

핫가스 바이패스 및 압축기 가변속 제어에 의한 공작기계용 수냉각기의 성능 비교

정 석 권[†], 이 단 비^{*}, 윤 정 인

부경대학교 냉동공조공학과, *부경대학교 대학원 냉동공조공학과

Comparison of System Performances of Hot-gas Bypass and Compressor Variable Speed Control of Water Coolers for Machine Tools

Seok-Kwon Jeong[†], Dan-Bi Lee^{*}, Jung-In Yoon

Dept. of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**Graduate School of Refrigeration and Air-conditioning Eng. Pukyong National University, Busan, Korea*

(Received July 25, 2011; revision received October 26, 2011)

ABSTRACT: Recently, the needs of system performances such as working speed and processing accuracy in machine tools have been increased. Especially, the speed increment generates harmful heat at both moving part of the machine tools and handicrafts. The heat is a main drawback to progress accuracy of the processing. Hence, a cooler system to control temperature is inevitable for the machine tools. In general, two representative control schemes, hot-gas bypass and variable speed control of a compressor, have been adopted in the water cooler system. In this paper, comparisons of system performances according to the control schemes in a cooler for machine tools were conducted in detail. Each proportional-integral feedback controller for the two different control systems is designed. The system performances, especially the temperature control accuracy and coefficient of performance which is a criterion of energy saving, were mainly analyzed through various experiments using IRT water cooler system with different two types of control scheme. These evaluations will provide useful information to choose suitable water cooler system for the engineers who design controllers of the cooler system for machine tools.

Key words: Machine tool(공작기계), Water cooler(수냉각기), Hot-gas bypass(핫가스 바이패스), Compressor variable speed control(압축기 가변속 제어), PI control logic(PI 제어 로직)

기 호 설 명

C	: 제어기	K_i	: 적분게인
G	: 전달함수	K_p	: 비례게인
K	: 이득상수	s	: 복소기호
		T	: 온도 [°C]
		u	: 조작량

[†] Corresponding author

Tel.: +82-51-629-6181; fax: +82-51-629-6181

E-mail address: skjeong@pknu.ac.kr

하첨자

c : 압축기

- d* : 외란
e : 전자팽창밸브
h : 핫가스 바이패스 밸브
o : 출구(outlet)

1. 서 론

최근 공작기계 분야에서는 고속화, 고정밀화가 한층 요구되고 있다. 공작기계의 고속화는 공작기계의 스핀들 회전 속도와 공작물의 이송 속도를 동시에 증가시키므로 기계 부품과 재료 사이의 급격한 마찰을 유발하여 공작물 가공 부위에 유해한 열 발생을 초래하게 된다. 이는 공작물 재료의 열 변형을 증대시켜 가공 정밀도를 저하시키는 주된 원인으로 작용한다. 따라서 공작기계에서는 공작물의 가공 정밀도 향상을 위해 열 부하를 신속히 제거하기 위한 냉각기가 필수적이다. 냉각기는 기본 냉동사이클로 구성되며, 냉각기의 출구 온도를 일정하게 유지하기 위해 다양한 제어 방식들이 적용되고 있다.⁽¹⁻³⁾

초기의 냉각기 온도 제어 방법으로는 압축기의 전원을 on-off로 단속 제어하는 방식이 적용되었다. 이 방식은 정교한 온도 제어가 어렵고, 압축기의 빈번한 기동 및 정지로 인한 압축기 수명 단축과 소비전력의 증가가 불가피하였다. 특히 요구되는 온도 제어 정도와 소비전력 및 수명 간에는 상충 문제가 발생하므로 고성능 제어법으로는 부적절하였다. 이러한 단점을 해결하기 위한 방안으로 핫가스 바이패스(Hot-gas Bypass; HB) 방식과 압축기 가변속(Compressor Variable Speed; CVS) 제어 방식이 도입되었다.⁽⁴⁻⁸⁾

HB 방식은 기존의 냉동사이클에 개도(opening angle) 제어가 가능한 밸브 하나만을 추가하면 되는 간단한 구조로, 제어계의 설계 및 구성이 쉬우면서도 비교적 정밀한 온도 제어가 가능하다. 하지만 이 시스템은 주 에너지 소모원인 압축기의 회전수를 일정하게 운전하는 제어 원리상 부분 부하시 에너지 절감 효과가 거의 없다. 반면에 CVS 방식은 출구 온도 제어를 위해 압축기 회전수 뿐만 아니라 과열도 제어를 위한 전자팽창밸브(Electronic Expansion Valve; EEV) 개도도 동시에 제어해야 하므로 제어계의 설계 및 구성이 복잡하고 고가이다. 하지만 정밀한 온도 제어가 가능하고 부분 부하시 에너지 절약이 가능한 것이 장점이다. 결국 최적의

냉각기 선정을 위해서는 적용 대상에서 요구되는 제어 정도 및 에너지 절약 성능과 가격 성능 등을 종합적으로 검토할 필요성이 있다.

