

핫가스 바이패스 유량에 따른 산업용 냉각기의 온도제어 특성

백승문¹ · 최준혁² · 변종영² · 문춘근³ · 이호생⁴ · 정석권⁴ · 윤정인[†]

(원고접수일 : 2009년 9월 10일, 원고수정일 : 2009년 10월 30일, 심사완료일 : 2009년 11월 10일)

Characteristics of Temperature Control by Hot-gas Bypass Flow Rate on Industrial Water Cooler

Seung-Moon Baek¹ · Jun-Hyuk Choi² · Jong-Yeong Byun² · Choon-Geun Moon³ ·
Ho-Saeng Lee⁴ · Seok-Kwon Jeong⁴ · Jung-In Yoon[†]

요 약 : 본 논문은 EEV를 이용한 냉각시스템의 성능특성에 관한 논문이다. 산업용냉각기는 고속으로 운전하는 공작기계의 열 변형을 줄이기 위해 사용되었으며, EEV는 냉각기의 용량조절을 위해 사용되었다. 본 장치는 압축기 출구에서 나온 핫가스를 증발기 입구로 보내는 핫가스 바이패스 시스템을 위해 설계되었다. 본 실험은 PID제어를 통한 고정도 온도제어 연구의 중간결과물이다. 실험의 결과로 핫가스 바이패스의 EEV스텝 조절을 통하여 증발압력의 상승과 냉동능력의 감소를 알 수 있었다. 본 실험의 결과를 통하여 효율적인 냉각기의 설계에 있어 기초 자료로 이용할 예정이다

주제어 : 핫가스 바이패스, 오일쿨러, 전자팽창밸브, On-Off제어, PID제어

Abstract: The paper presents the performance characteristics for a cooling system using EEV. The water cooler was used to reduce thermal deformation and contraction due to high speed of machine tools and the EEV was used for capacity control for water cooler. The apparatus was designed for hot-gas bypass system which a hot-gas can flows from outlet of compressor to the inlet of evaporator. This experiment is the intermediary study for precise temperature control through PID control. The results show that the evaporator pressure increased and refrigeration capacity decreased as the EEV opening step of hot-gas bypass increased. These results can be used as basic data for the design of effective water cooler.

Key words: Hot-gas bypass, Oil cooler, Electronic expansion valve, On-Off control, PID control

1. 서 론

산업기계의 가공 정밀도를 향상시키기 위해서 가공 부위 온도를 일정하게 유지시킬 수 있는 산업용 오일 및 수냉각기의 다양한 기술개발이 진행되고 있다. 공작기계는 절삭속도가 빠르기 때문에 공작

물의 가공부위에 상당한 열이 발생되며, 열은 공작기계 부품과 공작물에 열 변형을 초래하여 가공정밀도와 기계의 신뢰성을 떨어뜨린다. 따라서 발열억제를 위해 공작기계의 가공부위에 냉각된 오일 및 냉수를 공급한다. 이 때 공급되는 온도가 일정할 경우 공작물의 열 변형을 방지할 수 있다.

[†] 교신저자(부경대학교 기계공학부, E-mail: yoonji@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6180)

1 부경대학교 대학원 냉동공조공학과

2 부경대학교 대학원

3 (주) 대일

4 부경대학교

기존에 On-Off방식의 온도제어인 경우 정속운전 냉각기가 대부분 사용되고 있다. 하지만 이 경우 연속적으로 부하가 바뀌는 것을 적절히 제어하지 못하며, 가동 및 정지를 반복함으로써 소비전력의 증가와 정밀한 온도 제어가 되지 못한다.

Lee[1] 등의 경우 열변형을 방지하기 위해 오일쿨러를 이용하여 신뢰성을 평가하였고, 또한 핫가스 바이패스를 이용하여 오일쿨러의 성능을 평가하였다. Byun[2] 등의 경우 압축기 출구의 고온냉매 일부를 실외기에 직접 주입하는 방법을 통해 착상을 방지하는 연구를 수행하였고 M. Yaqub et. al[3,4]. 연구에서는 압축기 토출에서 팽창기 출구측으로 바이패스하는 방법을 제시하고 있다. Choi [5,6] 등의 경우 외부환경조건 및 부하 변동에 따라 핫가스 바이패스 밸브인 EEV의 스텝을 변화시켜 EEV스텝의 변화에 따른 냉각 시스템의 변화 및 시스템의 특성을 파악하는 기초 실험을 하였다.

