

반경험적 모델에 근거한 RTP 장비의 다변수 반복 학습제어

조문기*, 이용희, 주상래, 이광순
서강대학교 화공생명공학과, (주)콘웰 배치 사업부*

1. 서론

1.1. 급속 열처리 공정 (Rapid Thermal Processing)

반도체 웨이퍼 표면처리를 위한 급속 열처리 공정 (RTP)은 보통상온에서 1100°C 혹은 그 이상까지 수 초 내에 가열하며 처리하는 단일 웨이퍼 처리 공정을 의미하며 cleaning, annealing, oxidation, CVD, nitrification 등을 포함하여, 다양한 집적 회로 (IC) 가공을 위한 유망한 기술이다.

고도의 정밀도를 가진 다양한 제품, 짧은 life cycle로 인한 유연성, 치열한 가격경쟁으로 인한 높은 수율을 요구하는 시장의 새로운 변화는 열처리 공정의 중심을 기존의 회분furnace공정에서 RTP시스템으로 옮겨 놓았다. RTP 시스템의 상대적인 이점[1]은 다음 항목으로 설명이 가능하다.

- Reduced thermal budget
- Flexible integrated processing

Thermal budget[2]은 웨이퍼 물성에 영향을 줄 수 있는 온도에 노출된 시간 혹은 열에 의한 웨이퍼 내 불순물 확산의 정도로 정의되며, 이는 최소 선폴과 비례 관계를 가지고 있다. RTP 시스템은 회분furnace보다 고온에서 처리하는 대신 처리시간을 단축시켜 thermal budget을 줄일 수 있으며 이로 인해 불필요한 물질의 확산을 막을 수 있다.

한편, RTP 시스템은 챔버의 설계 변경만으로 새로운 제품에 적용이 가능하기 때문에 life cycle이 짧은 다양한 종류의 제품을 요구하는 시장의 상황에 쉽게 대응할 수 있다. 위에서 기술된 장점 외에도 웨이퍼의 대구경화, 가스공급 및 진공에 관련된 이점들은 장비의 선택을 RTP시스템쪽으로 자연스럽게 유도해 왔다.

RTP에서는 단일 웨이퍼 처리로 인하여 furnace에 문제가 되던 웨이퍼들 사이의 품질 불균일성은 더 이상 문제가 되지 않으며, 단지 어떻게 웨이퍼 내에서 균일한 온도분포를 성취할 수 있는가 만이 문제가 된다. 웨이퍼 내 위치에 따른 온도편차는 웨이퍼 표면 품질의 균일분포에 문제를 일으킬 뿐 아니라, 심각한 물리적 결함의 원인이 된다. 특히 냉각구간에서 일정 수준 이상의 온도편차는 웨이퍼 표면에 상이한 열팽창을 유발하게 되고, 이로 인해 사용불능의 치

명적인 격자결함(slip dislocation)이 발생하게 된다. 이를 해결하기 위한 노력은 장비의 설계시 고려되어야 할 부분과 운전시 고려되어야 할 부분으로 구분 된다. 전자의 경우 열원에 해당하는 램프의 형태와 배치, 반사경, 웨이퍼 회전 및 지지기구 등이 주요 고려 항목이 된다. 후자의 경우, 주어진 온도계획을 추종하며 균일분포를 유지하는 제어기법의 개발이 과제가 된다.

1.2. RTP 장비의 구성

그림 1은 일반적인 RTP 장비의 구성을 단면도로 표시한 것이다. 주요 부분은 가열을 위한 램프 및 램프 보호장치와 웨이퍼가 탑재되는 챔버, 두 부분을 구분하는 quartz window 그리고 온도 측정을 위한 센서가 부착되는 base plate로 구성되어 있다.

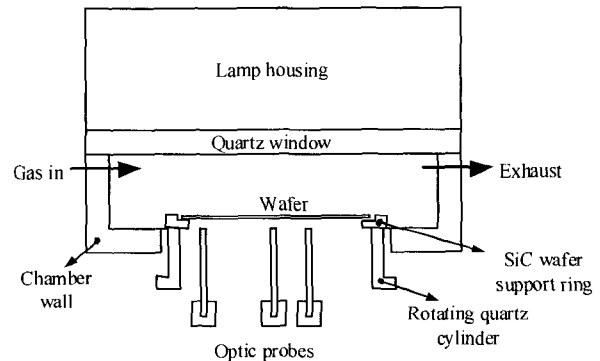


그림 1. 일반적인 RTP 장비의 단면 구성도.

1.2.1 램프 및 Quartz Window

열원은 주로 텅스텐-할로젠 램프를 사용하며 장비 개발업체에 따라 벌브 램프를 이용한 벌집형태, 선형 램프를 격자형태로 배열한 단면/양면 가열 방식의 등으로 구분된다. 열원인 램프 부분과 챔버 부분을 분리하고 있는 quartz window는 램프의 파손 및 오염으로부터 웨이퍼를 보호하는 목적 외에도 챔버의 진공 및 가압을 위한 기밀 유지, 처리 가스와 램프의 접촉을 방지하는 역할을 수행한다. 그러나 thermal mass가 매우 크고 자체 온도분포편차로 인해 웨이퍼 표면온도에 영향을 줄 수 있기 때문에 두께는 가능한 한 얇은 것이 바람직하다.

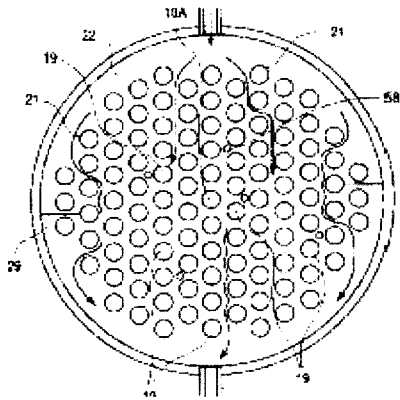


그림 2. 단면 가열 방식 벌집 모양의 전구 램프.

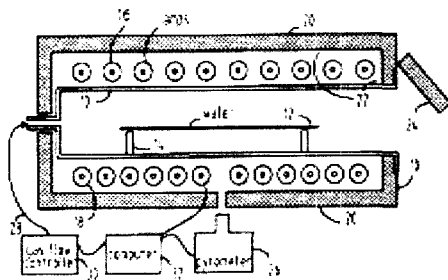


그림 3. 양면 가열 방식 선형 램프.

위의 그림들에서 제시된 형태 이외에도 원형의 램프가 사용되는 경우도 있다.

1.2.2 챔버 부분

공정 가스는 보통 증류 흐름으로 공급되며, 챔버에는 상압 및 진공 상태로 운전하기 위해 진공펌프와 배출 가스 유량을 조절하는 밸브 및 압력 센서가 부착된다. 챔버를 구성하는 재료는 스테인레스 steel이 주종을 이루며, 경제성을 고려하여 알루미늄 재질을 이용하는 경우도 있다. 챔버 벽의 과열 및 온도 변동으로 인한 외란을 방지하기 위해 벽 내부로 냉각수를 순환시킨다. 웨이퍼는 SiC재질로 만들어진 지지 기구 위에 놓여지게 되는데, 이 지지 기구를 edge ring이라 한다. Edge ring의 목적은 크게 두 가지인데, 그 중 하나가 웨이퍼 끝 부분의 열전달 메커니즘을 중간 부분과 동일하게 만들어 주기 위함이며, 두 번째는 온도측정을 위한 pyrometer의 동작 특성상 흑체 환경을 만들어 주기 위함이다. 웨이퍼의 회전은 열 및 가스흐름의 국부적 변이를 완화시킴으로 웨이퍼 온도 균일도를 향상 시킨다.

1.2.3 온도 측정

이상적으로는 웨이퍼 가공상태를 직접 감시하고 제어하기를 바라지만, 실시간으로 이를 측정하는 것은 경제적 기술적 측면에서 많은 어려움을 가지고 있다. 이런 이유로 측정이 가능한 웨이퍼의 표면 온도를 대신 제어하게 된다. RTP장비에서 사용되는 대표적인 온도 계측기는 열전대와

pyrometer이다. 열전대는 웨이퍼 표면에 작은 홈을 낸 후 열전대의 측정부분을 홈 안에 밀어넣고 세라믹 계통의 접착제로 고정시킨다. 열전대 웨이퍼는 pyrometer를 교정하거나, 새로운 레시피에 해당하는 장비의 파라미터를 구할 때, 장비의 성능을 검증할 때 사용된다. 열전대의 부착 위치나 개수는 사용목적에 따라 엔지니어가 결정하게 된다. 양산 라인의 장비에서는 비 접촉식 pyrometer를 사용하여 온도를 측정하며, 웨이퍼의 필름 두께, 종류, 처리과정에서의 dopant 증착 정도에 따라 방사율 (emmissivity)이 크게 변화되어 표면 온도의 정확한 측정이 어렵다. 이를 극복하기 위해서 실시간으로 방사율을 측정, 보정하는 것이 필요하고 감지하는 파장대의 영역에 따라 흑체 환경을 조성해 주어야 할 필요가 있다. 제시된 두 가지 방법 모두 웨이퍼 표면의 온도를 정확히 측정한다는 보장이 없기 때문에 처리 후 측정된 공정 물성 정보를 이용하여 보정하는 절차를 반드시 거쳐야 하며 이는 장비를 운용하는 엔지니어 몫으로 남게 된다. 이 밖에도 표면 온도를 정확히 측정하려는 여러 방법이 제시되고 있지만 가격과 기술적인 이유로 실용화 되지 못하고 있다.

웨이퍼 표면 온도의 측정에 관한 상세한 이론 및 기술에 관한 내용은 본 논문의 범위에서 제외된다. 이후 기술되는 모든 이론의 배경에는 신뢰성 있는 온도의 측정이 전제된다.

1.3. RTP 장비의 제어 목표

RTP 장비의 궁극적인 목적은 웨이퍼 표면의 가공상태 (막 두께, 저항 등)가 주어진 목표 값을 만족 시키면서, 웨이퍼 표면 전체에 걸쳐 균일한 특성을 갖도록 하는데 있다. 이때, lot 단위로 생산되는 웨이퍼들 간의 물성과 웨이퍼 내의 물성이 동시에 균일분포를 충족시켜야 한다. 위에서 기술된 두 종류의 균일분포를 이루기 위한 온도제어의 목적은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 주어진 온도제적의 정밀한 추종.
- 웨이퍼 표면 온도의 지역적인 분포 편차 최소화.

전자의 요구사항은 각 회분의 운전이 주어진 제적을 잘 추종 해야만 만족될 수 있다. 후자의 요구사항은 여러 가지 의미를 내포하고 있는데 그 중 가장 중요한 것이 웨이퍼 표면물성의 균일한 분포를 얻기 위함이다. 지역적인 온도편차는 바로 웨이퍼 표면 물성의 분포편차로 나타나기 때문이다. 또 다른 이유는 뒤틀림(warping) 및 단 결정 파손 (slip)과 같은 심각한 웨이퍼의 물리적 손상을 방지하기 위함이다. 이들의 발생원인은 지역별 온도차이로 기인한 열팽창의 차이에서 기인한다. 특히 slip은 치명적인 결함으로 승온 및 냉각단계와 같이 동 특성이 강하게 나타나는 구간에서 쉽게 발생 할 수 있다. 그림 4는 장비가 추구해야 할 온도제어의 목표를 보인 것이다.

