ 는  $j$  번째 램프 영역에서 발생하는 열에너지이며,  $L_{i,j}$ 는 영역  $j$ 에서 방사된 열에너지에 대한  $i$  번째 웨이퍼 요소에서 흡수되는 에너지의 비,  $W_{i,j}$ 는  $j$  번째 웨이퍼 요소에서 방사된 에너지 중 반사에 의해  $i$  번째 웨이퍼 요소에 흡수되는 에너지의 분율을 나타낸다.  $q_i^{\text{wall}}$ 은 반응기의 벽면에서 방사되는 에너지에 의해 웨이퍼  $i$  번째 요소가 흡수한 에너지를 나타낸다. 이들 각 파라미터의 구체적인 풀은 반응기와 웨이퍼의 기하학적 구조의 함수로 나타난다[8].

가정한 램프의 배열 및 최대 발열량이 균등한 온도분포를 얻기에 적합한 것인지를 확인하기 위하여 식 (4)의  $L_{i,j}$ 를 계산하였다. 실제 공정에서는  $L_{i,j}$ 의 계산에 반응기 및 웨이퍼 표면의 여러 작은 굴곡과 반사율 분포, 거칠음 등 표면상태가 모두 고려되어야 하므로 계산이 상당히 복잡하고 어려워지나, 본 연구에서는 이러한 것들을 무시하고 표면이 평평하며 매끄럽고 반응기 표면에서의 방사율도 일정하다고 가정하였다.

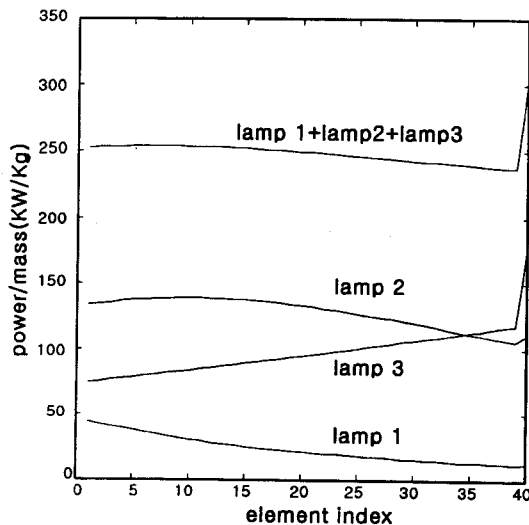


Fig. 4. Illumination patterns.

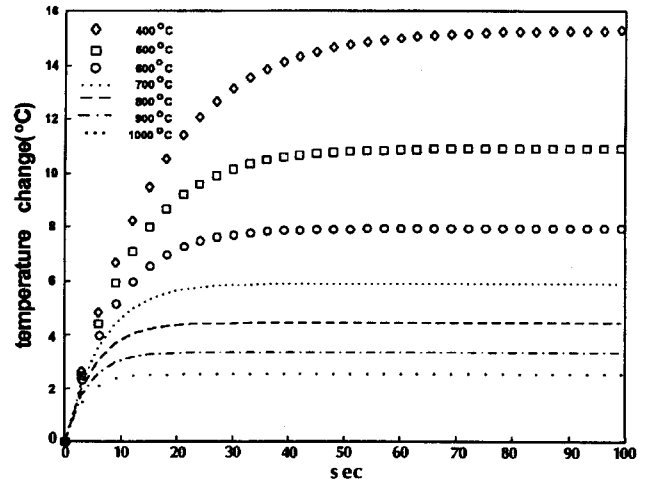


Fig. 5. Step responses of the third temperature measurement to a power increase in the third lamp zone at various steady states.

Fig. 4는 대상으로 한 원통형 반응기 모델에서 도달률(view factor)의 계산에 의해  $L_{i,j}$ 를 구한 후, 램프 에너지가 최대값을 가질 때 웨이퍼 반경방향 단위질량당 흡수되는 램프 에너지량을 계산한 것으로 총 에너지 흡수량이 반경좌표에 따라 크게 변하지 않는 것을 볼 수 있다. 이것은 제어에 의해  $P_j$ 를 조절할 경우, 평탄한 온도분포를 얻을 가능성이 있음을 시사하는 것이라 할 수 있다.

대상 RTP 공정은 식 (5)의 미분을 중심 차분으로 근사한 후 각 요소의 상미분 방정식을 연립하고  $\Delta t=0.01$  sec을 기본적분시간으로 하여 Gear방법을 이용하여 적분하였다.

웨이퍼의 표면온도는 각각 1, 8, 16, 24, 32, 40번째의 6영역에서 측정되는 것을 가정하였다.

### 2-3. RTP의 비선형 동특성과 간섭현상

Fig. 5는 RTP를 일정한 온도에 유지시킨 후 3번째 램프군에 같은 크기의 계단 입력을 하였을 때 웨이퍼 중심에서 3번째 온도측정치의 응답을 여러 정상상태 온도에 대해 보인 것이다. 웨이퍼의 온도가 올라갈수록 응답이 빨라지며 정상상태 이득이 작아지는 비선형성을 볼 수 있다. 한편 Fig. 6은 이때 나타나는 여섯 온도측정점의 온도응답을 400 °C와 900 °C의 두 정상상태 주변에서 보인 것이다. 복사열이 강해지며 램프군 주변 뿐 아니라 웨이퍼 전영역에 강한 열전달이 이루어져 심한 간섭이 있는 공정임을 알 수 있다.

제어를 위한 샘플링 주기는 위의 계단 응답으로부터 가장 빠른 응답이 나타나는 1,000 °C에서의 상승 시간(rising time)이 5 sec 부근임을 고려하여 0.1 sec로 정하였다.

