

## 진화 연산 알고리즘과 퍼지 논리를 이용한 고속 열처리 공정기의 제어기 설계

### Design of Controller for Rapid Thermal Process Using Evolutionary Computation Algorithm and Fuzzy Logic

황민웅 · 도현민\* · 최진영\*

Min Woong Hwang, Hyun Min Do\* and Jin Young Choi\*

SK 텔레콤 정보기술연구원, \*서울대학교 전기공학부/ERC-ACI/ASRI

#### 요 약

본 논문은 진화 연산 알고리즘과 퍼지 로직을 이용하여 고속 열처리 공정기의 웨이퍼 온도를 제어하는 제어기 설계 방법을 제안한다. 전체 제어기는 기준 온도의 정상 상태의 추종을 위한 앞먹임 정적 제어기, 과도 상태의 추종을 위한 앞먹임 동적 제어기, 그리고 온라인 상에서 모델링 오차나 외란을 극복하기 위한 되먹임 오차 제어기로 구성된다. 앞먹임 제어기들은 퍼지 로직을 이용하여 모든 동작점에서 제어 입력을 구해주는 전역적 비선형 제어기로 구성된다. 각 제어기들의 제어 파라미터는 진화 연산 알고리즘을 이용하여 추정되므로 수학적 모델식을 모르는 경우에도 제어기를 설계할 수 있는 장점이 있다. 끝으로 모의 실험을 통하여 제어기의 성능을 검증한다.

#### ABSTRACT

This paper proposes a controller design method using the evolutionary computation algorithm and the fuzzy logic to control the wafer temperature in rapid thermal processing. First, we design the feedforward static controller to provide the control powers of the lamps for the given steady state temperature. Second, the feedforward dynamic controller is designed for the additional control powers to achieve a given transient response. These feedforward controllers are implemented by using the fuzzy logic to act as a global nonlinear controller over a wide range of operating points. The parameters of these controllers are optimized by using the evolutionary computation algorithm so that it can be used when the mathematical model is not available. In addition, the feedback error controller is introduced to compensate the feedforward controllers when there exist disturbances and modeling errors. The gain of feedback error controller is also obtained by the evolutionary computation algorithm. Through simulations, we verify the proposed control system can give a satisfactory performance.

#### 1. 서 론

고속 열처리 공정기(rapid thermal processing, RTP)는 웨이퍼를 처리하기 위해서 필요한 공정들 즉, 담금질(annealing), 클리닝(cleaning), 산화(oxidation), 화학적 증기 증착(chemical vapor deposition), 질화(nitridation), 에피 성장(epitaxial growth)등을 할 수 있는 웨이퍼 가공 기술이다[1-3]. 이러한 고속 열처리 공정기는 단일 웨이퍼 공정기인데 최근 반도체 공정에서 웨이퍼가 대형화 되고 다품종 소량생산이 요구되면서 주목받기 시작했다. 단일 웨이퍼 공정은 대형 노에서 이루어지던 기존

의 공정에 비하여 웨이퍼 하나하나가 같은 환경 하에서 가공되므로 웨이퍼간의 균일성을 유지하기가 용이하다. 또한 고속 열처리 공정기는 200°C/s의 빠른 가열이 가능하므로 열처리 비용을 줄일 수 있고 몇 가지 공정을 한 곳에서 수 분 내에 처리할 수 있으며[4] 불순물의 재분산을 최소화하는 등의 장점을 가지고 있다[5]. 이러한 장점에도 불구하고 고속 열처리 공정기가 실제 생산과정에서 많이 쓰이지 못하고 있는 것은 빠른 가열로 인하여 생기는 웨이퍼내의 온도의 불균일성 문제를 해결하지 못하고 있기 때문이다[6]. 웨이퍼내의 온도가 균일하지 못하면 웨이퍼는 이로 인한 열적 압력

\*본 연구는 한국과학재단 특정기초연구비(961-0100-001-2) 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

(thermal stress)을 받게 되고 균열(crack)등이 생기게 된다. 이러한 문제를 해결하여 생산수율을 높이는 것이 중요한 문제가 되었고 이에 관한 많은 연구가 이루어졌다[1,2,6-8]. 그러나 이러한 기존 연구들은 수학적 모델식에 의존하여 설계되기 때문에 실제 적용시 모델링 오차에 의해 성능이 보장되지 않을 수 있다.

본 논문에서는 고속 열처리 공정기의 수학적 모델을 모른다는 가정하에 입출력 데이터를 사용하여 제어기를 설계하는 방법을 제안한다. 전체적인 제어시스템은 앞먹임 정적 제어기(Feedforward Static Controller, FSC), 앞먹임 동적 제어기(Feedforward Dynamic Controller, FDC), 되먹임 오차 제어기(Feedback Error Controller, FEC)의 세가지로 구성된다. 앞먹임 정적 제어기는 정상상태의 온도를 유지하기 위한 입력력을, 앞먹임 동적 제어기는 과도상태의 온도를 제어하기 위한 입력력을 만들어낸다. 되먹임 오차 제어기는 온라인 상에서 외란이나 모델링 오차 등을 보상하는 역할을 한다. 이 제어기들의 매개변수는 진화 연산 알고리즘을 이용하여 추정된다.

본문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 고속 열처리 공정기의 구조 및 모델링, 3절에서는 제어기의 전체적인 구조와 각각의 제어기 구성방법에 대하여 기술한다. 4절에서는 모의실험결과를 제시하고 끝으로 5절에서 결론을 맺는다.

## 2. RTP의 구조 및 수학적 모델링

### 2.1 고속 열처리 공정기의 구조

고속 열처리 공정기에는 램프의 배치 방식, 챔버의 수, 온도 측정 방법 등에 따라 다양한 구조가 있으나 기본적인 구조는 그림 1과 같은 형태를 하고 있다. 웨이퍼의 위쪽에 램프가 위치하여 웨이퍼를 가열하고 아래쪽에 온도 측정 장치를 설치하여 웨이퍼의 온도를 측정한다. 웨이퍼와 외부환경과는 석영으로 된 투명한 창을 통해 분리되고 그 내부는 필요한 가스 등으로 채워진다. 다양한 구조의 변형은 주로 램프의 배열 방식에서 이루어졌는데 초기에 일자형 램프를 웨이퍼의 위쪽과 아래쪽에 서로 직각이 되도록 배열하는 방식[2]에서 둥근 형의 램프를 한쪽 면에 벌집모양으로 여러 개 배열하는 방식, 3중링으로 램프를 묶어서 각각의 전력을 제어하는 방식[1,6,9,10], 6각형 형태로 램프가 웨이퍼를 둘러싸는 방식[11], 4개의 링구조를 사용하는 방식[12]까지 다양한 구조가 제시되었다. 그리고 웨이퍼의 온도를 측정하는데 있어서 써머커플러(thermocoupler), 고온계(pyrometer), 음향센서(acoustic sensor)등 다양한 방법이 제시되고 있다[13,14].

