

## 게인 스케줄링을 이용한 광대역 온도제어기의 설계

### Design of Temperature based Gain Scheduled Controller for Wide Temperature Variation

정재현<sup>1</sup>, 김정한<sup>1,✉</sup>  
Jae Hyeon Jeong<sup>1</sup> and Jung Han Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (Department of Mechanical System Design Eng., Seoul National Univ. of Sci. & Tech.)  
✉ Corresponding author: hankim@seoultech.ac.kr, Tel: +82-2-970-6397

Manuscript received: 2013.1.18 / Revised: 2013.5.24 / Accepted: 2013.7.12

*This paper focused on the design of an efficient temperature controller for a plant with a wide range of operating temperatures. The greater the temperature difference a plant has, the larger the nonlinearity it is exposed to in terms of heat transfer. For this reason, we divided the temperature range into five sections, and each was modeled using ARMAX(auto regressive moving average exogenous). The movement of the dominant poles of the sliced system was analyzed and, based on the variation in the system parameters with temperature, optimal control parameters were obtained through simulation and experiments. From the configurations for each section of the temperature range, a temperature-based gain-scheduled controller (TBGSC) was designed for parameter variation of the plant. Experiments showed that the TBGSC resulted in improved performance compared with an existing proportional integral derivative (PID) controller.*

Key Words: temperature control (온도제어), gain scheduling (게인 스케줄링), ARMAX, model identification (모델식별), nonlinear system(비선형시스템), PI controller (비례-적분제어기)

#### 1. 서론

산업용 온도제어 장비인 칠러(chiller)는 각 공정에서 요구되는 목표 온도를 추종하도록 하는 온도제어 장비로, 공정요건에 따라 다양한 분야 및 단계에 적용되고 있으며 이를 위한 시스템 최적화 및 제어기술의 연구가 진행되고 있다. 특히 반도체 및 디스플레이 공정 등의 중간단계에서 필수적인 역할을 함으로써 수율의 향상과 공정시간의 단축에 큰 기여를 한다.

현대 제어이론의 발전으로 온도제어에 대해서도 여러 가지 고급제어 알고리즘이 많이 연구되었으나 실제 산업현장에서는 PI 또는 PID제어기를 널리 사용하고 있는데 그 이유는 구조가 간단하면

서도 높은 안정성과 효율성을 가지기 때문이다.<sup>1</sup> PID 제어기의 현대적인 온도제어 응용으로는 가변 풍량 유닛에 의한 실내 공간의 온도제어를 위해 상태 예측기(state observer)를 이용하여 PID제어기에 상태 피드백 제어를 적용한 Park, 이온제거수(deionized water)의 온도제어를 PID 제어에 외란 예측기(disturbance observer)를 적용한 Mimura, 신경회로망을 이용한 PID구조를 갖는 자기동조 제어기를 설계한 Cho, uDEAS를 이용한 히터 시스템의 IMC-PID자동 동조 제어기를 설계한 Kim, 적응최적시간 제어를 사용한 전기로의 온도제어를 뱅-뱅제어 기법을 적용한 Jeon 등이 있다.<sup>2-6</sup>

온도 제어시스템은 열의 전달과 입출력에 의한 비선형적 특성 때문에 정확한 모델링 및 제어가

어렵게 되는데, 특히 넓은 온도제어 범위를 가지는 장치일 때는 온도 변화에 따른 시스템 모델의 변화가 무시하기 힘들 정도로 커지는 경우가 많아서 이러한 경우 단일모델 기반인 일반적인 PID 제어기로는 좋은 성능을 내기 힘들다.

상용화된 PI 또는 PID 제어기는 고정된 시스템 모델에 대한 단 하나의 모델링 및 제어게인 세트를 가지고 있으므로 전체 온도범위에서의 최적화된 성능을 얻는데 한계가 있으며, 실제 현장에서 제어기의 튜닝은 대부분 특정 온도에서의 시행착오법에 의하여 이루어지고 있어서, 튜닝에 사용된 온도 대역 이외의 구간에서는 성능이 크게 떨어지게 된다.