본 연구는 핫가스 바이패스 밸브인 EEV (Electronic Expansion Valve)의 개방에 따른 냉각 시스템의 사이클 변화 특성을 파악하고, EEV스텝 조절을 통해 냉각기로 유입되는 부하변동에 대응하며 정밀한 온도 조절이 가능하도록 핫가스 바이패스의 제어 알고리즘 개발에 최종목표를 두었다.

2. 핫가스 바이패스방식

대표적인 핫가스 바이패스방식으로는 압축기 출구 냉매를 증발기 입구 또는 증발기 출구로 바이패스 시키는 방식, 그리고 압축기 출구냉매를 응축기 출구 냉매와 혼합시킨 후 증발기 출구로 바이패스 시키는 방식이 있다. 이 방식 중 첫 번째 방식은 타방식에 비해 압축기의 토출온도가 낮아 안정적인 운전이 가능하며, 냉각능력을 조절할 수 있는 제어 범위도 넓어[3] 이번 실험에는 3가지 방식 중 첫 번째 방식을 적용하였다.

Figure 1은 핫가스 바이패스방식의 개략도를 나타낸 것으로, 압축기에서 압축된 고온·고압의 냉매 일부를 증발기 입구로 바이패스 시켜 팽창밸브를 통과한 저온·저압의 냉매와 혼합시키는 방식이다.

이로 인해 증발기의 온도는 상승하게 되고 냉각능력은 감소하게 된다. 핫가스 바이패스 밸브인 EEV의 개도를 제어함으로써 증발기의 냉각능력을 조절하여 결과적으로 공작기계로 공급되는 냉각유체의 온도를 제어 가능하게 된다. Table 1은 제어 대상인 EEV의 세부사양을, Figure 2는 EEV의 외형과 입력 펄스 수에 따른 개도 변화를 각각 나타낸 것이다.

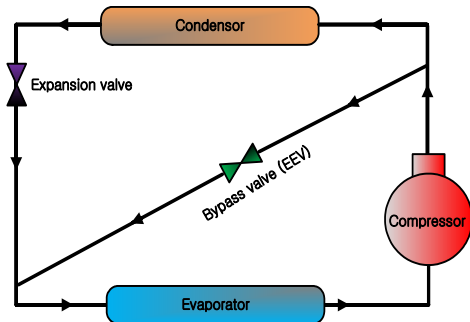
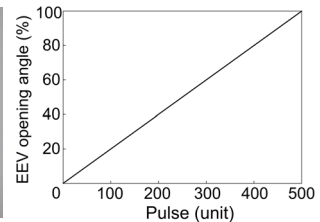


Figure 1: Schematic diagram of hot-gas bypass

Table 1: Specifications of EEV

Operating range [Pulse]	0~500
Rated voltage [V]	DC 12
Max working pressure [MPa]	3.3



(a) Appearance (b) Characteristics

Figure 2: Appearance and characteristic of EEV

3. 실험 장치 및 방법

이번 실험에서는 핫가스 바이패스의 스텝변화에 따른 시스템의 성능특성을 알아보기 위해 약 3.0 kW 용량의 기본 냉동 시스템장치를 구성하였다. Figure 3은 실험 장치의 개략도를 나타냈으며, Table 2는 실험에 사용된 장치의 각 요소의 사양을 나타낸다.

주요 구성품은 왕복동식 압축기를 사용하였으며, 응축기는 플레이트 핀튜브 타입의 공랭식 응축기를 사용하였다. 그리고 EEV의 스텝을 조절하기 위해 스텝핑 모터를 EEV 상단에 장착시켜 핫가스 바이패스 개도를 조절하였다. 토출가스 바이패스는 압축기에서 나오는 고온고압의 가스를 팽창기 출구 쪽으로 바이패스를 시켜 팽창기에서 나오는 냉매와 EEV 밸브를 이용하여 나오는 냉매를 혼합하여 조절하였다. 이번 실험에서는 EEV의 스텝 개도를 변수로 잡아 0~500사이를 각 125스텝 간격으로 변화시켜 실험하였다. 그리고 온도조절기를 이용하여 밀폐형 열교환기의 열량을 조절하여 냉각기에서 나오는 냉수 출구 온도를 일정하게 조절하였다.

