

# 급속 열처리 공정을 위한 Bang-Bang/PID 온도제어기법

## Bang-Bang plus PID Temperature Control Scheme for Rapid Thermal Processing

宋泰勝\*, 柳 鐔\*

(Tae-Seung Song\* and Joon Lyou\*)

### 요 약

본 논문에서는 급속 열처리 공정에서 필수적인 빠르고 정밀한 웨이퍼의 온도제어기법을 제안하였다. Bang-Bang/PID 제어기법은 빠른 온도상승률을 만족하고, 오버슈트와 정상상태 오차를 줄이도록 한다. 즉 초기에 허용 가능한 최대전력을 공급하는 일종의 Bang-Bang 방식의 제어를 하고, 설정온도와 출력에서 측정되는 온도와의 차이가 어느 정해진 범위보다 작을 때 PID 제어를 수행한다. 또한 PID 이득을 정하기 위해 ARX 모델로 식별된 플랜트에 Kappa-Tau 동조법이 사용되었다. 개발된 제어기는 실험용 RTP 장비에 적용하여 그 성능을 평가하였다.

### Abstract

This paper describes the quick and precise control of the wafer temperature essential in rapid thermal processing(RTP). The bang-bang plus PID controller structure is introduced to satisfy rapid ramp-up rate and reduce overshoot and steady state error. The controller employs the PID action when the magnitude of the error between reference signal and the output temperature signal is smaller than some prescribed value. To find PID gains, the plant(autoregressive) model is first identified and Kappa-Tau tuning rule is used. The developed controller is applied to experimental RTP apparatus, and performances are evaluated.

**Keywords** : RTP, temperature control, bang-bang plus PID control, system identification, Kappa-Tau tuning

### I. 서 론

근래에 이르기까지 반도체 생산에서 열처리 공정은 주로 대용량의 가열로(furnace)에서 이루어져 왔다. 그러나 최근 소자의 고집적화와 웨이퍼 크기의 증가로 단일 웨이퍼 열처리를 할 수 있는 급속 열처리 공

정(Rapid Thermal Processing; RTP)이 검토되고 있다. 이는 필수적으로 요구되는 공정환경의 변화에 대처할 수 있는 유연성을 지닌 공정기법으로, 많은 웨이퍼를 동시에 큰 가열로에 넣어 오랜시간 가열하는 기존의 방식과 달리 여러 단위공정들을 웨이퍼의 이동 없이 하나의 장비에서 처리하므로 잦은 이동으로 인한 웨이퍼의 오염을 줄이고, 실시간 제어를 통한 작업시간의 단축과 짧은 시간동안 열에너지를 웨이퍼 표면에 전달하기 때문에 고온의 장시간 공정에서 발생하는

\* 忠南大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Eng., Chungnam Nat. Univ.)

接受日: 1999年3月26日, 修正完了日:1999年6月25日

바람직하지 않는 열적 효과(thermal effect)를 최소화할 수 있다[1].

RTP 시스템에서 가장 중요한 문제는 웨이퍼상의 온도가 기준 온도궤적을 정확히 따르도록 하는 것과, 미세한 박막의 형성을 위해 웨이퍼 전 영역에 균일한 온도를 유지하도록 온도제어를 수행하는 것이다. 그동안 까다로운 온도제어 성능을 맞추기 위하여 국내적으로 여러가지 고급기법들이 제시되어 왔으나[3-6], 본 연구에서는 대상공정의 특성에 맞게(실제 사용에 유리하도록) 간단한 방식의 공정제어기를 제시하고 실험적 검증에 치중하였다. 좀더 구체적으로 실험데이터에 식별기법을 적용하여 모델을 추정하였으며, Bang-Bang/PID 제어기법을 적용하여 온도제어기를 설계하였다. 여기서 Bang-Bang /PID 제어기법은 600℃ ~ 1200℃ 범위에서 50℃/sec 이상의 빠른 온도상승률을 만족하도록 각 램프에 허용 가능한 최대전력을 공급한 후 설정 온도 가까이에서 PID 제어기로 전환하여 출력에 오버슈트와 정상상태 오차를 줄이도록 하였다. 또한 온도 균일성을 위해서는 여러 구역으로 나뉘어 있는 가열 램프에 실험적으로 얻은 가중치를 적용하였다.