온도제어기 설계시 사용되는 시스템 모델의 식별방법은 일반적으로 연속적 방법 또는 귀납적 방법을 이용한다.<sup>7</sup> 연속적 방법으로는 열역학적 법칙을 이용하여 열전달 지배 방정식 등을 사용해 모델을 수식화하는 방법으로 전기히터 제어의 동특성 모델링 연구를 진행한 Shin, 방열판기구(hot plate apparatus)의 PID제어기 튜닝을 위한 열응답 시뮬레이션 연구를 진행한 Thomas 가 있다. 귀납적 방법은 실제 시스템의 입출력 데이터를 가지고 역으로 모델을 추적하는 방법으로 반도체 테스트 핸들러를 위한 온도 제어기 개발을 연구한 Cho, 가스터빈 발전기의 배기가스온도 모델링 및 시뮬레이션을 연구한 Woo 가 있다.<sup>7-10</sup>

본 연구에서는 칠러의 온도에 대한 플랜트 특성 변화를 입체적으로 모델링하고, 플랜트의 비선형성을 보상하기 위해 주극점의 변화에 따라 제어게인을 스케줄링함으로써 넓은 온도 구간에서의 공정 수율과 정착 시간의 단축을 위한 알고리즘을 제안하였다.

플랜트의 모델링은 입출력데이터를 이용하여 모델을 역으로 추적하는 ARMAX(auto regressive moving average exogenous) 제어 모델을 구성하고 구간에 따른 최적제어 파라미터를 스케줄링하여 온도에 따라 게인이 입체적으로 변화하도록 하는 Temperature Based Gain Scheduled Controller(TBGSC)를 설계하였다. 마지막으로 실험을 통하여 기존 PID 제어기와 설계된 제어기간의 성능을 비교 및 검증하였다.

## 2. 온도제어 시스템

### 2.1 칠러 시스템

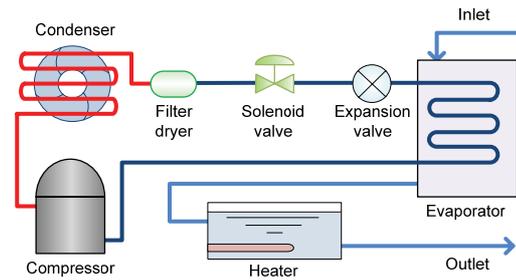


Fig. 1 Schematic diagram of the chiller system

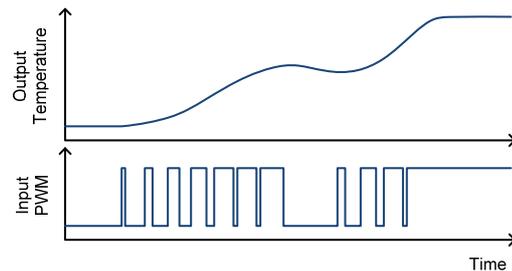


Fig. 2 PWM vs Outlet temperature

칠러는 압축기(compressor), 응축기(condenser), 팽창기(expansion valve), 증발기(evaporator)의 사이클을 이용한 냉동기로서 제어하고자 하는 대상, 즉 플랜트의 온도를 일정하게 유지하도록 하는 장치이다. 기본적인 시스템 구성은 Fig. 1과 같으며 냉각(cooling) 과 가열(heating)을 이용하여 온도를 제어하게 된다. 냉각방식은 수냉식과 공냉식이 있으며 각 방식에 따라 구성이 조금 다르나 그 원리는 같다. 본 연구에서 사용되는 장비는 응축기(condenser)와 압축기(compressor)등으로 구성되는 냉각장치의 출력이 일정한 상태에서 2차 순환 냉매를 통과시키고, 이를 히터(heater)로 가열하여 최종 온도를 제어하는 방식이며, 위의 Fig. 2에 히터의 입력신호인 PWM에 의한 히터의 온/오프와 냉매온도 입출력 관계를 예시하였다.

칠러는 일반 냉장고와는 달리 원거리에 있는 제어 대상체에 냉매를 순환시켜야 하므로 칠러 내부의 냉각 사이클이 하나 있고, 제어 대상체와 칠러 사이를 순환하는 별도의 냉매를 가지고 있는 이중구조로 되어 있다.