으로 데이터 측정이 가능하도록 하였다. 냉매 측 온도측정은 T형 열전대를 이용하고 압력은 온도측정부위와 동일한 부분에 압력센서를 설치하여 측정 가능 하도록 하였다. 냉매의 질량유량 측정은 Oval사의 질량유량계를 사용하였으며 압축기에 소모되는 전력량의 측정은 칼로리미터에 부착된 Yokogawa사의 전력계를 통해 측정하였다. 장치 배관 및 모든 부분은 고무발포보온재와 보온재 테이프를 사용하여 충분히 단열함으로써 외부와의 열교환이 없도록 하였다. 측정된 온도, 압력, 질량유량, 전력량은 Yokogawa사의 MX-100 모델을 사용하여 PC에 저장하는 동시에 PC모니터에서 각 측정값을 실시간 확인할 수 있도록 하였다.

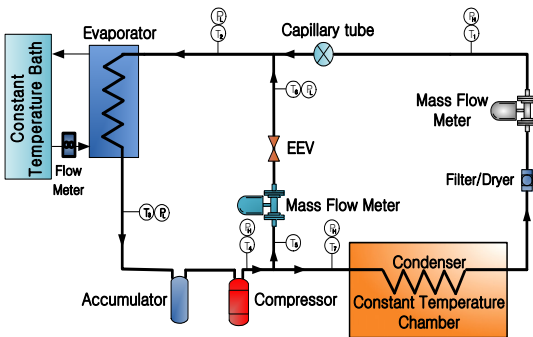


Figure 3: Schematic diagram of experimental apparatus

Table 2: Specification of the test unit

Compressor	Rotary type
Condenser	Air-cooled fin and tube type
Expansion device	Capillary tube
Bypass valve	EEV

Table 3는 실험조건을 나타낸 것이다. 공랭식 응축기와 열교환 하는 외부 공기의 온도는 항온 챔버를 이용하여 25℃와 35℃로 각각 맞추어 응축기가 일정 온도 하에서 열교환 할 수 있도록 하였다. 냉수 출구온도는 각각 16~25℃까지 3℃ 간격으로 일정하게 맞춰 실험 하였으며 냉수 출구 유량은 26l/min로 일정하게 유지되도록 하였다. 그리고 주요기기 입·출구에는 압력센서와 온도센서를 장착하여 실시간

Table 3: Experimental conditions

Parameter	Conditions
Refrigerant	R-22
Chilled water flow rate [l/min]	26
Chamber temperature [℃]	35, 25
Chilled water outlet temperature [℃]	16, 19, 22, 25
EEV step	0~500

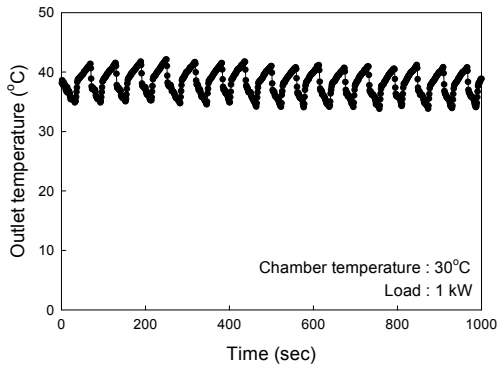
4. 실험결과 및 고찰

4.1 On-Off 제어에 의한 특성

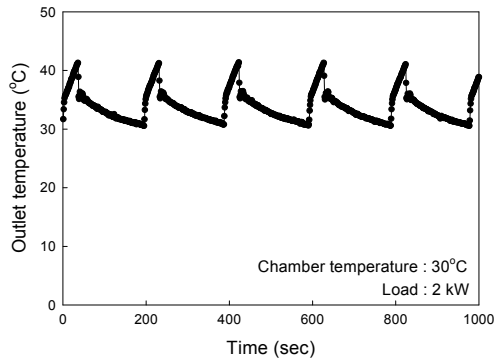
Figure 4는 기존의 On-Off 제어 시스템을 가지는 냉각기에 가해지는 냉각 부하별 냉각기 출구 온도 변화를 나타낸 그림이다. 냉각기는 1 kW의 적은 부하에서는 온도 편차가 ±3.25℃를 나타내어 최저 온도와 최고 온도차가 약 7.5℃를 나타냈으며, 부하가 2 kW에서는 온도 편차가 ±4.5℃를 나타내어 최저 온도와 최고 온도차가 약 9℃를 나타내고 있다.