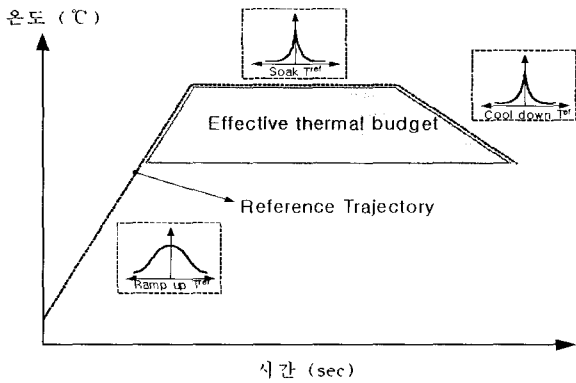


그림 4. 온도 추종 궤적 및 유효 Thermal Budget.

잘 설계된 장비도 상온에서 1000℃ 이상 모든 구간에 걸쳐 온도의 균일분포를 만족시키는 것은 매우 어려운 일이다. 이런 이유로 대부분의 RTP장비는 물성에 많은 영향을 주는 유지 및 냉각구간에서 좋은 성능이 나타나도록 설계되어 있다.

1.4. 기존 RTP 장비 업체의 온도 제어 방법

앞에서 기술된 온도제어의 목표를 이루기 위해 RTP 장비 개발업체에서 사용하고 있는 제어기는 크게 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 형태와 출력 ratio가 보완된 PID 형태로 분류될 수 있다.

1.4.1 MIMO 형태의 제어기[3]

3~6 개의 pyrometer를 공정출력으로, 동일한 수로 그룹핑된 램프 그룹을 공정입력으로 제어기를 구성한다. 제어기는 실시간 계산량이 적은 MIMO LQG (Linear Quadratic Gaussian)와 비선형 모델에 근거한 feedforward 제어를 결합하여 사용한다. 그림 5는 구성된 제어기를 블록선도로 표현한 것이다. 경우에 따라서는 하나의 그룹핑 내에서 개별 램프에 적절히 제어출력을 분산시키기 위하여 ratio를 적용하는 경우도 있다. 이 방법은 현존하는 상업용 장비 중 가장 진보된 형태이나, 제어기 구성을 위한 비선형 모델을 얻기 위해서 많은 비용 및 시간이 소요된다. 특히 웨이퍼의 처리공정 및 물성이 바뀌는 경우 비선형 모델의 파라미터를 새로 구해야 하는 문제점을 안고 있다.

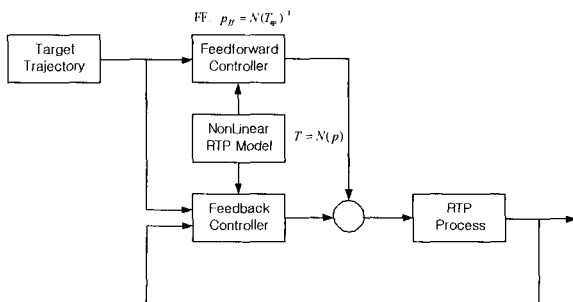


그림 5. RTP 장비에 적용된 MIMO 제어기의 블록 선도.

1.4.2 Ratio가 보완된 형태의 PID 제어기

선형 격자형태의 램프가 장착된 장비의 대부분은 SISO PID 제어기를 적용하고 있다. RTP 장비의 운전이 주로 비정상상태에서 짧은 시간 안에 완료되는 특성을 고려하여 승온, 유지, 냉각 시 각각 다른 튜닝을 적용하며, 각 단계를 더 세분화하여 적용하는 경우가 많다. 처리 웨이퍼의 종류 및 운전 레시피가 변화하는 경우에는 새로운 제어기 파라미터를 구하고 관리해야 한다. 공정출력은 웨이퍼의 중심부분에 부착된 1개의 pyrometer를 이용한다. 이 경우 측정된 부분의 온도만 원하는 궤적을 추종하기 때문에 PID 제어기만으로는 웨이퍼 전 표면에 걸친 균일 온도 분포, 즉 물성의 균일분포를 얻는 것이 불가능 하다. 이를 위해 PID 제어출력에 적절한 ratio를 곱하여 각 램프 출력으로 이용한다. 위의 PID 파라미터의 경우와 마찬가지로 각 단계 및 램프 별로 ratio를 얻어야 한다. 이들 튜닝 파라미터와 램프 ratio를 얻기 위해서는 처리된 웨이퍼의 물성 분포를 off-line으로 측정 후 보정하고 다시 적용을 반복하는 시행착오에 의존할 수 밖에 없다. 이와 같은 작업은 장비에 충분히 숙련된 엔지니어도 상당한 시간을 필요로 한다.

특히, 웨이퍼 내 위치간 온도 차로 인한 thermal stress에 의해 발생하는 단 결정 파손 (slip)과 같은 물리적인 결함을 극복하기 위해서는 운전 구간을 조밀하게 세분화 해야 하므로 시간 및 인력의 소모가 많이 소요된다. 따라서 빠르게 변화하는 시장의 요구에 대한 대응력이 떨어질 수 밖에 없다.[4]

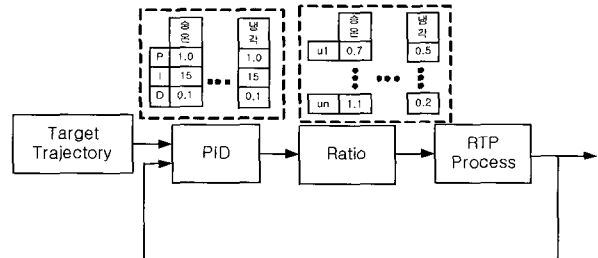


그림 6. RTP 장비에 적용된 SISO 제어기의 블록 선도.

1.5. RTP 장비 온도 제어 시스템 설계의 추진 방향

낮은 thermal budget에 대한 요구로 회분 furnace에서의 많은 웨이퍼 처리가 RTP 시스템으로 전환되는 것과 같은 상황이 RTP 시스템 내에서도 일어나고 있고, 이러한 추세는 spike annealing[5]에서 극명하게 나타난다. Spike annealing은 150~300℃/sec 정도의 속도로 목표온도까지 웨이퍼를 급속 승온 시킨 후 가능한 최소시간 체류 후 급속 냉각을 요구한다. 웨이퍼의 동 특성을 고려해 볼 때 feedback 제어는 이와 같은 급속한 온도 궤적의 추종을 감당할 수 없으며 feedforward 제어가 필연적으로 보완되어야 한다. 앞에서 고려한 여러 상황 및 spike annealing과 같은 새로운 추세에 대응하기 위해 RTP 제어 시스템이 갖추어야 될 중요한 핵심요소는 다음과 같이 정리될 수 있다.

- 정밀한 모델링 작업을 하지 않고도 심각한 비선형성을 극복하며 최고의 추적제어 성능을 나타내는 MIMO 제어기법.
- 짧은 샘플링 시간을 위한 효율적인 알고리즘.
- Feedback 제어의 한계를 극복할 수 있도록 feedforward 제어의 보완.
- 표준화된 모델 인식방법 및 적용의 용이함.
- 경제성을 위해 최소의 센서를 사용하여 구현할 수 있는 방법의 제안.

위의 요구사항을 만족시킬 수 있도록 본 연구에서는 semi-empirical model에 근거한 TBC (Two-stage Batch control) 기법을 제시하고 이를 실험으로 검증하였다. 먼저 TBC제어기법은 모델에 근거한 MIMO 제어로 feedforward 제어는 학습제어 (Iterative Learning Control, ILC)가 off-line으로 feedback 제어는 표준화된 LQG/MPC가 on-line으로 담당하도록 구성된 것이다. ILC기법을 도입함으로써 간단한 선형공정 모델만으로도 회분수가 증가하며 제어오차를 극복해 가며 정밀한 추적제어를 이루는 것이 가능하다. 제어성능을 더욱 향상시키기 위하여 RTP의 열수지 모델이 제시하는 물리적 구조를 선형모델에 반영하여 모델의 질을 향상 시키었다. 또한 레시피 변화에 쉽게 대비할 수 있도록 부공간 인식법(Subspace Identification)을 이용한 표준화된 모델 인식방법을 개발하였다. 마지막으로 웨이퍼 표면의 온도 균일도의 손상을 최소화하며 사용 센서의 수를 감소시킬 수 있는 제어기법을 개발하였다.

2. RTP 장치의 모델

2.1. 복사에 의한 열 전달(6)

RTP 시스템의 운전은 고온에서 수행되므로 복사에 의한 열전달을 지배한다. 그림 7은 gray표면에서 일어나는 복사 현상을 표현한 것으로 ρ 는 반사율 (reflectivity), α 는 흡수율 (absorptivity), τ 은 투과율 (transmissivity)을 의미한다.

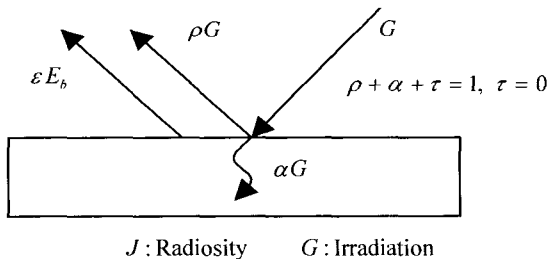


그림 7. 표면에서 일어나는 복사현상.

실리콘 웨이퍼의 표면을 방사율이 ϵ 인 gray, diffuse, opaque 표면이라 가정하면 총 입사 (irradiation, G)와

총 복사 (radiosity, J) 사이의 관계는 식(2.1)과 같이 표현된다. 실리콘 웨이퍼의 경우 일정 온도 이상 (대략 500°C) 이면 표면이 opaque 상태에 도달하여 투과율은 0이 된다.

$$J = \epsilon E_b + \rho G \quad (2.1)$$

온도가 T 이고 표면적이 A 인 표면 (gray, diffuse, opaque)을 통해 외부로 유출되는 순 에너지는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$q = A(J - G) = \frac{E_b - J}{(1 - \epsilon)/\epsilon A} \quad (2.2)$$

두 표면 A_1 과 A_2 사이에 교환되는 순 복사 에너지는 view factor를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$q_{21} = F_{21}A_1J_1 - F_{12}A_2J_2 = F_{21}A_1(J_1 - J_2) \quad (2.3)$$

여기서 F_{21} 는 표면적 A_1 에서 A_2 로 이동되는 관점에서의 view factor를 의미한다.

2.2. 정상 상태에서의 물리적 모델링

대상 공정인 RTP 장비 내에서 실질적으로 열 교환이 이루어지는 부분은 챔버 내의 벽, 웨이퍼 표면, 열원인 램프들이다. 이들 사이의 열전달 현상은 주로 복사에 의한 것이고, 위에서 기술된 view factor를 이용한 두 표면 사이의 열전달로 표현이 가능하다. 이를 위해 각 부분을 작은 조각으로 쪼개고, 각 부분의 조각을 표시하는 인덱스를 챔버 내 벽은 w로, 웨이퍼는 s로, 램프는 l로 표현하였다.

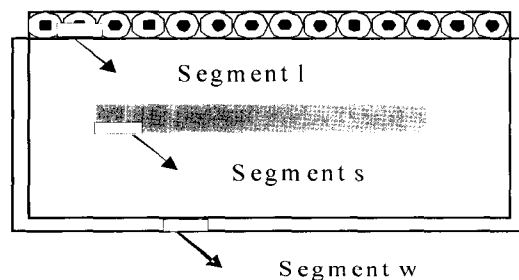


그림 8. 챔버 내 복사 열전달에 관계된 요소의 정의.