칠러 내부의 증발기(evaporator)를 거친 차가운 냉매는 히터를 통과하면서 원하는 온도로 제어되어 파이프나 호스를 통하여 온도를 제어하고자 하는 외부(Outlet)의 대상체(척, 체임버등)에 전송되게

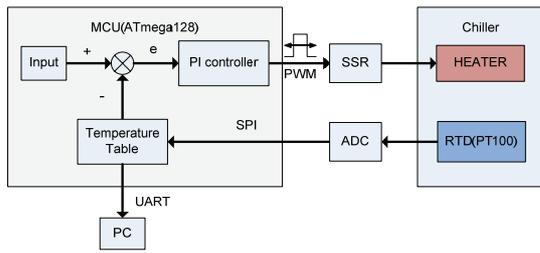


Fig. 3 H/W Block diagram

된다. 쿨러는 항상 켜놓고 히터로만 온도제어를 하는 이유는 압축기의 온/오프 자체가 비선형적인 온도의 점프나 단속을 유발하기 때문에, 정밀한 온도제어를 위해서는 압축기는 항상 켜놓고 냉매를 순환하는 장치 안에서 출력되는 쪽의 냉매의 온도를 히터로 제어한다.

### 2.2 제어 시스템의 H/W 구성

상기한 칠러 온도 제어 시스템의 H/W는 Fig. 3에 제시된 블록선도와 같이 구성된다. RTD온도센서(PT100)로부터 받은 온도 신호는 ADC(AD7792)와 마이크로 컨트롤러(ATmega128) 간의 직렬통신(SPI)을 통해 전달되며, 측정 원리는 RTD 온도센서(PT100)에 미세한 전류(1mA)를 흘려 나오는 저항을 계산하여 ADC에서 직렬통신(SPI)으로 마이크로 컨트롤러에 온도신호를 전달한다. 전달받은 신호는 내부에 저장된 알고리즘을 통하여 출력 값을 계산하며, 동시에 PC에 온도데이터 및 관련된 여러 가지 정보를 전송할 수 있는 기능을 내장하여 데이터를 저장 및 출력한다.

계산된 온도 제어 신호는 마이크로 컨트롤러에서 칠러 내부의 히터로 연결된 반도체릴레이의 제어를 통해 히터를 단속 제어한다. 온도는 약 100ms간격으로 측정하였으며 마이크로 컨트롤러로부터 출력되는 PWM제어신호는 1초 간격으로 출력하여 제어하였다.

## 3. 모델링

### 3.1 플랜트의 모델링

광대역 온도 제어기에 있어서 중요한 점은 온도를 제어하고자 하는 대상체의 변화 및 교체에 따라 제어대상 플랜트의 모델링이 크게 달라지게 된다는 점이다. 따라서 제어기의 게인도 여기에 맞추어 달라져야 하며, 제어 대상체의 용량이라든지 그 안의 공정상의 대상체가 달라지면 이에 상

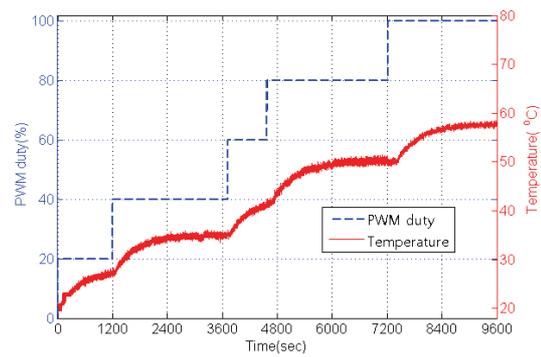


Fig. 4 Experimental data for plant modeling

응한 제어기의 튜닝이 손쉽게 이루어 질 수 있어야 한다.

제어기의 설계에 있어 플랜트의 모델링은 입력  $U(t)$ 에 대한 출력  $Y(t)$ , 즉 플랜트의 전달함수를 구하는 것이며 상당히 중요한 부분을 차지한다. 모델링의 입력은 반도체릴레이(SSR)에 연결된 히터의 제어 신호이며, 출력은 온도가 된다. 본 모델링에서는 SSR의 입력신호인 PWM 신호에 대한 RTD 온도 센서의 응답신호를 측정하였다.

본 연구에서는 Heat Exchanger(TK-HE7050SC)를 사용하여 모델링, 제어시뮬레이션 및 실험을 진행하였다. 이 장비의 온도제어 범위는  $20^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 이며 냉각과 가열이 동시에 제어가 가능하다. 냉매의 유속은 일정한 상수로 고정하였으며, 장비의 냉각능력지수는 50% 고정출력으로 일정하게 유지하여 실험을 진행하였다. 히터의 PWM제어에 따른 출력 냉매의 온도관계 실험결과 중 하나를 도시하면 Fig. 4와 같고, 이 실험결과들을 시스템 모델링 시 입력 데이터로 사용 및 검증하였다.