냉각기의 제어와 관련된 연구로는 압축기 가변속 및 전자팽창밸브 제어시의 다양한 정특성 분석 연구,⁽⁷⁻¹²⁾ 동특성 모델을 실험적 방법으로 구해 PI 피드백 제어를 적용한 고성능 제어 및 예측제어를 가미한 제어 방법⁽⁴⁻⁶⁾ 등이 주류를 이루고 있다. 뿐만 아니라 제어변수 간에 간섭 문제를 해결하기 위한 비간섭 제어법과 피드포워드 제어법도 제안되었다.^(13, 14) 특히 최근에는 듀얼밸브 타입의 오일쿨러 시스템을 통해 HB 방식의 온도 제어 정도를 향상시킨 연구⁽²⁾ 등이 발표되었다. 이들 최근의 연구들을 통해 HB 방식과 CVS 방식은 온도 제어 성능이 정상상태(steady state)에서 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 이내로 정교하게 제어될 수 있음이 확인되었다. 그러나 이는 각 방식에 사용된 냉각기의 사양과 제어 로직이 각기 다른 상태에서의 결과들이어서 이 두 제어 방식 간의 직접적인 성능 비교로 보기는 어렵다. 또한 최근 중요시 되고 있는 에너지 절약 성능에 대한 비교 검토도 행해진 바가 없다.

따라서 본 논문에서는 이 두 방식에 동일한 제어 로직을 적용하여 온도 제어 정도와 에너지 절약 성능 비교에 초점을 맞추어 이들을 종합적으로 검토하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 HB 방식과 CVS 방식의 1 RT급 수냉각기를 2대 제작하고, 현장의 엔지니어들이 가장 널리 사용하고 있는 PI (Proportional, Integral) 제어를 설계하여 온도 제어 정도와 에너지 사용 효율의 척도인 COP(Coefficient Of Performance)를 중점적으로 비교 분석하였다. 실험에서는 공작기계를 대신한 열 부하로써 전기히터를 사용하였고, 정특성 및 다양한 동특성 실험을 통해 두 제어 방식의 성능을 고찰하였다.

2. 수냉각기의 대표적인 고정도 제어방식

2.1 HB 및 CVS 방식의 온도 제어 원리

Fig. 1은 수냉각기의 대표적 제어방식인 HB 방식과 CVS 방식의 온도 제어 원리를 나타낸 개념도이다. Fig. 1(a)는 HB 방식으로 제어변수인 냉각기 출구 온도는 핫가스 바이패스 밸브인 EEV 개도에 의해 제어된다. 부분 부하 운전시에는 압축기 출구 측의 핫가스를 증발기 입구 측으로 바이패스시켜

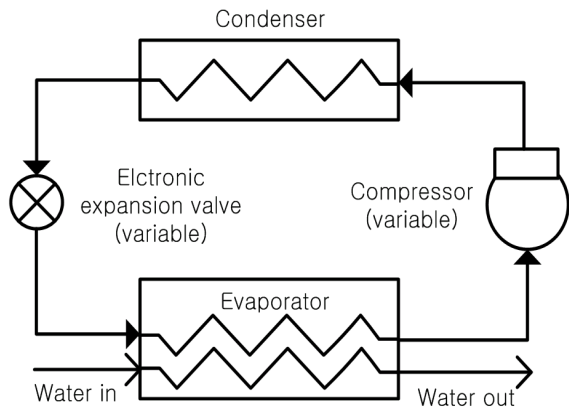
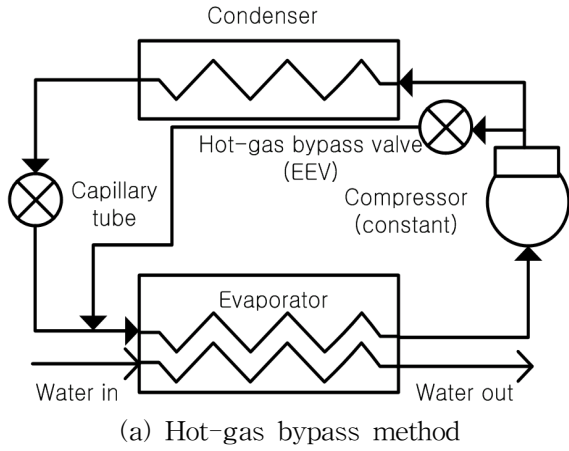


Fig. 1 Schematic diagram of water cooler control system.