II. 급속 열처리 공정

RTP는 반도체 제조공정에서 웨이퍼를 열처리하는 공정으로 담금질(annealing), 산화(oxidation), 화학 증기 증착(chemical vapor deposition) 등을 할 수 있다. 대부분의 RTP 시스템에서 웨이퍼 가열을 위한 열원은 급속가열이 가능하며, 열원에 의한 웨이퍼의 오염이 전혀 없는 직선형태의 텅스텐-할로겐 램프를 사용한다. 본 연구의 대상으로한 장비는 14개의 직선형태로 된 램프가 설치되어 있으며, 이들은 중앙으로부터 6개, 4개, 4개씩 세 구역으로 나뉘어 제어된다. 가열된 웨이퍼의 온도측정은 웨이퍼에 부착된 열전대센서를 이용해 측정하고, 결과는 제어기로 출력된다. 공정실의 재질은 스테인레스 스틸(stainless steel) 또는 알루미늄(aluminum)등으로 되어 있다. 지지대위의 웨이퍼는 열원의 순간적인 발광에 의해 열을 흡수하여 가열되고, 전력차단에 의해 냉각된다. 램프와 웨이퍼

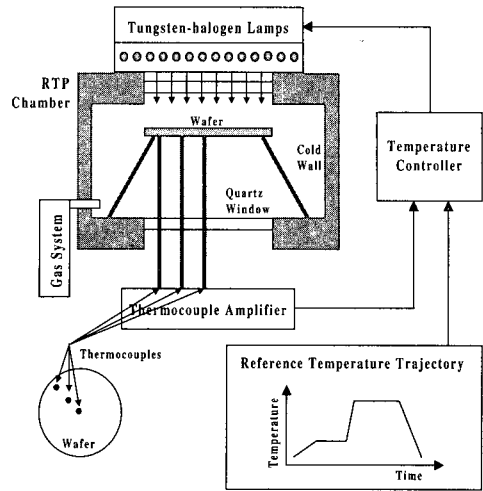


그림 1. RTP 시스템의 전체구조  
Fig. 1. Overall structure of RTP system

사이에는 투명한 석영판(quartz window)으로 분리되어 있다. 챔버 외벽은 대부분이 냉각수를 이용하여 낮은 온도를 유지하도록 하고 있으며, 이는 챔버 벽면에 먼지입자 형성을 막고 챔버 구성요소를 보호하기 위해서이다. 그림 1은 열전대 센서로 온도를 측정하고, 제어가 포함된 RTP 시스템의 전체구조이다.

III. 열전달 모델의 식별

3.1 ARX 모델 식별

정밀한 온도제어를 위해서는 RTP 반응 챔버내의 열전달 모델을 정확하게 알아야 한다. 그런데 RTP 시스템의 열전달 모델은 비선형적이고, 주변의 영향을 많이 받아 정확한 모델을 예측하기 어렵다. 본 연구에서는 실제 장비로부터 실험데이터를 획득하고, ARX (auto-regressive with external input) 모델을 근간으로 최소자승법을 이용한 파라미터 식별을 수행하였다. 이 방법은 이전의 출력데이터를 이용하여 모델의 오차를 줄여나가는 방법으로 메모리 소모가 적은 장점이 있다. RTP 시스템을 ARX 모델의 형태로 나타내면 그 형태는 다음과 같다[7].

$$T(t) = \sum_{k=1}^{n_1} a_k T(t-k) + \sum_{k=1}^{n_2} b_k V(t-k - n_d + 1) \quad (1)$$

여기서  $T$ 는 출력되는 온도이고,  $V$ 는 램프 구동기에 입력되는 전압값이다. 구조는  $n_a, n_b, n_d$ 를 정하므로써 결정된다. 이때  $n_a$ 는 극점(pole)의 개수,  $(n_b - 1)$ 은 영점(zero)의 개수, 그리고  $n_d$ 는 지연시간(delay time)을 의미한다.

3.2 데이터 취득 시스템의 구성

식별을 위한 실험데이터의 획득과, 온도제어를 위한 디지털 PID 제어 프로그램의 수행을 위해 연속시간계 플랜트에 대한 이산치 형태의 입출력 데이터를 필요로 한다. 본 연구에서는 그림 2와 같은 구조의 데이터 취득 시스템을 구성하였다.

