

# 챔버내 초정밀 열 환경제어에 관한 연구

## A Study on Precision Thermal Environmental Control of Chamber

\*박철우<sup>1</sup>, #박경서<sup>1</sup>, 신동훈<sup>2</sup>, 남진현<sup>2</sup>

\*C. W. Park<sup>1</sup>, #K. S. Park(timi20@kisti.re.kr)<sup>1</sup>, D. H. Shin<sup>2</sup>, J. H. Nam<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 한국과학기술정보연구원 슈퍼컴퓨팅센터, <sup>2</sup> 국민대학교 기계공학과

Key words : PID control, Thermo-Electric Module, Min-Enviromnet

### 1. 서론

최근 들어 반도체용 웨이퍼의 대구경화, 고집적화, 패턴의 미세화 등의 반도체 기술이 고도화됨에 따라 미세한 온도 변화도 공정장비의 정밀도에 영향을 미치게 된다. 이런 오차발생을 최소화하기 위해서 온도의 정밀 제어가 요구되고 있다. 그러나, 기존의 클린룸은 대용량 열환경제어를 사용하기 때문에 작업공간에서의 온도변화에 대해 반응속도가 느리고, 배출된 유량의 지역 편중 현상이 발생하게 된다. 이에 따라 클린룸내 국소환경시스템(mini-environment system)연구가 진행되고 있다.<sup>1,2</sup>

본 논문은 반도체 공정장비의 공정 정밀도를 향상시키기 위해 최적의 환경을 구축하는데 목적이 있으며, 본 논문의 결과는 항온장비 구축에 기본 자료로 활용될 수 있을 것이다.

### 2. 실험 및 해석

#### 2.1 정밀 항온기 실험장치

본 연구에서 사용된 항온기는 제어부, 열교환부, 계측부로 나뉘며, Fig. 1에 개략도를 도시하였다. 제어부는 PID 제어기를 기본으로 하며, PID 제어기에서 나오는 신호를 받아 출력전압을 제어하는 SCR(Silicon Control Rectifier)과 on/off 전력제어를 위한 SSR(Solid State Relay)로 구성되어 있다. 본 장치는 챔버내 공기를 폐쇄회로로 순환시키면서 열교환하는 방식으로 공정 장비에서 발생하는 열량을 흡입하여 적정온도로 제어 후 챔버 내부로 다시 보내게 되어 있다. 이는 제어정밀도를 높이고, 제어시간을 단축하는데 효과적이다. 마지막으로 계측부는 PID 제어의 피드백으로 사용되는 T-type 열전대로 구성된다.

#### 2.2 실험방법

##### 2.2.1 PID parameter 설정방법

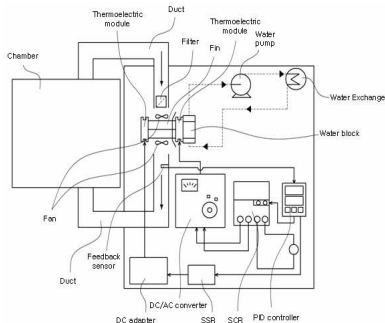


Fig. 1 Schematic diagram of a precision temperature controller

본 연구에서는 열교환기의 온도를 제어하기 위해 열전소자의 전력을 제어할 수 있는 상용 PID 제어기를 이용하였다. PID 파라미터는 경험에 의한 반복실험으로 결정되고, 상황과 조건에 따라 달라지는 것이 보통이나 이를 보완하고, 체계적인 방식을 제안하기 위해 Ziegler-Nichols 튜닝규칙과 감쇠비 조정을 병행하여 사용하였다.

Ziegler-Nichols 튜닝규칙은 실험을 통해 얻은 계단응답이나 또는, 비례 제어 시 한계 안정도를 일으키는  $K_p$  값에 근거하여 PID 제어기의 튜닝규칙을 제안한다. 다음에 제시하는 Ziegler-Nichols 튜닝규칙은 플랜트의 수학적 모델이 알려지지 않은 경우에 매우 편리하다. 하지만, Ziegler-Nichols 튜닝규칙은  $K_p, T_i, T_d$ 의 최종 값을 결정해 주기보다는 미세튜닝을 위한 시작 값을 제공해 준다고 볼 수 있다.