증발기의 냉각능력을 강제적으로 조절함으로써 냉각기의 출구 온도를 제어한다. Fig. 1(b)는 CVS 방식으로 부분 부하시 압축기 회전수를 가변시켜 냉매의 질량유량을 조절함으로써 냉각기의 출구 온도를 제어한다. 급격한 냉매 질량유량 변동으로 인해 증발기의 과열도가 급상승 또는 급하강하는 현상을 방지하고, 최적 COP를 달성할 수 있는 운전점에서 냉각기를 작동시키기 위해 과열도도 동시에 제어한다. 과열도가 0℃ 이하일 경우, 액냉매 유입으로 인한 압축기 손상 위험성이 있으며, 10℃ 이상일 때는 COP가 낮아지고 더욱 상승하게 되면 윤활 불량 등으로 인한 압축기 손상을 초래할 수 있기 때문이다. 결국 CVS 방식은 제어변수가 출구 온도 및 과열도인 2변수 제어 시스템에 해당한다.

2.2 PI 피드백 제어기 설계

Fig. 2는 피드백 제어의 일반적인 블록선도이다. 이

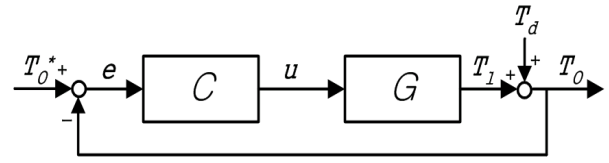


Fig. 2 Block diagram of PI control.

그림에서 G 는 제어대상의 동특성을 나타내는 전달 함수, C 는 제어기로서 본 연구에서는 PI 제어기를 나타낸다. HB 방식은 단일변수 시스템이므로 Fig. 2와 같은 모델을 하나만 필요로 하는 반면, CVS 방식은 2변수 제어 시스템이므로 이와 같은 모델을 2개 필요로 한다.

Fig. 2에서 제어기의 입력인 온도편차 e 는 $T_o^* - T_o$ 이며, 제어기는 PI 로직을 통해 이 온도 편차값을 0이 되게 하는 조작량 u 를 생성한다. 여기서 상첨자인 기호 ‘*’는 지령값을 의미한다.

PI 제어기에 의한 조작량은 비례계인 K_p 와 적분계인 K_i 에 의해서 식(1)과 같이 표현된다.

$$u(s) = \left\{ K_p + \frac{K_i}{s} \right\} e(s) \quad (1)$$

PI 제어기는 제어변수인 냉각기의 출구 온도와 과열도가 적절한 과도특성 및 정상특성을 갖도록 설계한다. 본 논문에서는 MATLAB의 게인 튜닝 기능을 이용해 PI 게인들을 설정하였다.