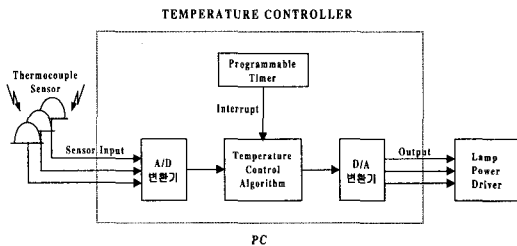


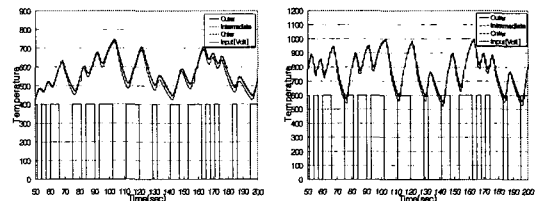
그림 2. 데이터 취득 시스템의 블록도  
Fig. 2. Block diagram of data acquisition system

이 시스템은 열전대 센서로부터 출력값을 읽어들이기 위한 A/D 변환기 부분과 램프전력구동기에 계단 입력을 인가하기 위한 D/A 변환기 부분, A/D 변환기와 D/A 변환기를 디지털 컴퓨터에 연결시켜주는 병렬 포트 및 샘플링 시간이 해당하는 일정 시간간격으로 A/D 변환기의 출력값을 디지털 컴퓨터에서 읽어들이도록 하는 소프트웨어적인 타이머 부분으로 구성되어 있다. 3채널의 A/D 변환기는 Axiom社의 AX5611로서 12비트의 분해능을 가지고 있다. 열전대 센서로부터 측정된 웨이퍼상의 온도는 입력범위 0V~10V에 해당하는 이산치 형태로 디지털 컴퓨터로 입력된다. 세 구역으로 나뉘어 있는 램프를 구동하기 위한 D/A 변환기는 3채널로 이루어진 AX5212를 사용한다. 12비트의 분해능으로 디지털 컴퓨터로부터의 제어입력에 맞도록 전력변환장치를 통하여 램프에 전력을

공급한다.

3.3 모델의 식별 결과

열전달 모델은 지연시간을 갖는 2차 시스템으로 간주하여  $n_a=2, n_b=2, n_d=2$ 로 정하였고, RTP 시스템이 온도구간별로 비선형성이 심하므로 저온일 경우와 고온일 경우로 나누어 데이터를 수집, 식별을 수행하였다. 식별을 위한 입력으로는 모든 주파수를 발생시키는 의사난수 이진 수열(pseudo-random binary sequence; PRBS)을 사용하였다. 이때 RTP 시스템이 충분히 반응할 수 있도록 3초, 6초, 9초의 주기가 임의적으로 발생하도록 하였다[3]. 그림 3은 취득된 출력온도와 입력전압 궤적을 나타내는데 저온일 경우는 입력을 4V로 하여 램프를 구동시킬 때 400℃~700℃ 사이에서 변동됨을 알 수 있다. 고온일 경우도 6V로 구동시켰을 때 600℃~1000℃ 사이에서 가장 많이 변화되었다.



(a) 저온일 경우 (b) 고온일 경우

그림 3. 식별을 위한 온도·전압 궤적

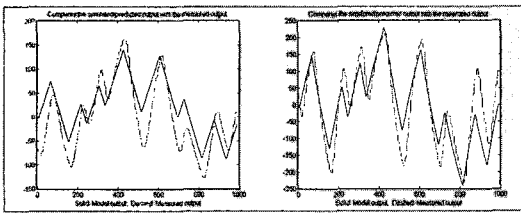
Fig. 3. Trajectories of temperature and power for identification

식별은 MATLAB 함수를 이용하여 수행하였으며 결과를 ARX 모델로 각각 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{저온일 경우: } & y(t) - 1.4637y(t-T) + 0.4639y(t-2T) \\ & = 0.0005u(t-2T) + 0.0023u(t-3T) \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{고온일 경우: } & y(t) - 1.4645y(t-T) + 0.4670y(t-2T) \\ & = 0.0011u(t-2T) + 0.0030u(t-3T) \quad (3) \end{aligned}$$

이번 식별에서는 200초동안 총 2000개의 데이터를 수집하였고, 그중 60~110초구간의 데이터를 이용하여 식별을 수행하고 결과의 타당성을 검증하기 위하여 60~160초구간에 식별실험에서와 똑같은 제어입력을 식별된 모델에 가하여 응답을 구하여 보았는데 그 결과는 그림 4와 같다.

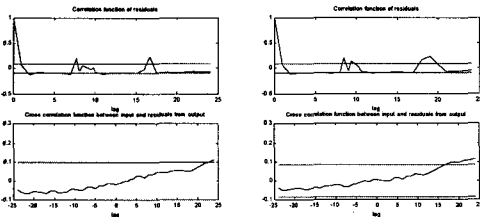


(a) 저온일 경우 (b) 고온일 경우

그림 4. 식별된 모델의 응답

Fig. 4. Response of identification model

그림 5는 식별결과 얻어진 모델에 대한 신뢰성 테스트 결과이다. 90% 신뢰도 경계에 대하여 잔여치에 대한 상관함수가 신뢰도 영역을 다소 벗어난 것 외에는 거의 대부분 영역에서 90% 신뢰도를 충족시키고 있음을 알 수 있다. 따라서 구해진 모델이 실제 열전달 모델을 잘 묘사하고 있다고 판단된다.