## 3. Q-ILC 설계를 위한 모델 인식

본 연구에서 채택한 Q-ILC는 임펄스 응답계수로 표현되는 시변 선형모델을 필요로 한다. RTP는 앞에서 살펴 본 것과 같이 강한 비선형성을 보이거나 주어진 기준 온도 궤적을 따르며 운전되기 때문에 시변 선형모델로의 근사가 가능하다.

### 3-1. 각 온도별 상태 공간 모델 구성

시변 선형모델을 구성하기 위해서 본 연구에서는 RTP의 운전 온도범위 350-1,050 °C를 먼저 100 °C 단위의 7개의 등간격으로 나누고, 각 온도영역을 대표하는 7개의 시불변 선형 상태공간모델을 400, 500, ..., 1,000 °C 주변에서 구한 후 이 모델들을 연결하여 요구되는

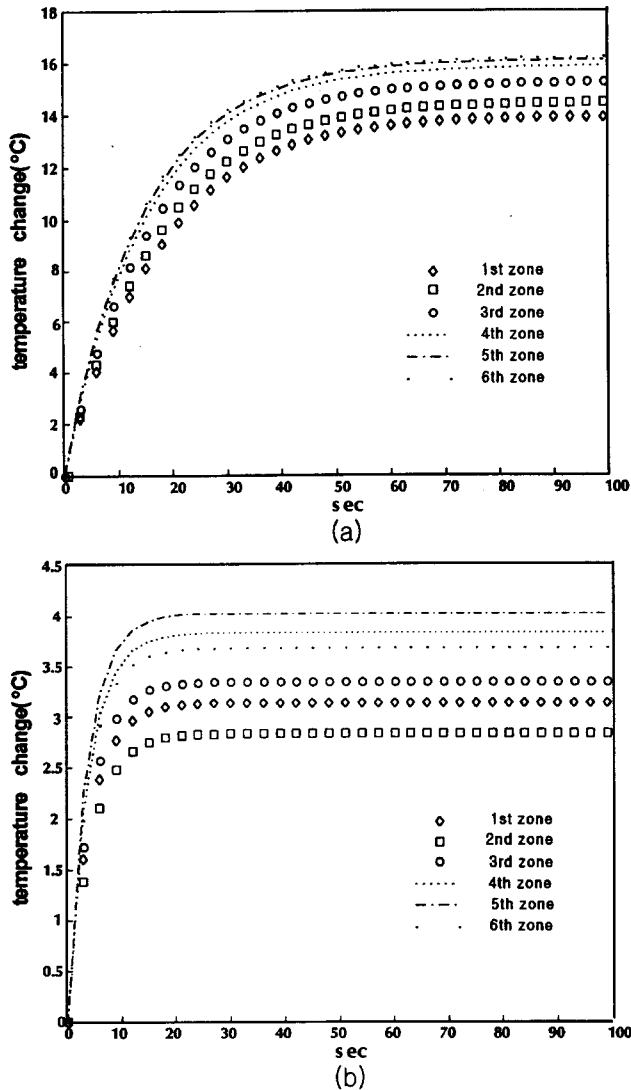


Fig. 6. Step responses of six temperature measurements to a power increase in the third lamp zone.

(a) Initial steady state at 400 °C, (b) Initial steady state at 900 °C.

시변 선형모델을 구성하였다. 이러한 방법을 택한 것은 같은 RTP 장비에서 웨이퍼 종류에 따라 가공온도가 달라질 수 있으며, 이러한 다양한 상황에 효과적으로 적응할 수 있도록 하기 위함이다.

각 온도에서의 모델인식실험을 위해 먼저 웨이퍼 중심으로부터 1번 램프-1번 측정온도, 2번 램프-3번 측정온도, 3번 램프-5번 측정온도에 각각 P, PI, P 제어계를 구성한 후 RTP가 각 정상상태 온도에 도달되도록 하였다. 여기서 두 개의 제어계에 적분제어기능을 사용하지 않은 것은 웨이퍼 온도와 램프 사이의 간섭으로 적분제어를 이용하여 3개의 피제어 온도를 동시에 원하는 설정치에 유지시키는 것이 어려웠기 때문이다. 이렇게 하여 도달한 초기 정상상태 400 °C 주변에서 각 제어 입력에 독립적인 PRBS(Pseudo Random Binary Sequence)신호를 더하여 2,000 샘플링 시점에서 입출력 데이터를 얻었으며 같은 조작을 설정치 500, ..., 1,000 °C에 대해서 반복수행하였다.

각 온도 주변에서 얻어진 입출력 데이터는 편차값으로 변환시키고 -1~1사이의 값으로 표준화한 후 MATLAB5.2의 ident.m에 프로그램되어 있는 subspace 방법[9]을 이용하여 식 (7)과 같은 상태공간

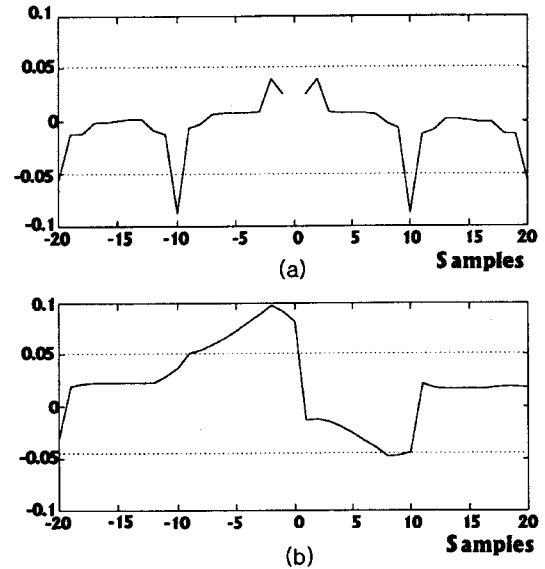


Fig. 7. Residual tests of the identified model at 400 °C.

(a) Autocorrelation of the residual of  $\bar{T}_1^m$ , (b) Cross-correlation between  $\bar{P}_1$  and the residual of  $\bar{T}_1^m$ .

