

산업용 냉각기의 열부하 변화에 대응한 정밀온도제어 특성 Characteristics of Precise Temperature Control of Industrial Cooler on Thermal Load

백승문 · 최준혁 · 변종영 · 문춘근 · 정석권 · 윤정인

S. M. Baek, J. H. Choi, J. Y. Byun, C. G. Moon, S. K. Jeong and J. I. Yoon

(접수일 : 2010년 3월 2일, 수정일 : 2010년 3월 31일, 채택확정 : 2010년 4월 1일)

Key Words : Hot-gas Bypass(핫가스 바이패스), PID Control(PID 제어), Electronic Expansion Valve(전자팽창밸브), Gain Tuning(게인 튜닝)

Abstract : Recently, technical trend for machine tools is focused on enhancement of speed and accuracy. High speedy processing causes thermal and structural deformation of objects from the machine tools. Water cooler has to be applied to machine tools to reduce the thermal negative influence with accurate temperature controlling system. Existing On-Off control type can't control temperature accurately because compressor is operated and stopped repeatedly and causes increment of power consumption and decrement of the expected life of compressor. The goal of this study is to minimize temperature error in steady state. In addition, control period of an electronic expansion valve were considered to increment of lifetime of the machine tools and quality of product with a water cooler. PI controller is designed using type of hot-gas bypass for precise control of temperature. Gain of PI is decided easily by method of critical oscillation response, excellent performance of control is shown with 4.24% overshoot and $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ error of steady state. Also, error range of temperature is controlled within 0.2°C although disturbance occurs.

1. 서 론

최근 개발되고 있는 공작기계의 방향은 고정도화 고속화를 추구하고 있다. 공작기계는 절삭속도와 이송속도가 빠르기 때문에 공작물의 가공부위에 상당한 열이 발생한다.¹⁾ 이로 인한 열 발생이 정밀도에 중요한 문제를 야기한다. 열은 공작기계 부품과 공작물에 열 변형을 초래하고 이로 인해 가공정밀도와 기계의 신뢰성이 저하된다.^{2,4)} 이를 최소화하는 방법으로는 원점보정, 공작기계 서보제어의 제어 및 용도에 따라 오일 및 냉수를 이용한 냉각기구의 이용 등이 있다. 발열을 억제하기 위해 공작기계의 가공부위에 냉각된 냉수를 공급한다. 이 때 공급되는 냉수의 온도가 일정할 경우 공작물의 열 변형을 방지할 수 있다.

현재 산업용 냉각기에 가장 널리 사용되고 있는 제어는 on-off 방식이다. 이 방식은 정교한 온도제어가 어렵고, 빈번한 작동 및 정지 동작으로 소비전력의 증가와 압축기 수명을 단축시키는데, 이러한 단점을 보완한 정밀한 온도제어 방식으로는 토출가스 바이패스 방식^{5,6)}과 압축기 가변속제어방식이 알려져 있으며 본 논문에서는 토출가스 바이패스방식에 의한 산업용 수냉각기의 정밀온도제어기 설계에 대해서 검토한다.

토출가스 바이패스방식은 토출가스 밸브인 EEV(Electronic expansion valve)의 개도량을 PID 제어로직에 의해 피드백제어 한다. 제어기 설계 시의 핵심은 제어변수인 냉수출구온도가 적절한 과도특성 및 정상특성을 갖도록 PID 제어기 게인(gain)을 설계하는 것이다.