(a) 저온일 경우 (b) 고온일 경우

그림 5. 식별된 모델의 신뢰성 평가

Fig. 5. Residual tests of identification model

IV. Bang-Bang/PID 제어기 설계

4.1 온도제어 알고리즘

RTP 시스템에서 웨이퍼 온도제어에 관한 일반적

인 제어규격은 산화막 형성에 대해서는  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  범위, 그 외 다른 공정에 대해서는  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  범위 내의 정상상태 온도균일도, 온도상승동안  $10^{\circ}\text{C}$ 내의 온도편차,  $50^{\circ}\text{C}/\text{sec}$  이상의 온도상승률(ramp-up rate)등이 권장되고 있다[4]. 온도제어기는 온도센서로부터 측정치를 받아 디지털 펄스폭 제어 알고리즘을 수행하여 램프에 내보낼 전력량을 계산한다. 이상적인 온도곡선을 얻기 위해서는 실용적인 관점에서 개루프 Bang-Bang 제어와 PID 되먹임 제어를 적절히 혼합할 필요가 있다. 즉 제어기는 초기 가열시에 급격한 상승 기울기를 얻기 위해 램프에 허용 가능한 최대전력을 공급하는 Global Mode로 동작하고, 온도가 정상상태 온도 가까이 도달했을 때 오버슈트와 정상상태 오차를 줄이기 위해 PID 제어를 수행하는 Fine Mode로 동작한다. 이때 Mode 전환은 실시간으로 측정되는 두 지점에서의 온도값을 이용하여 Mode를 전환했을 때 램프 반응 지연시간만큼 지난후의 온도를 예측하여 가장 적절한 지점으로 결정한다.

**Global(Bang-Bang) Mode:** 초기에 설정온도로 최단시간 도달하기 위하여 램프에 허용 가능한 최대전력을 인가한다. 여기서 실험 대상으로 삼은 RTP 시스템은 총 14개의 직선형 텅스텐-할로젠 램프로 이루어지며, 이들은 챔버의 기하학적인 구조와 웨이퍼 크기(5인치)를 감안하여 중앙으로부터 6개, 4개, 4개씩 세 구역으로 나뉘어 제어된다. 그런데 제어규격에는 처음 온도상승동안  $10^{\circ}\text{C}$ 내의 온도편차를 요구하므로 실험적으로 웨이퍼의 온도상승에 가장 큰 영향을 미치는 중앙의 6개의 램프에는 최대전력의 90%를 가하고, 외곽의 램프들에는 이보다 작은 값을 적용하여 상승동안 온도 균일성을 만족하도록 하였다. 그림 6은 램프 존에 따른 최대전력의 백분율값을 나타낸다.

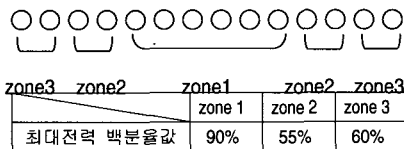


그림 6. 램프존에 따른 최대전력의 백분율값

Fig. 6. Percent maximum power of lamp zones

**Mode 전환시점 결정:** RTP 시스템은 램프 구동 명령이 주어진 후 어느정도의 반응지연시간( $t_d$ )을 가진다. 전환시점의 결정은 초기 Global Mode에서 상승하는 온도의 두 지점을 이용하여 상승 기울기( $R$ )를 정하고 이때 정해진  $R$ 과 초기온도( $T_0$ )를 이용하여 반응지연시간만큼 상승할 온도를 미리 계산하여 예측된 온도가 설정온도( $T_{ref}$ )보다 크거나 같아질 때를 Fine Mode로 전환할 시점으로 한다. 즉 전환 시점의 시간이  $t_s$  라면 다음식이 만족되는 첫  $t_s$  지점에서 Fine (PID) Mode로 전환한다.

$$T_{ref} \leq T(t_s) = R(t_s + t_d) + T_0 \quad (4)$$

**Fine(PID) Mode:** Fine Mode에서는 챔버내의 웨이퍼 온도가 설정온도 근처에서 원하는 궤적의 이산화된 기준 온도값을 충실히 추적할 수 있도록 되먹임 제어방식인 비례·적분·미분(proportional, integral, derivative; PID) 제어 알고리즘을 사용한다. 그림 7은 제어 알고리즘의 동작흐름도를 나타낸다.