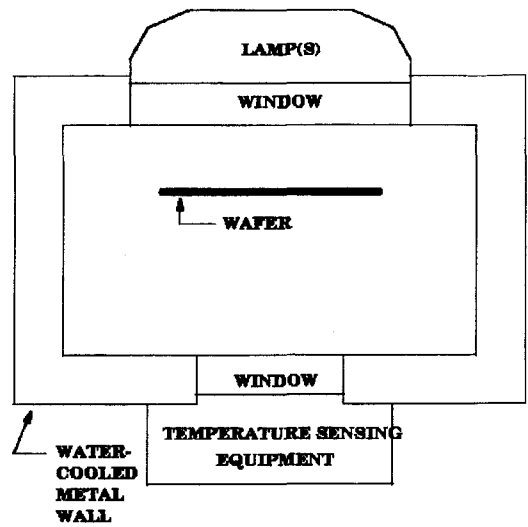


그림 1. 고속 열처리 공정기의 일반적인 구조.

Fig. 1. General structure of rapid thermal processing.

본 논문에서 사용한 고속 열처리 공정기는 스탠포드 대학에서 개발한 고속 열처리 공정기[1]를 기반으로 하며 웨이퍼를 20개의 조각으로 분할(2.2절 참조)하여 각각의 온도를 측정하여 광원의 양을 조절할 수 있다. 전체적인 구조와 램프의 배치 구조는 그림 2와 같다. 챔버의 위쪽 면에는 수십 kW의 전력을 소모하여 강한 빛을 내는 텅스텐-할로겐 램프군이 있어 웨이퍼의 가열에 충분한 에너지를 공급한다. 램프와 웨이퍼 사이는 석영으로 만들어진 투명한 창(quartz window)으로 분리되어 있고 웨이퍼는 3개의 지지대를 통해 고정되어 있으며 지지대는 웨이퍼의 온도 균일도를 위하여 회전 운동을 한다. 챔버 내에는 대기나 다른 가스 등으로 채워져 외부와 분리되어 웨이퍼만 내장하게 되어 있고, 챔버의 아래 부분에는 웨이퍼의 방사파장을 측정하여 온도를 알 수 있는 고온계(pyrometer)와 같은 온도 측정 장치가 있다.

### 2.2 고속 열처리 공정기의 수학적 모델링

이 절에서는 위에서 제시한 중심축 대칭형 고속 열처리 공정기 내의 웨이퍼의 열전달 모델을 기술한다. 웨이퍼를 원통 좌표계로 나타내고 열전달 방정식을 수치 근사화함으로써 식을 나타낸다[1-3,5]. 열전달 방정식을 근사화하기 위해 웨이퍼를 N개의 중심이 같은 원으로 분할하여 이산화시킨다. 즉, 하나(중심축을 포함하는 원)는 원통이 되며 나머지는 중심이 빈 고리 모양이 된다. 그리고 각 웨이퍼 조각 내에서는 온도가 균일하다고 가정한다. 이때 하나의 웨이퍼 조

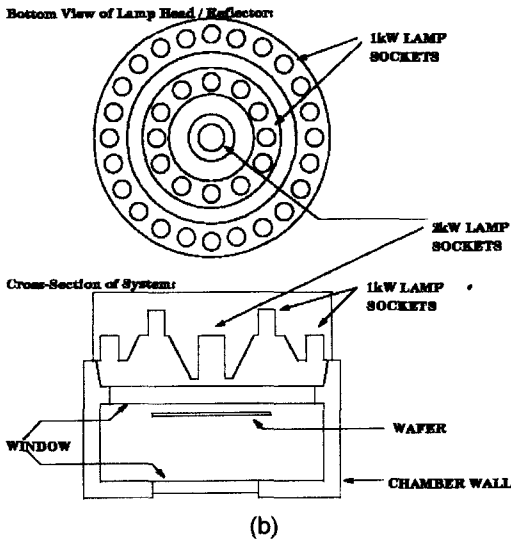
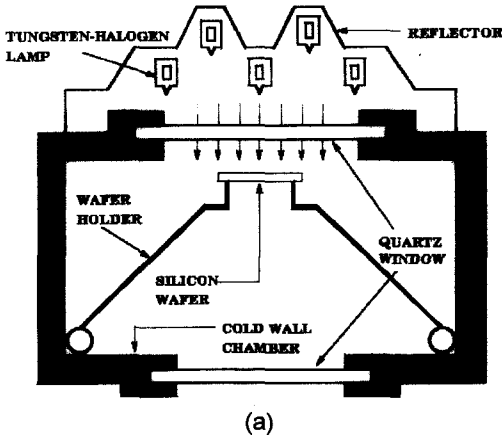


그림 2. (a) 스탠포드에서 제안한 고속 열처리 공정기의 전체 구조 (b) 램프의 배치구조.  
Fig. 2. (a) Overall structure of RTP proposed by Stanford (b) Lamp structure.

각이 얻는 순열류량은 웨이퍼에 의해 방출되는 방사열, 웨이퍼가 흡수하는 램프의 방사열, 웨이퍼 내부의 전도열, 웨이퍼와 주위 가스 사이의 대류열, 그 밖의 외란열등의 합으로 나타나는데 이를 수식적으로 나타내면 다음과 같다.

$$q = K^{rad} T^4 + K^{cond}(T)T + K^{conv} \begin{pmatrix} T_{gas} \\ \vdots \\ T_{gas} \end{pmatrix} + LP + q^{wall} + q^{dist}, \quad (1)$$

$$\dot{T} = C^{-1} q. \quad (2)$$

여기서  $q=[q_1 \dots q_N]$ ,  $T=[T_1 \dots T_N]$ 는 웨이퍼의 열류량과 온도,  $P=[P_1 \dots P_M]$ 는 램프 파워 입력,  $q^{wall}$ 는 챔버의 벽에서 나오는 열류량을 의미하며,  $q^{dist}$ 는 모델링 오차를 보상하기 위한 항이다.  $T_{gas}$ 는 웨이퍼 주위의 가스 온도,  $K^{rad}$ ,  $K^{cond}$ ,  $K^{conv}$ 은 방사열, 전도열, 대류열을 나타내기 위한 계수들이고  $L$ 은 공정기내에서 램프와 웨이퍼, 챔버간의 뷰 팩터에 의해 결정되고  $C = diag[m_1 C_p(T_1) \dots m_N C_p(T_N)]$ 는 웨이퍼의 질량과 비열에 의해 결정된다.

본 논문에서는 고속 열처리 공정기의 수학적 모델로부터 입출력 데이터를 생성하여 제어기를 설계한다.

### 3. 고속 열처리 공정기의 제어기 설계

고속 열처리 공정기 내의 웨이퍼의 온도 제어에서 달성하고자 하는 목표는 두 가지이다.

- 제조 공정에서 정해진 기준 온도 곡선의 정확한 추종
  - 웨이퍼의 위치에 상관없는 균일한 온도 분포
- 앞의 조건은 여러 장의 웨이퍼에 대해 같은 처리 과정을 되풀이하더라도 항상 같은 특성을 갖는 웨이퍼를 만들기 위한 것이고, 뒤의 조건은 하나의 웨이퍼 내의 각 셀(cell)들이 모두 같은 특성을 갖게 하여 수율을 극대화하기 위한 것이다.