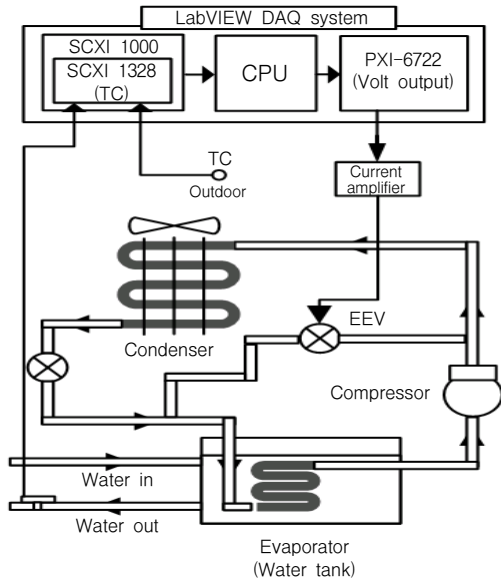
3. 실험 방법

3.1 실험장치

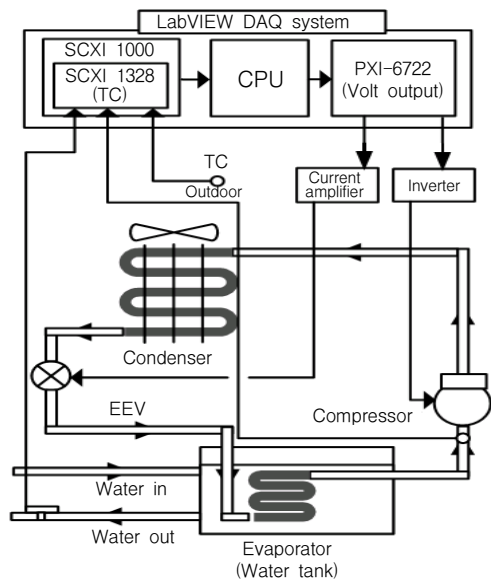
Fig. 3은 각 실험장치의 개략도이다. 제어장치로는 제어 로직 연산 및 필요한 데이터 수집을 위해 LabVIEW 시스템, EEV를 제어하기 위해 스텝 모터 드라이버, 압축기 회전수를 제어하기 위해 V/f = 일정 타입의 인버터를 각각 사용하였다. 공작기계를 대신한 열 부하용으로는 전기히터(3kW×2)를 사용하였고, 온도센서로는 열전대(thermocouple)를 각각 사용하였다.

Table 1은 실험장치의 사양을, Table 2는 실험조건을 각각 나타낸다. 냉각기의 출구 온도 지령값은 공작기계의 특성을 고려해 25℃로 설정하였고, 이 값을 일정하게 유지하는 것을 제어 목표로 정하였다. 또한, 과열도의 목표값은 Fig. 4에서의 과열도

와 COP와의 특성을 고려한 정특성 실험 결과로부터 8℃로 설정하였다.



(a) Control system of HB



(b) Control system of CVS

Fig. 3 Water cooler control system for experiments.

Table 1 Specifications of the test unit

Component	Note
Compressor	Rotary type, 1[HP]
Condenser	Air-cooled fin and tube type
Evaporator	Plate heat type
Refrigerant	R-22

Table 2 Experimental conditions

Item	Note
Water flow rate	22.5[l/min]
Ambient air temperature	30[°C]
Sampling time	1[sec]
Target temperature	25[°C]

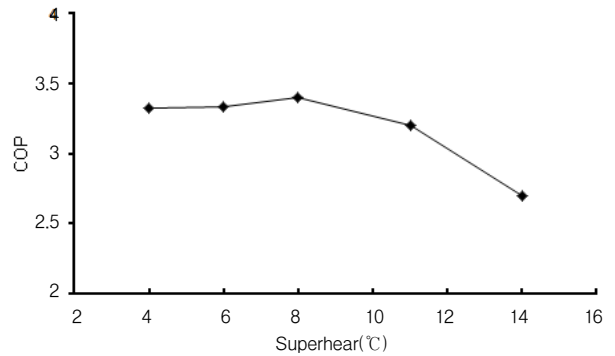


Fig. 4 Relationship between COP and superheat in CVS system.

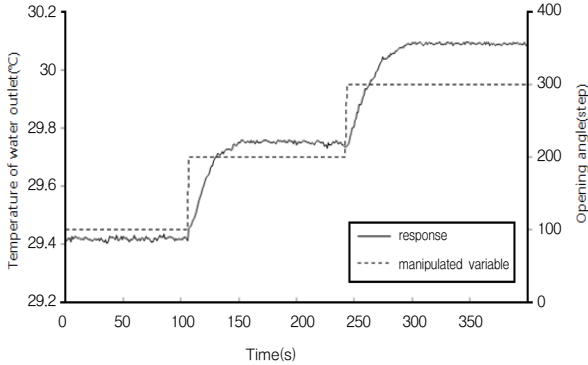
Table 3 Refrigerating capacity and compressor work according to superheat

Superheat[°C]	Refrigerating capacity[W]	Compressor work[W]
4	3170	950
6	3150	943
8	3150	937
11	3050	939
14	2600	946

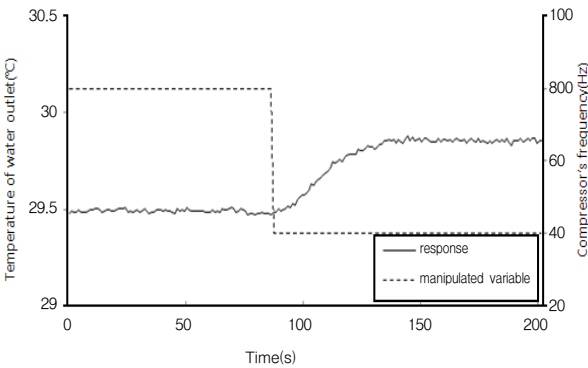
Fig. 4는 외기 온도(ambient temperature) 조건을 고려하여 냉수 입구(water in) 온도 30℃, 인버터 주파수 60 Hz의 열평형 상태 하에서 실험한 결과이다. 과열도에 따른 냉동능력과 압축일량은 Table 3에 나타내었다.