우선 실리콘 웨이퍼의 입장에서 램프와 챔버 내벽의 모든 조각들, 그리고 웨이퍼 조각 s와 자신을 제외한 웨이퍼의 다른 조각들과의 열교환을 통한 순 열 입력량은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$q_s = \sum_l (F_{sl}A_lJ_l - F_{ls}A_sJ_s) + \sum_w (F_{sw}A_wJ_w - F_{ws}A_sJ_s) + \sum_{s'} (F_{ss'}A_{s'}J_{s'} - F_{s's}A_sJ_s) \quad (2.4)$$

이를 조각 \$s\$ 입장에서 입력과 출력 부분으로 분리하여 정리할 수 있다.

$$q_s = \sum_l F_{sl} A_l J_l + \sum_w F_{sw} A_w J_w + \sum_{s'} F_{ss'} A_{s'} J_{s'} - \left(\sum_l F_{ls} A_s + \sum_w F_{ws} A_s + \sum_{s'} F_{s's} A_s \right) J_s \quad (2.5)$$

여기서 \$s\$'는 웨이퍼 조각 중 자신을 제외한 나머지를 의미한다. 또한 식(2.2)으로부터 같은 의미의 순 복사 유입량을 표현할 수 있다.

$$q_s = \frac{J_s - E_{bs}(T_s)}{(1 - \varepsilon_s(T_s))/\varepsilon_s(T_s) A_s} \quad (2.6)$$

식(2.5)과 식(2.6)을 나머지 모든 조각에 적용하여 이를 벡터 및 행렬로 표시하면 다음과 같다.

$$\mathbf{q}_s = \mathbf{V}_s \mathbf{J}_l + \mathbf{V}_{sw} \mathbf{J}_w + (\mathbf{V}_{ss} - \mathbf{\Pi}_{ss}) \mathbf{J}_s = \mathbf{M}_s (\mathbf{J}_s - \mathbf{E}_{bs}) \quad (2.7)$$

여기서 각 벡터 및 행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{V}_s = \begin{bmatrix} F_{s1} A_1 & \dots & F_{sn} A_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{s1} A_1 & \dots & F_{sn} A_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{V}_{sw} = \begin{bmatrix} F_{s1} A_1 & \dots & F_{sn} A_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{s1} A_1 & \dots & F_{sn} A_n \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{V}_s = \begin{bmatrix} F_{s1} A_1 & \dots & F_{sn} A_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{s1} A_1 & \dots & F_{sn} A_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_s \triangleq \begin{bmatrix} \frac{\varepsilon_s A_s}{(1 - \varepsilon_s)} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{\varepsilon_s A_s}{(1 - \varepsilon_s)} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{q}_s = \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{\Pi}_{ss} \triangleq \begin{bmatrix} \sum_l A_l F_{l1} + \sum_w A_w F_{w1} + \sum_{s'} A_{s'} F_{s'1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sum_l A_l F_{ln} + \sum_w A_w F_{wn} + \sum_{s'} A_{s'} F_{s'n} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

위의 정리과정을 챔버 내벽과 램프에도 적용하면 다음의 식을 얻는다.

$$\mathbf{q}_w = \mathbf{V}_w \mathbf{J}_l + \mathbf{V}_{ws} \mathbf{J}_s + (\mathbf{V}_{ww} - \mathbf{\Sigma}_{ww}) \mathbf{J}_w = \mathbf{M}_w (\mathbf{J}_w - \mathbf{E}_{bw}) \quad (2.9)$$

$$\mathbf{q}_l = \mathbf{V}_l \mathbf{J}_w + \mathbf{V}_{ls} \mathbf{J}_s + (\mathbf{V}_{ll} - \mathbf{\Sigma}_{ll}) \mathbf{J}_l = \mathbf{M}_l (\mathbf{J}_l - \mathbf{E}_{bl}) \quad (2.10)$$

이제 램프 그룹의 각 출력이 램프 각 조각의 순 복사에너지와 같다고 볼 수 있으므로

$$\mathbf{q}_l = \mathbf{p}_l \quad (2.11)$$

웨이퍼의 경우 정상상태에서 순 에너지 흐름이 영이 되므로 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\mathbf{q}_w = \mathbf{0} \Leftrightarrow \mathbf{J}_w = \mathbf{E}_{wb} = \sigma \mathbf{T}_w^4 \quad (2.12)$$

식(2.11)를 식(2.9)과 식(2.10)에 대입한 후 \$\mathbf{J}_s\$를 고정된 나머지 상수들로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_w & (\mathbf{V}_{ww} - \mathbf{\Sigma}_{ww}) - \mathbf{M}_w \\ (\mathbf{V}_{ll} - \mathbf{\Sigma}_{ll}) & \mathbf{V}_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{J}_l \\ \mathbf{J}_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{V}_{ws} \mathbf{E}_{bs} - \mathbf{M}_w \mathbf{E}_{bw} \\ \mathbf{p}_l - \mathbf{V}_{ls} \mathbf{E}_{bs} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

위 식을 식(2.7)에 대입하면 아래와 같은 최종적인 식을 얻게 된다.

$$\mathbf{E}_{bs} = \mathbf{D} \mathbf{p}_l + \mathbf{E}_{bw} \Rightarrow \mathbf{T}_s^4 = \mathbf{D} \mathbf{p}_l + \mathbf{I}_0 \mathbf{T}_w^4 \quad (2.14)$$

여기서 \$\mathbf{T}^4\$은 각 조각에서의 \$T^4\$을 요소로 갖는 벡터이며, \$\mathbf{I}_0\$는 1을 요소로 갖는 벡터이다. 우측 식은 \$\mathbf{p}_l = \mathbf{0}\$인 경우, \$T_s = T_w\$이 성립되는 사실을 반영하여 얻어진 것이다. 위의 식에서 중요한 사실을 \$\mathbf{D}\$를 구성하는 변수 중 \$\mathbf{M}_w\$만이 온도의 함수라는 것이다. 즉, 웨이퍼의 종류나 온도에 따른 방사율의 변화와 텅스텐-할로겐 램프의 방사율의 변화에 영향을 받지 않고 오직 챔버 내벽의 방사율 변화에만 영향을 받는다는 사실이다. 한편, 챔버 내벽 안쪽에 냉각수의 흐름이 있어 운전 중에 \$T_w\$의 변화가 크지 않다는 사실로부터 공정 모델 행렬 \$\mathbf{D}\$는 거의 상수행렬임을 알 수 있다.

2.3. 제어 모델 구조

식(2.14)의 의미는 정상상태에서 램프 출력 \$\mathbf{p}(t)\$는 웨이퍼 표면온도 \$\mathbf{T}_s^4(t)\$과 선형적인 관계를 가지고 있다는 것이다. 이 관계로부터 제어를 위한 동적 모델의 입출력의 선정은 \$\mathbf{p}(t)\$와 \$\mathbf{T}_s^4(t)\$보다 \$\mathbf{p}(t)\$와 \$\mathbf{T}_s^4(t)\$이 보다 타당함을 알 수 있고, 이를 근거로 공정 입출력을 다음과 같이 정의하는 것이 바람직할 것이다.

$$\mathbf{u}(t) \triangleq \mathbf{p}(t), \quad \mathbf{y}(t) \triangleq \mathbf{T}_s^4(t) \quad (2.15)$$

정의된 공정 입출력 신호를 이용하여 선형 시불변 추계적 상태 공간 모델을 얻기 위해 부공간 인식법의 일종인 N4SID(7)를 적용한다. 적용하기에 앞서, 취득한 데이터는 바이어스와 잡음의 영향을 제거하기 위해 적당한 필터를 이용하여 전 처리가 수행되어야 한다. 본 연구에서는 다음과 같은 필터를 채택하였으며

$$F(q^{-1}) = \frac{1 - q^{-1}}{1 - f q^{-1}}, \quad 0 < f < 1 \quad (2.16)$$

“time difference”와 “low pass 필터”가 결합되어 있다. 이들 필터에 의해 처리된 새로운 공정 입출력을 아래와 같이 정의한다.

$$\mathbf{u}_f(t) \triangleq F(q^{-1})\mathbf{u}(t), \quad \mathbf{y}_f(t) \triangleq F(q^{-1})\mathbf{y}(t) \quad (2.17)$$

\$\{\mathbf{u}_f(t)\}\$와 \$\{\mathbf{y}_f(t)\}\$를 부공간 인식법인 N4SID에 적용하며 식(2.18)의 모델을 얻으며, 다시 식(2.17)을 고려하여 \$\mathbf{u}(t)\$

와 $y(t)$ 사이의 관계로 복원하면 식(2.19)의 선형 추계적 상태공간 모델(innovation form)을 얻는다.

$$\begin{aligned} x_f'(t+1) &= \bar{A}x_f'(t) + \bar{B}u_f(t) + \bar{K}v(t) \\ y_f(t) &= \bar{C}x_f'(t) + v(t) \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} x(t+1) &= Ax(t) + Bu(t) + Kv(t) \\ y(t) &= Cx(t) + v(t) \end{aligned} \quad (2.19)$$

여기서 $A = \begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{K} \\ 0 & I \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} \bar{B} \\ 0 \end{bmatrix}$, $C = [\bar{C} \quad I]$, $K = \begin{bmatrix} \bar{K} \\ (I-f)I \end{bmatrix}$ 이며, 이후 제안된 제어기는 식(2.19)에 근거하여 설계된다.

3. TBC (Two-Stage Batch Control) 기법

ILC(반복학습제어)는 같은 작업이 되풀이 수행되는 회분공정의 추적제어 성능을 향상 시키도록 발전해 온 기법이다. 로보트 팔의 학습을 위한 Arimoto의 기여[8] 이후 지난 20년 동안, ILC 기법은 지속적인 발전을 해왔으며 그 적용 또한 다양한 분야로 확장되어 왔다. ILC의 방법 및 대표적인 적용사례들이 몇 권의 책[9,10,11]으로 발간 되었다.

기본적으로 ILC의 주된 관심은 '모델 오차와 반복적으로 유입되는 외란을 극복하며 궁극적인 추적 제어 성능을 얻을 일'에 집중되어 왔다. 그러나 실제 적용에 있어서는 다양한 형태의 외란이 공정에 유입 될 수 있고, 이를 잘 극복하기 위해서는 실시간 제어 (Real-time Feedback Control, RFC)가 반드시 요구된다. ILC와 RFC의 결합은 전형적인 feedforward-plus-feedback구조를 가지며, 수렴속도의 향상과 같은 이점을 줄 수 있으며 이들의 결합 방법에 관한 연구가 상당 부분 진행되어 왔다.[11,12,13,14,15] 이들 연구에서 제시된 ILC-RFC 결합 방법은 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$u_k(t) = u_{k-1}(t) + H_{ILC}e_{k-1}(1:N) + H_{RFC}e_k(1:t) \quad (3.1)$$

여기서 $e_k(i:j)$ 는 시간구간 $t=i:j$ 의 제어 오차를, k 는 회분 인덱스를 의미한다. H_{ILC} 와 H_{RFC} 는 각각 ILC와 RFC의 제어기 이득을 나타낸다.