#### 3.1 제어기의 전체 구조

고속 열처리 공정기 내의 웨이퍼의 열전달 모델은 비선형성이 강하고 측정이 요구되는 매개변수가 많아, 정확한 모델이 요구되고 기본적으로 선형 시스템에 적용되는 기존의  $LQG/LTR$ 이나  $H_\infty$ 와 같은 제어 방법을 적용하기가 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 모델과 실제 고속 열처리 공정기 사이에 오차가 존재하거나 모델을 모르는 경우에도 주어진 실험 자료를 바탕으로 제어기를 구성할 수 있고, 또한 모델 오차나 외란 입력 등을 보상할 수 있도록 하는 지능 제어 기법을 제안한다.

제어 시스템의 전체 구조는 그림 3과 같으며 두 개의 앞먹임 비선형 제어기와 하나의 되먹임 선형제어기로 구성되어 있다. 이때 전체 제어 입력  $P[n]$ 은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P[n] = P^{ss}[n] + P^{dyn}[n] + P^{fb}[n]. \quad (3)$$

여기서, 인덱스  $n$ 은 이산화된 시간을 나타내는 것으로 샘플링 시간을  $\Delta$ 로 잡고, 초기 시각이  $t_0$ 인 경우에  $P[n]$ 은  $t_0 + n\Delta \leq t \leq t_0 + (n+1)\Delta$  동안 가해지는 제어 입력을 의미한다.

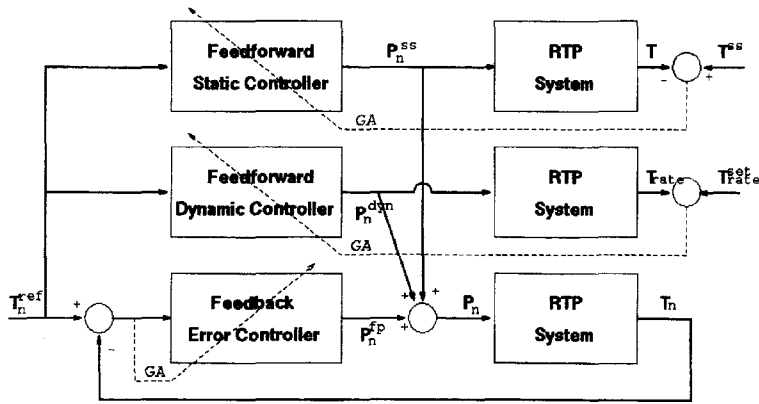


그림 3. 제어기의 전체적인 구조.  
Fig. 3. Overall structure of controller.

$P_n^{SS}[n]$ 은 앞먹임 정적 제어기(feedforward static controller, FSC)로부터 구해지는 램프의 전력으로서, 주어진 기준 온도  $T^s$ 에 웨이퍼의 온도가 정상 상태에서 최소의 온도 오차 분포를 가지고 도달하도록 한다.  $P_n^{dnp}[n]$ 은 앞먹임 동적 제어기(feedforward dynamic controller, FDC)로부터 구해지는 추가적인 전력으로서, 기준 온도 궤적이 주어졌을 때 과도 상태에서 웨이퍼의 온도 궤적이 기준 온도 궤적을 따라가도록 하기 위하여 온도 변화율을 조정하는 역할을 한다.  $P_n^f[n]$ 은 모델링 오차와 외란 입력 등이 있을 경우 온라인 상에서 이를 보상하여 주는 제어입력으로 되먹임 오차 제어기(feedback error controller, FEC)에 의해 구해진다.

각각의 제어기의 제어 매개 변수는 기준 온도와 고속 열처리 공정기 내의 웨이퍼의 온도를 바탕으로 진화 연산 알고리즘을 이용하여 최적의 값을 갖도록 추정된다. 앞의 제어기 구조에서 앞먹임 제어기를 둘로 분리한 것은 진화 연산 알고리즘을 효율적으로 적용하기 위한 것이다. 둘을 합칠 경우 학습시켜야 할 궤적 설정이 어렵고 많은 학습 궤적을 사용해야 한다. 따라서 제어기설계에 많은 시간이 소요되게 된다. 또한 정상상태부분과 과도상태부분을 동시에 고려하여 적합도 함수를 설정해야 하므로 각각의 부분에 알맞은 적합도 함수를 정할 수 없게 되어 비효율적이 되며 최적의 해를 찾는 데 어려움이 생기게 된다. 여기서 사용하는 진화 연산 알고리즘의 기본 절차는 다음과 같다[15].

1. 임의의 2진 문자열로 나타나는 개체(individual)로 개체군(population)을 구성한다. 각각의 개체는 해의 후보가 된다. 난수를 이용하여 임의로 개체군을 초기화한다.

2. 각각의 개체에 대하여 목적 함수를 기초로 하여 적합도를 계산한다.
3. 적합도에 근거하여 옛 개체군으로부터 좋은 해를 선정하여 새로운 개체군을 구성한다.
4. 더 좋은 해를 얻기 위하여 새로운 개체군에 대하여 교차 연산자(crossover operator)나 돌연변이 연산자(mutation operator)를 적용한다.
5. 만족할 만한 결과가 얻어질 때까지 2-4의 과정을 반복한다.

그림에서 점선으로 나타난 고속 열처리 공정기는 오프라인 상에서 제어기의 매개 변수를 구하기 위한 것을 의미한다. 그리고, 진화 연산 알고리즘을 이용하여 추정된 제어 매개 변수들의 최적값을 바탕으로 퍼지 논리를 이용하여 제어기를 구성한다. 구체적인 제어기의 설계과정은 각각 제어기별로 이후의 절에서 자세히 기술한다.

### 3.2 앞먹임 정적 제어기의 설계

앞먹임 정적 제어기의 역할은 웨이퍼의 정상 상태 온도가  $T^s$ 가 되도록 하는 램프 전력  $P^s$ 를 구하는 것이다. 즉,  $P^s$ 를 고속 열처리 공정기의 램프에 가하면, 웨이퍼가 정상 상태에서 최소의 온도 오차 분포를 가지고  $T^s$ 에 도달해야 한다. 이는 고속 열처리 공정기의 제어 목표 중 두 번째인 웨이퍼의 모든 위치에서 균일한 온도 분포를 유지하기 위해서이다.

$P^s$ 를 구하기 위하여 앞서 제시한 고속 열처리 공정기에 대한 수학적 모델식 (1)과 (2)를 생각해 보자. 웨이퍼의 온도가 정상 상태에 있으면 더 이상 온도의 변화가 없으므로 식 (2)의 좌변이 0이 되어 결국  $q=0$ 이 된다. 즉,  $P^s$ 를 구하기 위해서는 식 (1)의 좌변을 0으로 만드는  $P$ 를 찾으려 한다. 이 전력 벡터  $P^s$ 를

모델에 가하면 웨이퍼가 복사, 전도, 대류 등에 의해서 고속 열처리 공정기 내의 기체나 챔버 등으로 잃는 열류를 입력 열류  $LP$ 를 통하여 상쇄시켜 더 이상의 웨이퍼 온도의 변화가 없이 원하는 온도  $T^{ss}$ 를 유지하게 된다.