모델을 얻었다. PRBS신호는 최소 변화시간을 2sec로 하여 지나치게 높은 주파수 자극이 공정에 가해지지 않도록 하였다.

$$x(t+1)=Ax(t)+Bu(t) \quad (7)$$

$$y(t)=Cx(t)$$

여기서

$$u(t)=\begin{bmatrix} \bar{P}_1 \\ \bar{P}_2 \\ \bar{P}_3 \end{bmatrix}, \quad y(t)=\begin{bmatrix} \bar{T}_1^m \\ \vdots \\ \bar{T}_6^m \end{bmatrix} \quad (8)$$

이며  $\bar{\cdot}$ 는 표준화된 편차 변수를 의미한다.

Subspace 방법에서 제시된 상태의 차수는 모든 온도영역에서 모두 3으로 나타나 측정온도에 강한 종속성이 있음을 보였다.

Fig. 7은 400 °C에서 얻어진 1번 램프( $\bar{P}_1$ )와 1번 피제어온도( $\bar{T}_1^m$ ) 사이의 모델에 대한 신뢰성 테스트 결과이다. 점선은 99.5% 신뢰도 경계를 나타낸다. 입력과 출력잔차(residual) 사이의 cross-correlation 이 신뢰도 영역을 다소 벗어난 것 외에는 거의 대부분 영역에서 99.5% 신뢰도를 충족시키고 있음을 볼 수 있다.

### 3-2. 시변 선형모델의 구성

Subspace 방법에서 balanced 상태공간모델을 제공하므로 각 온도영역별 상태들은 서로 다른 기저(basis)에 대해 정의된다. 따라서 온도영역이 전이되는 시점에서는 식 (7)의 관계로 상태가 전이되지 못할 가능성이 있다. 그러나  $x(t)=T(t)\bar{x}(t)$ 의 유사변환을 적용하여 새롭게 정의된 상태  $\bar{x}$ 로 식 (7)을 모든 영역에 대해 다음과 같이 재구성하고

$$\begin{aligned} \bar{x}(t+1) &= \underbrace{T^{-1}(t+1)A(t)T(t)}_{\bar{A}(t)}\bar{x}(t) + \underbrace{T^{-1}(t+1)B(t)}_{\bar{B}(t)}u(t), \quad t=0, \dots, N-1 \\ y(t) &= \underbrace{C(t)T(t)}_{\bar{C}(t)}\bar{x}(t) \end{aligned} \quad (9)$$

시점  $i$ 에서 가해진 단위 임펄스입력에 대한  $j$ 시점에서의 응답계수

행렬  $g_{ij}$ 를 구하면

$$\begin{aligned} g_{ij} &= \bar{C}(j) \bar{A}(j-1) \bar{A}(j-2) \cdots \bar{A}(i) \bar{B}(i) \\ &= \bar{C}(j) \bar{A}(j-1) \bar{A}(j-2) \cdots \bar{A}(i) \bar{B}(i) \end{aligned} \quad (10)$$

의 관계를 구할 수 있다. 즉, 새로운 기저로 정의된 상태공간 모델로 구성된 응답계수 행렬과 각 온도별로 구한 시불변 선형 상태공간 모델로 구성된 응답 계수 행렬이 서로 같음을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 새로운 기저를 찾지 않고 온도별 시불변 선형 상태공간 모델  $A(i)$ ,  $B(i)$ ,  $C(i)$ 의 조합만으로 식 (10)과 같이 시변 임펄스 응답 모델을 구하였다.

#### 4. Q-ILC(이차 성능지수에 의한 학습제어)

Q-ILC는 학습제어[6]의 한 방법으로 기존의 학습제어방법들이 가지고 있던 여러 단점들, 예를 들면, 지나친 입력변화, 잡음에 대한 민감성 등의 문제를 해결하며 동시에 입출력 변수의 차수가 다른 일반적인 다변수 회분공정의 적용을 위해 개발된 방법이다[6, 7]. Q-ILC는 순수한 학습제어방법으로 실시간 제어기능은 없으며 이전 회분의 운전결과를 이용하여 제어오차를 줄일 수 있는 현재 회분의 제어입력을 계산한다.

##### 4-1. Direct Error Feedback Q-ILC(DEF Q-ILC)

회분공정의 전 운전구간(혹은 특정 운전구간)에서 정의된 입력  $u(t) \in \mathbb{R}^{n_u}$  및 출력변수  $y(t) \in \mathbb{R}^{n_y}$ 를 다음과 같이 정의하고

$$\begin{aligned} u &= [u^T(0) u^T(1) \cdots u^T(N-1)]^T \\ y &= [y^T(1) y^T(2) \cdots y^T(N)]^T \end{aligned} \quad (11)$$

회분공정이 기준계적 주변에서 운전되는 경우, 입출력 관계는 다음과 같은 선형 대수식으로 근사할 수 있다.

$$\bar{y} = Gu + v \quad (12)$$

여기서  $v$ 는 외란을 의미하며,  $G$ 는 인과성(causality)에 의해

$$G = \begin{bmatrix} g_{1,0} & 0 & \cdots & 0 \\ g_{2,0} & g_{2,1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N,0} & g_{N,1} & \cdots & g_{N,N-1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

와 같은 아래 삼각형의 구조를 가진다.  $g_{ij} \in \mathbb{R}^{n_y \times n_u}$ 는  $i$  시점에서 가해진 단위 임펄스 입력에 대한  $j$ 시점에서의 응답을 나타내는 임펄스 응답계수행렬이다.