3.2 실험 방법

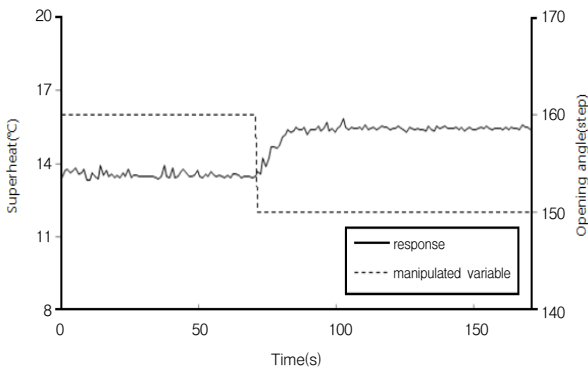
실험에서는 우선 HB 방식 및 CVS 방식의 동특성 모델을 얻기 위해 스텝응답을 통한 전달함수 G 를 구하였다. 이 전달함수를 기반으로 각 제어 방식의 제어기 C 의 PI 게인들을 구하였다. 게인 설정시에는 MATLAB의 게인 튜닝 기능을 이용하여 각 제어변수의 인디셜응답이 오버슈트 10% 이내가 되도록 하는 게인들을 구하였다.



(a) Water outlet temperature versus opening angle variation in HB system



(b) Water outlet temperature versus compressor's rotating speed variation in CVS system



(c) Superheat versus EEV's opening angle variation in CVS system

Fig. 5 Step responses with respect to manipulated variables.

Fig. 5(a)는 냉수 입구 온도 32°C의 열평형 조건 하에서 핫가스 바이패스 밸브의 개도 변화에 따른 냉각기의 출구 온도 응답이다. Fig. 5(b)와 Fig. 5(c)는 CVS 시스템에서 압축기의 회전수 변화에 따른 냉각기의 출구 온도 응답 및 EEV의 개도 변화에

따른 과열도 응답이다. 이때의 냉수 입구 온도는 30°C였다.

식(2)~식(4)는 Fig. 5로부터 구한 전달함수이며 Δ 는 변화량이다. 이 가운데 식(2)는 HB 시스템, 식(3)과 식(4)는 CVS 시스템의 동특성으로서 평형 조건 하에서 반복적으로 실험한 결과이다. 응답은 선형 시스템인 1차 지연요소의 동일한 패턴이 얻어졌다. 이로써 제어대상이 열 평형점 부근에서 선형 근사화가 가능함을 확인하였다.

1차 지연요소 전달함수의 표준형($K/(\tau s + 1)$)에서 특성 파라미터 값은 시정수 τ 와 DC 게인 K 이다. τ 는 Fig. 5에서 최종값의 63.2%에 도달하는 시간으로부터 구하고, K 는 출력값의 변화량을 입력값의 변화량으로 나누어서 구하였다.

$$G_h(s) = \frac{\Delta \text{냉각기 출구 온도}}{\Delta \text{HBV 개도}} = \frac{0.0035}{19s + 1} \quad (2)$$

$$G_c(s) = \frac{\Delta \text{냉각기 출구 온도}}{\Delta \text{주과수}} = \frac{-0.009}{23s + 1} \quad (3)$$

$$G_e(s) = \frac{\Delta \text{과열도}}{\Delta \text{EEV 개도}} = \frac{-0.19}{7.5s + 1} \quad (4)$$

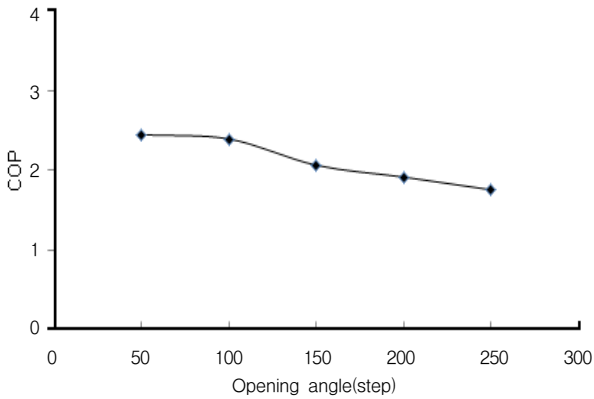
이 전달함수를 바탕으로 MATLAB 시뮬레이션을 통해 구한 각 시스템의 PI 게인은 HB 방식의 경우, $K_p = 49.5$, $K_i = 14.7$, CVS 방식의 압축기 회전수 제어용은 $K_p = 19.2$, $K_i = 4.7$, EEV 개도 제어용은 $K_p = 1$, $K_i = 0.7$ 이었다. 이 게인 값들을 이용하여 두 제어 방식의 정특성과 동특성을 구하였다. 동특성 실험에서는 기동 특성과 부하 변동 특성 파악에 초점을 맞추어 실험하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