하지만, 위 식에서 벡터  $T$ 의 차원이  $P$ 의 차원보다 커서 변수의 개수보다 식의 수가 많고 또한 비선형 식이기 때문에 식 (1)의 좌변을 0으로 만드는 해  $P^{ss}$ 가 유일하게 결정되지 않는다. 따라서, 특정한 온도  $T^{ss}$ 가 주어졌을 때 식 (1)의 좌변을 0에 가깝도록 하여 오차가 최소가 되도록 하는 최적의 해를 구할 수밖에 없다. 스텐포드의 Norman[1]은 이 수학적 모델에 선형 계획법(linear programming)을 적용시켜  $P^{ss}$ 를 구하였다. 그러나, 모델을 구하는데 많은 가정이 들어가 있고, 고속 열처리 공정기의 매개 변수들의 값이 정확하지 않으므로 식을 이용하여 구한  $P^{ss}$ 를 실제의 고속 열처리 공정기에 적용시켰을 경우에는 오차가 발생할 수 있다.

지금까지는 수학적인 모델이 주어졌을 때 이를 이용하여  $P^{ss}$ 를 구하는 것을 살펴보았다. 하지만, 위와 같은 모델 식을 이용하지 않고 고속 열처리 공정기의 입출력 데이터를 이용하여  $P^{ss}$ 를 구할 수 있다. 본 논문에서 제어하고자 하는 웨이퍼의 온도의 범위는 800K에서 1600K인데, 이 범위에 속하는 모든 온도에 대해 연속적으로  $P^{ss}$ 를 구하는 것은 불가능하다. 따라서  $\delta$ 만큼의 간격으로 이산화된  $\alpha$ 개의 기준 온도  $T_i^{ss}(1 \leq i \leq \alpha)$ 에 대하여 전력 벡터  $P_i^{ss}(1 \leq i \leq \alpha)$ 를 구한다. 진화 연산 알고리즘을 적용시켜  $P_i^{ss}$ 를 구하는 과정은 다음과 같다.

우선 구하려고 하는 제어 매개 변수인  $P_i^{ss}$ 를 2진 문자열로 코딩하여 개체를 만든다. 이 개체들이 실제로 나타내는 전력의 범위는 고속 열처리 공정기의 램프에 의하여 결정이 되는데 본 논문에서 사용한 모델은  $P^{min}=[0 \ 0 \ 0]^T \text{ kW}$ ,  $P^{max}=[2 \ 10 \ 35]^T \text{ kW}$ 로 주어진다 [1]. 최적의 램프전력을 구하기 위하여 필요한 적합도 함수는 웨이퍼의 온도가 정상 상태로 수렴하였을 때의 기준 온도와의 차이이고 이를 최소화시키는 것이 목적 함수이다. 즉, 다음 벡터들의 차의 크기(norm)를 이용하여 적합도 함수를 정의한다.

$$||T^{ss} - T_i^{ss}||. \tag{4}$$

그리고 제어하고자하는 범위의 임의의 온도  $T_i^{ss} < T^{ss} < T_{i+1}^{ss}(1 \leq i < \alpha)$ 에 대하여 제어 입력  $P^{ss}$ 를 구하기 위해서 다음과 같은 퍼지 논리를 사용하여 전역적 비선형 제어기를 구성한다.

$$f_{i(T)} = \exp\left(-\frac{(T - T_i^{ss})^2}{\Delta^{ss}}\right), \tag{5}$$

$$P^{ss}[n] = \frac{\sum_{i=0}^{\alpha} P_i^{ss} f_i(T^{ref}[n])}{\sum_{i=0}^{\alpha} f_i(T^{ref}[n])}. \tag{6}$$

여기서  $T^{ref}[n]$ 은 이산화된 시간  $n$ 에서 웨이퍼가 따라 가야 할 기준 온도 궤적을 나타낸다. 식 (6)에서 각각의 퍼지 소속 함수(fuzzy membership function)는  $T_{i,ss}$ 를 중심으로 하고  $P_i^{ss}$ 를 중심에서의 전력 벡터 값으로 하는 방사형 기저 함수가 되고,  $\alpha$ 가 충분히 큰 값을 가지면 원하는 제어 범위에서 효과적으로 동작하는 제어 입력을 얻을 수 있다.

실제 설계에서는  $\Delta^{ss}$ 를 20K로 정하여  $\alpha=41$ 이 되도록 하였다. 즉, 각 기준온도에서 최적의 전력을 구하기 위하여 41번의 진화 연산 알고리즘을 실행시키게 된다. 각각의 진화 연산 알고리즘은 다음의 진화 매개 변수를 가지며 한번의 실행에 약 4분 정도가 소요되었다.<sup>1)</sup>

- 개체군의 크기 : 50
- 최대 진화 세대 : 1000
- 돌연변이 연산자 확률 : 0.05
- 교차 연산자 확률 : 0.2

### 3.3 앞먹임 동적 제어기의 설계

앞에서 구한 앞먹임 정적 제어기에 의한 제어 입력을 고속 열처리 공정기에 적용시키면 웨이퍼의 온도는 정상 상태에서 원하는 온도로 수렴하게 된다. 하지만, 정상 상태로 수렴하는 시간이 오래 걸리므로 온도의 상승, 하강 등이 복합적으로 섞여 있는 기준 온도 궤적을 빨리 추종할 수가 없다. 즉, 정확한 온도의 변화율을 얻기 위해 기준 온도 궤적의 변화율에 의존하는 제어 입력을 가해야 웨이퍼의 온도를 효과적으로 제어할 수 있는 것이다.

이를 위하여  $n$ 번째 시간에서의 기준 온도  $T^{ref}[n]$ 와 기준 온도 궤적의 변화율  $RT^{ref}[n]$ 에 의존하는 추가적인 제어 입력  $P^{dyn}[n]$ 을 고려한다. 여기서 기준 온도 궤적의 변화율  $RT^{ref}[n]$ 은 식 (7)로 표현할 수 있다.

$$RT^{ref}[n] = \frac{T^{ref}[n+1] - T^{ref}[n]}{\delta}. \tag{7}$$

1) 모든 모의 실험의 샘플링 시간은 0.01초이며, 고속 열처리 공정기 시뮬레이터는 SUNOS 4.1.3을 운영체제로 하는 SUN SPARC 20에서 C++프로그래밍 언어를 사용하여 구현되었다.