본 연구의 제어대상은 수학적 모델링이 매우 어렵기 때문에 모델 기반의 설계가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 게인 튜닝법 중 가장 대표적인 지글러-니콜스(Ziegler-Nichols)의 임계진동법^{7,8)}을 이용하여 PID 게인을 설정하고, 실험을 통하여 그 성능을 확인하고자 한다. 그리고 제어 주기별 열 부하의 급격한 변동에서도 목표 온도의 오차 이내로 정밀하게 제어가 가

윤정인(교신저자) : 부경대학교 냉동공조공학과
E-mail : yoonji@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6180
백승문, 최준혁, 변종영 : 부경대학교 대학원
문춘근 : (주) 대일
정석권 : 부경대학교 냉동공조공학과

능한지 여부와 부하변동 및 외기온도변화 같은 순간적인 외란이 주어졌을 경우 제어 주기별로 실험을 통하여 냉수의 제어오차범위를 목표온도 이내로 유지 가능 여부를 확인하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험장치의 구성도를 나타내며, Table 1은 실험조건을 각각 나타낸다.

주요 부속품으로는 로터리 타입 1HP 압축기, 에어로 핀타입 응축기, 증발기 역할을 담당하는 판형열교환기, 모세관과 토출가스 바이패스 밸브인 EEV로 크게 구성되어 있다. 그리고 냉매는 R-22를 사용하였다. EEV의 제어는 PLC와 스텝핑모터 드라이버로 구성되어 있다. 그리고 냉각기 입·출구에는 온도센서인 PT-100을 설치하였으며, 온도/전압 신호변환기가 온도검출 및 신호변환을 위하여 장착되었다.

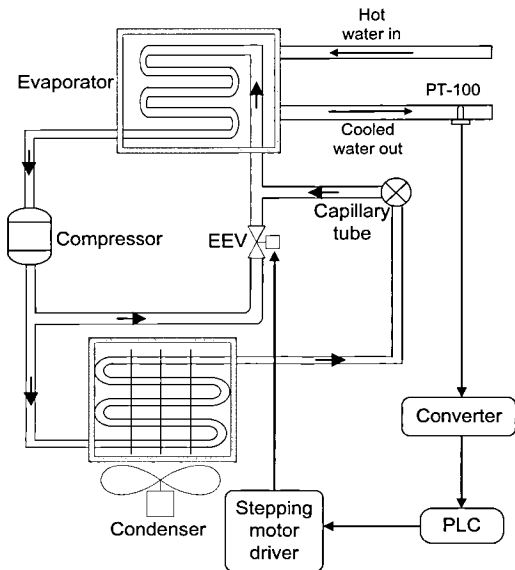


Fig. 1 Schematic diagram of control system of a water cooler

Table 1 Experimental conditions

Mass flow rate of cooled water [l/min]	25
Air temperature [°C]	30
Control period [sec]	1, 10, 15, 20

공냉식 응축기가 장착으로 인해 정밀한 실험데이터를 얻기 위해서 항온챔버를 이용하였으며, 항온챔버 내부에 실험장치를 설치하였다.

응축기와 열교환 하는 항온챔버 내부의 온도는 30°C로 고정하였으며, 냉각기의 냉수출구온도는 25°C로 유지하였다. 여건상 동작기계를 설치할 수 없는 관계

로 열 부하는 전기히터를 설치하여 장치의 열 부하를 대신하도록 하였다.

PT-100에서 실시간으로 측정된 냉수출구온도는 컨버터를 통해 전압으로 변환되어 PLC로 전송되게 된다. 그리고 PLC에서는 전송된 냉수출구온도와 미리 설정한 온도를 비교하게 되어 그 편차를 PI제어기에 의하여 0이 되도록 펄스 지령신호로 출력한다. EEV 개도를 담당하는 스텝핑모터 드라이버는 펄스를 출력하여 EEV의 개도량을 제어하게 된다.

시스템 장치의 운전상황 파악을 위해 시스템 주요 장치 부분의 입·출구부에는 T-type 열전대 와 압력 센서와 정확한 유량을 측정하기 위하여 터빈타입 디지털 유량계를 장착하여 온도, 압력 및 유량을 측정 가능하도록 하였다. 측정 기기에서 전달되는 각종 데이터 정보는 데이터 수집장치 (Agilent사, 34970A)로 모아져 PC로 전송되며 실시간으로 데이터가 저장되도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

산업용 수냉각기 시스템 특성은 외란이 일어나더라도 냉수출구온도를 적정 편차 이내로 유지 및 공급하는 것이 요구된다. 따라서 제어기의 설계사양은 오버슈트와 정착시간보다는 급격한 외란이 발생되더라도 냉수출구온도의 정상상태오차를 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 이내로 유지하도록 하였다.