$y_d$ 를 식 (11)과 같은 방법으로 정의된 설정치 벡터, 하첨자  $k$ 는 회분수라 하고

$$\begin{aligned} c_k &= y_d - y_k \\ \Delta u_{k+1} &= u_{k+1} - u_k \end{aligned} \quad (14)$$

로 정의할 때, DEF Q-ILC는

$$\min_{\Delta u_{k+1}} \left[ J_k = \frac{1}{2} \{ e_{k+1}^T Q e_{k+1} + \Delta u_{k+1}^T R \Delta u_{k+1} \} \right] \quad (15)$$

을 만족하는 제어입력을 회분단위로 찾는 제어법칙이다. 제약조건이 없는 경우 제어식은 다음과 같다.

$$u_{k+1} = u_k + (G^T Q G + R)^{-1} G^T Q e_k \quad (16)$$

선형으로 제약조건이 주어지는 경우, 식 (16)은 QP(quadratic programming)문제가 된다.

$v_k$ 가 회분 수와 관계없이 일정한 경우, Q-ILC는(일정한 범위내에서) 모델오차가 있는 경우에도  $k$ 가 증가함에 따라  $J_k$ 를 도달 가능한 최소값에 이르게 한다. 특히  $n_u \geq n_y$ 이며  $G$ 의 모든 행(row)이 선형독립인 경우는  $J_k \rightarrow 0$ 이 되어 접근적 완전제어를 가능하게 한다.

##### 4-2. 차수 감소 DEF Q-ILC

대상으로 한 RTP는  $n_y=6$ ,  $n_u=3$ 이며  $N=401$ 로 행렬  $G$ 가  $2406 \times 1203$ 의 대단히 큰 차원을 갖는다. Q-ILC가 비록 오프라인 제어방법이지만 이때의 계산량은 상당한 부담이 되며 특히 제약조건이 있는 경우는 더욱 문제가 된다. 차수감소 Q-ILC는 이러한 계산량을 감소시키기 위한 방법으로 본 연구를 통하여 제안된 것이다.

우선 제어성능이 크게 손상되지 않는 범위내에서 회분마다 결정해야 할 입력변수의 수를 줄이기 위해 식 (17)과 같이  $WQ^{1/2}G$ 의 다음 식과 같은 특이치 분해에 의해 공정모델내의 중요한 모드와 그렇지 않은 모드를 출력변수에 대한 영향력의 관점에서 구별하였다[10].

$$WQ^{1/2}G = U \Sigma V^T = [U_1 U_2] \begin{bmatrix} \Sigma_1 & 0 \\ 0 & \Sigma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서  $Q^{1/2}$ 는  $y$ 의 factor로 간주할 수 있으며[식 (16) 참조],  $W$ 는 RTP의 비선형성을 보정하기 위한 가중치를 나타낸다. Fig. 6에 보인 것과 같이 낮은 온도에서 구한 모델의 정상상태 이득과 시상수가 높은 온도에서 구한 모델의 그것보다 모두 크기 때문에, 가중치를 가하지 않고 특이치 분해를 한다면 어떤 모드가 이 공정의 중요 모드인지를 구별할 수 없게 된다. 이와 같은 문제점을 극복하기 위해 본 연구에서는 각 온도에서 구한 모델의 정상상태 이득을 평균화시킨다는 관점에서  $W$ 를 구성하였다.  $W$ 는 대각 행렬로 각 대각요소는 다음과 같이 해당시점 모델의 정상상태 이득의 역수를 갖도록 하였다.

$$W = \begin{bmatrix} \frac{1}{K(1)} I & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{K(2)} I & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{1}{K(N)} I \end{bmatrix}, I \in \mathbb{R}^{n_y \times n_y} \quad (18)$$

여기서  $K(i)$ 는 시점  $i$ 에서의 기준계적온도에 해당되는 모델의 정상상태 이득이다. 시변선형공정의 정상상태이득 차이를 보상하는 정확한 접근은 알려지지 않은 듯하며, 사실 위의 방법은 직관적 접근이지만 모사결과 만족할 만한 성능을 보이는 것으로 나타났다.

식 (17)에서 공정출력에 미치는 영향에 의해 특이치를  $\Sigma_1 > \Sigma_2$ 와 같이 분해하면 이 결과로부터 공정의 입출력 관계를 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$U_1^T WQ^{1/2} y_k = \Sigma_1 V_1^T u_k \quad (19)$$

이 관계에 의해 차수가 감소된 입출력 변수를 다음과 같이 정의하자.

$$z_k = U_1^T WQ^{1/2} e_k \quad (20)$$

$$\Delta m_k = V_1^T \Delta u_k \quad (21)$$

이제  $e$ 와  $u$ 는 감소된 차수의 subspace내의 벡터로 근사되며 복원은 다음의 관계로 수행된다.

$$e_k = Q^{1/2} W^{-1} U_1 z_k \quad (22)$$

$$\Delta u_k = V_1 \Delta m_k \quad (23)$$

식 (22), (23)을 식 (15)에 대입하면 최적화 문제는 차수가 감소된  $\Delta m_{k+1}$ 를 결정하는 문제가 된다. 제약조건이 없는 경우, 해는 다음과 같이 얻어진다.

$$m_{k+1} = m_k + (\sum_1^T \Lambda_y \sum_1 + \Lambda_u)^{-1} \sum_1^T \Lambda_y z_k \quad (24)$$

식 (22), (23)을 대입하여  $u_{k+1}$ 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$u_{k+1} = u_k + V_1 (\sum_1^T \Lambda_y \sum_1 + \Lambda_u)^{-1} \sum_1^T \Lambda_y U_1^T W Q^{1/2} e_k \quad (25)$$

여기서

$$\Lambda_y = U_1^T (W^{-1})^T W^{-1} U_1$$

$$\Lambda_u = V_1^T R V_1$$

제약조건이 있는 경우 DEF Q-ILC와 마찬가지로 OP(Quadratic programming)문제가 된다.