$P^{dm}[n]$  역시 앞먹임 정적 제어를 설계할 때 사용 하였던 진화 연산 알고리즘과 퍼지 논리를 이용하여 구한다. 3.2절에서와 마찬가지로 제어하고자 하는 웨 이퍼의 온도범위 800K에서 1600K 사이의 모든 온도 에서 연속적으로  $P^{dm}[n]$ 를 구하는 것은 불가능한 일 이다. 따라서  $\Delta^{dm1}$  만큼의 간격을 갖는  $\beta$ 개의 이산화 된 기준 온도에 대하여 생각하기로 한다. 온도의 변화 율  $RT$  역시 연속적인 양이므로 다음과 같이 이산화시 킨다. 온도 변화를  $RT$ 는 시스템의 한계에 의하여 그 범위가 결정되며 현재의 웨이퍼의 온도에 따라서 달 라지게 된다. 따라서 고속 열처리 공정기 내의 웨이퍼 의 현재 온도에 따른 최소  $RT$ 와 최대  $RT$ 를 먼저 다 음과 같이 구한다. 즉, 웨이퍼의 초기 온도를 제어 온 도 범위 중 가장 낮은 온도인 800K로 둔 다음 램프에 가할 수 있는 가장 큰 전력을 가함으로써 각 온도에서 얼마나 빠른 온도 변화율을 가지고 웨이퍼의 온도 를 올릴 수 있는가를 살펴볼 수 있다. 그리고 이를 바탕으로 각 온도에서 낼 수 있는 최대 순간 온도 상승 변화율을 계산할 수 있다. 비슷한 방법으로 웨이퍼의 초기 온도를 제어 범위 중 가장 높은 온도인 1600K 에 두고 모든 램프를 꺼서 전력을 가해주지 않으면 각 온도에서 가장 빠른 온도 냉각 변화율을 구할 수 있다. 예를 들면 온도가 1000K일 때 이 고속 열처리 공정기의  $RT$ 의 범위는  $-50K/s \leq RT \leq 350K/s$  이다. 즉, 웨이퍼의 온도가 1000K일 때는 초당 350K 이상 으로 온도를 올릴 수가 없고 초당 50K 이상으로 온도를 내릴 수가 없다. 따라서  $RT$ 에 대하여도 기준 온도  $T$ 에서와 마찬가지로 최대값과 최소값 사이를  $\Delta^{dm2}$  만 큼의 간격으로 이산화한  $\gamma$ 개의 기준 온도 변화율만을 고려한다. 기준 온도 변화율  $RT_i (1 \leq i \leq \gamma)$ 와 기준 온도  $T_j (1 \leq j \leq \beta)$ 에 대한  $P_{ij}^{dm}$ 를 진화 연산 알고리즘을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

웨이퍼의 초기 온도를  $T_j$ 로 두고  $RT_i$ 를 얻기 위해 가능한 전력 벡터들로 개체를 구성한다. 구성된 개체 들을 고속 열처리 공정기에 적용시켜  $\delta t$ 만큼의 시간 이 흐른 후의 온도가  $T_j + RT_i \cdot \delta t$ 가 되도록 하는 최적 의 전력 벡터를 찾는다. 즉, 적합도 함수는 현재의 웨 이퍼 온도  $T_j$ 에서 기준 온도 변화율  $RT_i$ 와 코딩된 램 프의 전력을 고속 열처리 공정기에 가했을 때에 얻는 웨이퍼의 온도 변화율  $RT$ 의 차로 정의한다.

$$|RT - RT_i|, T = T_j. \tag{8}$$

이와 같은 과정을 모든  $RT_i (1 \leq j \leq \gamma), T_j (1 \leq j \leq \beta)$ 에 대하여 수행한 뒤, 퍼지 논리를 사용하면 기준 온 도와 기준 온도 변화율 사이의 온도와 온도 변화율에 대한  $P^{dm}$ 을 식 (9), (10)를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$g_{ij}(RT, T) = \exp\left(-\frac{(RT_i - RT)^2}{\Delta^{dm2}}\right) \exp\left(-\frac{(T_j - T)^2}{\Delta^{dm1}}\right), \tag{9}$$

$$P^{dm}[n] = \frac{\sum_{i=0}^{\beta} \sum_{j=0}^{\gamma} P_{ij}^{dm} \cdot g_{ij}(RT^{ref}[n], T^{ref}[n])}{\sum_{i=0}^{\beta} \sum_{j=0}^{\gamma} g_{ij}(RT^{ref}[n], T^{ref}[n])}. \tag{10}$$

식 (10)은 2차의 퍼지 소속 함수를 ( $RT, T$ )를 입력으 로 하는 공간에 세운 것으로, 각각의 퍼지 소속 함수 는 그 중심이 ( $RT_i, T_j$ )이며 중심에서의 값이  $P_{ij}^{dm}$  인 방사형 기저 함수이다.

실제 설계에서  $\beta$ 는 앞먹임 정적 제어기의 설계시 와 동일하게 41로 하였고 기준 온도 변화율  $RT_i$ 는 -60K/s 에서 0K/s 사이에서는 10K/s의 간격으로, 0K/s 에서 200K/s 사이에서는 20K/s의 간격으로 이산화 하여  $\gamma$ 는 17로 하였다. 따라서 모두  $41 \times 17$  번의 진 화 연산 알고리즘을 실행시키게 된다. 각각의 진화 연 산 알고리즘은 다음의 진화 매개 변수를 가지며 한번 의 실행은 약 10초 정도가 걸렸다.

- 개체군의 크기 : 20
- 최대 진화 세대 : 200
- 돌연변이 연산자 확률 : 0.05
- 교차 연산자 확률 : 0.2

### 3.4 뒤먹임 오차 제어기의 설계

3.2, 3.3절에서  $P^{sn}[n], P^{dm}[n]$ 을 주어진 기준 온도 궤적에 대하여 계산을 하였다. 그러나, 이 제어 입력 들은 단지 오프 라인에서 계산된 개루프 제어 입력이 므로 실제 고속 열처리 공정기에서 존재할 수 있는 다양한 외란의 영향에 대하여서는 대처할 수 없다. 따 라서 고속 열처리 공정기에 실제 적용할 때 온라인 상에서 그 오차를 제거해 줄 수 있는 뒤먹임 오차 제 어기가 필요하다.

앞먹임 정적 제어기와 앞먹임 동적 제어기에 의하 여 각 동작점마다 1차적으로 제어 입력이 구해졌으므 로 변화량에 대해서만 고려하여 식 (12)의 간단한 뒤 먹임 선형 오차 제어를 사용하였다. 즉, 웨이퍼의 온도와 기준 온도 사이의 오차가 주어졌을 때 비례 이득  $G$ 를 이용하여  $P^{fb}[n]$ 를 계산한다.

$$T^{ref}[n] = [T_1^{ref}[n] T_2^{ref}[n] \cdots T_N^{ref}[n]], \tag{11}$$

$$P^{fb}[n] = G \cdot (T[n] - T^{ref}[n]). \tag{12}$$

여기서 비례 이득  $G$ 를 구하는데 역시 진화 연산 알고 리즘을 이용할 수 있다. 즉, 비례 이득  $G$ 의 요소값들 로 개체를 구성한다. 이 경우 적합도 함수는 모의 실

험 동안의 기준 온도 궤적과 웨이퍼 온도의 차의 합으로 정의한다.

$$\sum_n ||T^{ref}[n] - T[n]|| \quad (13)$$

진화 연산 알고리즘은 다음의 진화 매개 변수를 가지며 한번의 실행은 약 2시간 정도가 걸렸다.