냉각기는 압축기와 냉각 시스템의 회로를 보호하기 위해서 일반적으로 압축기의 작동이 멈춘 후에 3분 동안 작동을 강제적으로 멈추는 보호 회로를 가진다. 이 때문에 냉각기 출구의 냉수 온도가 냉각기 작동 온도를 초과 하였더라도 냉각기는 정지 후 3분 동안 작동을 못하게 되어 있다. 이러한 이유로 인하여 부하가 커질수록 유체의 온도는 3분

동안 빠르게 상승하고 온도편차가 커지게 되는 것이다. 부하의 크기가 작은 1 kW의 경우 On-Off 주기가 5분 간격으로 이어지고 있으며, 부하가 큰 2 kW의 경우는 15.4분 간격을 이루고 있다.



(a) Thermal load 1kW



(b) Thermal load 2kW

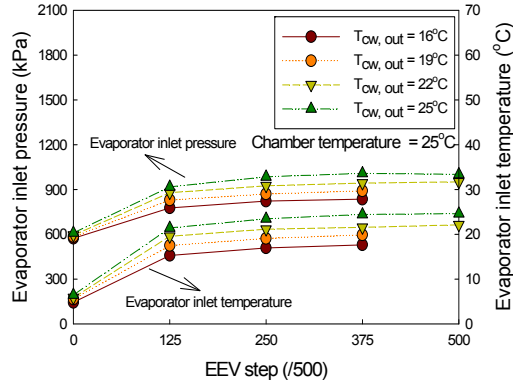
Figure 4: Temperature response under On-Off control system

부하가 클수록 3분 정지 기간 동안 유체의 온도는 상승하고 이것을 목표 온도까지 냉각 시키는데 많은 시간이 소요 되므로 부하의 크기가 커질수록 On-Off 주기는 길어지는 특성을 보여 주는 것이다.

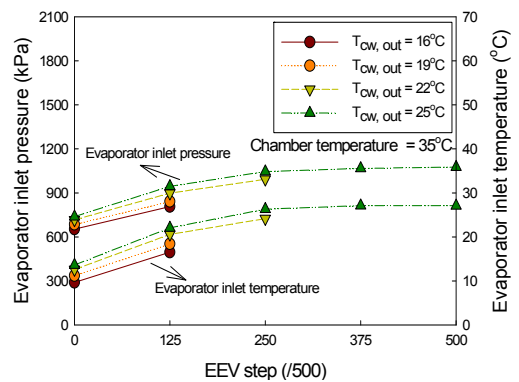
4.2 토출가스 바이패스밸브 개도변화에 따른 특성

Figure 5는 챔버온도를 25°C와 35°C로 각각 고정시키고 EEV 스텝 변화에 따른 냉수출구 수온별 증발기 입구압력과 입구온도의 변화를 나타낸 결과이다. 챔버온도 25°C와 35°C 모두 냉수출구 수온이 낮을수록 증발기 입구압력과 입구온도는 냉수

출구수온이 높은 경우와 비교하여 낮은 값을 보였다. 이는 냉수출구수온이 낮을수록 장치의 응축압력과 응축온도가 낮아짐으로써 증발기 입구압력과 증발온도가 낮아지는 것으로 판단된다.



(a) 25°C chamber Temperature



(b) 35°C chamber temperature

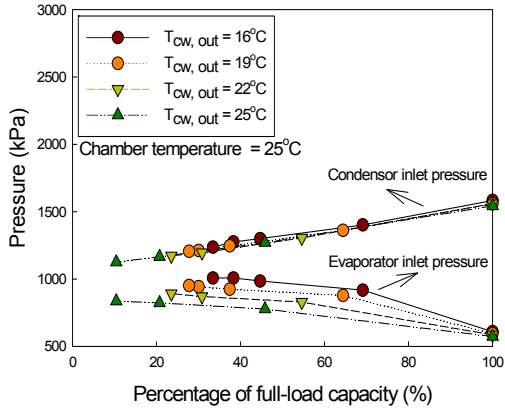
Figure 5: EEV step versus evaporator inlet pressure and temperature

그리고 챔버온도 25°C와 35°C에서 증발기 입구압력과 입구온도는 EEV 스텝 0에서 125까지 30%정도 급격하게 상승하는 경향을 보였으며 EEV 스텝 250부터는 그 증가폭이 6%내외로 감소하여 일정한 압력대로 유지하려는 경향을 보였다.