본 실험 제어에 적용한 임계진동법은 다음과 같은 절차를 거쳤다. PID제어 계수 가운데 $T_i = \infty$, $T_d = 0$ 으로 놓고 주어진 제어 대상에 P제어기만을 적용하여 비례계수 K_p 값을 0부터 증가시키면서 출력에 진동이 나타나는 임계이득 K_{cr} 에까지 이르게 한다. 이 임계이득 K_{cr} 은 출력이 지속진동이 나타날 때의 비례계수 값으로 정의된다. 임계이득 K_{cr} 이 구해지면 이에 대응하는 지속진동의 임계주기 P_{cr} 을 구할 수 있다.

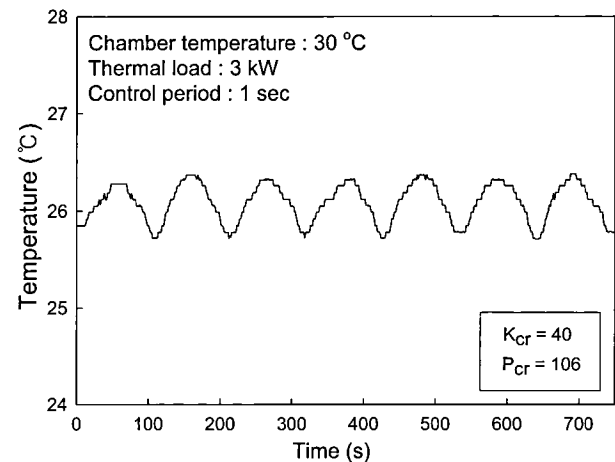


Fig. 2 Critical oscillation response

$$K_p = 0.45K_{cr}, T_i = 1/1.2P_{cr}, K_i = K_p/T_i \quad (1)$$

Fig. 2는 임계진동법으로 게인튜닝을 위해 외기온도 30℃에서 부하 3kW를 주어 진동이 발생할 때 까지 K_p 를 증가시킨 실험의 결과를 나타낸 그래프이다. 진동이 발생할 때의 임계이득 K_{cr} 은 40이고, 임계주기 P_{cr} 은 106이다. 그러므로 K_p 는 18이며 K_i 는 0.21이다.

Fig. 3은 임계진동으로 얻어진 게인 값을 이용하여 부하를 2kW를 인가하였을 경우 각 주기별 시간에 따른 온도변화를 나타낸 그래프이다. 냉수출구온도는 산업기계의 특성을 고려하여 25℃로 설정하였고, 이 값은 운전 중 가변되지 않는 것으로 가정하였다. 1, 10, 15, 20초까지의 제어주기를 변경하였을 때의 주기별 실험결과를 살펴보면 과도특성은 약 3.8% 이내로 나타났고, 정상특성은 약 ±0.1~0.2℃로 나타났다.

이는 동작기계에서 부하가 2kW일 때 제어 주기를

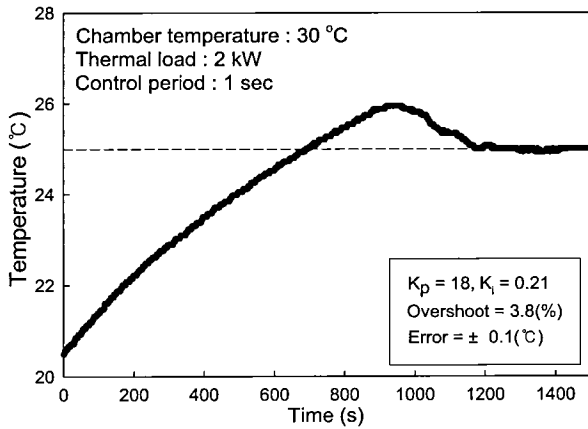
1, 10, 15, 20초로 변경시 모두 적정 편차 이내로 냉수 출구온도를 유지 가능한 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 4는 임계진동으로 얻어진 게인 값을 이용하여 부하를 3kW 인가하였을 때 각 주기별 시간에 따른 온도변화를 나타낸 그래프이다.