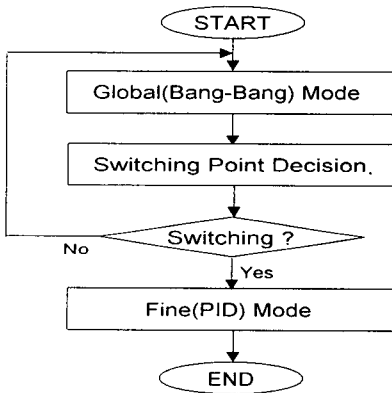


그림 7. 제어 알고리즘의 동작흐름도

Fig. 7. Flow diagram of control algorithm

4.2 디지털 PID 제어기

$$P(kh) = Ke(kh) \quad (5)$$

$$I(kh + h) = I(kh) + \frac{Kh}{T_i} e(kh) \quad (6)$$

$$D(kh) = \frac{T_d}{T_d + Nh} D(kh - h) + \frac{KT_d N}{T_d + Nh} e(kh) \quad (7)$$

$$\text{제어입력: } u(kh) = P(kh) + I(kh) + D(kh) \quad (8)$$

위 식에서  $K$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ 는 각각 비례이득, 적분 시간, 미분시간을 나타내고,  $h$ 는 샘플링 간격이다. 미분항은 고주파 성분인 잡음에 너무 민감하지 않도록 저역통과필터(lowpass filter)형태로 수정한다. 이때  $N$ 은 최대미분이득(maximum derivative gain)으로 고주파 성분에 대하여 미분이득이  $N$ 으로 제한된다[8].

4.3 PID 이득 계산

설정온도 가까이에서 PID 제어기로 전환된 후 온도제적은 기존의 상승기울기를 유지하면서 오버슈트 없이 설정온도에 수렴해야 한다. 이러한 조건을 만족하기 위해 정교한 제어 계수 동조가 요구된다. Ziegler-Nichols 동조방법은 제동비( $\zeta$ ) = 0.5 정도가 되도록 제어계수를 결정하므로 응답이 빠르나 오버슈트가 다소 큰 단점이 있다. 본 연구에서는 가능한 오버슈트가 없도록 계수를 결정하는 Kappa-Tau 동조방법을 이용하였다. Kappa-Tau 동조방법은 K. Åström에 의해 최근 제안된 방법으로 식별된 두 전달함수로부터 시스템의 정적이득( $K_p$ ), 임계이득( $K_u$ ) 그리고 임계주기( $T_u$ )를 구하고, 이들을 이용하여 이득비( $x$ )를 구해 PID 제어 계수를 결정한다. 그런데 Kappa-Tau 동조방법은 민감도에 따라 계수를 결정하는 식이 달라질 수 있는데 본 논문에서는 RTP 시스템의 외란에 대한 민감도를 1.4로 정하고 PID 제어계수를 결정한다[9].

$$x = \frac{1}{K_p K_u} \quad (9)$$

$$K = 0.33 K_u e^{-0.31x - 1.0x^2} \quad (10)$$

$$T_i = 0.76 T_u e^{-1.6x - 0.36x^2} \quad (11)$$

$$T_d = 0.17 T_u e^{-0.46x - 2.1x^2} \quad (12)$$

동조결과 계산된 제어기 계수와 이들을 실험과정에서 수정(미세조정)하여 실제 적용한 계수를 표 1에 나타내었다.

표 1. 계산된 PID 제어기 파라미터

Table 1. Calculated PID parameters

	동조결과 제어기 계수				실제 적용계수		
	$K$	$T_i$	$T_d$		$K$	$T_i$	$T_d$
저온일 경우	1.3332	4.1508	1.0805	600℃	1.35	4.35	1.16
				700℃	1.35	4.39	1.19
고온일 경우	1.5873	4.4923	1.1509	800℃	1.56	4.46	1.18
				900℃	1.56	4.59	1.19

V. 소프트웨어 설계

제어기 소프트웨어는 Windows NT 운영체제 환경에서 Visual C++를 이용하여 구현한다. C 언어를 이용한 제어 소프트웨어의 구현은 실시간 처리 및 입출력 동작에 효율성을 기할 수 있다. 제어기 전체의 동작을 관리하는 소프트웨어는 초기화 루틴, 실시간 온도출력 기능을 포함한 메인 루틴, 인터럽트 서비스 루틴등으로 구성된다.

5.1 초기화 루틴

프로그램이 시작되면 가장 먼저 실행되는 초기화 루틴은 제어기 내부의 입출력 보드를 초기화하고, 메모리 변수들과 샘플링 주기를 설정한다. 일정한 샘플링 주기를 설정하기 위하여 제어기에서는 내부 타이머 인터럽트를 사용한다. 이때 주기는 0.2초로 하여 신속한 제어가 가능하도록 하였다.