Figure 6은 챔버온도를 25°C와 35°C로 각각 고정시키고 부분부하에 변화에 따른 냉수출구수온별 증발기 입구압력과 응축기 입구압력의 변화를 나타낸 그래프이다.

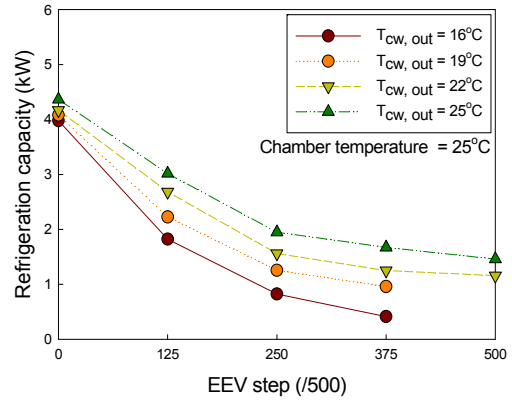
냉수출구수온이 낮을수록 부분부하가 감소할수록 증발기의 입구 압력은 증가하였으며, 부분부하

가 감소할수록 응축기의 입구 압력은 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 챔버온도를 고정시켜 실험을 한 것으로 인해 냉수출구수온변화에 따른 부분부하 변동시 응축압력은 증발압력에 비해 상대적으로 변화폭이 크지 않았다.

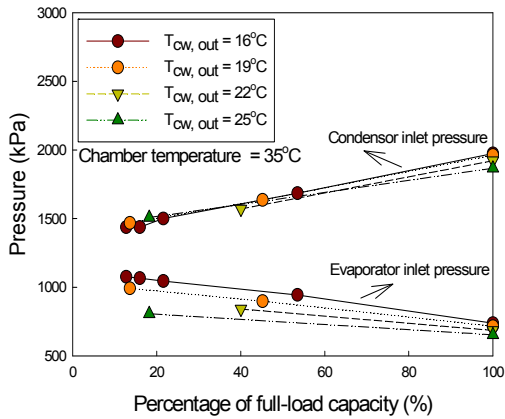


(a) 25°C chamber temperature

냉매가 증발기 입구에서 혼합되어 증발기에 유입되게 된다. 이는 곧 증발기의 냉동능력을 낮추게 되는 주요한 원인이 된다. EEV 스텝을 증가시킬수록 모든 냉수출구수온에서 냉동능력은 하락하는 것으로 나타났다.

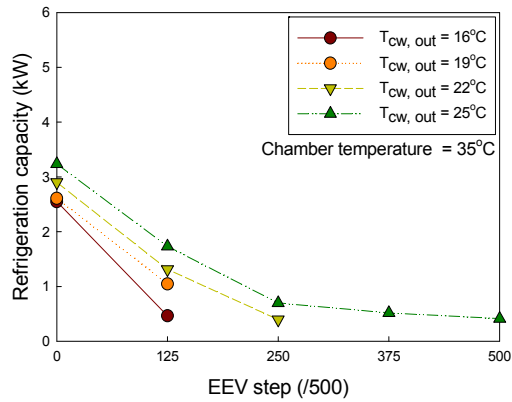


(a) 25°C chamber temperature



(b) 35°C chamber temperature

Figure 6: Variation of pressure with respect to percentage of full-load capacity



(b) 35°C chamber temperature

Figure 7: Variation of refrigeration capacity with respect to EEV step

4.3 토출가스 바이패스밸브 개도에 따른 냉각 성능

Figure 7은 챔버온도를 25°C와 35°C로 각각 고정시키고 EEV 스텝을 변화시켰을 경우 냉수출구수온변화에 따른 냉동능력의 변화를 나타낸 결과이다. EEV 스텝을 늘릴수록 압축기에서 압축되어진 고온고압의 냉매가 바이패스 되는 양이 증가하며, 이 증가한 고온고압의 냉매와 팽창밸브를 통과한

그리고 챔버온도가 35°C에 비해 25°C에서 동일한 냉수출구조건에서의 냉동능력이 높게 나타났으며 챔버온도 25°C일 때에 비해 35°C에서 냉동능력이 낮아지는 경향을 보였다. 이는 챔버온도가 높을수록 냉매를 응축시키는 응축압력과 응축온도가 높아지므로 응축압력과 온도가 낮은 경우에 비해 냉동능력이 작아지게 되는 것으로 판단된다.