실제 운전상황에서는 예상치 못한 외란이 유입될 수 있으며 식(3.1)에 근거한 ILC-RFC는 성능의 한계를 보일 수 밖에 없다. 예를 들어, 강도가 큰 실시간 외란이 유입되면 제어오차가 커지게 되고 RFC가 공정입력 (제어출력)에 미치는 항 $H_{RFC}e_k(1:t)$ 이 큰 값을 갖게 된다. 이 현상은 학습에 의해 $u_k(\bullet)$ 가 최적의 입력레직에 수렴해 가는 과정에 외란으로

작용하게 되고 다음 회분에 악영향을 미치게 된다. 이 영향을 극복하며 $u_k(\bullet)$ 가 수렴하기 위해서는 외란이 유입되지 않은 경우 보다 많은 회분의 학습이 요구 되거나, 아니면 이러한 외란이 수시로 유입되는 경우는 ILC-RFC의 성능이 상당히 저하될 수 밖에 없다. 실시간 외란의 극복에 관한 연구 [16,17,18,19]가 그 동안 지속적으로 수행되어 왔지만, 실제 적용 측면에서는 그 중요성에 비해 이 문제가 경미하게 취급 되었던 것이 사실이다.

위의 문제를 극복하며 실시간 외란에 효과적으로 대응하기 위해 고려되어야 할 중요한 관점은 RFC와 ILC가 담당해야 할 외란을 분리하는 것이다. 즉, 실시간 외란은 RFC가, 회분마다 반복되는 외란은 ILC가 담당하도록 구성해야 한다. 식(3.1)의 구조는 두 가지 형태의 외란을 분리하여 처리할 수가 없다.

최근 순수 ILC에서는 실시간 외란의 영향을 효과적인 제거하여 수렴성능에 미치는 영향을 최소화 하는 추계적 제어기 설계기법이 제안된 바 있다. Lee et al.(2000)은 외란을 매 회분 마다 반복되는 부분과 회분 마다 임의로 발생하는 부분으로 분리하여 표현하고, 후자의 외란이 ILC의 수렴을 방해하는 문제를 극복하기 위해 회분 인덱스를 따라 동작하는 Kalman 필터를 도입하였다. 적응 ILC를 도입한 Norroff(2000) 또한 외란의 공 분산을 실시간으로 추정하기 위해 Kalman 필터를 사용하였다. Phan과 Longman(2000)은 ILC내의 불필요한 신호를 제거하기 위해 마찬가지로 Kalman 필터를 도입하였다. Lee et al.은 Kalman 필터가 결합된 위의 ILC에 RFC를 결합한 제어기를 BMPC (Batch Model Predictive Control)[20]와 BLQG (Batch LQG)[21] 두 형태로 제시하였다. 이들 두 가지 방법의 기본 동작은 다음 식으로 표현된다.

$$u_k(t) = u_{k-1}(t) + H_{ILC}\bar{e}_{k-1}(1:N) + H_{RFC}e_k(1:t) \quad (3.2)$$

여기서 $\bar{e}(\bullet)$ 는 실시간 외란의 영향이 배제된 제어 오차를 의미한다. 위 식에 함축되어 있는 의미는 실시간 외란에 독립된 ILC 신호를 얻는 것이지만, 상대적으로 커다란 외란에 의해 RFC가 작용하면 식(3.1)와 마찬가지로 ILC가 받는 영향을 피할 수가 없다. 즉, ILC와 RFC가 동일한 공정입력에 작용하는 한 필터링 된 제어오차만으로는 외란 문제를 올바르게 해결할 수가 없다.

앞서 기술된 문제점을 근간으로, 본 연구에서는 새로운 관점의 RFC와 ILC가 결합되는 구조를 제안하였다. 즉, 학습을 위한 입력과 실시간 외란을 위한 입력을 분리하여 ILC가 실시간 외란의 영향을 받지 않도록 제어기를 설계하는 것이다. 공정 입력의 분리를 위해 외란의 형태를 세가지로 구분하였다.

- 매 회분마다 반복적으로 발생하는 외란 (run-wise persisting part)

의 관계가 얻어진다. 이 관계에서 볼 수 있듯이 실시간 외란과 측정잡음 v_k, n_k 은 \bar{e}_k 에 영향을 미치지 못하며, ILC 제어 신호 \bar{u}_k 도 이들의 영향을 받지 않고 수렴 값에 이를 수 있게 된다. 실제 적용에서 \bar{e}_k 와 \bar{c}_k 는 측정할 수 없는 변수이므로 Kalman 추정치를 사용해야 한다.

3.2. Two-stage Batch Control 알고리즘

이제 앞에서 개념적으로 소개한 TBC기법을 상태공간 모델에 적용한 실용적인 알고리즘을 유도하여 보자.

3.2.1 공정모델 구성

식(2.19)의 모델을 회분 인덱스를 포함하여 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_k(t+1) &= Ax_k(t) + Bu_k(t) + Kv_k(t) \\ y_k(t) &= Cx_k(t) + v_k(t) \end{aligned} \quad (3.9)$$

시간 축에서의 $v(t)$ 는 평균이 0인 백색잡음이지만, 서로 다른 회분에서의 $v(t)$ 과는 상관관계를 보일 수 있다. $v(t)$ 내에는 매 회분마다 반복되어 나타나는 부분들이 있을 수 있으므로 (모델오차의 영향 등) 간단하지만 합리적인 $v_k(t)$ 의 모델은 다음과 같이 K 에 따른 random walk과 white noise가 결합된 형태이다.

$$\begin{aligned} v_k(t) &= \bar{v}_k(t) + \hat{v}_k(t) \\ \bar{v}_k(t) &= \bar{v}_{k-1}(t) + n_k(t) \end{aligned} \quad (3.10)$$

여기서 $\bar{v}_k(t)$ 와 $n_k(t)$ 는 시간과 회분 인덱스에 대해 상관성이 없는 백색잡음이다. TBC의 유도를 위해 공정입력 $n_k(t)$ 는 ILC $\bar{u}_k(t)$ 와 RFC $\hat{u}_k(t)$ 로 분리하고 공정출력과 상태를 이와 상응하게 분리한다.

$$\begin{aligned} u_k(t) &= \bar{u}_k(t) + \hat{u}_k(t) \\ y_k(t) &= \bar{y}_k(t) + \hat{y}_k(t) \\ x_k(t) &= \bar{x}_k(t) + \hat{x}_k(t) \end{aligned} \quad (3.11)$$

이제 식(3.9)에 대입하여 재정리하면 두 개의 상태공간 모델 식으로 분리 된다.

$$\begin{aligned} \bar{x}_k(t+1) &= A\bar{x}_k(t) + B\bar{u}_k(t) + K\bar{v}_k(t) \\ \bar{y}_k(t) &= C\bar{x}_k(t) + \bar{v}_k(t) \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \hat{x}_k(t+1) &= A\hat{x}_k(t) + B\hat{u}_k(t) + K\hat{v}_k(t) \\ \hat{y}_k(t) &= C\hat{x}_k(t) + \hat{v}_k(t) \end{aligned} \quad (3.13)$$

ILC의 유도를 위해 식(3.11)을 회분간의 차이로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta \bar{x}_k(t+1) &= A\Delta \bar{x}_k(t) + B\Delta \bar{u}_k(t) + K\Delta n_k(t) \\ \Delta \bar{y}_k(t) &= \Delta \bar{y}_{k-1}(t) + C\Delta \bar{x}_k(t) + \Delta n_k(t) \end{aligned} \quad (3.14)$$

3.2.2 ILC 알고리즘 (First stage)

ILC의 유도를 위해 공정 입출력, 상태, 외란 등의 관계식(3.14)을 회분의 운전 구간 $t \in [0, N]$ 까지 확장하여 벡터 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta \bar{x}_k &= \Phi \Delta \bar{x}_k(0) + \Gamma \Delta \bar{u}_k + E n_k \\ \bar{y}_k - \bar{y}_{k-1} &= \Sigma \Delta \bar{x}_k + F n_k \end{aligned} \quad (3.15)$$

여기서

$$\begin{aligned} \Delta \bar{x}_k &\triangleq [\Delta \bar{x}_k(0)^T \quad \Delta \bar{x}_k(1)^T \quad \dots \quad \Delta \bar{x}_k(N-1)^T]^T \\ \bar{y}_k &\triangleq [\bar{y}_k(1)^T \quad \bar{y}_k(2)^T \quad \dots \quad \bar{y}_k(N)^T]^T \end{aligned} \quad (3.16)$$

등이다. $\bar{e}_k = r - \bar{y}_k$ 의 정의에 의해 식(3.15)은 다음과 같이 정리된다.

$$\bar{e}_k = \bar{e}_{k-1} - \Sigma \Gamma \Delta \bar{u}_k - (\Sigma E + F) n_k - \Sigma \Phi \Delta \bar{x}_k(0) \quad (3.17)$$

식(3.13)도 위와 같은 방법으로 정리하면 다음의 식이 얻어지며,

$$\begin{aligned} \hat{x}_k &= \Phi \hat{x}_k(0) + \Gamma \hat{u}_k + E \hat{v}_k \\ \hat{y}_k &= \Sigma \hat{x}_k + F n_k \\ y_k &= \bar{y}_k + \hat{y}_k \end{aligned} \quad (3.18)$$

이것을 오차의 식으로 재정리하면 아래와 같다.

$$e_k = \bar{e}_k - \Sigma \Gamma \hat{u}_k - (\Sigma E + F) \hat{v}_k - \Sigma \Phi \hat{x}_k(0) \quad (3.19)$$

$\Delta \bar{x}_k(0)$ 와 $\hat{x}_k(0)$ 의 영향은 매 회분의 초기조건이 같을 때에만 무시될 수도 있으며, 그렇지 않으면 실시간 제어기(RFC)가 제거해야 할 외란으로 고려되어야 한다. 식이 지나치게 복잡해 지는 것을 피하기 위하여 여기서는 초기조건 항을 무시하고 식(3.17)과 (3.19)을 재정리하면 다음과 같은 회분 인덱스에 대한 추계적 상태공간 모델이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \bar{e}_k &= \bar{e}_{k-1} - G \Delta \bar{u}_k - M n_k \\ e_{k-1} &= \bar{e}_{k-1} - G \hat{u}_{k-1} - M \hat{v}_{k-1} \end{aligned} \quad (3.20)$$

식(3.20)의 Kalman 필터는 Kalman 이득의 식과 함께 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \bar{e}_{k-1|k-1} &= \bar{e}_{k-1|k-2} + K_{k-1}(e_{k-1} - \bar{e}_{k-1|k-2} + G \hat{u}_{k-1}) \\ \bar{e}_{k|k-1} &= \bar{e}_{k-1|k-1} - G \Delta \bar{u}_k \end{aligned} \quad (3.21)$$

QILC에서 도입했던 아래의 목적함수를 만족하도록 다음 회분의 공정입력을 계산한다.

$$\min_{\Delta \bar{u}_k} \frac{1}{2} \left\{ J = \|\bar{e}_{k|k-1}\|_Q^2 + \|\Delta \bar{u}_k\|_R^2 \right\} \quad (3.22)$$

제약조건이 없는 경우의 해는 다음과 같다.

$$\Delta \bar{u}_k = (G^T Q G + R)^{-1} G^T Q \bar{e}_{k-1|k-1} \quad (3.23)$$

$$\bar{u}_k = \bar{u}_{k-1} + \Delta \bar{u}_k \quad (3.24)$$

ILC가 적용되는 과정은 다음과 같다. $k-1$ 회분이 종결되면 \bar{e}_{k-1} 이 얻어지며 Kalman 필터 (식(3.21))를 이용하여 $\bar{e}_{k-1|k-1}$ 을 구한다. 이 값을 식(3.23), (3.24)에 대입하여 \bar{u}_k 를 계산한다.