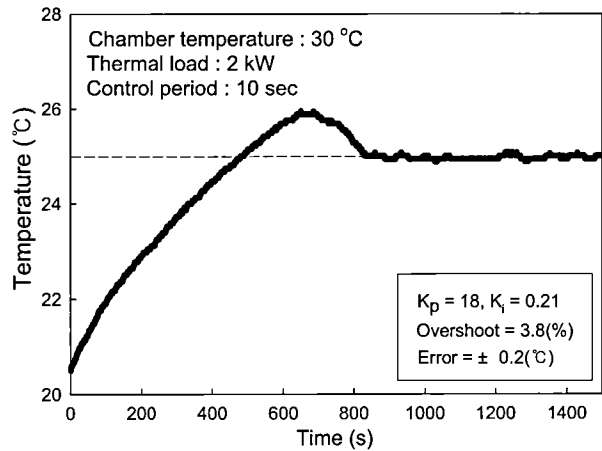
앞실험과 마찬가지로 냉수출구온도는 동작기계의 특성을 고려하여 25℃로 설정하였고, 이 값은 운전 중 가변되지 않는 것으로 가정하였다. 1, 10, 15, 20초까지의 제어주기를 변경하였을 때의 주기별 실험결과를 살펴보면 과도특성은 약 4.24% 이내로 나타났고, 정상특성은 약 ±0.1~0.2℃로 나타났다.

이는 동작기계에서 부하가 3kW일 때 제어 주기를 1, 10, 15, 20초로 변경시 모두 적정 편차 이내로 냉수 출구온도를 유지 가능한 것으로 판단할 수 있다.

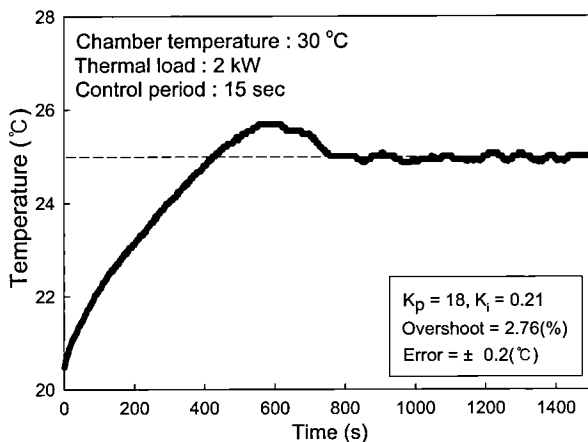
Fig. 5는 정격부하인 3kW 인가 후 2kW로 부하를 변동 시키고 다시 순간적으로 3kW의 부하를 인가시키는 순간적인 외란 인가 상태에서의 제어응답을 나타