챔버온도 25°C에서는 출구수온 25°C 기준으로 EEV스텝을 증가시킬 경우 125, 250 스텝까지는 각 30%이상 냉동능력이 하락하였으며 이후 375, 500 스텝은 13%정도 각각 하락하였다. 챔버온도 35°C에서 냉수 출구수온 25°C 기준으로 EEV 스텝을 증가시킬 경우 챔버온도 25°C와 유사한 경향으로 냉동능력이 하락하였으나 차이점으로는 EEV 0에서 250스텝까지는 냉동능력이 급격하게 낮아지며 EEV 스텝 250이상에서는 냉동능력 값은 0.5 kW 정도의 값으로 수렴됨을 보였다.

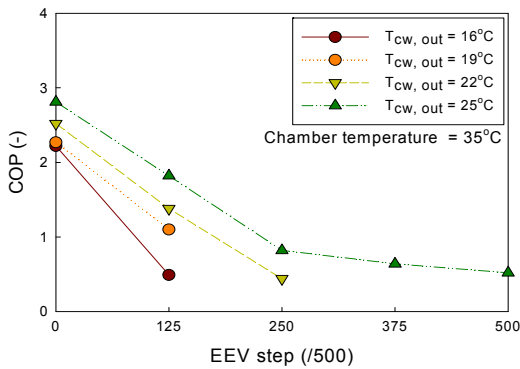


Figure 8: Variation of COP with respect to EEV step

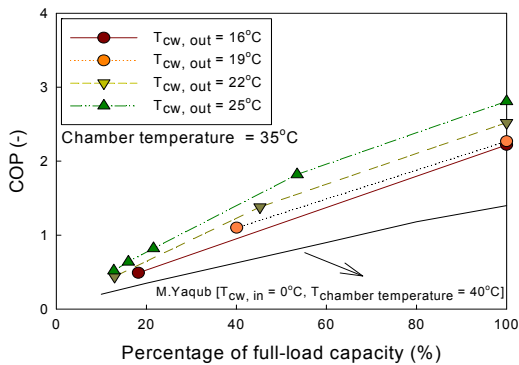


Figure 9: Variation of COP with respect to percentage of full-load capacity

Figure 8은 챔버온도를 35°C에서 EEV 스텝변화에 따른 COP변화를 나타낸 결과이다. 그림에서와 같이 동일냉수출구온도에서는 스텝이 증가할수록, 동일 스텝에서는 냉수출구온도가 낮을수록 COP는 낮은 경향을 보였다. 냉수출구온도가 낮을수록 응축온도와 증발온도가 감소하였는데 이로 인

한 것으로 판단된다. 챔버온도 35°C에서 냉수출구수온별로 EEV 0스텝 기준으로 냉수출구수온은 25°C에서는 EEV 125스텝이 늘어날 경우 냉동능력은 47% 감소하며 COP는 35% 감소하였다.

Figure 9는 최대부하 능력비율에 대한 COP와의 상관관계를 나타낸 결과로 PID제어기 설계시 제어변수로 사용하고자 하는 챔버온도 35°C, 냉수출구수온 25°C에서는 냉동시스템을 100%부터 10%까지 용량을 조절해서 사용가능함을 알 수 있었다. 오른쪽 하단의 결과는 M. Yaqub⁽⁴⁾의 결과로 증발기입구온도 0°C, 응축기입구온도 40°C의 상태에서 시뮬레이션 한 값으로, 본 실험값과 유사한 경향을 보이고 있다.