3.2.3 RFC 알고리즘 (Second stage)

제어입력 $u_k(t)$ 를 구하기 위해서는 $k-1$ 회분 종료 후 결정된 $\bar{u}_k(t)$ 를 기반으로 k 회분 운전 중에 $y_k(t)$ 가 $r(t)$ 를 추종하도록 $\hat{u}_k(t)$ 를 결정하여야 한다. $\bar{u}_k(t)$ 는 이미 결정된 feed-forward 신호이므로 이 신호가 출력에 기여하는 부분을 제외한 나머지 부분만을 $\hat{u}_k(t)$ 의 함수로 나타내는 모델을 구할 필요가 있다. 이를 위해 $\Delta \bar{u}_k(t)$ 가 기여하는 출력부분을 나타내는 다음의 식을 고려한다.

$$\begin{aligned} a_k(t+1) &= A a_k(t) + B \Delta \bar{u}_k(t) \\ y_{a,k}(t) &= C a_k(t) \end{aligned} \quad (3.25)$$

여기서 식(3.13)과 식(3.25)의 차이를 구하면 추계적인 상태(state) $\tilde{x}_k(t) \triangleq \Delta \bar{x}_k(t) - a_k(t)$ 로 구성된 상태공간 모델이 얻어지며 $\Delta \bar{u}_k(t)$ 가 제거된다.

$$\begin{aligned} \tilde{x}_k(t+1) &= A \tilde{x}_k(t) + K n_k(t) \\ \bar{y}_k(t) &= C \tilde{x}_k(t) + y_{a,k}(t) + \bar{y}_{k-1}(t) + n_k(t) \end{aligned} \quad (3.26)$$

실시간 제어를 위해, 식(3.13)와 식(3.26)를 결합하면 측정치를 포함한 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \tilde{x}_k(t+1) \\ \tilde{y}_k(t+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_k(t) \\ \tilde{x}_k(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \hat{u}_k(t) + \begin{bmatrix} K \tilde{v}_k(t) \\ K n_k(t) \end{bmatrix} \\ y_k(t) - y_{a,k}(t) - \bar{y}_{k-1}(t) &= [C \quad C] \begin{bmatrix} \tilde{x}_k(t) \\ \tilde{x}_k(t) \end{bmatrix} + n_k(t) + \tilde{v}_k(t) \end{aligned} \quad (3.27)$$

식(3.27)의 $\bar{y}_{k-1}(t)$ 는 추정될 수 없는 항목이므로 $k-1$ 회분 종료 후 ILC 계산과정에서 추정되는 $\bar{y}_{k-1|k-1}(t)$ 로 근사한 후

식(3.27)을 다음과 같이 표현한다.

$$\begin{aligned} z_k(t+1) &= \Phi z_k(t) + \Gamma \hat{u}_k(t) + \xi_k(t) \\ y_k(t) - y_{a,k}(t) - \bar{y}_{k-1|k-1}(t) &= \Sigma z_k(t) + \eta_k(t) \end{aligned} \quad (3.28)$$

이제 $\hat{u}_k(t)$ 은 다양한 제어 기법에 의해 결정될 수 있다. 여기서는 다음의 LQG 목적함수를 만족시키는 $\hat{u}_k(t)$ 을 고려하였다.

$$\min_{\hat{u}_k(t)} J_k = E \left\{ \|e_k(N)\|_S^2 + \sum_{t=0}^{N-1} (\|e_k(t)\|_Q^2 + \|\hat{u}_k(t)\|_R^2) \right\} \quad (3.29)$$

식(3.29)에서 공정출력을 $y_k(t) - y_{a,k}(t) - \bar{y}_{k-1|k-1}(t)$ 로 취하면 출력오차는 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\begin{aligned} e_k(t) &= r(t) - y_k(t) \\ &= \{r(t) - y_{a,k}(t) - \bar{y}_{k-1|k-1}(t)\} \\ &\quad - \{y_k(t) - y_{a,k}(t) - \bar{y}_{k-1|k-1}(t)\} \end{aligned} \quad (3.30)$$

따라서 식(3.29)는 출력을 $r(t) - y_{a,k}(t) - \bar{y}_{k-1|k-1}(t)$ 로 추종시키는 servo문제이다. LQG servo 해는 잘 알려져 있으며 [25] 다음의 형태로 주어진다.

$$\hat{u}_k(t) = -L_{\beta}(t) z_k(t|t) + L_{\beta}(t) b(t+1) \quad (3.31)$$

$z_k(t|t)$ 는 다음의 Kalman 필터 식에 의해 실시간에서 계산되어야 한다.

$$\begin{aligned} z_k(t+1|t) &= \Phi z_k(t|t) + \Gamma \hat{u}_k(t) \\ z_k(t|t) &= z_k(t|t-1) \\ &\quad + M(t)(y_k(t) - y_{a,k}(t) - \bar{y}_{k-1|k-1}(t) - \Sigma z_k(t|t-1)) \end{aligned} \quad (3.32)$$

4. 다중 공정 입력의 사용

3장에서 유도한 TBC 기법을 RTP장비에 적용하기 위해서는 먼저 장비의 입출력 변수가 결정 되어야 한다. 이 중 입력변수는 다수의 가열램프를 어떻게 그룹핑(grouping)하느냐에 따라 달라진다. 일반적인 접근은 공정출력과 같은 수의 공정입력을 고려하여 그룹핑을 수행하는 것이다. 이때 그룹핑의 기준이 되는 것으로 공정이 심한 방향성(directionality)을 갖지 않도록, 즉 공정출력이 여러 방향으로 고루 제어될 수 있게 하여 온도 균일성을 달성하기에 적합한 환경을 제공하는 것이다. 공정의 방향성은 공정 이득행렬의 condition number로 그 정도를 측정할 수 있다. 따라서, 여러 가능한 그룹핑 중 condition number가 가장 작은 경우를 택하는

것이 적절한 그룹핑을 이루는 한 방법이다. 또 다른 방법은 공정입력의 수를 출력 보다 크게 취하는, 즉 다중 (redundant) 공정입력을 사용하는 것이다. 이 경우 ILC는 여분의 자유도를 갖는 공정입력을 조절하여 식(3.24)를 만족 시키는 가능한 최선의 온도 균일도를 성취할 것이다. 이때 주의할 점은 증가된 공정입력의 수로 인해 신뢰성 있는 모델링이 어려워 질 수 있고, 제어기가 공정입력을 계산할 때 많은 시간이 소요된다는 사실이다. 대상 공정에 따라 이 부분은 trade-off를 수행할 필요가 있다. 다중 공정입력이 방향성을 완화시키며 제어성능을 향상시킬 수 있다는 것은 이미 실험적으로 입증되었다[26].

5. 낮은 차수 제어기 및 최적의 센서 위치 선정

열전대 웨이퍼를 이용하여 온도제어를 수행하는 경우는 원하는 수만큼의 열전대를 부착하여 사용할 수 있으므로 장비의 성능이 허락하는 한 상당히 정도의 온도 균일도를 얻을 수 있다. 그러나 생산 라인의 RTP 장비에서는 pyrometer를 이용하여 온도를 측정하여야 하므로 온도측정점의 수가 제약을 받고 온도분포의 균일도도 떨어질 수 밖에 없다. 이번 장에서는 열전대 웨이퍼를 이용하여 off-line에서 TBC 를 수행한 결과를 바탕으로 적은 수의 온도 측정점을 갖는 제어기 설계방법을 소개한다. 여기에는 두 가지 문제가 중요하다. 첫째는 측정점을 어디로 선택 하느냐 하는 것, 둘째는 성능저하를 최소화하는 낮은 차수 제어 방법은 무엇이나 하는 것이다.

이 문제를 접근하기 위하여 다음과 같은 제어기 운영 방법을 먼저 전제한다. ILC에 의한 feedforward 제어신호는 열전대 웨이퍼를 이용한 실험에서 구하고 이것을 낮은 차수 제어기에서 그대로 사용한다. 낮은 차수 제어기는 RFC만 실시간에서 계산하며 주어진 feedforward 제어신호와 합하여 최종 제어신호를 출력하도록 한다. 따라서 낮은 차수 제어기도 공정 입력은 열전대 웨이퍼의 경우와 동일하게 구성하는 것을 전제로 한다.

5.1. 적은 수의 측정변수를 이용한 전체 차수 상태추정

RFC는 상태 feedback제어기이며 상태 추정치는 가관 측성이 만족되는 한 Kalman 필터에 출력 측정치를 대입만 하면 얻어지므로 3.2.3절의 RFC 가 그대로 낮은 차수 제어기가 될 수 있다. 다만 식(3.32)의 출력 변수와 관련된 부분들이 pyrometer 측정상황에 맞게 수정되지만 하된다. 수정된 Kalman 필터식은 다음과 같다.

$$z_k(t+1|t) = \Phi z_k(t|t) + \Gamma \bar{u}_k(t) \tag{5.1}$$

$$z_k(t|t) = z_k(t|t-1) + M_c(t)(y_{k,c}(t) - y_{a,k,c}(t) - \bar{y}_{k-1|k-1,c}(t) - \Sigma z_k(t|t-1))$$

여기에 하첨자 c 는 선택된 적은 수의 온도측정을 의미한다.

센서 위치에 따라 상태 예측오차가 달라지므로 이를 이용하여 최적 센서 위치는 상태 예측오차의 공분산 행렬이 최소가 되는 위치로 결정하는 방법을 생각할 수 있다. 이때 정상상태 공분산 행렬을 고려하고 행렬의 크기는 최대 특이치로 평가하면 최적 센서 위치 결정 문제는 다음의 식으로 표현된다.

$$\min_c \bar{\sigma}(P_{\infty}) \tag{5.2}$$

5.2. 비 측정변수의 추론치를 보완한 상태 추정

5.1절에 제안된 방법은 합리적이지만 기대하는 성능을 보이기 위해서는 가관측성과 모델오차가 없다는 것이 전제되어야 한다. 실제로는 모델오차를 무시할 수 없기 때문에 (사실 우리는 상당한 모델오차를 극복할 수 있는 ILC의 이점을 누리려 하므로 굳이 정밀한 모델을 얻으려는 노력을 하지 않았다.) 적은 수의 측정변수에서는 상태추정치가 많은 오차를 보일 가능성이 있다. 이를 보완하기 위하여 열전대 측정점 중 pyrometer로는 측정되지 않는 비측정점을 측정점의 온도 및 기타 공정변수로 추론하고 이를 측정치로 가정하여 원래의 RFC를 사용하는 방법을 생각하였다. 추론은 아래와 같은 선형 회기 모델을 이용하였다.

$$\bar{y}_{uc,k}(t) = H_1 y_{c,k}(t) + H_2 u_k(t) + v(t) \tag{5.3}$$

여기서 아래첨자 c 와 uc 는 각각 pyrometer 측정점과 비측정점을 의미한다. 추론된 공정출력을 이용한 상태의 추정기는 다음과 같다.

$$z_k(t+1|t) = \Phi z_k(t|t) + \Gamma \bar{u}_k(t) \tag{5.4}$$

$$z_k(t|t) = z_k(t|t-1) + M(t) \left(\begin{bmatrix} y_{c,k}(t) \\ \hat{y}_{uc,k}(t) \end{bmatrix} - y_{a,k}(t) - \bar{y}_{k-1|k-1}(t) - \Sigma z_k(t|t-1) \right)$$

6. 실험 장치

6.1. 장치 구성

그림 10은 본 연구실이 보유한 8인치 웨이퍼 급속 열처리 장치의 열공급을 위한 램프 부분과 웨이퍼가 처리되는 챔버 내부를 보인 사진으로, 장비의 기능 면에서는 상업용 장비와 거의 유사하다. 펌프와 웨이퍼 공간을 분리하기 위해 10mm 두께의 quartz window 가 놓여있다. 열 공급을 위한 램프는 선형 타입의 텅스텐-할로겐 램프로 개별 용량은 1kW이며 가로 세로 방향으로 각각 19개씩 구성되어 있다. 램프의 용량과 램프의 개수는 웨이퍼 처리 목적에 따라 달라진다. 램프 및 quartz window 사이에 불활성 가스(예, N₂)를 흘려주는데 그 목적은 램프를 보호하고 quartz window의

온도 상승을 막기 위함이다. 챔버 내부 공급되는 가스종류는 RTP 장치의 처리공정에 따라 달라지는데 annealing을 수행하는 경우에는 N_2 를, oxidation을 수행 할 때는 O_2 를 공급한다. 특히 oxidation 처리를 위한 경우 O_2 의 흐름은 충류를 유지해야 하는데 이는 표면에서 O_2 의 확산과 관련되어 있다. 본 실험에서는 장비의 제한조건으로 가스의 흐름에 관련된 실험은 제외되었다. 또한 실제 양산용 장비에서는 온도 측정을 위해 pyrometer를 사용하나, 본 장치에선 열전대가 부착된 테스트용 웨이퍼를 사용하였다.