실험 결과를 분석해보면 온도의 구간별로 시정수가 조금씩 다르다는 것을 알 수 있는데, 그 이유는 시스템의 열의 전도 및 방출에 대한 비선형성 때문이며, 이는 칠러의 유속에 따라서도 달라질 수 있다. 이러한 비선형적 특징을 가지는 시스템은 온도에 따라 시스템 모델 파라미터가 달라진다는 것을 확인할 수 있다.

### 3.2 제어 모델 식별

모델링 실험을 통해 얻은 상기의 데이터를 이용하여 ARMAX제어모델을 구성하였으며 관계식은 식(1)과 같다.

$$A(q)y(t) = B(q)u(t - n_k) + C(q)e(t) \quad (1)$$

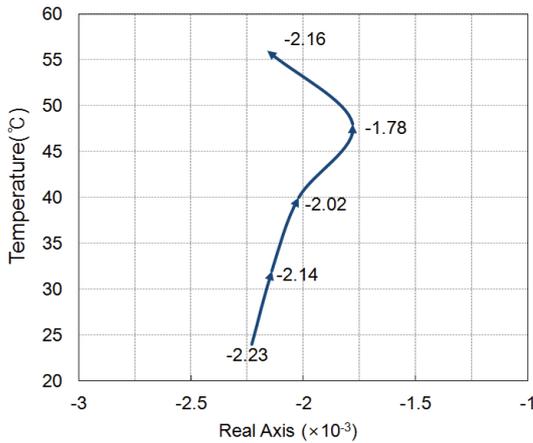


Fig. 5 Variation of poles according to temperature

Table 1 Transfer function for temperature range

Temperature	Transfer function G(s)
Section 1 (20~28 °C)	$G_1(s) = \frac{1.3 \times 10^{-9} s^2 + 0.0437s + 0.8757}{s^2 + 284.2s + 0.6336}$
Section 2 (28~36 °C)	$G_2(s) = \frac{10^{-5}(0.012s^2 + 0.8413s + 11.91)}{s^2 + 0.06568s + 0.0001361}$
Section 3 (36~44 °C)	$G_3(s) = \frac{1.888 \times 10^{-7} s^2 + 1.814s + 36.27}{s^2 + 2.529 \times 10^4 s + 51.09}$
Section 4 (44~52 °C)	$G_4(s) = \frac{2.781 \times 10^{-6} s + 55.6 \times 10^{-6}}{s^2 + 0.05151s + 8.829 \times 10^{-5}}$
Section 5 (52~60 °C)	$G_5(s) = \frac{4.538 \times 10^{-3} s + 90.77 \times 10^{-3}}{s^2 + 23.08s + 0.1614}$

식(1)에서  $A(q), B(q), C(q)$  는 다음과 같다.

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n_a} \tag{2}$$

$$B(q) = b_1 + b_2 q^{-1} + \dots + b_n q^{-n_b+1} \tag{3}$$

$$C(q) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_n q^{-n_c} \tag{4}$$

식(1)의  $u$ 는 입력,  $y$ 는 출력,  $e$ 는 오차이며 식(2)부터 (4)의  $n_a, n_b, n_c$ 는 모델의 차수,  $n_k$ 는 delay의 차수를 의미한다. 계수  $a_n, b_n, c_n$ 은 모델의 입출력 데이터를 이용하여 구할 수 있다. 일반적으로 간단한 발열시스템은 1차 시스템으로 간주하는 경우가 많으나, 2중 냉매구조인 칠러 시스템에서는 모델 식별의 정확성이 매우 중요하므로 2차 시스템으로 모델링 하였다.

플랜트 모델은 시스템의 특성인 극점의 위치가

변화하는 것을 알아내기 위해 구간을 다섯 개로 나누고 모델링 실험데이터를 이용해 각각 ARMAX 모델링하여 전달함수를 구하였다. 본 실험에서 측정한 플랜트의 주극점의 변화를 도시하면 Fig. 5와 같으며 제어대상 플랜트의 각 구간에 대하여 전달함수를 구해 정리하면 Table 1과 같다.