5.2 메인 루틴

인터럽트가 없는 동안 실행되는 메인루틴에서는 사용자 명령에 해당하는 메뉴부분과 실시간으로 현재 온도값과 제어입력을 표시할 수 있는 윈도우를 생성하고, 표시된 값들을 파일로 저장하는 역할을 한다.

메뉴에는 제어의 시작(start)과 멈춤(stop) 기능이 있으며, 세 점에서 측정된 온도와 제어입력을 선택해 표시할 수 있는 기능도 가지고 있다. 그림 8은 실시간 온도 출력 기능을 가진 제어기 소프트웨어로 700℃의 설정온도로 제어 중인 화면이다.

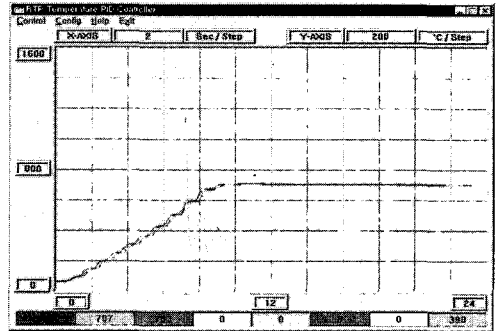


그림 8. 제어기 소프트웨어 화면

Fig. 8. Main view of controller software

5.3 인터럽트 서비스 루틴

메인루틴을 수행하는 도중 타이머 인터럽트가 발생하면 인터럽트 서비스 루틴으로 점프하여 해당 내용을 실행한다. 다음은 타이머 인터럽트 발생시 수행되는 함수들이다.

- ReadADCValue( ) : 현재 웨이퍼의 온도를 A/D 변환기를 통하여 읽어온다.
- PID\_Control( ) : 기준 온도 프로파일과 측정치를 이용하여 PID 연산을 수행한다.
- SetDACValue( ) : D/A 변환기에 제어 결과치를 출력한다.

VI. 실험결과 및 고찰

개발된 Bang-Bang/PID 온도 제어기의 성능을 검증하기 위하여 실제 시스템인 5인치용 급속 열처리 공정기에 적용하여 실험을 수행하였다. 제어기는 Pentium 200MHz PC 환경에서 제어 프로그램이 수행

되고, 내부의 아날로그 입출력 보드를 통해 데이터를 교환한다. 열전대 증폭기(thermocouple amplifier)는 RTP 반응챔버 내부의 웨이퍼에 부착된 열전대 센서를 통해 출력된 전류신호를 증폭하여 온도로 환산하고 그 결과를 제어기로 보낸다. 그림 9는 실험환경을 보여준다. 본 논문에서 설계된 제어기는 빠른 응답과 작은 오버슈트를 고려하여 설계되었다. 그림 10은 600℃에서 900℃까지 100℃간격으로 단일스텝 제어실험을 수행한 후 실시간으로 저장된 결과를 나타낸다.

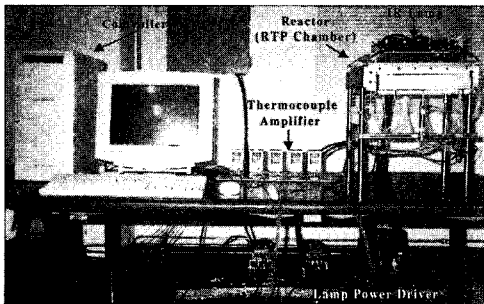
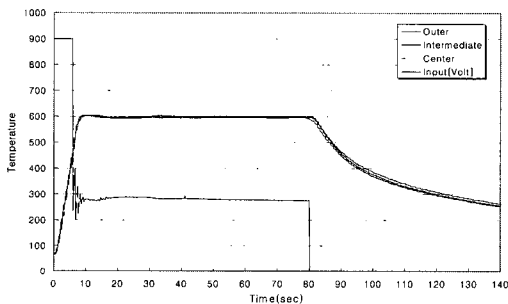
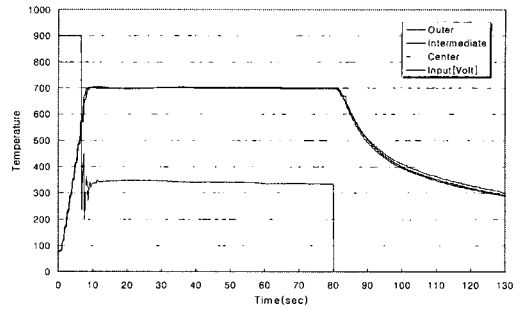