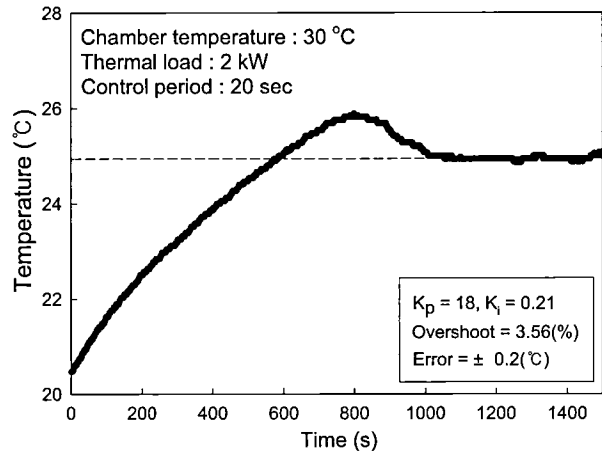
(a) Control period 1 sec



(b) Control period 10 sec

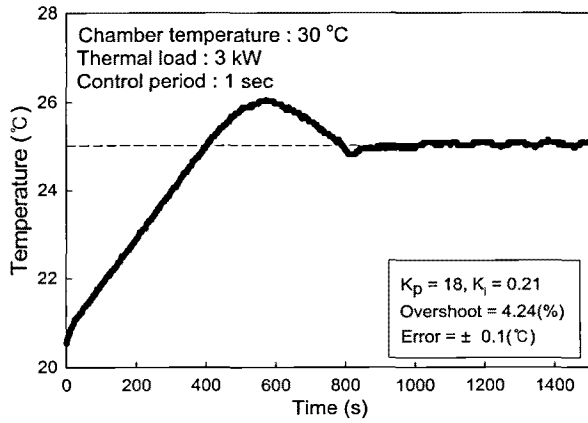


(c) Control period 15 sec

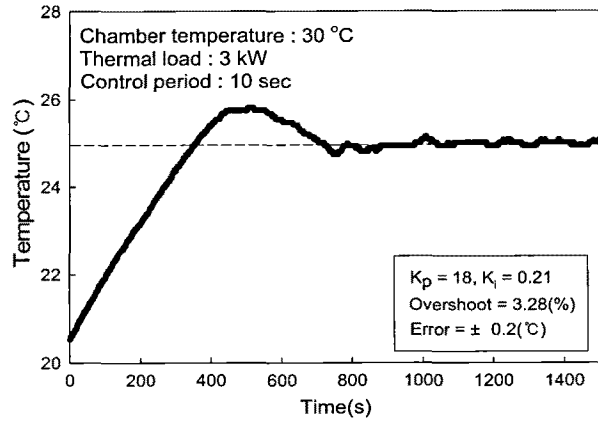


(d) Control period 20 sec

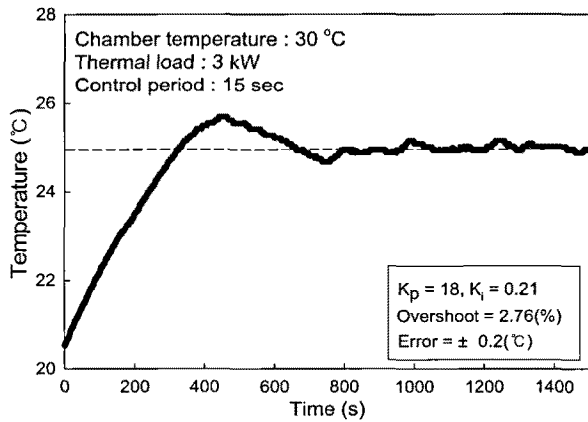
Fig. 3 Results of control performance with PI (2kW)



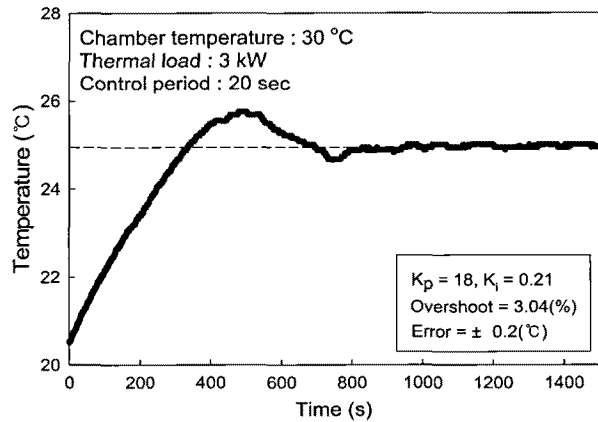
(a) Control period 1 sec



(b) Control period 10 sec



(c) Control period 15 sec



(d) Control period 20 sec

Fig. 4 Results of control performance with PI (3kW)