구간에 따라 설계된 5개의 플랜트 모델링 방정식은 온도에 따라 변화하는 것으로 볼 수 있으며, 가장 중요한 주극점의 변화는 Fig. 5와 같이 온도가 올라감에 따라 우측으로 이동하며 마지막 구간에서 좌측으로 이동하게 되는데, 이는 PWM으로 구동되는 히터의 전류특성과 포화상태, 그리고 장시간 히터의 on상태가 지속되어 발생하는 해당 플랜트의 비선형적 특성으로 보인다. 중요한 것은 그 양이 20 ~ 60°C 구간에서 절대값이 약 20% 넘게 변화하므로 이러한 변화를 고려해야만 각 온도대역에서의 최적 제어를 설계할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 플랜트의 비선형적인 변화를 수용할 수 있는 게인 스케줄링(Scheduling) 제어기법을 사용하여, 제어게인 또한 평면적으로 변화할 수 있는 Temperature Based Gain Scheduled Controller (TBGSC) 구조를 설계 및 개발하였다.

#### 4. 제어기의 설계 및 검증실험

##### 4.1 TBGSC의 설계

다음 Fig. 6은 제안된 TBGSC시스템의 구조를 나타낸 것으로 Table 1과 같이 온도 구간에 따라 변화하는 전달함수를 제어하기 위한  $G_c(s)$ , 즉 구간에 따라 게인이 입체적으로 변화할 수 있는 구조로 설계하였다. 일반적으로 빠른 응답이 필요한 온도제어의 경우 전기적인 맵핑의 조절을 위해 D 게인을 추가하여 PID 제어기를 구성하지만 열용량이 크지 않은 일반적인 단일 루프형 시스템에서는 P게인과 I게인만으로도 좋은 결과를 얻을 수 있으므로 본 연구에서는 P제어게인과 I제어게인을 사용하였다.<sup>11</sup>

기존 상용품인 PID제어기의 게인 조정은 오버슈트 없이 가장 빠른 정착시간 기준으로 튜닝되며, 숙련된 작업자가 장비의 공정 조건에 따라 가장 빈번하게 사용되는 온도를 목표점으로 설정하여 튜닝하여 사용되고 있다. 본 연구에서 제안한 TBGSC의 세부 게인 설정도 동일한 기준을 적용하여, 온도에 따라 최적화된 빠른 정착 시간, 적은 오버슈트(overshoot) 및 안정성 등의 조건하에 최적

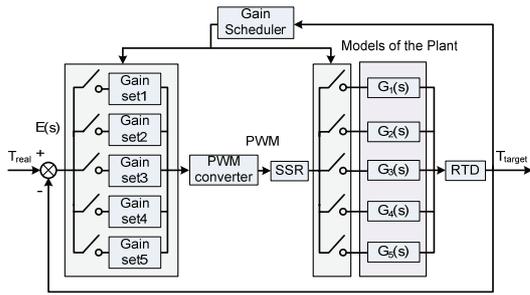


Fig. 6 Block diagram of the TBGSC system

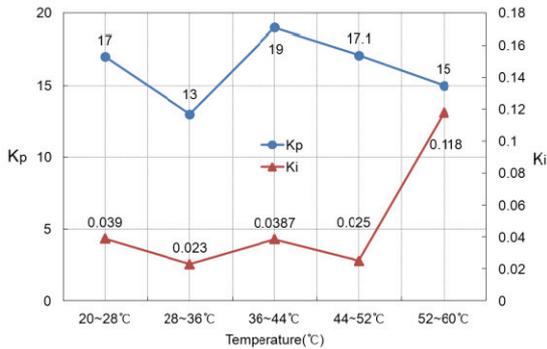


Fig. 7  $K_p$ ,  $K_i$  gain for temperature

의 성능을 유지하도록 설계하였다.

제안된 제어기에서는, 제어대상 플랜트가 보다 정확한 5개의 모델이 제어 온도에 따라 적용되며, 제어기는 변화하는 플랜트에 맞는 게인으로 자동 전환된다. 최적 제어 게인은 MATLAB을 이용하여 플랜트 전달함수  $G_p(s)$ 에 대한 Step 응답 시뮬레이션과 게인튜닝을 통해 구하였으며 각 온도구간에 따른 게인은 Fig. 7에 도시하였다. TBGSC의 기본 구조는 식(5)와 같다.

$$G_c(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (5)$$

전체 시스템의 전달함수는 식(6)과 같이 얻을 수 있고 각 구간에 대한 스텝(step) 응답시뮬레이션은 Fig. 8과 같다.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (6)$$