## 5. Q-ILC를 이용한 제어 결과 및 검토

먼저 표준 Q-ILC의 성능을 확인하기 위하여 가공온도를 1,000 °C,

800 °C, 600 °C의 세 경우로 선택하고 각 경우에 대해 가열/냉각 속도를 60 °C/sec, 40 °C/sec, 20 °C/sec로 하여 수치모사를 행하였다. RTP의 요구성능은 Butler[11]에 의해 다음과 같이 제시된 바 있다.

(1) 가열, 냉각 영역에서 웨이퍼의 전체 표면온도는  $\pm 2.5$  °C 이내의 균일도를 유지하여야 한다.

(2) 정상상태 영역에서 웨이퍼의 전체 표면온도는  $\pm 0.5$  °C 이내의 균일도를 유지하여야 한다.

제어기의 **Q**와 **R**은 다음과 같이 출력값의 설정치 궤적에 대한 추적의 비중을 입력에 관한 것보다 더 크게 주기 위해  $\mathbf{Q} = \mathbf{I} \in \mathbb{R}^{n_y N \times n_y N}$ ,  $\mathbf{R} = 0.01 \mathbf{I} \in \mathbb{R}^{n_u N \times n_u N}$ 과 같이 설계되었으며 제약조건이 없는 제어알고리즘을 사용하였다.

### 5-1. DEF Q-ILC를 이용한 제어 모사

Fig. 8은 최종 목표온도를 600 °C로 설정하고 DEF Q-ILC를 5회분 반복운전하는 동안 나타난 웨이퍼 온도변화를 보인 것이다. Fig. 8(a)는 각 회분운전에서 나타난 6지점의 온도변화를 모두 보인 것이며, Fig. 8(b)는 5회분째 얻어진 시간에 따른 온도분포와 설정온도제적 사이의 차이이다. 1회분 DEF Q-ILC 운전을 위한 초기상태는 웨이퍼 온도가 400 °C를 유지하고 있는 것으로 가정하였다. DEF Q-ILC는 5회분의 반복운전으로 거의 수렴된 결과를 보였으며, 반복학습제

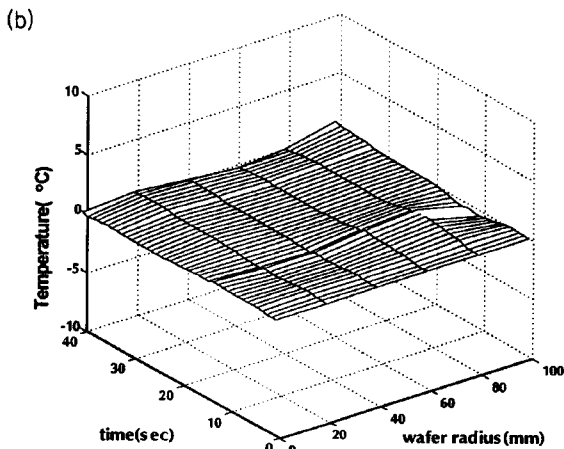
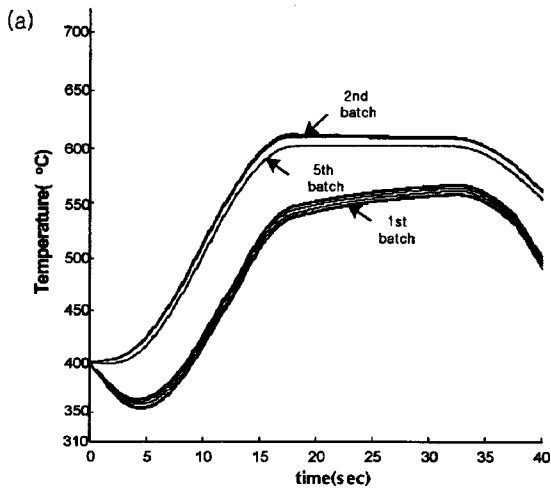


Fig. 8. Performance of DEF Q-ILC for 600 °C target temperature.

(a) Improvement during iteration(1st, 2nd and 5th batch), (b) Resulting control error after the 5th batch.

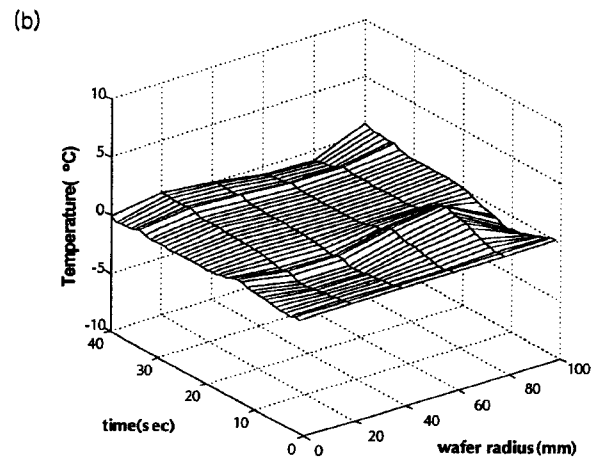
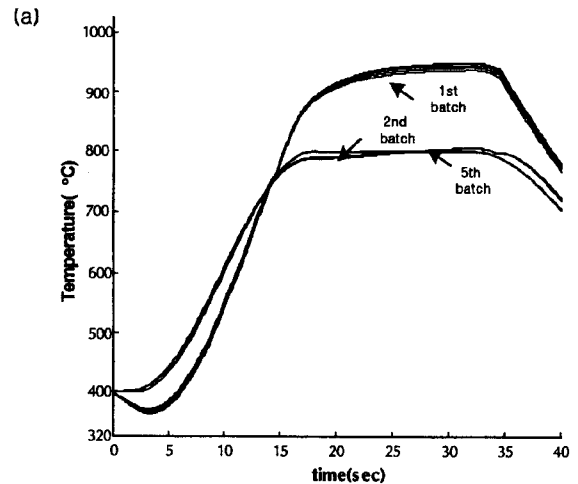


Fig. 9. Performance of DEF Q-ILC for 800 °C target temperature.