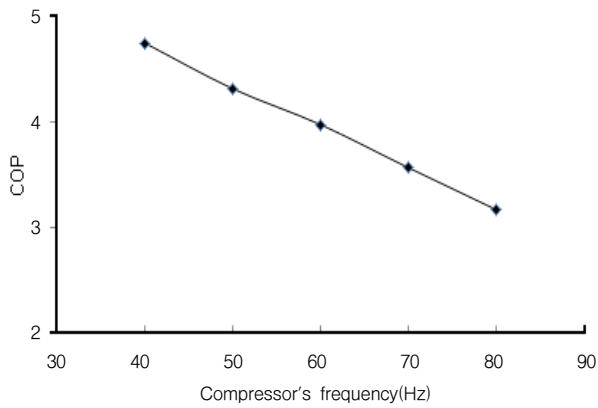
4.1 COP 비교 분석

HB 시스템은 핫가스 바이패스용 밸브의 개도만을 조절하므로 주된 에너지 소모원인 압축기의 회전수는 일정하기 때문에 부하 변동에 관계없이 거의 동일한 에너지를 소비한다. 반면에, CVS 시스템은 부분 부하시에 압축기의 회전수가 감소하고 전압과 전류도 동시에 감소하여, 결국 소비전력 저하로 이어져 에너지 절약이 가능하게 된다.

식(5)와 같이 압축기 일량 W 와 냉동효과 Q 로부터 두 방식의 COP를 실험적으로 구하였다.



(a) HB control system



(b) CVS control system

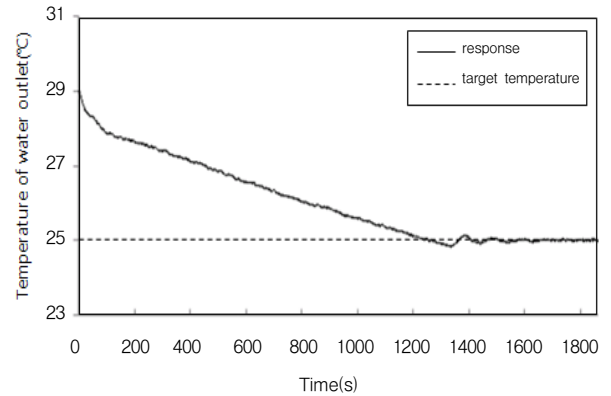
Fig. 6 COP comparison of two systems.

$$COP = \frac{Q}{W} \quad (5)$$

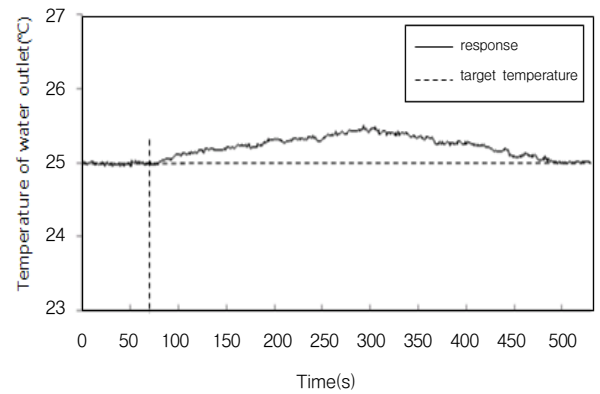
HB 시스템은 부하 변동시에도 압축기의 회전수가 일정하므로 식(5)의 분모는 거의 일정하다. 반면에 부분 부하시 밸브 개도 증가로 인한 핫가스 분배량 증가로 냉동효과는 감소하므로 Fig. 6(a)에서와 같이 COP는 감소함을 볼 수 있다. 이와 대조적으로 CVS 시스템은 부하 변동에 따라 압축기의 회전수가 달라져 식(5)의 분모가 변하므로 Fig. 6(b)와 같이 COP가 변함을 알 수 있다. 특히 부분 부하시 COP가 현저히 증가함을 볼 수 있다. Fig. 6(b)로부터 80Hz 부하 대비 40Hz에 상당하는 부분 부하시에는 효율이 약 49% 정도 상승함을 알 수 있다.

4.2 HB 및 CVS 시스템 제어 성능 비교

Fig. 7(a)는 HB 방식에서 2 kW의 열 부하만을 인가한 상태의 냉각기 기동시의 출구 온도 응답이다.