- 개체군의 크기 : 20
- 최대 진화 세대 : 200
- 돌연변이 연산자 확률 : 0.05
- 교차 연산자 확률 : 0.2

#### 4. 모의 실험

##### 4.1 시뮬레이터 사양

시뮬레이터 사양은 [1]에서 사용한 것과 동일하게 구성하였다. 웨이퍼의 직경(2R)은 100.8 mm(4인치 웨이퍼), 두께는 0.675 mm, Si의 밀도는  $2330 \text{ kg m}^{-3}$ , 웨이퍼의 방사율은 0.6으로 가정하였다. 웨이퍼는 20개의 고리모양으로 등분되어 각각의 조각에서 온도 측정이 이루어진다. 챔버의 직경은 260 mm, 높이는 150 mm이고 웨이퍼의 바닥면과 챔버의 바닥과는 100 mm의 간격이 있다. 챔버 내부 벽의 방사율은 모두 0.5이고 단 램프가 있는 부분은 램프를 흑체로 가정하여 방사율을 1로 보았다. 램프는 3중령형태로 원의 안쪽부터 최대 파워가 2 kW, 10 kW, 35 kW로 하였고 챔버의 나머지 내부 벽은 항상 300K를 유지하도록 하였다.

##### 4.2 모의 실험 결과

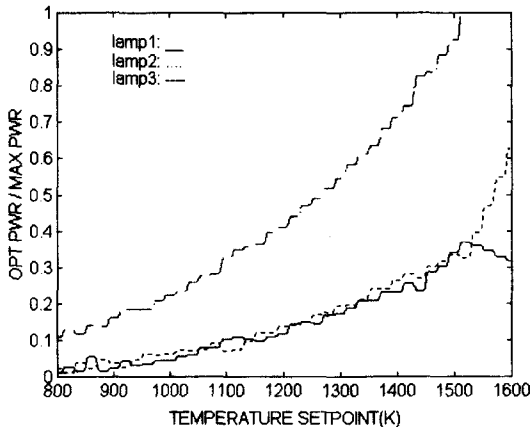


그림 4. 정상상태에 도달하기 위한 각 램프의 최적의 전력 대 최대 전력의 비율.

Fig. 4. Ratio of optimal power and maximum power of each lamp to achieve steady-state temperature.

우선 800K에서 1600K 사이의 온도 범위에서 앞먹임 정적 제어기의 제어 매개 변수를 구하였다. 모의 실험에서 사용한 고속 열처리 공정기의 각각의 램프 최대 전력을 1이라고 하면 800K에서 1600K 사이의 온도 범위에서  $P^{ss}$ 와  $T^{ss}$ 의 관계는 그림 4와 같이 나타난다. 이와 같이 구한 전력을 가지고 고속 열처리 공정기에 적용시켰을 때 웨이퍼의 정상 상태 온도는 기준 온도와 평균적으로 1.67K의 오차를 보였다.

다음은 앞먹임 동적 제어기의 제어 매개 변수를 구하기 위하여 그림 5의 기준 온도 궤적을 정하고 웨이퍼의 온도가 이 궤적을 따라가도록 하기 위하여 고속 열처리 공정기에 가해야 할  $P^{dyn}$ 를 구하였다. 그림 5의 기준 온도 궤적에 대하여 앞먹임 정적 제어기와 앞먹임 동적 제어기를 바탕으로 개루프 제어를 실시

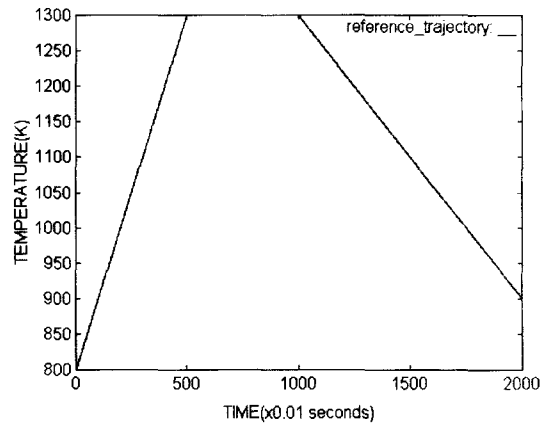


그림 5. 기준 온도 궤적.

Fig. 5. Reference temperature trajectory.

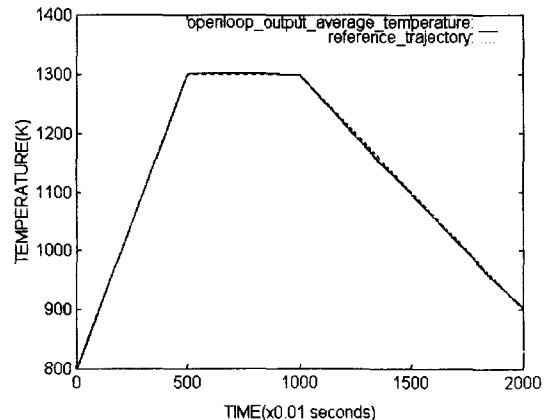


그림 6. 개루프 제어시 웨이퍼 온도와 기준 온도 궤적.  
Fig. 6. Wafer temperature and reference temperature in openloop control.

하였다. 그림 6에 웨이퍼의 온도<sup>2)</sup>와 기준 온도를 비교하여 나타내었다. 그리고, 그림 7에는 기준 온도 제적과 웨이퍼의 온도의 차이를 나타내었다. 이 두 그림에 의하면 온도 상승시에는 온도 오차가 1도 이하로 아주 작으나 시간이 지나갈수록 약간씩 증가하는 추세를 보이고 있으며 온도 유지 부분에서는 더 이상 온도 오차가 커지지 않고 온도가 천천히 줄어들고 있다. 그러나 온도 하강 부분에서는 다시 오차가 커져서 최고 6도 가량의 오차를 보이고 있다. 온도 하강시에 오차가 많이 발생하는 이유는 그림 8에 나타난 각 램프의 전력을 살펴보면 알 수 있다. 온도 하강시에 첫

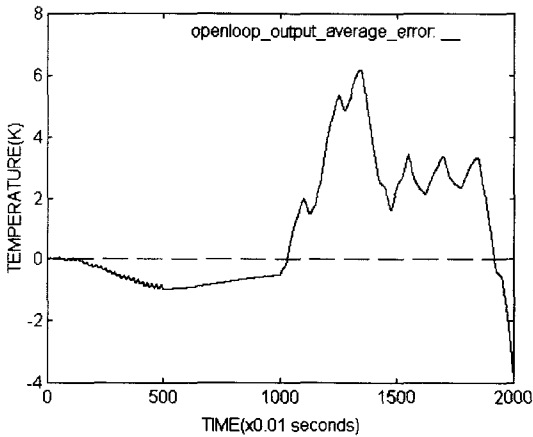


그림 7. 개루프 제어시 웨이퍼 온도와 기준 온도와의 차이.  
Fig. 7. Difference between wafer temperature and reference temperature in openloop control.

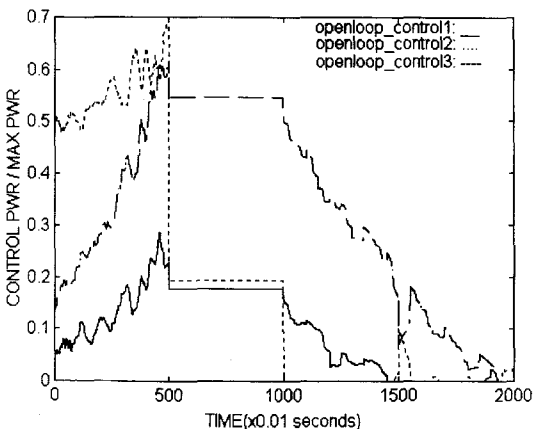


그림 8. 개루프 제어시 각 램프의 전력.  
Fig. 8. Power of each lamp in openloop control.