(a) Improvement during iteration(1st, 2nd and 5th batch), (b) Resulting control error after the 5th batch.

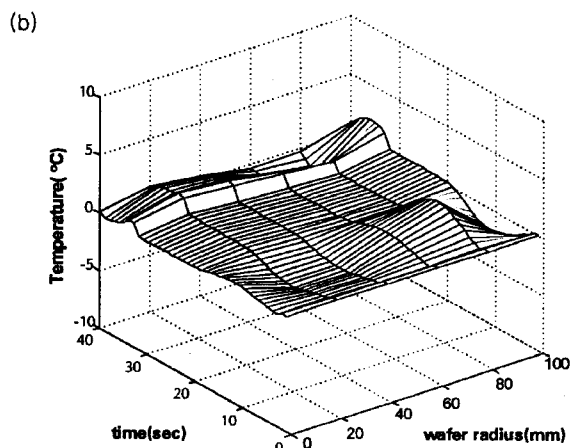
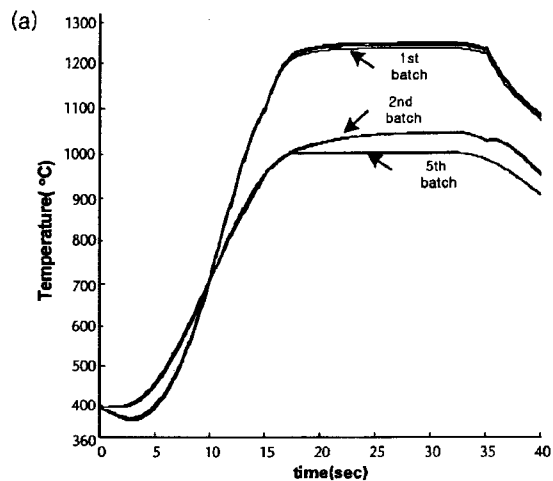


Fig. 10. Performance of DEF Q-ILC for 1,000 °C target temperature.

(a) Improvement during iteration(1st, 2nd and 5th batch), (b) Resulting control error after the 5th batch.

Table 1. Maximum temperature deviation after five consecutive DEF Q-ILC runs

Target temperature	Worst error during ramping	Worst steady state error
1,000 °C	1.9194 °C	0.3471 °C
800 °C	1.4683 °C	0.2091 °C
600 °C	0.7027 °C	0.2964 °C

어의 특성상 이때 얻어진 온도편차는 사실상 대상으로 한 RTP 공정에서 얻을 수 있는 최선의 결과라 할 수 있다. Fig. 9와 10은 최종 목표온도를 800 °C와 1,000 °C로 설정하였을 때의 결과이며 600 °C의 경우와 유사한 결과를 보임을 볼 수 있다.

Table 1은 각 목표온도에 대해 5회분 운전 후 나타난 최대제어편차를 온도상승구간에서와 정상상태 도달 후에 대해 요약한 것이다. 모든 온도영역에서 Butler가 제시한 기준을 잘 만족하고 있음을 볼 수 있다.

## 5-2. 차수감소 Q-ILC의 적용

식 (17)과 같이 비선형 보정항이 고려된 2,406×1,203 공정에 대한 특이치 분해를 한 결과 특이치의 분포가 Fig. 11과 같이 얻어졌다. 이 결과로부터 지배적 모드를 500개로 취하고 해당되는 입출력

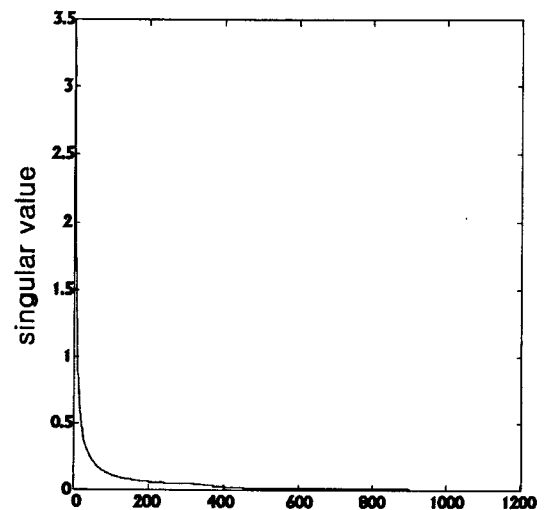


Fig. 11. Distribution of singular values.

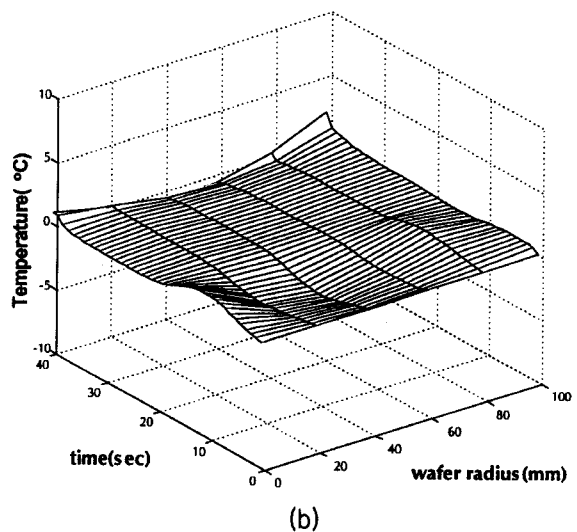
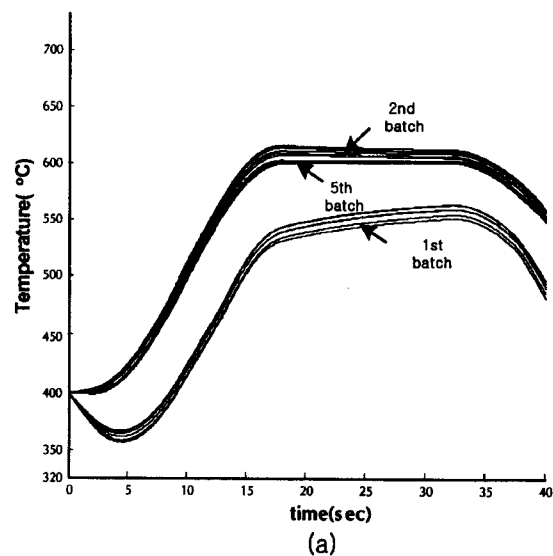


Fig. 12. Performance of Reduced-Order Q-ILC for 600 °C target temperature.