(a) Outlet temperature variation of starting

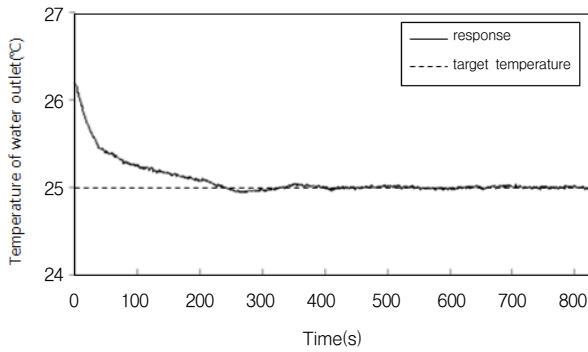


(b) Outlet temperature under load variation

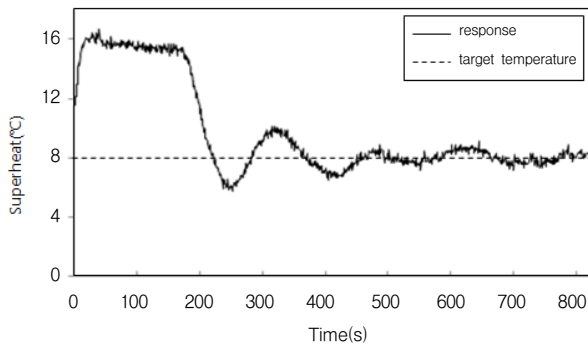
Fig. 7 Experimental control results of HB system.

출구 온도가 정상상태에서 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 이내로 양호하게 제어됨을 보이고 있다. Fig. 7(b)는 정상상태에서 열 부하를 2 kW에서 3 kW로 급격히 인가했을 경우의 냉각기 출구 온도 응답이다. 과도시에 최대오버슈트가 0.5°C 로 비교적 크게 나타났지만 정상상태 오차는 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 이내로 양호한 제어 결과를 나타내었다. 그래프에 표시된 세로 점선은 외란이 인가된 시점을 나타낸다.

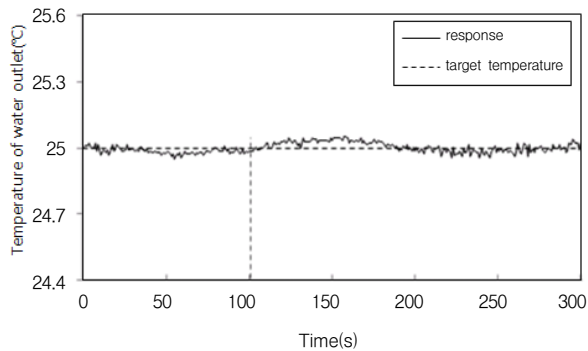
Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)는 CVS 방식에서 1 kW의 열 부하만을 인가한 상태의 냉각기 기동시의 출구 온도와 과열도 응답이다. 정상상태에서 출구 온도는 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, 과열도는 $\pm 2^\circ\text{C}$ 이내로 각각 양호한 제어 결과를 나타내었다. Fig. 8(c)와 Fig. 8(d)는 정상상태에서 열 부하를 1.5 kW로 급격히 인가한 경우의 냉각기 출구 온도와 과열도 응답이다. 출구 온도는 정상상태오차가 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 이내로 양호하게 제어 되었다. 그래프에 표시된 세로 점선은 외란이 인가된 시점을 나타낸다.



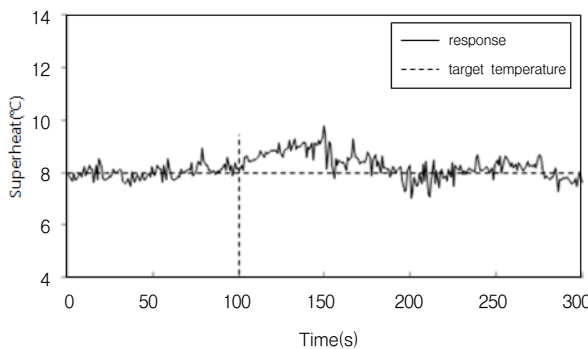
(a) Outlet temperature variation of starting



(b) Superheat variation of starting



(c) Outlet temperature under load variation



(d) Superheat under load variation

Fig. 8 Experimental control results of CVS system.