제어기의 PI 게인은 step 응답 시뮬레이션 결과에서 오버슈트가 1% 미만이며 정착시간을 최소화할 수 있도록 게인을 설정하였으나 실제 장비에

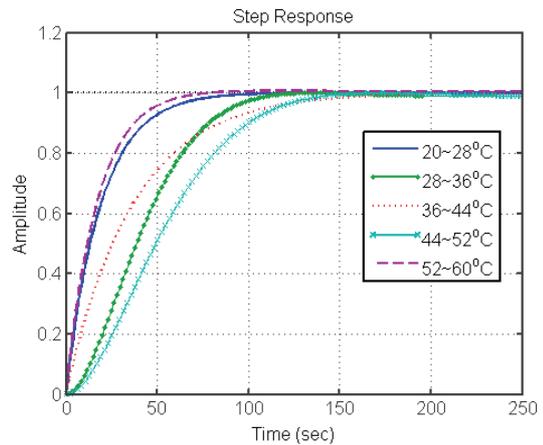


Fig. 8 Step responses of each temp. section

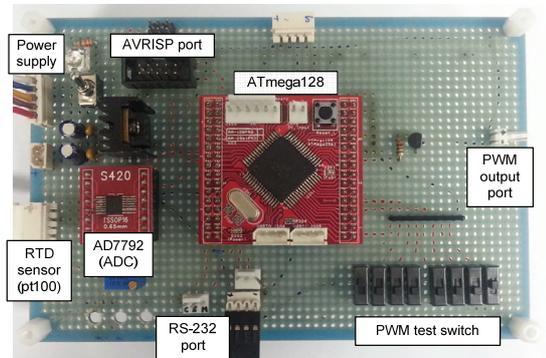


Fig. 9 Temperature control board

적용시 발생하는 약 2%의 오버슈트를 감소시키기 위해 게인튜닝을 실시하여 모든 구간에서 1% 미만이 되도록 최적 게인을 구하였다. 온도구간별 정착시간은 73.89sec, 103.17sec, 142.85sec, 131.80sec, 59.42sec이며 오버슈트는 0.05%, 0.00%, 0.00%, 0.00%, 0.68%이다.

설계된 제어기는 자동적으로 온도에 따라 게인이 스케줄링(scheduling) 됨으로써 변화하는 시스템의 최적의 제어 게인을 항상 추종하도록 설계되었으며, 본 연구에서와 같은 기법을 사용하면, 온도 제어의 폭이 매우 넓은 장비도 각 온도 대역에서의 최적 성능을 가지도록 제어하는 것이 가능하다.

Fig. 9는 제작된 온도 제어보드의 사진이다. 왼쪽부터 전원(5v)포트와 RTD 온도센서(PT100) 입력 포트, ADC(AD7792), 마이크로 컨트롤러(ATmega 128)가 있으며, 온도 출력 및 확인을 위한 RS-232 포트, SSR을 제어하기 위한 PWM 출력포트가 있다.

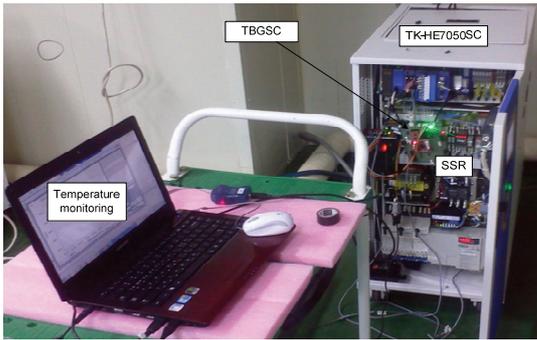


Fig. 10 Experimental setup

4.2 검증 실험 및 결과

시뮬레이션 결과를 토대로 구성된 TBGSC를 실험장비에(TK-HE7050SC)에 적용하여 제어기의 성능을 테스트하였다. 실험은 초기온도 20℃에서 40℃까지 5℃간격으로 목표온도를 설정하고 시간에 따른 온도 변화 및 히터출력을 측정하였다.