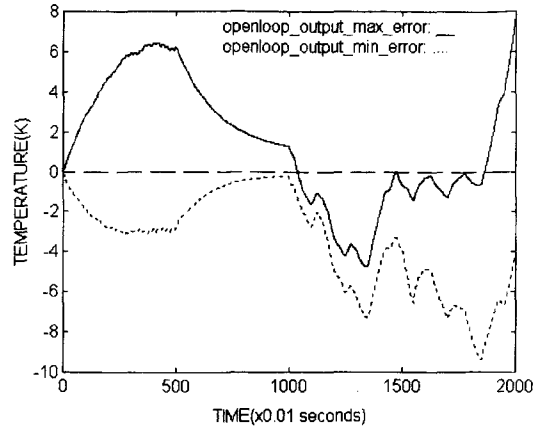


그림 9. 개루프 제어시 웨이퍼 각 부분의 최대, 최소 오차.  
Fig. 9. Max. and min. error of each wafer part in openloop control.

번째 램프와 두 번째 램프의 경우 앞먹임 정적 제어기에 의한 제어 입력보다 앞먹임 동적 제어기에 의한 제어 입력이 오히려 커서 두 램프가 모두 꺼져버리고 가장 큰 전력을 낼 수 있는 세 번째 램프에 의해서만 제어가 이루어지고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 각각의 램프가 담당하고 있는 비중이 제어기마다 다르기 때문에 제어가 효율적으로 되지 않고 오차가 발생하는 것으로 볼 수 있다. 그림 9에 시간별로 웨이퍼의 상태를 나타내었다. 이산화된 웨이퍼의 각 부분 중 기준 온도와의 차이가 최대인 온도와 최소인 온도를 표시하였다.

그림에서 보면 일단 웨이퍼를 가열시키면서 웨이퍼의 온도 균일도가 깨지고 있는 것을 알 수 있다. 그리고, 온도의 유지 부분에서는 웨이퍼의 각 부분들이 정상 상태로 들어서면서 균일도가 회복이 되고 있다. 그리고 온도의 하강 부분에서는 전반적으로 기준 온도의 범위를 벗어나는 것이 관찰되고 있다.

지금까지는 제어 입력에 외란을 고려하지 않았다. 하지만 시뮬레이터가 아닌 실제 고속 열처리 공정기를 사용한다면 필수적으로 외부의 외란이 존재할 것이다. 또한, 고속 열처리 공정기 시뮬레이터의 매개 변수는 실제의 고속 열처리 공정기의 그것과는 오차가 있을 것이다. 따라서 실제 고속 열처리 공정기에서 사용할 수 있으려면 이들에 대한 대처가 가능해야 할 것이다. 여기서는 각 램프의 최대 전력의 10%에 해당하는 외란이 제어 입력에 가해진다고 가정하였고, 실제 고속 열처리 공정기의 파라미터와 모의 실험에 사용하고 있는 파라미터가 최대 10%의 차이가 있다고 가정하였다. 먼저 이런 외란과 모델 오차 하에서 개루프 제어가 얼마나 성능을 발휘하는가를 알아보기 위

2) 웨이퍼의 각 조각들의 온도의 평균을 웨이퍼의 온도로 가정하였다.



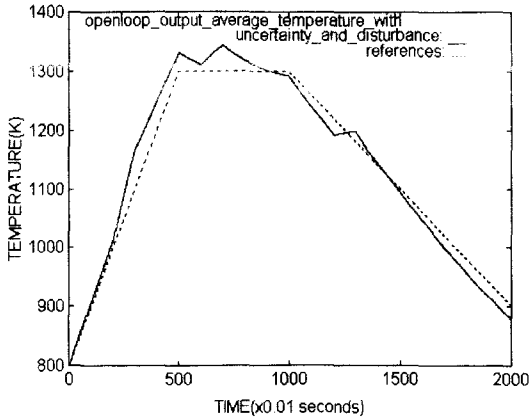


그림 10. 외란과 모델링 오차가 존재할 때 개루프 제어시의 웨이퍼의 온도와 기준 온도 궤적.

Fig. 10. Wafer temperature and reference temperature in openloop control with uncertainty and disturbance.

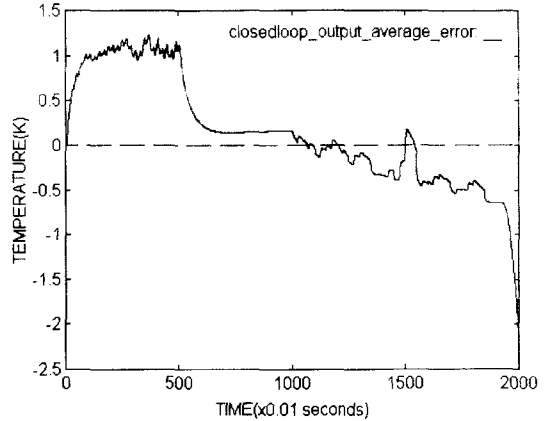


그림 12. 페루프 제어시 웨이퍼 온도와 기준 온도와의 차이.

Fig. 12. Difference between wafer temperature and reference temperature in closedloop control.

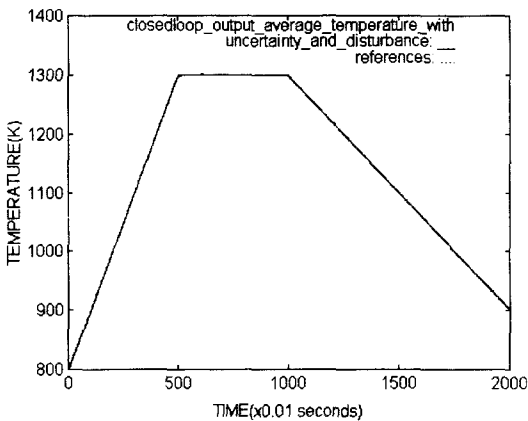


그림 11. 외란과 모델링 오차가 존재할 때 페루프 제어시의 웨이퍼 온도와 기준 온도 궤적.

Fig. 11. Wafer temperature and reference temperature in closedloop control with uncertainty and disturbance.

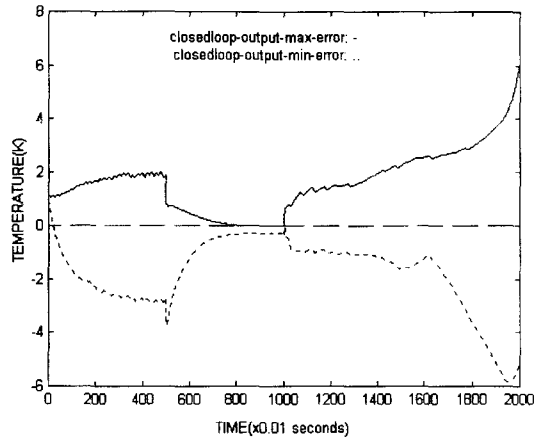


그림 13. 페루프 제어시 웨이퍼 각 부분의 최대, 최소 오차.