내는 그래프이다. 정격부하인 3kW에서 튜닝한 게인 값으로 제어한 경우, 제어주기 1초, 10초 및 15초에서는 급격한 외란 인가 시에도 제어오차를 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 이내로 유지할 수 있었으나, Fig. 5의 제어주기 20초에서는 외란 인가 시 오차가 $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ 로 나타나 제어 오차범위인 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 미치지 못한 것 확인 할 수 있었다. 이는 1, 10 및 15초 주기에서는 순간적인 외란이 인가될 경우에는 설계사양에 맞추어 정밀한 온도제어가 가능하지만 15초 이상의 긴 주기인 20초 제어 주기에서는 적용하기 곤란함을 알 수 있었다.

4. 결 론

토출가스 제어방식을 적용한 산업용 수냉각기의 정밀온도제어를 위한 PI제어기 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 임계진동법으로 PI제어를 쉽게 결정할 수 있었고 제어 결과 열 부하의 급격한 변동 하에서도 목표 온도

의 오차를 설계사양인 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 이내로 정밀하게 제어할 수 있음을 알 수 있었다.

2) 제어 결과 과도특성은 부하 2kW에서는 3.8%이내, 3kW에서는 4.24%이며, 정상상태오차가 $\pm 0.1 \sim 0.2^{\circ}\text{C}$ 로 우수한 제어성능을 보였다.

3) 순간적인 외란 인가 상태 시 제어주기 1초, 10초 및 15초 주기까지는 제어오차를 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 이내로 유지할 수 있었다.

4) 제어주기가 긴 20초 주기에서는 외란 인가시 오차가 $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ 로 나타나 제어 오차범위인 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 를 넘어 긴 제어주기에는 적용하기 곤란함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