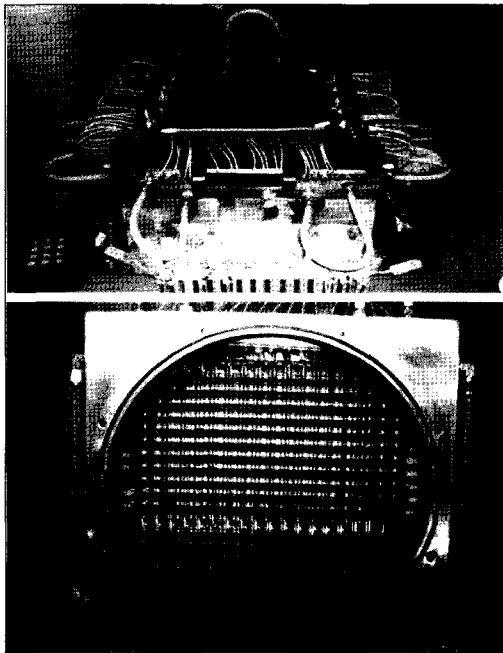


그림 10. 실험에 사용된 Pilot RTP 장비의 외관.

6.2. 인터페이스 구성

위의 그림은 제어 시스템을 구성하기 위한 인터페이스 구성을 보인 것이다. 온도 측정을 위해 K-type의 열전대 8개를 웨이퍼 표면에 부착하였고, 이를 16 bit 분해능을 갖는 고속 A/D 변환보드에 연결하였다. 실제 전력 공급을 모니터링 하기 위해 매 thyristor 마다 전압계와 전류계를 설치하였고 이로부터 계산된 전력을 공정출력으로, TBC의 제어출력을 기준 값으로 하는 slave loop에 PI제어기를 구성하였다. 이는 전력 공급 변동에 따른 외란을 실시간으로 제거하기 위함이다. 챔버 벽에 냉각을 위해 냉각수가 일정한

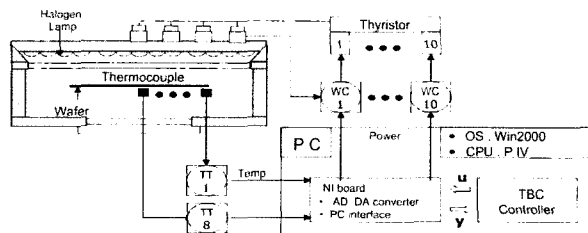


그림 11. Pilot RTP 장비의 시스템 구성도.

유속으로 공급되고 있으며, 이를 위한 유량 제어 시스템은 구성하지 않았다. 본 장치에 사용된 thyristor는 총 10개로 실제 양산 장비에서 사용되는 것을 도입하였고 38개에 해당하는 텅스텐-할로겐 램프 3~4개씩 각 thyristor에 연결되었다. 그룹핑 상태와 embedded 웨이퍼에 부착된 TC는 다음 그림과 같다.

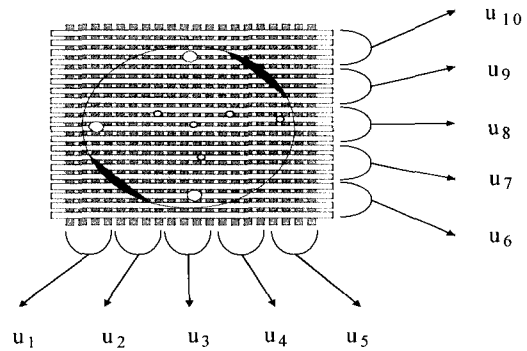


그림 12. 램프의 그룹핑 및 공정입력의 구성.

부착 위치 중 원의 사이즈가 상대적으로 큰 세 군데가 차수 감소 제어 시 선택된 공정출력을 의미 한다.

7. 실험 결과 및 토의

7.1. 모델 인식 실험

실험에 사용된 장비는 MIMO 시스템으로 공정 입출력이 8×10 으로 구성되어 있다. 즉, 공정출력은 열전대 웨이퍼에 부착된 열전대 8개를, 공정입력은 38개의 텅스텐-할로겐 램프가 10개로 그룹핑 되어 있는 thyristor 출력의 의미한다. TBC의 적용을 위해서 이들 입력력 사이의 모델이 요구되며, 모델인식을 위한 실험이 별도로 수행되었다. TBC 제어기의 학습 기능이 모델 오차에 강인하다 할지라도 실시간 외란에 대한 강인성과 수렴 성능을 위해서는 가능한 오차가 적은 모델을 얻는 것이 타당하다. 이를 위해 다음과 같은 모델 인식을 위한 실험 절차를 구성하였다.

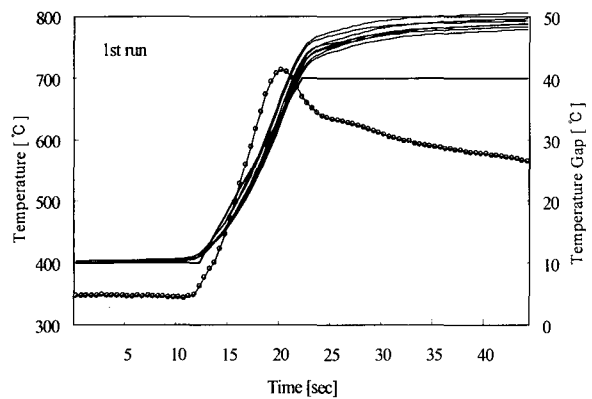
먼저 시스템의 입력과 같은 수의 독립적인 PRBS(Pseudo Random Binary Sequence)[28]를 생성하여 이를 20~50배까지 인장 하였다. 인장의 이유는 PRBS 신호가 모든 주파수 대역에 대해 같은 파워를 가지므로, 공정의 성격상 저주파 대역의 특성이 강하게 표현된 모델을 얻을 수가 없기 때문이다. 샘플링 타임이 0.5초 이고 사용된 입력 데이터 수가 4500개 이므로 실제 모델 인식 실험에 소요된 시간은 40분이 조금 못 미친다. 이렇게 획득된 입출력 데이터는 식(2.16)의 필터 ($f=0.9512$)를 이용하여 신호를 전처리한 후 N4SID를 이용하여 추계적 상태 공간모델로 표현하였다. 이때 상태의 차수는 10으로 한 경우가 가장 안정적이고 신뢰성 있는 결과를 주었다.

7.2. TBC 제어 실험

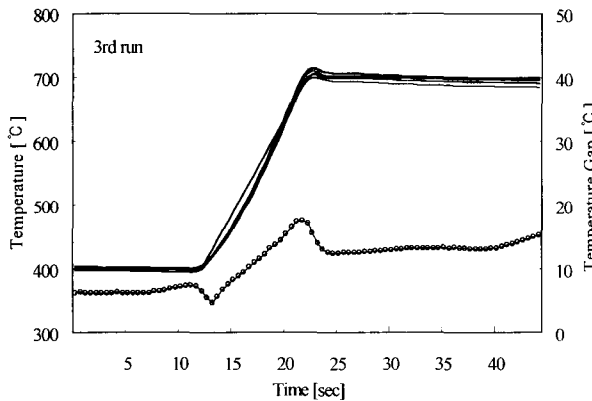
7.2.1 T⁴-모델을 이용한 TBC 성능 및 T-모델과 비교

모든 실험 결과에는 기준체적을 추종하는 웨이퍼 온도들은 좌측 축에, 웨이퍼 온도 사이의 최대 차는 우측 축의 스케일로 읽도록 표현 하였다. 또한 실선은 웨이퍼 온도, 작은 원이 연결된 선은 최대 온도 차를 나타낸다.

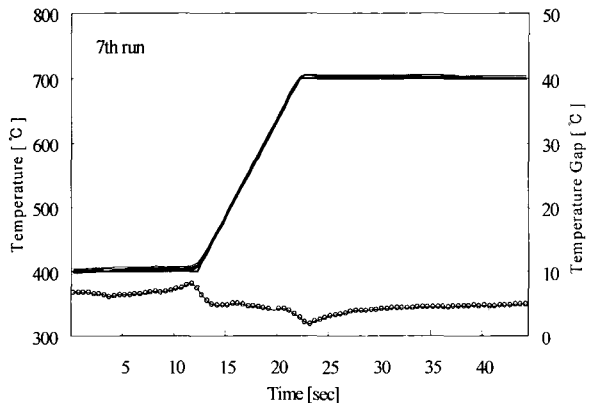
그림 13은 T⁴-모델에 근거한 TBC의 수렴 과정을 나타낸 것이다. 수렴 속도가 빠를 뿐 아니라 추종 궤적이 급하게 변하는 부분에서 과도응답을 보이지 않는 전형적인 학습 제어 특성을 잘 나타내고 있다.



a) 1회분 운전



b) 3회분 운전



c) 7회분 운전(수렴)

그림 13. T⁴-모델에 근거한 TBC의 수렴 성능.

그림 14는 수렴한 상태에서의 최대 온도차로 T⁴-모델과 T-모델의 성능을 비교한 것이다. 700°C 부근에서 T-모델을 이용한 TBC의 최대 온도 차가 8°C 정도 임에 반해 T⁴-모델의 경우는 5°C임을 보인다. 한편 온도상승 구간에서의 성능 차이는 더 현격하게 나타난다. 이 결과는 T⁴-모델이 공정의 물리적 관계를 더 잘 표현하기 때문에 얻어진 것임을 반증하는 것이다.

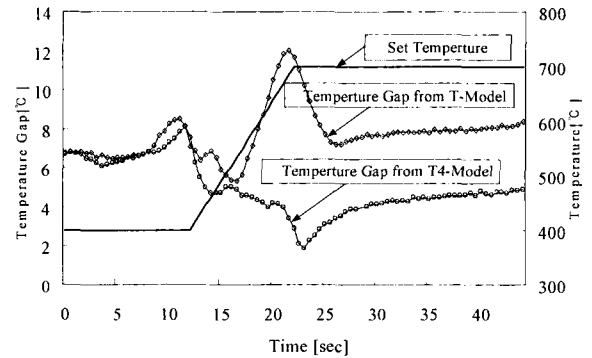


그림 14. 최대 온도 차를 통한 T⁴-모델과 T-모델의 제어 성능 비교.