Fig. 2에 표시한 것처럼 실험을 통해 얻어진 프로세스 반응곡선(process reaction curve)의 변곡점에서 그은 접선과 프로세스 반응곡선이 안정화되는 시간에서의  $K$ (proportional gain)값과의 교점을 구함으로써 지연시간(L)과 시정수(T)를 결정할 수 있다. 결정된 L 값을 Table 1에 제시된 튜닝규칙에 적용하면 초기  $K_p$  값을 선정할 수 있게 된다.

본 연구에서는 PID 파라미터의 최적 값을 이론적으로 습득하기 위해 Ziegler-Nichols 튜닝규칙에 의해 얻어진 PID 파라미터 값을 초기 값으로 선정 한 후, 제시된 열시스템의 전달 함수와 감쇠비를 이용하여 PID 파라미터의 최적 값을 구하게 된다. Fig. 3은 운반지연을 갖는 열시스템을 나타낸 것이다. 이 시스템의 전달함수  $C(s)/R(s)$ 를 라플라스로 근사화하여 PID 파라미터를 결정하기 위해선 다음과 같은 과정을 수행하게 된다.

Table 1 The tuning parameter value of Ziegler-Nichols

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$T/L$	$\infty$	0
PI	$0.9T/L$	$L/0.3$	0
PID	$1.2T/L$	$2L$	$0.5L$

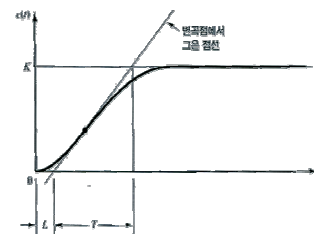


Fig. 2 Process reaction curve

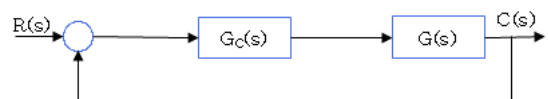


Fig. 3 Schematic diagram of PID Control System

##### 2.2.2 불감대 설정방법

열전소자는 전력 공급을 중단할 경우 열이 전이 된다는 사실을 감안하여 일정한 전력 공급이 이루어져야 한다. 하지만, 전력의 공급이 지속될 경우 작동유체를 일정한 온도

로 유지하기 힘들게 된다. 본 논문에서는 불감대 설정은 열전소자의 특성상 문제점인 내부 열 전이현상을 억제하고, PI 제어상의 오차를 감소시키려는 목적으로 이용한다. 불감대의 설정은 0 ~ -5% 까지 변화시키면서 실험하였다.

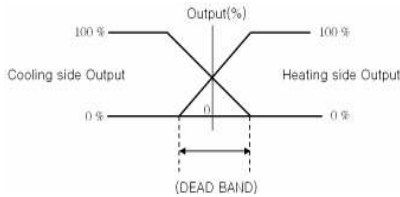


Fig. 4 Linear-minus-dead-band

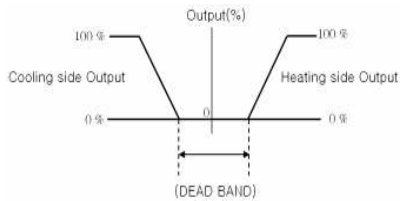


Fig. 5 Linear-plus-dead-band

### 3. 연구결과 및 고찰

#### 3.1 PID 설정

Table 2 Case of PI Controller Parameter

	$K_p$	$T_i$	$\zeta$
1	6 (%)	6.98 (s)	0.7
2	3 (%)	13.75 (s)	0.7
3	0.2 (%)	137 (s)	0.79
4	0.1 (%)	192 (s)	0.79
5	0.1 (%)	202 (s)	0.81

Ziegler-Nichols 튜닝규칙에 의해 초기  $K_p$  값을 구하기 위해 일정한 전력(전압: 5 V, 전류: 3 A)을 입력하여 본 연구에서 제시한 항온기에서 출력되는 온도변화를 얻어 시정수(T)와 운반지연시간(L)를 각각 350(s), 50(s)로 도출하였다.