Fig. 13. Max. and min. error of each wafer part in closedloop control.

하여 앞먹임 제어기만을 이용한 모의 실험을 하였다. 그 결과는 그림 10과 같다. 예상했던 대로 웨이퍼의 온도는 기준 온도 궤적을 전혀 따라가지 못하고 있으며 오차가 계속 누적되어 점점 기준 온도 궤적에서 멀어지고 있다. 이제, 뒤먹임 오차 제어를 포함시킨 페루프 제어 시스템을 이용하여 제어를 하는 경우를 살펴보겠다. 그림 11은 제어 입력에 외란이 들어오고 모델링 오차가 존재하는 경우에 뒤먹임 오차 제어를 사용했을 때 웨이퍼의 온도 궤적이다. 그림 10과 비교할 때 그 성능이 뚜렷하게 향상되었음을 알 수 있다. 또한, 외란과 모델 오차가 존재하지 않을 때의 개루프 제어의 결과인 그림 6과 비교하여도 좋은

성능을 나타내고 있다. 그림 12에 나타난 기준 온도 궤적과 웨이퍼의 온도 오차를 살펴보면 온도 상승시에는 약 1도, 정상상태에서는 약 0.2도 그리고 온도 하강시에는 약 2도의 오차를 보이고 있다. 마지막으로, 웨이퍼의 온도 균일도를 그림 13에서 살펴보면 여전히 온도를 올리거나 내릴 때 온도의 균일도가 흐트러지고 있지만 그림 9에서 본 개루프 시스템의 경우보다는 성능이 많이 향상된 것을 볼 수 있다.<sup>3)</sup>

3) 웨이퍼의 공정에서 수율을 결정하는 핵심적인 부분은 정상상태 유지부와 그 직전, 직후의 부분이다. 이 부분에서 웨이퍼의 온도 균일도를 수 도내에서 유지하는 것이 요구되고 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 고속 열처리 공정기의 웨이퍼 온도를 제어하기 위하여 진화 연산 알고리즘을 이용하여 제어 매개 변수를 최적화하고 이를 바탕으로 퍼지 논리를 이용하여 제어를 구성하는 지능 제어 기법을 제안하였다. 전체적인 제어기는 앞먹임 정적 제어기, 앞먹임 동적 제어기, 그리고 뒤먹임 선형 오차 제어기로 구성하였다. 각각의 제어기는 기준 온도의 정상 상태의 추종, 과도 상태의 추종, 그리고 온라인 적용시 모델링 오차나 외란을 극복하기 위한 제어 입력을 구해주는 역할을 한다. 그리고 모의 실험을 통하여 고속 열처리 공정기의 모델링 오차가 존재하거나 제어 입력에 외란이 들어오는 경우에도 웨이퍼의 온도를 제어할 수 있음을 보였다. 또한 이 기법은 고속 열처리 공정기의 모델식에 의존하지 않고 입력력 데이터만으로 제어를 구성하므로 실제 고속 열처리 공정기에 대해서도 쉽게 적용시킬 수 있는 장점이 있다.

향후 과제로 웨이퍼의 온도가 변화하는 순간에 웨이퍼의 온도 균일도를 향상시키는 것과 다양한 외란과 비선형 모델링 오차를 극복하기 위한 온라인 적응 제어 방법의 추가가 요구된다.

## 참고문헌

- [1] S. A. Norman, "Optimization of wafer temperature uniformity in rapid thermal processing systems", Technical Report, Dept. of Electrical Engineering, Stanford University, June, 1991.
- [2] R. S. Gyurcsik, T. J. Riley and F. Y. Sorrell, "A model for rapid thermal processing: achieving uniformity through lamp control", *IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing*, 4(1), 9-13, Feb., 1991.
- [3] S. A. Campbell, K. -H. Ahn, K. L. Knutson, B. Y. H. Liu and J. D. Leighton, "Steady-state thermal uniformity and gas flow pattern in a rapid thermal processing chamber", *IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing*, 4(1), 14-20, Feb., 1991.
- [4] K. C. Saraswat, P. P. Apte, L. Booth, Y. Chen, P. C. P. Dankoski, F. L. Degertekin, G. F. Franklin, B. T. Khuri-Yakub, M. M. Moslehi, C. S. Schaper, P. J. Gyugui, Y. J. Lee, J. Pei and S. C. Wood, "Rapid thermal multiprocessing for a programmable factory for adaptable manufacturing of IC's", *IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing*, 7(2), 159-175, May, 1994.
- [5] H. A. Lord, "Thermal and stress analysis of semiconductor wafers in a rapid thermal processing oven", *IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing*, 1(3), 105-114, Aug., 1988.
- [6] P. P. Apte and K. C. Saraswat, "Rapid thermal processing uniformity using multivariable control of a circularly symmetric 3 zone lamp", *IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing*, 5(3), 180-188, Aug., 1992.
- [7] P. J. Gyugyi, Y. M. Cho, G. Franklin and T. Kailath, "Convex optimization of wafer temperature trajectories for rapid thermal processing", submitted to 1993 CCA, Jan., 1993.
- [8] R. H. Perkins, T. J. Riley and R. S. Gyurcsik, "Thermal uniformity and stress minimization during rapid thermal processes", *IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing*, 8(3), 272-279, Aug., 1995.
- [9] Y. M. Cho, A. Paulraj, T. Kailath and G. Xu, "A contribution to optimal lamp design in rapid thermal processing", *IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing*, 7(1), Feb., 1994.
- [10] 최성규, 최진영, 권옥현, "8인치 웨이퍼의 온도균일도향상을 위한 고속열처리공정기의 최적 파라미터 설계에 관한 연구", 대한전자공학회 논문지, 34(10), 68-76, 10. 1997.
- [11] B. J. Cho, P. Vandenabeele and K. Maex, "Development of a hexagonal-shaped rapid thermal processor using a vertical tube", *IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing*, 7(3), Aug., 1994.
- [12] Yaw-Kuen Jan and Ching-An Lin, "Lamp configuration design for rapid thermal processing systems", *IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing*, 11(1), Feb., 1998.
- [13] P. Dankiski, L. Booth, G. Franklin and K. Saraswat, "RTP temperature sensing-just how is it?", 33rd CDC, 1994.
- [14] Y. J. Lee, B. T. Khuri-Yakub and K. Saraswat, "Temperature measurement in rapid thermal processing using the acoustic temperature sensor", *IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing*, 9(1), Feb., 1996.
- [15] D. E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989.

---

**황민웅(Min Woong Hwang)**

한국 퍼지 및 지능 시스템학회 논문지 제7권 제4호 참조  
1998년 : 서울대학교 대학원 전기공학부 졸업(공학석사)  
1998년 현재 : SK 텔레콤 정보기술연구원 연구원

---

---

**최진영(Jin Young Choi)**

한국 퍼지 및 지능 시스템학회 논문지 제7권 제4호 참조  
현재 : 서울대학교 전기공학부 조교수

---



---

**도현민(Hyun Min Do)**

1997년 : 서울대학교 전기공학부 졸업  
(학사)  
1997년 현재 : 서울대학교 대학원 전기  
공학부 석사과정

---