7.2.2 실 시간 외란에 강인한 TBC

생산 라인의 RTP 장비에 작용하는 두 가지 주요 외란은 챔버 벽면의 온도와 웨이퍼의 초기 온도이다. 챔버 벽면 온도는 라인의 start-up 시와 정상 운전시 크게 차이가 나며 온도 제어에 영향을 미친다. 그림 15는 그림 13의 수렴 이후 챔버 벽면 온도를 낮추어 8회분 운전을 수행 한 결과이다. 챔버 벽면이 냉각된 상태이므로 웨이퍼 온도가 처지는 상황이 발생한다. 그러나 TBC의 RFC 기능이 운전 과정에서 이를 잘 극복해 나가는 결과를 보여준다.

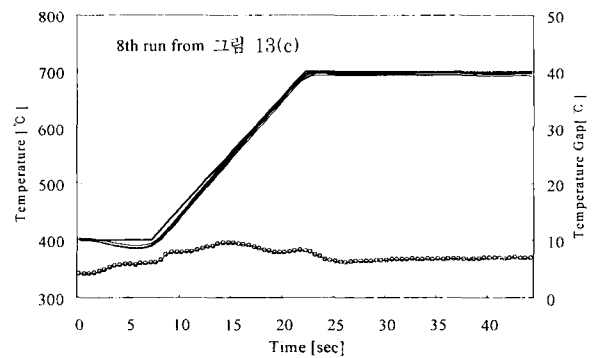
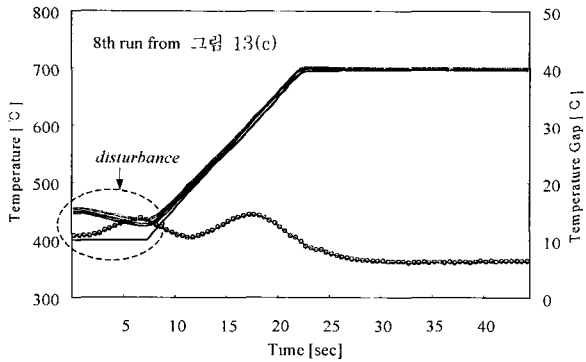
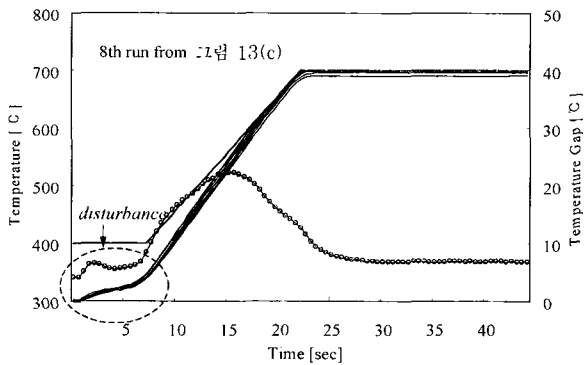


그림 15. 냉각된 챔버에 대응하는 TBC의 성능.

그림 16은 웨이퍼의 초기온도가 정상치에서 벗어난 경우가 외란을 극복하는 TBC의 성능을 보여 준다. 그림 13의 수렴 이후 웨이퍼 초기온도를 450°C, 300°C 두 경우에 대해서 수행하였다. 초기 운전 온도의 차이가 100°C 정도의 심각한 외란도 효과적으로 극복함을 볼 수 있고, 유지구간에서 온도분포의 균일도를 평가할 수 있는 온도차도 수렴했을 때와 같은 수준을 유지하고 있다.



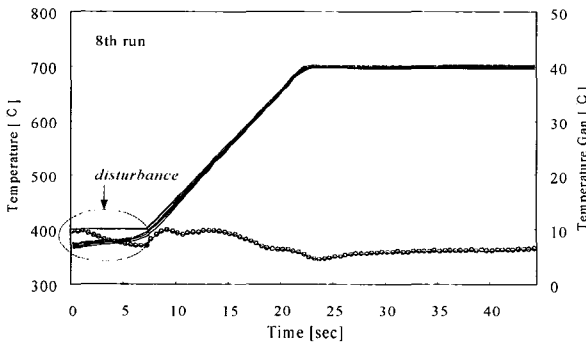
a) 운전 시작 온도가 450°C일 경우



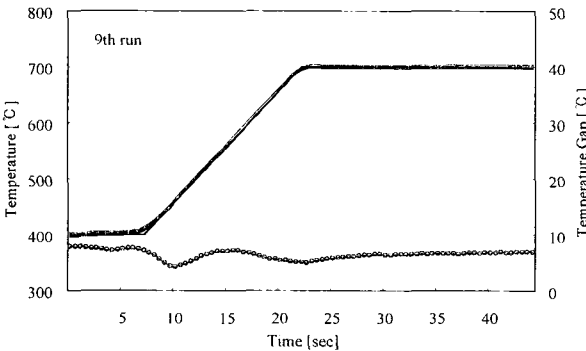
b) 운전 시작 온도가 300°C일 경우

그림 16. 웨이버 초기 온도 변화에 대한 제어 성능.

7.2.3 일시적인 외란에 대한 공정 입력의 영향



a) 8회분에 운전 시작 온도 370°C인 외란 유입



b) 9 회분에서 정상 운전

그림 17. 일시적인 외란이 TBC의 학습에 미치는 영향 (공정 출력).

그림 17은 TBC가 특정 회분에 유입된 실시간 외란을 극복한 뒤 다음 회분의 학습에 영향을 미치지 않음을 보여준다. 7회분까지 수렴 시킨 뒤 (그림 13(c)) 8회분 때에 초기조건 370°C의 실시간 외란을 유입시키고 9회분에서 외란을 제거한 후 그 결과를 보인 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 연속되는 3 회분 모두 제어 성능에는 아무런 문제가 없다. 특히 9회분의 결과(그림 17(b))는 7회분의 결과와 거의 동일하여 8회분 때 유입된 외란이 다음 회분에 거의 영향을 미치지 않았음을 알 수 있다. 이 결과는 공정입력을 살펴 볼 때 더 분명하다. 그림 17은 RFC제어신호를 보인 것이다. 8회분의 신호에서만 외란을 극복하기 위한 변화가 보일 뿐 7, 9 회분에서는 같은 형태를 보인다.

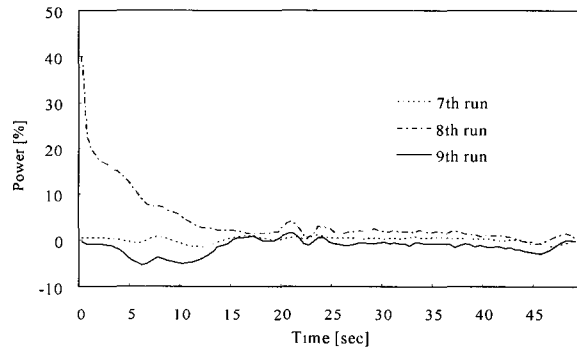


그림 18. 일시적인 외란이 TBC의 학습에 미치는 영향 (공정 입력, 램프 그룹 u1).

7.3. 낮은 차수 제어기

7.3.1 측정 변수만을 제어한 경우

그림 19는 그림 12에 선택된 3점만을 이용하여 TBC를 구성하고 제어를 수행한 결과이다. 제어 점수가 작기 때문에 추종 성능 및 최대 온도 차가 8점을 제어한 경우보다 탁월함을 알 수 있다.

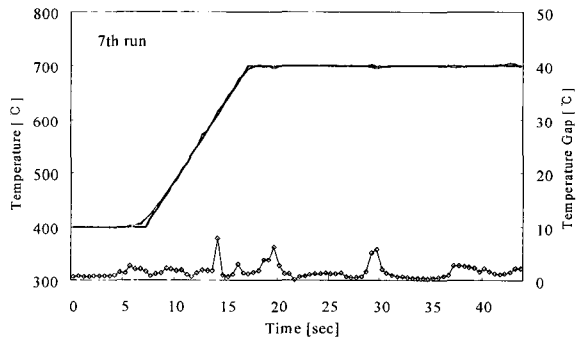


그림 19. 3 점 제어의 결과.

그림 20은 이때 제어되지 않은 나머지 5점의 온도를 함께 보인 것이다. 3점의 온도를 가능한 한 정확히 기준궤적에 맞추려 하였기 때문에 water bed 효과로 오히려 나머지 5점은 기준 궤적에서 심하게 벗어난 것을 볼 수 있다.

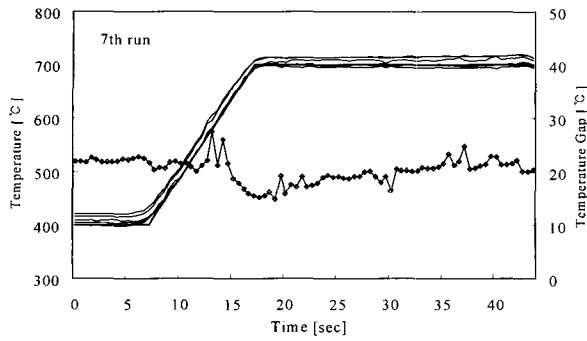
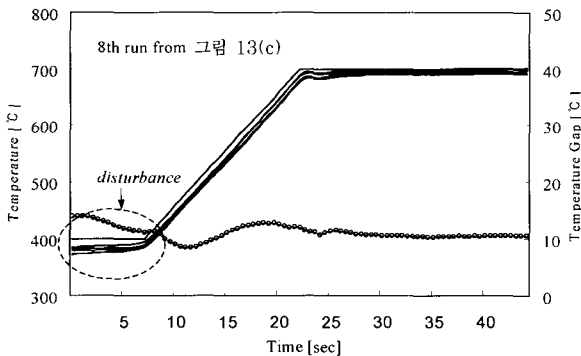


그림 20. 3점 제어 시 나타난 8점의 온도 궤적.

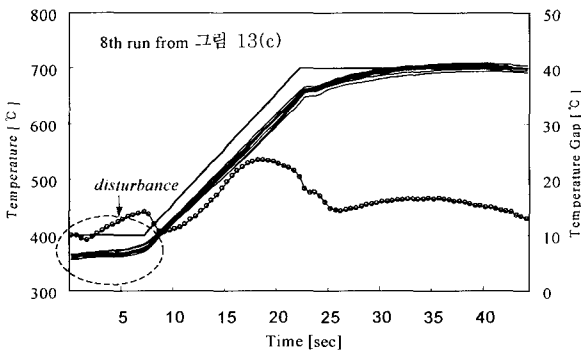
7.3.2 전체 차수 상태추정에 근거한 제어

그림 21은 3점 측정치로 8점 측정에서 얻은 모델의 상태 전체를 추정하고 제어를 수행하여 8점 전체의 응답은 보인 것이다. 초기온도가 380°C인 경우, 제어오차가 전체 온도에 균등하게 배분되며 8점 제어를 수행한 결과와 유사한 성능을 보인다. 그러나 초기 온도가 360°C까지 낮아진 경우는 모델오차에 기인한 상태 추정오차가 커지며 제어 성능이 현저히 저하된다.

그림 22는 위의 결과를 개선하기 위하여 5점의 비측정 온도를 추정하는 선형회귀 모델을 구성하고 이 추정치를 측정치와 합하여 상태를 추정하고 RFC를 행한 결과를 보인 것이다. 웨이퍼의 초기온도가 350°C 및 450°C 까지 벗어난 경우에도 8점 모두를 측정할 경우와 유사한 뛰어난 결과를 보인다.