5. 결 론

본 논문에서는 냉각기의 대표적인 제어방식인 HB 방식과 CVS 방식에 대해 제어 성능과 에너지 절약 성능을 비교 분석하였다. 먼저, 제어시스템 구성, 가격 등을 단순 비교하면, 2변수 시스템인 CVS 방식이 단일 변수인 HB 방식 보다 제어가 어렵고 장치가 고가로 된다. 그러나 인버터와 같은 전력변환장치는 초기 설치 비용에 불과하며 그 가격도 파워일렉트로닉스 기술 발전에 힘입어 점차 저가 추세에 있으므로 에너지 절약 효과로 초기에 충분히 상쇄될 수 있다. 두 번째로 두 시스템의 COP를 분석해 보면 CVS 방식이 HB 방식보다 부분 부하시 높게 나타났다. 그 이유는 HB 방식이 압축기를 정속으로 운전하기 때문에 에너지 절약이 근본적으로 어려운 반면에 CVS 방식은 부하에 따라 압축기의 회전수를 가변속 제어하므로 에너지 절약이 가능하기 때문이다. 마지막으로 제어 성능으로는 두 시스템 모두 거의 비슷한 결과인 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 이내의 정밀한 제어 정도를 보였다. 따라서 적용 대상의 공작물이 부하 변동이 빈번하여 부분 부하 운전이 필요할 경우에는 CVS 방식이 더욱 적절함을 알 수 있다.

참고문헌

1. Lee, S. W., Yeom, H. K., and Park, K. J., 2009, Performance of Hot Gas Bypass Type Oil Cooler System, Journal of Korean Society for Precision Engineering, Vol. 26, No. 3, pp. 73-80.
2. Lee, S. W., Yeom, H. K., and Lee, H. K., 2011, Improvement of Temperature Accuracy in Oil Cooler Systems with Gas Bypass, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 12, No. 1, pp. 39-45.
3. Yaqub, M., Zubair, S. M., and Khan, J.-ur-R., 2000, Performance Evaluation of Hot-gas Bypass Capacity Control Scheme for Refrigeration and Air-conditioning Systems, Energy, Vol. 25, pp. 543-561.
4. Jung, Y. M., Byun, J. Y., Yoon, J. I., and Jeong, S. K., 2009, A Study on High Precision Temperature Control of an Oil Cooler for Machine Tools Using Hot-gas Bypass Method, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 33, No. 7, pp. 1003-1011.

5. Byun, J. Y. and Jeong, S. K., 2010, Design of PI and Feedforward Controller for Precise Temperature Control of Oil Cooler System, *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 89-95.
6. Jeong, S. K., Byun, J. Y., Kim, S. H., and Yoon, J. I., 2011, Precise Temperature Control of Oil Coolers with Hot-gas Bypass Manner for Machine Tools Based on PI and Feedforward Control, *SAREK*, Vol. 23, No. 2, pp. 111-119.
7. Beak, S. M., Choi, J. H., Byun, J. Y., Moon, C. G., Lee, H. S., Jeong, S. K., and Yoon, J. I., 2009, Characteristics of Temperature Control by Hot-gas Bypass Flow Rate on Industrial Water Cooler, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 33, No. 8, pp. 1129-1136.
8. Beak, S. M., Moon, C. G., Kim, H. W., Jeong, S. K., and Yoon, J. I., 2010, Characteristics of Capacity Control of Variable Speed Water Cooler with the Electronic Expansion Valve Open/Close Degree, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 34, No. 2, pp. 282-288.
9. Beak, S. M., Moon, C. G., Kim, E. P., Jeong, S. K., and Yoon, J. I., 2011, The Characteristic Study of Capacity Control of an Industrial Cooler Using an Inverter Compressor with Varing the Ambient Temperatures, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 35, No. 2, pp. 238-243.
10. Beak, S. M., Moon, C. G., Kim, E. P., Jeong, S. K., and Yoon, J. I., 2011, Characteristics of On-off Control and Hot-Gas Bypass Control in an Industrial cooler, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 35, No. 4, pp. 429-435.
11. Beak, S. M., Choi, J. H., Byun, J. Y., Moon, C. G., Jeong, S. K., and Yoon, J. I., 2010, Characteristics of Precise Temperature Control of Industrial Cooler on Thermal Load, *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 34-39.
12. Beak, S. M., Moon, C. G., Yoon, J. I., Jeong, S. K., and Kim, E. P., 2011, The characteristics of capacity control using a variable speed compressor in an industrial cooler, *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 37-41.
13. Li, H., You, S. S., Yoon, J. I., and Jeong, S. K., 2008, An Empirical Model for Independent Control of Variable Speed Refrigeration System, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, pp. 1918-1924.
14. Li, H., You, S. S., and Jeong, S. K., 2009, Feedforward Control of Capacity and Superheat for a Variable Speed Refrigeration System, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 1067-1074.