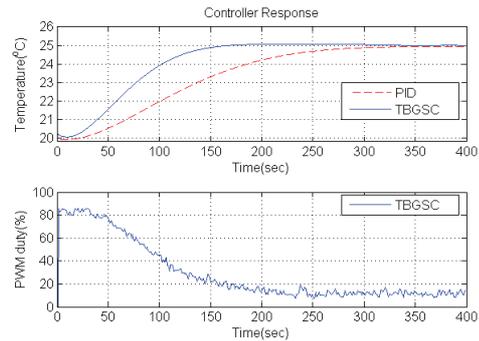
제안된 제어기의 성능은 기존의 상용화 되어있는 PID 온도 제어기와 비교하였으며, 실험의 방법은 초기치는 20℃에서부터 시작하고, 목표제어온도를 25, 30, 35, 40℃ 등으로 순차적으로 목표치를 높여가면서 기존 제어기와 성능을 비교하였다. 설정된 온도의 정밀도는 ±0.25℃를 기준으로 정상 상태에 도달한 것으로 판단하여 측정하였으며 결과는 다음 Fig. 11과 같다.

Fig. 11에 제시된 바와 같이 기존 제어기 보다 제안된 제어기의 응답이 더 빠른 것을 알 수 있으며 구간에 따른 정착 시간(settling time) 및 단축률은 Table 2에 나타내었다. Fig. 11의 각 그래프의 아래그림은 제안된 알고리즘에 의한 PWM 출력을 같이 도시한 것이다.

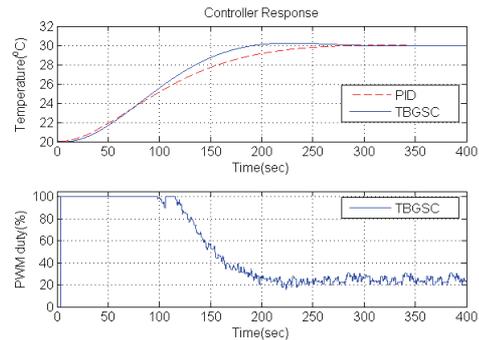
Table 3은 TBGSC가 적용된 후의 PWM duty에 의해 투입된 총 에너지량을 표로 나타낸 것으로 실험시작 후 420초까지 사용된 에너지를 구하였다. 사용된 히터의 용량은 6kW이며 3상 (phase) 220VAC 전원을 사용했다.

Table 2에서 보여지는 바와 같이 목표 온도가 낮을수록 기존의 제어기에 비하여 제안된 제어기는 정착시간이 단축되었으며, 목표온도가 25℃일 경우 무려 51% 나 시간을 단축하였다.

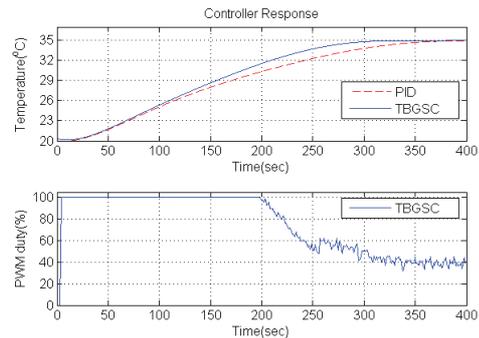
설정한 목표 온도가 높아질수록 기존의 제어방법과 응답시간의 차이가 줄어들게 되는데 그 이유는 목표 온도가 높아지게 되면 히터의 출력이 초기에 긴 시간 동안 포화 상태(duty 100%)가 되기



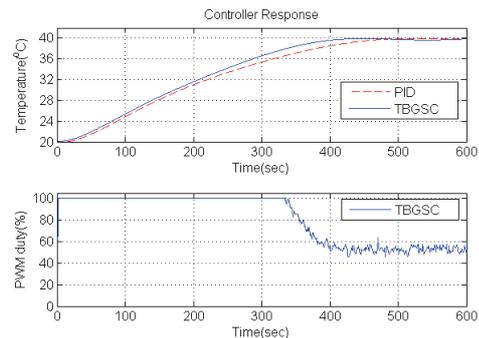
(a) Target temperature of 25℃



(b) Target temperature of 30℃



(c) Target temperature of 35℃



(d) Target temperature of 40℃

Fig. 11 Comparison of response

Table 2 Comparison of measured settling time(sec.)

Temp.(°C)	Existing PID controller	Proposed TBGSC	T <sub>s</sub> Improvement(%)
20~25	292	142	51.37
20~30	245	181	26.12
20~35	356	302	15.17
20~40	476	417	12.39

Table 3 Total energy consumption of TBGSC

Temperature(°C)	energy consumption (J)
20~25	175.73
20~30	349.18
20~35	516.28
20~40	650.02

때문이며, 본 실험에서는 40°C 이상인 구간에서는 기존 제어기와 성능의 차이가 크지 않게 된다. 그러나 만약 히터의 용량을 더 크게 설계한다면 히터 동작의 포화도 더 높은 온도에서 일어나기 때문에 이러한 문제도 개선이 가능하다.