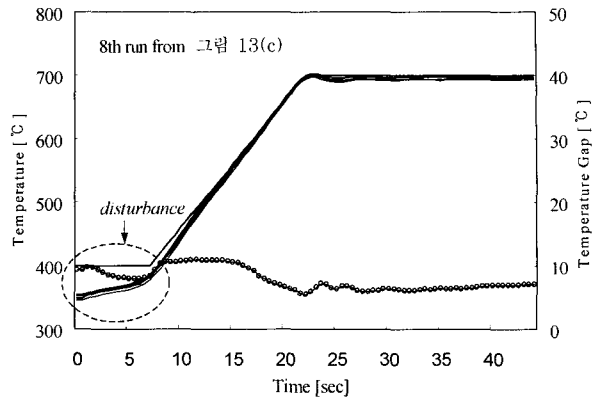


a) 초기 온도 380°C

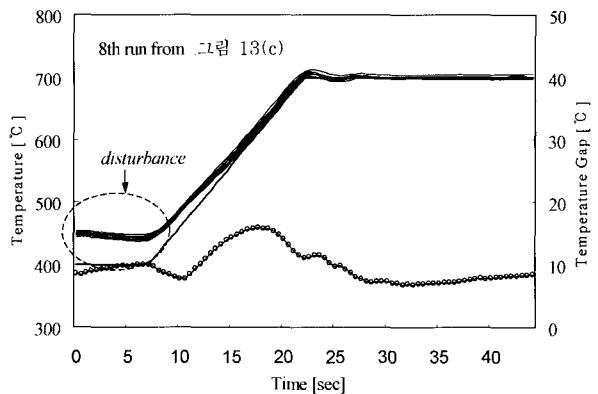


b) 초기 온도 360°C

그림 21. 적은 수의 측정변수를 이용한 상태 추정에 의한 제어 성능.



a) 초기 온도 350°C



b) 초기 온도 450°C

그림 22. 측정변수 및 추론치를 동시에 이용한 상태 추정에 의한 제어성능.

8. 결론

본 연구를 통하여 RTP 장비의 웨이퍼 온도의 추종 성능 및 분포의 균일도를 향상 시킬 수 있는 핵심 제어기술들이 제안되었고, 실험을 통해 그 효용성이 검증 되었다. 그 기술들의 주요 내용은 다음과 같다.

8.1. 물리적 관계에 의한 반 경험적 모델링

RTP 장비의 정상상태 열수지의 물리적 모델을 구성하여 램프출력과 웨이퍼의 표면온도의 4제곱 사이에 선형적 관계가 있음을 밝혔고 이 사실을 동 특성 모델에 도입하였다. 이를 T^4 -모델로 이름 하였다.

8.2. 실시간 외란에 강인한 TBC

제안된 TBC 제어기는 공정입력을 ILC와 RFC로 분리함으로써 학습의 성능을 저하시키지 않으면서 실시간 외란에 대응할 수 있도록 설계 되었고, T^4 -모델 구조에 근거함으로써 비선형성을 극복하였다. 제안된 TBC의 성능은 체계적인 실험 시나리오를 통해 검증되었다.

8.3. 다중 공정입력의 사용

RTP 공정의 방향성을 개선하기 위해 다중 공정입력의 사용이 제안되었고, 더 많은 수의 공정입력을 채택한 경우가 condition number 및 제어성능 면에서 개선됨을 알 수 있었다.

8.4. RTP 장비에 적합한 새로운 제어 전략

충분한 수의 열전대가 부착된 웨이퍼를 대상으로 TBC를 적용하여 수렴시킨 후, 이때 얻은 feedforward 제어신호를 적은 수의 pyrometer로 온도제어를 수행 하는 생산용 웨이퍼의 실시간 LQG 제어기에 결합 시키는 제어전략이 제안 되었다. 일련의 실험을 통해 제안된 제어 전략에 근거한 낮은 차수 제어기의 제어성능이, 열전대 웨이퍼에서 얻어지는 제어성능과 큰 차이가 없음을 확인하였다.

결론적으로, 제안된 기술들은 상업용 RTP 장비의 제어 시스템에 탁월한 도구로 사용될 수 있으리라 기대된다.

참고문헌

1. M. F. Pas and S. D. Pas, Rapid Thermal Processing: When Will it Replace Batch Processing?, *Rapid Thermal & Integrated Processing VI*. Eds. T. J. Riley et al., Materials Res. Soc., 147, 1997.
2. S. Wolf and R. N. Tauber, *Silicon Processing for the VLSI Era, Volume 1 Process Technology*, 2nd ed., alifornia, LATTICE PRESS, 2000.
3. S. Ramamurthy, A. Mayur, D. d. Roover and J. L. Ebert, "Improved Performance of a Fast-Ramp RTA System Through Recipe And Controller Optimization," *Applied Materials Inc.*, <http://www.appliedmaterials.com>
4. N. Kuan, Single, "Wafer Thermal Processing Industry Transition to Single Wafer is Happening Now," *Applied Materials Inc.*, <http://www.appliedmaterials.com>
5. A. J. Mayur and A. Jaggi, "Optimized Spike Anneal Temperature-Time Profiles for Advanced S/D Extension Requirements," *Applied Materials Inc.*, <http://www.appliedmaterials.com>
6. J. P. Holman, *Heat Transfer*, 5th ed., New York, McGraw-Hill, 1981.
7. P. V. Overschee and B. D. Moor, "N4SID: Subspace Algorithms for the Identification of Combined Deterministic Stochastic System," *Automatica*, vol. 30, pp. 75, 1994.
8. S. Arimoto, S. Kawamera and F. Miyazaki, Bettering "Operation of Robots by Learning," *J.*

- Robotic Syst.*, vol. 1(1), pp. 123, 1984.
9. Z. Bien and J. -X. Xu ed, *Iterative Learning Control : Analysis, Design, Integration, and Applications*, Boston, Kluwer Academic Publisher, 1998.
10. "Special Issue on Iterative Learning Control," *Int. J. Control*, vol. 73(10), 2000.
11. K. L. Moore, "Iterative Learning Control An Expository Overview," *Applied & Computational Controls, Signal Processing, and Circuits*, vol. 1(1), pp. 151-241, 1999.
12. K. S. Lee, S. H. Bang and K. S. Chang, "Feedback-Assisted Iterative Learning Control Based on an Inverse Process Model," *J. Process Control*, vol. 4, pp. 77, 1994.
13. J. X. Xu, X. Wang and T. H. Lee, "Analysis of Iterative Learning Control Systems Using Current Cycle Feedback," *Proc. of ACC.*, pp. 1-8, 1995.
14. H. Hashimoto and J. X. Xu, "Learning Control System with Feedback," *Proc. of IEEE Asian Electronic Conference*, Hong Kong, 1987.
15. M. J. Phan, R. W. Longman and K. L. Moore, "Unified Formulation of Linear Iterative Learning Control," *Proc. Of AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting*, Clearwater, FL, AAS00-106, 2000.
16. Y. Chen, C. Wen, J. X. Xu and M. Sun, "An Initial State Learning Method for Iterative Learning Control of Uncertain Time-Varying Systems," *Proc. of the 35th IEEE Conf. on Decision and Control*, Kobe, Japan, 3, pp. 3996-4001, 1996.
17. Y. Chen, and K. L. Moore, "Harnessing the Nonrepetitiveness in Iterative Learning Control," *Proc. of the 41st IEEE Conf. on Decision and Control*, Las Vegas, Nevada, USA, vol. 3, pp. 3350-3355, 2002.
18. C. Chien, "A Discrete Iterativer Learning Control of Nonlinear Time-Varying Systems," *Proc. of the 35th IEEE Conf. on Decision and Control*, Kobe, Japan, pp. 3056-3061, 1996.
19. S. Panzieri and G. Ulivi, "Disturbance rejection of Iterative Learning Control Applied to Trajectory Tracking for a Flexible Manipulator," *Proc. of the 3rd Europ. Control Conf.*, Sept., pp. 2374-2379, 1995.
20. K. S. Lee, J. H. Lee, I. S. Chin and H. J. Lee, "A Model Predictive Control Technique for Batch Processes and its Application to Temperature Tracking Control of an Experimental Batch Reactor," *AIChE J.*, vol. 45(10), pp. 2175-2187, 1999.

21. K. S. Lee, J. H. Lee, I. S. Chin, J. Choi and J. H. Lee, "Control of Wafer Temperature Uniformity in Rapid Thermal Processing Using an Optimal Iterative Learning Control Technique," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 40, pp. 1661-1672, 2001.
22. K. S. Lee, J. H. Lee and W. C. Kim, "Model-Based Iterative Learning Control with a Quadratic Criterion for Time-Varying Linear Systems," *Automatica*, vol. 36, pp. 641-657, 2000.
23. I. S. Chin, S. J. Qin, K. S. Lee and M. K. Cho, "A Two-Stage Iterative Learning Control Technique Combined with Real-Time Feedback for Independent Disturbance Rejection," *Automatica*, in printing, 2003.
24. W. C. Kim, I. S. Chin, K. S. Lee and J. Choi, "Analysis and Reduced-Order Design of Quadratic Criterion-Based Iterative Learning Control Using Singular Value Decomposition," *Comp. and Chem. Eng.*, vol. 24(8), pp. 1815-1819, 2000.
25. F. L. Lewis and V. L. Syrmos, *Optimal Control*, New York, NY: John Wiley and Sons, 1995.
26. M. Cho, S. Joo, S. Won and K. S. Lee, "Multivariable Optimal Learning Control of Wafer Temperatures in a Commercial RTP Equipment," *accepted for publication in Canadian J. Chem. Eng.*, 2003.
27. A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, 2nd ed., New York, McGraw-Hill, 1984
28. L. Ljung, *System Identification: Theory for th User*, 2nd ed., Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1999.

..... 저자약력



《이 광 순》

- 1977년 서울대학교 화학공학과(공학사).
- 1979년 한국과학기술원 화학공학과(공학석사).
- 1983년 한국과학기술원 화학공학과(Ph. D.).
- 1983년~현재 서강대학교 화학공학과 교수.
- 주요 관심분야 : 공정 제어, 반응 공학, 공정 설계, 반복 학습 제어, 시스템 공학.
- E-mail : kslee@ccs.sogang.ac.kr



《조 문 기》

- 1990년 서강대학교 화학공학과 (공학사).
- 1992년 서강대학교 화학공학과 (공학석사).
- 2004년 서강대학교 화학공학과(공학박사).
- 1997년~현재 Conwell batch 사업부 근무 중.
- 주요 관심분야 : 공정 제어, 공정 설계, 반복 학습 제어, Batch Control.
- E-mail : iloveyou@conwell.co.kr



《주 상 래》

- 1994년 한국해양대학교 제어계측 공학과 (공학사).
- 1999년 한국해양대학교 제어계측 공학과 (공학석사).
- 1999년~현재 코닉시스템 반도체 장비 사업부 Semiconductor Equip. Div. Manager.
- 2001년~현재 서강대학교 화학공학과 박사과정 재학 중.
- 주요 관심분야 : 다변수 온도제어, 공정제어, 확률 제어, FDC.
- E-mail : srjoo@kornic.co.kr



《이 용 희》

- 2002년 서강대학교 화학공학과(공학사).
- 2002년~현재 서강대학교 화학 공학과 석사과정 재학 중.
- 주요 관심분야 : 공정 제어, 공정 설계, 반복 학습제어.
- E-mail : abraxase@sogang.ac.kr