(a) Improvement during iteration(1st, 2nd and 5th batch), (b) Resulting control error after the 5th batch.

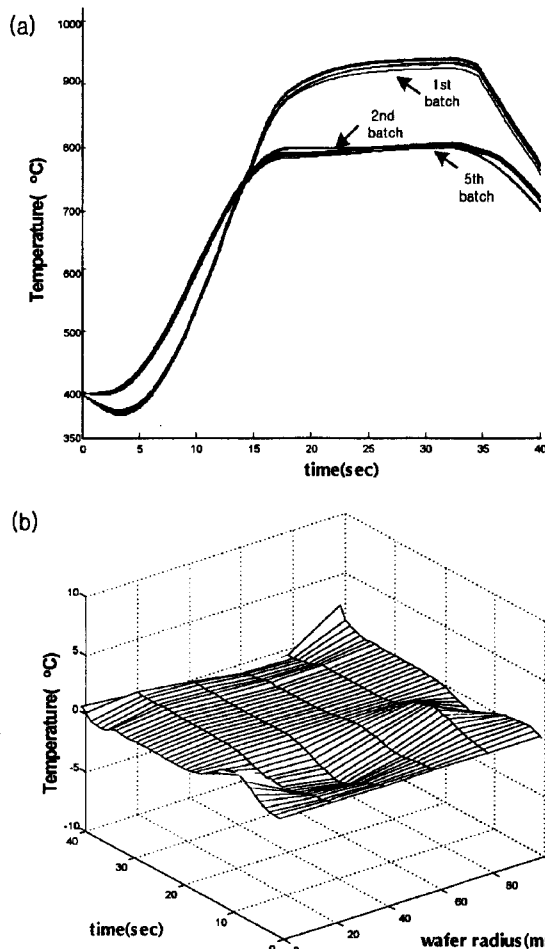


Fig. 13. Performance of Reduced-Order Q-ILC for 800 °C target temperature.

(a) Improvement during iteration(1st, 2nd and 5th batch), (b) Resulting control error after the 5th batch.

특이벡터  $V_i$ ,  $U_i$ 를 이용하여 차수감소 Q-ILC를 구성하였다.

Fig. 12-14는 DEF Q-ILC와 마찬가지로 정상상태 600, 800, 1,000 °C에서 모사실험을 수행한 결과이며 Table 2는 5회분 운전 후의 최대 온도편차이다. 제어성능이 DEF Q-ILC와 거의 유사하며 온도편차도 Butler[11]의 조건을 충분히 만족하는 좋은 결과를 보이고 있다.

모사에 필요한 모든 프로그램은 MATLAB5.2로 구성하였으며 이때 차수감소 Q-ILC의 계산시간이 표준 Q-ILC의 경우의 약 1/4정도인 것으로 나타났다.

### 5-3. 입력 제어성능 비교

Fig. 15는 가공온도 1,000 °C에서 5번째 회분운전시 나타난 입력변화를 비교한 것이다. DEF Q-ILC와 차수감소 Q-ILC 모두 입력 변수가 움직일 수 있는 최대 한계인 0-100%를 벗어 나지 않음을 볼 수 있으며, 시변 선형 임펄스응답 모델을 구성할 때 온도구간이 바뀌며 새로운 시불변 상태공간 모델이 조합되는 시점에서 입력이 심하게 흔들리는 것을 볼 수 있다. 차수 감소 Q-ILC는 입력변수(특히 1번 램프온)의 변화가 일정하게 유지되지 않고 약간씩 흔들리는 모습을 볼 수 있으며 이는 특이치 분해를 통해 잘려진 입력모드를 보상하기 위한 동작이라 할 수 있다. 그러나 움직임의 폭이 작으며 전체적인 제어입력은 DEF Q-ILC와 거의 유사하여 실용적으로 구현하는데에는 아무 문제가 없을 것으로 사료된다.

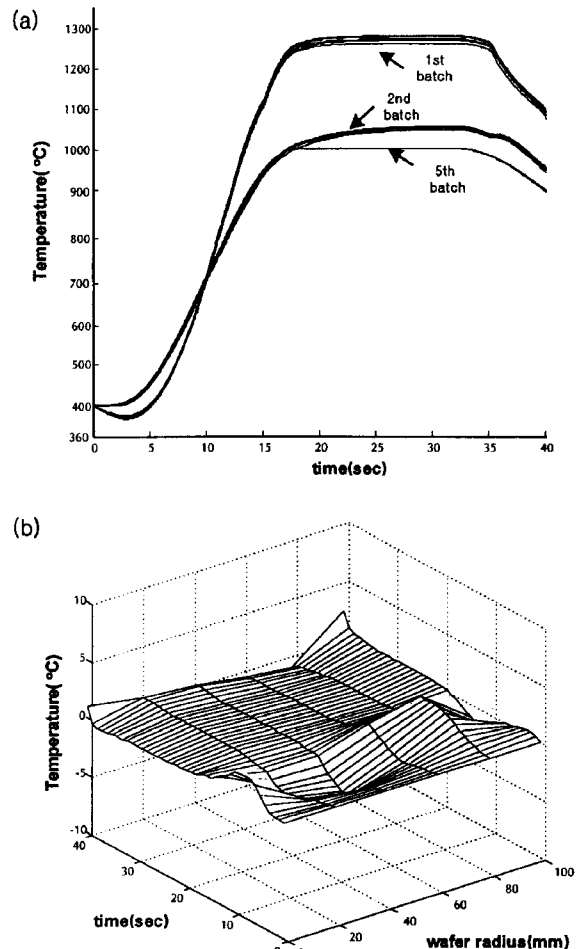


Fig. 14. Performance of Reduced-Order Q-ILC for 1,000 °C target temperature.