그림 9. 실험환경  
Fig. 9. Experiment environment

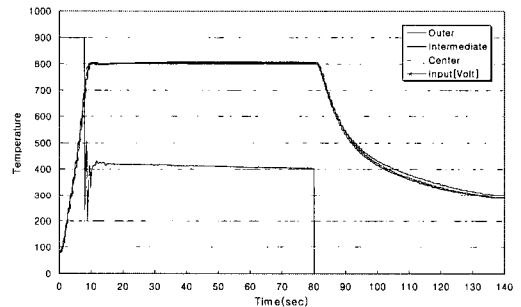
기준 온도 프로파일은 초기온도에서 75℃/sec의 기울기로 증가하고, 설정온도로 80초 동안 유지하고 냉각된다. 이때 냉각은 전력을 차단하므로써 이루어진다. 그래프는 웨이퍼의 세 점에서 측정한 온도와 램프 전력구동기에 인가되는 전압을 표시한다. 램프전력 구동기는 0V~10V에서 동작되므로 초기 9V가 입력된 것은 램프의 허용 가능한 전력의 90%를 가하여 빠른 온도상승 기울기를 얻고자 하였다.



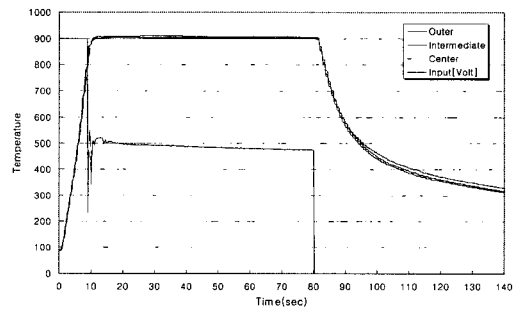
(a) 600℃



(b) 700℃



(c) 800℃



(d) 900℃

그림 10. RTP 시스템의 온도제적

Fig. 10. Temperature trajectories of RTP system

RTP 시스템의 응용공정중에는 다단계 가열이 요구되는 공정이 존재한다. 이를 위해 제어기 소프트웨어에 각 온도별로 구한 제어계수를 참조 테이블 형식으로 저장하여 설정온도에 따라 제어계수를 변경하

도록 하였다. 그림 11은 600℃에서 800℃로 이어지는 다단스텝 가열공정의 온도궤적을 나타내었다. 그림 10과 11에서 온도궤적은 초기에 빠른 온도 상승 기울기와 오버슈트 및 정상상태에서 온도가 일정하게 잘 제어되고 있음을 알 수 있다.

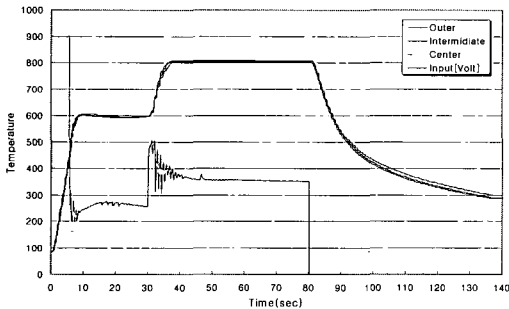


그림 11. 다단스텝 가열공정의 온도궤적  
Fig. 11. Temperature trajectory of multi-step heat process

이상의 실험결과로 온도상승기울기, 온도상승시 최대온도편차 그리고 정상상태에서 온도균일도를 정리하면 표 2와 같다. 여기서 온도균일도는 정상상태에서 웨이퍼 세점에서의 온도차가 최대일 경우와 그때의 측정온도값이다.

표 2. 성능평가 결과 요약

Table 2. Ramp-up rates, errors and nonuniformities

	온도상승 기울기	온도상승시 최대온도편차	정상상태 온도균일도	
			최대값	측정온도값
600℃	73℃/sec	10℃	- 6℃	(594, 597, 600)
700℃	75℃/sec	9℃	+ 7℃	(703, 707, 700)
800℃	74℃/sec	11℃	+ 8℃	(804, 808, 800)
900℃	75℃/sec	11℃	+ 10℃	(905, 910, 900)

표에서 온도상승기울기는 평균 1초에 75℃ 정도이고, 온도상승시 최대온도편차는 10℃ 내외이다. 그런데 본 연구에서는 웨이퍼 세점에서 측정된 온도중 중심점에서의 값을 이용해서 램프존 1에 출력하는 단변수(SISO) 형태의 PID 제어를 수행하고 나머지 두

존의 램프에는 실험적으로 얻은 가중치(램프존 2에는 제어입력의 90%, 램프존 3에는 95%)를 적용하였다. 따라서 정상상태에서의 온도 균일도 최대값이 처음 제시한 제어규격보다는 다소 큰 값이 출력되었다.