Table 3에서 첫 번째 구간인 20°C에서 25°C로 상승했을 때와, 20°C에서 40°C로 상승시켰을 경우를 비교하면 온도차이는 4배이지만 투입된 에너지는 3.7배로 정확한 배수로 계산되지 않는 비선형적인 특징을 가지고 있음을 알 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 광폭의 온도 제어 대역을 가지는 플랜트의 효율적인 온도 제어를 위해 단일한 게인 세트에 의한 기존 방식을 온도 구간을 나누어 다수개의 게인 세트에 대체하여 온도에 의한 플랜트의 가변 파라미터가 반영된 TBGSC를 설계하였다.

열 전달 및 열 방출 시스템은 온도의 차이가 커질수록 비선형적인 특성이 강해지므로, 온도 제어의 범위가 넓은 칠러 시스템에 대하여 이를 구역별로 모델링하여 플랜트의 파라미터를 입체적으로 설계하여 빠른 응답특성과 효율적인 성능을 얻어내었다. 반도체 공정에서 빠른 온도제어 특성은 매우 중요하며, 이는 곧 수율의 향상과 공정시간의 단축을 의미한다.

제안된 제어기는 실제 장비를 ARMAX 모델을 사용하여 모델링하고 시뮬레이션 하였으며, 이를 바탕으로 제어기를 설계하여 실제 실험에서도 예

상된 바와 같은 우수한 성능을 입증하였다. 또한 일반 상용 소형 마이크로 컨트롤러에 내장할 수 있을 정도로 효율적인 알고리즘이며, 데이터를 테이블화하여 효율적으로 변경, 참조가 가능하도록 설계하였다.

### 후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. Kim, J. H., "Control of Linear Motor using DSP," Dong-II Pub., pp. 84-92, 2003.
2. Park, S. H. and Shin, S. C., "A Study on the Development of the Zonal Division Model and the State Feedback Controller for the Temperature Control of the Indoor Zone Via VAV Unit," Journal of SAREK, Vol. 13, No. 10, pp. 947-959, 2001.
3. Mimura, K. and Shiotsuki, T., "Temperature Control of Deionized (DI) Water Heater by Combination of PID Control and Modern Control Theory," Proc. of International Conference on Mechatronics, pp. 1-5, 2007.
4. Cho, W. C., Jeong, I. G., and Shim, T. E., "Design of a Self-tuning Controller with a PID Structure Using Neural Network," Journal of IEEK, Vol. 39-SC, No. 6, pp. 1-8, 2002.
5. Kim, M. S., Kim, J. H., Choi, M. K., Park, J. O., and Kim, J. W., "Design of an Auto-Tuning IMC-PID Controller for a Heater System Using uDEAS," Journal of Intelligence and Information Systems, Vol. 21, No. 4, pp. 530-535, 2011.
6. Jeon, B. K., Song, C. S., and Keum, Y. T., "Temperature Control of Electric Furnaces using Adaptive Time Optimal Control," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 26, No. 5, pp. 120-127, 2009.
7. Woo, J. H., "Simulation of Exhaust Temperature of Gas Turbine Generator using Operating Data," Proc. of KSS Autumn Conference, pp. 176-180, 1999.
8. Shin, Y. G. and Kim, Y. I., "Modeling of Electric Control Dynamics," Proc. of SAREK Autumn Conference, pp. 1282-1287, 1998.
9. William C. T. and Robert R. Z., "Thermal response

- simulation for tuning PID controllers in a 1016 mm guarded hot plate apparatus,” *Journal of ISA Transactions*, Vol. 50, pp. 504-512, 2011.
10. Cho, S. Y., Kim, J. Y., Kang, T. S., Lee, H. J., and Koh, K. I., “Development of a Temperature Controller for a Semiconductor Test Handler,” *Journal of KIEE*, Vol. 48A, No. 4, pp. 395-401, 1999.
  11. Lee, J. H., “Temperature Control System for the Practical resolution of Time delay,” *Automatic Control Division Lecture of SAREK*, pp. 33-38, 2003.