(a) Improvement during iteration(1st, 2nd and 5th batch), (b) Resulting control error after the 5th batch.

Table 2. Maximum temperature deviation after five consecutive Reduced-Order Q-ILC runs

Target temperature	Worst error during ramping	Worst steady state error
1,000 °C	2.5051 °C	0.3690 °C
800 °C	1.9660 °C	0.2749 °C
600 °C	0.8742 °C	0.2268 °C

## 6. 결 론

본 연구를 통하여 RTP 공정내 셀리콘 웨이퍼 표면온도의 균일성 유지와 기준제어에 관한 추적성 문제를 해결하기 위해 Q-ILC(이차 성능 지수에 의한 학습 제어) 기법의 사용을 제시하였으며, 수치 모사 실험을 통하여 만족할 만한 제어성능을 얻었다. 또한 Q-ILC가 요구하는 과도한 계산량의 감축을 위하여 차수감소 Q-ILC 방법을 제시하였으며 수치모사를 통해 표준 Q-ILC와 비교하여 거의 같은 제어성능을 1/4 정도의 계산시간에 얻을 수 있음을 보였다.

DEF Q-ILC와 차수감소 Q-ILC의 성공적인 적용은 이들 기법이 RTP 공정내 웨이퍼 표면온도제어에 매우 유용함을 입증한 것이며 다른 반도체 공정에 대한 제어방법으로의 가능성도 제시한 것이라



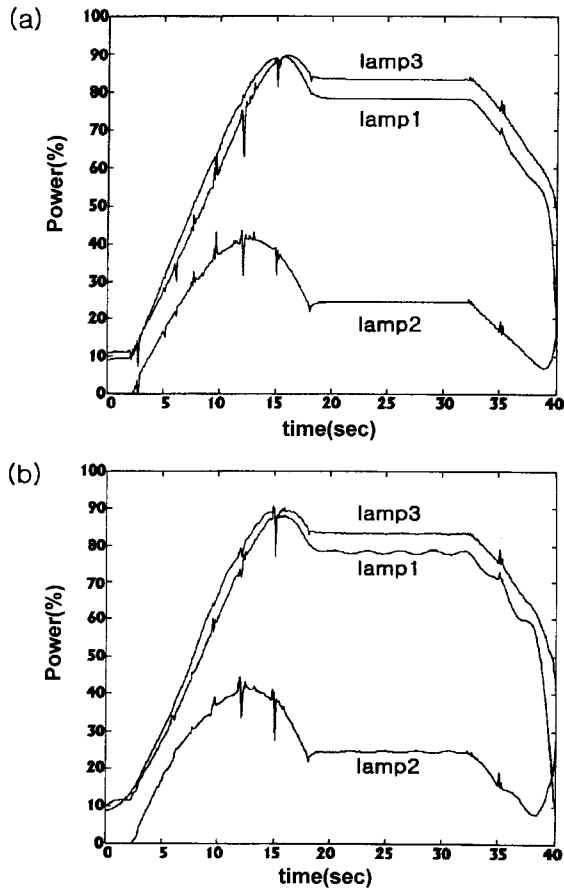


Fig. 15. Comparison of convergent input movements for 1,000 °C target temperature.

(a) DEF Q-ILC, (b) Reduced-Order Q-ILC.

생각된다.

온라인 온도측정이 가능한 실제 공정에서의 적용을 위해서는 짧은 시

간에 계산이 가능한 되먹임제어가 보완되어야 한다. 그러나 Q-ILC를 통해 오프라인 최적입력 패턴이 미리 결정될 수 있으므로, PID 정도의 간단한 제어기만으로도 외란에 대응하는 충분한 제어효과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

## 감 사

본 연구는 포항공과대학교 공정산업의 지능자동화 연구센터를 통한 한국과학재단의 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

## 참고문헌

1. Lord, H. A.: *IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing*, 1(3), 105(1988).
2. Gyuresik, R. S., Riley, T. J. and Sorrell, F. Y.: *IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing*, 4(1), 9(1991).
3. Apte, P. P. and Saraswat, K. C.: *IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing*, 5(3), 180(1992).
4. Stuber, J. D., Trachtenberg, I. and Edgar T. F.: *Proc. of 33rd Conf. Decision and Control*, 79(1994).
5. Gyugyi, P. J., Cho, Y. M., Franklin, G., Kailath, T. and Roy, R. H.: *The 1st IEEE Conf. on Control Application*, 374(1992).
6. Lee, K. S., Bang, S. H. and Chang, K. S.: *J. Proc. Cont.*, 4(2), 77 (1994).
7. Kim, W. C., Chin, I. S., Choi, J. and Lee, K. S.: Submitted to *Computers and Chemical Engineering*(1997).
8. Norman, S. A.: Ph. D. Thesis, Stanford University(1989).
9. Overshee, P. V. and Moor, B. D.: *Automatica*, 30(1), 75(1994).
10. Kim, S. H., Moon, H. J. and Lee, K. S.: *J. of Control, Automation and Systems Engineering*, 4(4), 413(1998).
11. Butler, S. W.: *J. Vac. Sci. Tech. B.*, 13(4), 1917(1995).