VII. 결 론

최근의 집적화된 반도체 칩의 생산에서 열 비용 (thermal budget)의 최소화를 위해 급속 열처리 공정기가 강력히 요구되고 있다. 급속 열처리 공정기에서는 웨이퍼 전체의 온도를 균일하게 유지하거나 여러장의 웨이퍼들에 대해서 같은 결과를 얻을 수 있도록 정교한 온도제어가 요구된다. 본 논문에서는 식별기법을 적용하여 급속 열처리 공정기내 웨이퍼의 열전달 모델을 추정하였고, 제시된 Bang-Bang/PID 제어기법을 이용한 온도제어 소프트웨어를 개발·적용하여 그 성능을 검증하였다. 이때 시행착오적이지 않고 추정된 모델에 Kappa-Tau 동조기법을 적용하여 PID 제어계수를 결정하였다. 실험 결과 정상상태 오차가 거의 없고, 빠른 온도상승과 작은 오버슈트(ramp-up rate 75℃/sec, overshoot 0.55% 내외) 측면에서 설계된 제어기의 만족할 만한 성능을 보였다. 웨이퍼내의 균일한 온도 분포 측면은 900℃에서 최대 온도편차가 10℃ 이하로 비교적 정밀한 제어가 됨을 알 수 있었다. 참고로 본 연구결과는 현재 전자통신연구원(ETRI)의 glass reflow 용 급속 열처리 공정기에 탑재되어 사용되고 있다.

본 연구에서는 국내에서 처음으로 급속 열처리 공정기를 제작하고 실제 적용실험에 중점을 두었기 때문에 보다 진보된 제어알고리즘은 적용시키지 못했으나 앞으로 다변수제어기법 등을 적용하면 웨이퍼상의 온도균일도가 향상될 수 있으리라고 예상된다. 이에 이번 연구의 결과는 앞으로 대구경(8인치 이상) 웨이퍼의 향상된 온도제어를 위한 기반을 마련하고 실험적 접근을 통해 취득된 온도제어 기법 등은 산업계에 존재하는 많은 유사공정에도 적용이 가능하기 때문에 파급효과가 크다 하겠다.

참 고 문 헌



[1] R. B. Fair, *Rapid Thermal Processing: Science and Technology*, Academic Press, Inc., 1993.

[2] S. Norman, "Wafer Temperature Control in Rapid Thermal Processing", *A Ph. D Dissertation*, 1992.

[3] Y. M. Cho, P. Gyugyi, "Control of Rapid Thermal Processing: A System Theoretic Approach", *IEEE Trans. on Control System Tech.*, pp. 644-653, 1997.

[4] 최병욱, 권옥현 외2인, "A Robust Controller Design for Uniform Temperature Control of Nonlinear Multi-variable Rapid Thermal Processor", *Jour. of Electrical Eng. and Information Science*, vol. 2, pp. 8-16, 1997.

[5] 정영석, 이광순, 최진훈, "Q-ILC를 이용한 고속열처리공정의 온도 제어", *한국자동제어학술회의논문집*, pp. 1189-1192, 1998.

[6] 최진영, 도현민, "신경망기반의 반복학습제어를 이용한 고속열처리공정기의 온도제어", *제어계측, 자동화, 로보틱스 합동학술발표회논문집*, pp. 88-91, 1999.

[7] I. D. Landau, *System Identification and Control Design*, Prentice Hall, 1990.

[8] K. Åström and T. Hägglund, "PID control", In Levine, Ed., *The Control Handbook*, pp. 198-209, CRC Press and IEEE Press, 1996.

[9] T. Hägglund and K. Åström, "Automatic tuning of PID controllers", *The Control Handbook*, pp. 817-826, CRC Press and IEEE Press, 1996.

저 자 소 개



宋 泰 勝(會員申請中)  
 1974년 6월 16일생. 1997년 2월 충남대학교 전자공학과 학사 졸업.  
 1999년 2월 충남대학교 전자공학과 제어 및 통신공학 석사 졸업.  
 1999년 3월 ~ 현재 충남대학교 전자공학과 제어공학 박사과정. 주

요관심분야 : 반도체공정제어, 다변수 제어, 식별 및 추정/고장검출 등임.



柳 鐸(正會員)  
 第 3卷 第 1號 論文 99-01-17 參照.  
 現在 忠南大學校 電子工學科 教授.