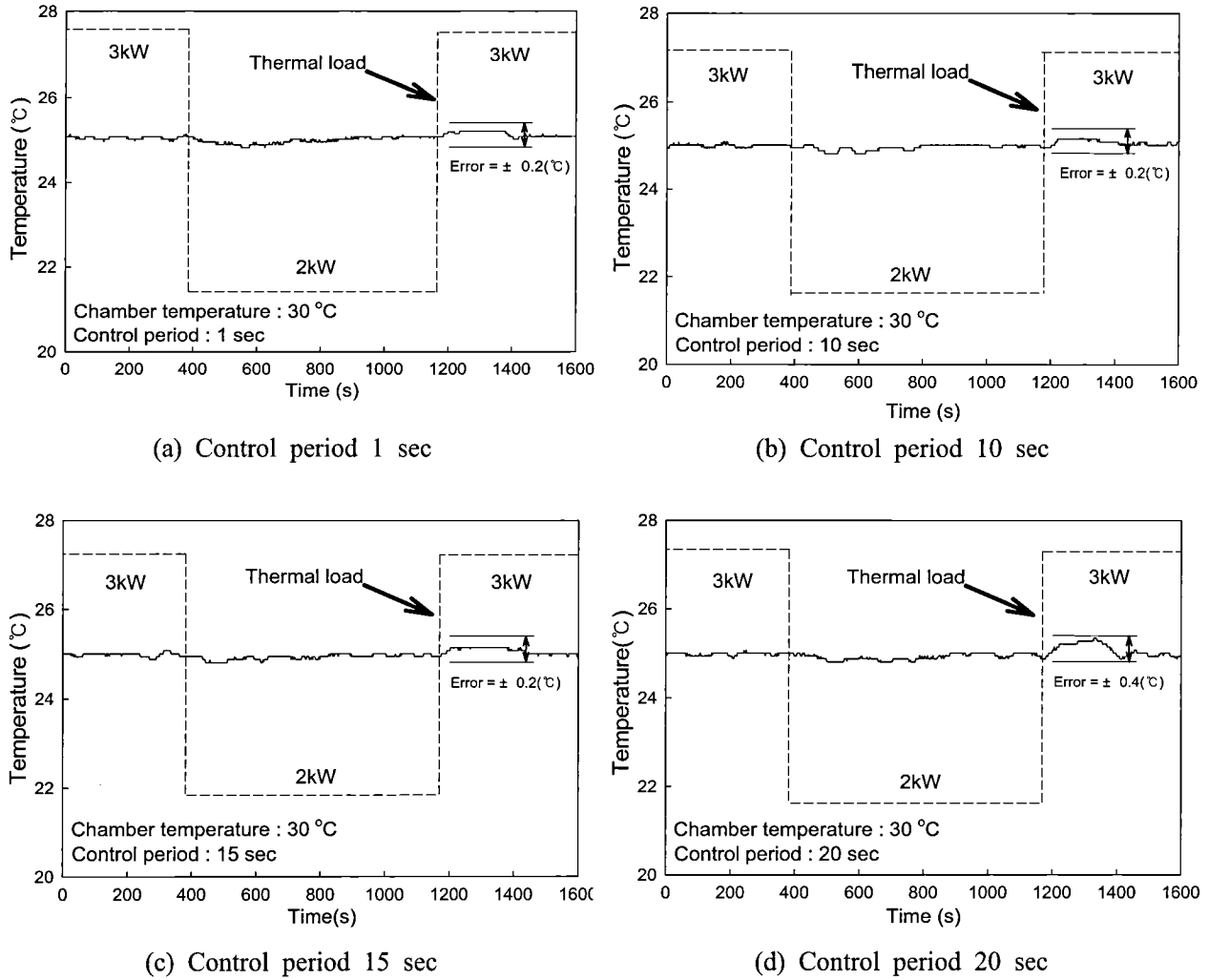


Fig. 5 Outlet temperature variation of chilled water with disturbance as time by period

참고 문헌

1. Beak, S. M. et al., 2009, "Characteristics of Temperature Control by Hot-gas Bypass Flow Rate on Industrial Water Cooler", The Korean Society of Marine Engineering, Vol. 33, No. 8, pp. 55~62.
2. Lee, S. W., Yeom, H. K., 2008, "Performance of thermal error controller to minimize thermal deformation of machine tools", Proceeding of Korean Society for Precision Engineering(spring), pp. 376~380.
3. Lee, S. W. and Lee, C. W., 2007, "Assessment capability of oil cooler with hot-gas", Proceeding of Korean Society for Precision Engineering, No. 6, pp. 459~460.
4. J. H. Choi et al., 2009, "Performance Characteristics of Cooler Controlled Capacity Using Hot-gas Bypass", Int. Symp. on Convective Heat and Mass Transfer in Sustainable Energy, Vol. 2, pp. 502~505.
5. Yaqub. M, Zubair S. M., Jameel-ur-Rehman Khan, 2000, "Performance evaluation of hot-gas bypass capacity control scheme for refrigeration and air-conditioning systems", Energy, Vol. 25, pp. 543~561.
6. Yaqub. M, Zubair S. M., Jameel-ur-Rehman Khan, 2000, "Performance evaluation of hot-gas bypass capacity control scheme for refrigeration and air-conditioning systems", Energy, Vol. 25, pp. 543~561.
7. Byun J. Y. et al., 2009 "Precise Temperature Control of Oil Cooler with Hot-gas Bypass", The Korean Society for Power System Engineering,

- KSPSE The 2009 Spring Conference, pp. 141 ~ 146.
8. Byun J. Y., Jeong J. M., and Jeong S. K.. 2009 "Hot-gas bypass control by PI logic for precise temperature of oil coolers with an electronic expansion valve", ISAMPE 2009, pp. 272~276.