오버슈트 범위 2% 또는 5% 내로 안정화되는 시간이 가장 짧아지는 감쇠비  $\zeta$  는 0.7 근처이며, 이때 최대 오버슈트도 5%이내 이므로 최적설계에 선호되는 감쇠비이다.<sup>5</sup> 그러나 정밀도를 향상시키기 위해서는 감쇠비를 조정해야 한다. 제어대상이 2 차 시스템일 경우 바람직한 과도응답을 얻기 위해서는 감쇠비 범위가 0.4~0.8 사이여야 한다는 기준을 초기범위 설정에 사용한다. 한편,  $\zeta$  가 0.4 이하로 작아지면 과도응답에 지나친 오버슈트 발생,  $\zeta$  가 0.8 이상으로 커지면 시스템의 응답이 느려진다. 보다 나은 정밀도를 위해 본 연구에서는 오버슈트를 1% 이내로 설정하기 위해 감쇠비를 약 0.79로 설정하였다.

Table 2 는 초기  $K_p$ ,  $T_i$  값과 수정하여 재설정된 값들이다.  $K_p$  값을 수정하는 이유는 항온기의 응답속도를 높이고 온도변화에 신속히 대응할 수 있도록 하기 위함이다.

1 번의 경우 오버슈트가 -0.5 °C 발생 하였으며, 안정화까지의 시간이 많이 소요됨을 보였다.

2 번은 임의로  $K_p$  값을 절반으로 줄였을 경우이다. 이는 목표점까지의 도달시간을 단축하기 위한 조치이다.

3 번의 경우는 오버슈트를 1% 이내로 하면서 안정화 시간을 단축하기 위하여  $K_p$  값과 감쇠비를 적정 값으로 조정 한 뒤 실험하였다.

4 번의 경우는 3 번에서  $K_p$  값을 절반으로 줄여 시간의 단축을 고려한 경우이다.

5 번의 경우는 4 번에서 감쇠비를 조정하여 오차를 줄이는 목적으로 실험을 하였으나, 4 번과 같은 결과를 도출하였으며, 안정화 시간이 약간 감소하는 결과를 보여 주었다. 3~4 번의 경우의 실험결과를 Fig. 6 에 나타내었다.

#### 3.2 불감대 영역설정

Fig. 6 ~ Fig. 7 에 나타낸 그래프는 동일한 조건인 Case 5 (P: 0.1, I: 202) 에서의 불감대의 변화에 대한 온도제어의 결과이다. 불감대 영역을 0 ~ -5% 로 변경하면서 실험하였을 경우 -2 ~ -3 %사이에서 목표 값과 오차가 가장 적게 나타났으며, 온도가 안정화되는 시간이 증가함을 알 수 있다.

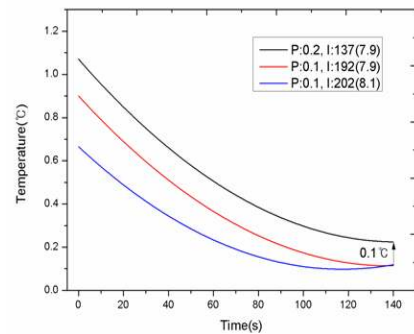


Fig. 6 Comparison experimental results in Case 3, 4, 5 [Dead Band : 0%]

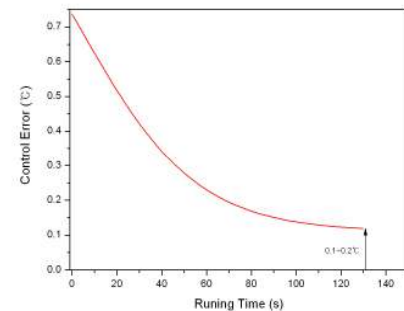


Fig. 7 Experimental results with Dead Band in Case1 [Heat(P:1), Cool(P:0.1, I:202), Dead Band : 0%]

### 4. 결론

본 연구에서는 반도체 제작 공정과 같이 정밀도가 중요한 공정의 미세한 온도를 제어할 수 있는 시스템을 구축할 수 있는 기본적인 연구에 대해 고찰해 보았다.

#### 참고문헌

1. Lei, T, K., "Use of computational fluid dynamics applications in cleanroom design," Journal of IEST, Vol. 44, No 2, pp. 30 ~ 40
2. Jancoski, C. A. and sinclair, J. D., "High isolation mini-environment for process involving toxic substances," Proceeding-Institute of Environmental Sciences, pp. 117 ~ 121, 1997.
3. Gene F. Franklin. and J. David Powell, Abbas Emami-Naeini., "Feedback Control of Dynamic System," Pearson Education Korea, pp.230 ~ 236, 2000