5. 결 론

외부환경조건 및 부하 변동에 따라 핫가스 바이패스 밸브인 EEV의 스텝 변화를 주어 냉각기로 유입되는 부하변동에 대응함으로써 정밀한 온도 조절을 할 수 있는 실험적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) On-Off제어 실험에서 On-Off 제어 주기가 가지는 냉각기의 문제점 및 특성을 파악하여 큰 온도 편차와 잦은 On-Off 주기를 가진다는 것을 알 수 있었다.

(2) 챔버온도 25°C와 35°C에서 냉수출구수온이 낮을수록 증발기 입구압력은 냉수출구수온이 높은 경우와 비교하여 낮은 값을 보였으며, 챔버온도 25°C에 비해 35°C에서 증발기 입구압력은 높은 경향을 보였다.

(3) PID제어기 설계시 제어변수로 사용하고자 하는 챔버온도 35°C, 냉수출구수온 25°C에서는 EEV 125스텝이 늘어날 경우 냉동능력은 47% 감소하며 COP는 35% 감소하였다.

(4) 챔버온도 35°C, 냉수출구수온 25°C에서는 100%부터 10%까지 냉각기의 용량을 조절해서 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

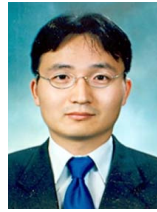
후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

- [1] S. W. Lee and C .W. Lee, "Assessment capability of oil cooler with hot-gas," Korean Society for Precision Engineering, no. 6, pp. 459-460, 2007.
- [2] J. S. Byun, J. H. Lee and D. J. Chang, "Frost retardation of an air-source heat pump by the hot gas bypass method," International Journal of Refrigeration, 31, pp. 328-334, 2008.
- [3] Yaqub. M, Zubair S. M., Khan S. H., "Second-law-based thermodynamic analysis of hot-gas by pass, capacity-control schemes for refrigeration and air-conditioning systems," Energy-The International Journal 20(6), pp. 483-493, 1995.
- [4] Yaqub. M, Zubair S. M., Jameel-ur-Rehman Khan., "Performance evaluation of hot-gas bypass capacity control scheme for refrigeration and air-conditioning systems," Energy, 25, pp. 543-561, 2000.
- [5] J. H. Choi, S. M. Baek, B. J. Jin, W. J. Choi, C. G. Moon, H. S. Lee and J.I. Yoon, "Performance Characteristics of Cooler Controlled Capacity Using Hot-Gas Bypass," ICHMT CONV-09 Tunisia, pp.502-505, 2009.
- [6] J. H. Choi, S. M. Baek, C. G.Moon, S. K. Jeong, and J. I. Yoon, "Performance Characteristics of Water Cooler Controlled Capacity Using Hot-Gas Bypass," IIR Korea, The 3rd Korean Congress of Refrigeration pp.125-128, 2009.

저 자 소 개



백승문(白承文)

2001년 부경대학교 대학원 냉동공조공학과 졸업(공학석사), 2004년 부경대학교 교육대학원 수산교육과 졸업(교육학 석사), 현재 부경대학교 대학원 현재 냉동공조공학과(박사과정)



최준혁(崔竣赫)

2006년 한국해양대학교 냉동공조공학과 졸업(공학석사), 현재 부경대학교 대학원 냉동공조공학과(석사과정)



변종영(卞種英)

2006년 부경대학교 기계공학부 냉동공조·에너지시스템전공 졸업(공학석사), 현재 부경대학교 대학원 냉동공조공학과(석사과정)



문춘근(文春根)

2004년 부경대학교 대학원 냉동공조공학과 졸업(공학박사), 2006년 The University of Aucland 연구원, 현재 (주) 대일 전임연구원



이호생(李虎生)

2006년 부경대학교 냉동공조공학과 졸업(공학박사), 2007년 The University of Illinois, ACRC, post-doc 현재 부경대학교 기계공학부 전임연구원



정석권(鄭碩權)

1995년 Yokohama National Univ. 전자 정보공학과 졸업(공학박사), 현재 부경대학교 기계공학부 교수, 자동제어계 설계, 고장진단·허용제어, 신뢰성 평가 등의 연구에 종사



윤정인(尹政仁)

1995년 Tokyo Univ. of A&T 졸업 (공학박사), 현재 부경대학교 기계공학부 교수, 한국마린엔지니어링학회 편집이사, 대한설비공학회 편집이사, 한국동력기계공학회 편집이사