

산업용 냉각기의 온오프 제어와 토출가스 바이패스 제어 특성 비교

백승문¹ · 문춘근² · 김은필³ · 정석권³ · 윤정인[†]

(원고접수일 : 2011년 4월 21일, 원고수정일 : 2011년 5월 9일, 심사완료일 : 2011년 5월 13일)

Characteristics of On-off Control and Hot-Gas Bypass Control in an Industrial Cooler

Seung-Moon Baek¹ · Choon-Geun Moon² · Eun-Pil Kim³ · Seok-Kwon Jeong³ · Jung-In Yoon[†]

요약: 본 연구는 현재 시판되어 산업현장에서 사용 중인 산업용냉각기의 대표적인 타입인 온오프 제어기가 채용된 냉각기와 토출가스 바이패스 제어기가 채용된 냉각기의 온도 제어 시스템의 운전 특성 및 제어 특성을 비교분석하였다. 온오프 제어 냉각기보다 토출가스 바이패스 제어 냉각기는 최소 8%, 최대 20% COP가 높게 나타났다. 이러한 결과들은 산업 현장에서 좀 더 상황에 맞는 제품의 선정을 할 수 있는 기초 자료로서 활용될 수 있으리라 생각된다.

주제어: 산업용 냉각기, 온오프방식제어, 토출가스 바이패스방식제어, 운전특성, 온도제어

Abstract: In this study the operational characteristics of the temperature control system between an on-off employed cooler and a bypass type cooler is analyzed. Currently an on-off controller employed cooler which is the industry's leading type on the market for industrial coolers is used. The new type cooler is used a bypass controller at discharge gas. The COP of the bypass controlled cooler with discharge gas is at least 8% higher than the on-off controlled cooler. The maximum COP difference is about 20%. Based on the results, the bypass control with discharge gas shows the possible temperature control with high precision.

Key words: Industrial cooler, On-off type controller, Hot-gas bypass controller, Operating characteristics, Temperature control

1. 서 론

산업용 공작기계는 상하좌우로 빠르게 움직이기 때문에 필연적으로 마찰에 따른 열이 발생하게 된다. 이러한 열 발생을 줄이기 위하여 다양한 형태의 냉각기가 생산 및 시판되어 판매 중이다. 시중에 판매되고 있는 이러한 냉각기들은 원하는 온도를 설정하여 온도를 제어할 수 있고 일정한 온도를 유지할 수 있는 기능을 가지고 있다. 하지만 생산성의 향상과 수익성의 증대를 이루어 내

기 위해서는 수시로 변화하는 작업환경을 모두 만족시키며 각 공장의 독특한 운전조건에 맞는 신뢰성 있는 주변기기를 선정하는 것이 무엇보다 중요하다.

최근 산업용 냉각기의 생산 및 판매 추세는 순환되는 냉각유체에 따라 크게 수냉각기와 오일냉각기로 구분되며, 냉각탑이나 지하수 등의 물을 이용한 응축냉각이 가능한 곳에는 수냉식 일체형 냉각기가 주로 판매되어 사용이 되고 있다. 현재

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

1 부경대학교 대학원

2 (주) 대일

3 부경대학교 냉동공조공학과

주로 보급형으로 시판되어 판매되고 있는 산업용 냉각기의 제어방식으로는 원하는 온도를 얻기 위하여 냉각 시스템의 압축기를 온오프 제어하는 방식과 토출가스 바이패스 밸브를 이용하여 온도를 제어하는 토출가스 바이패스 제어방식과 압축기 회전수를 제어하여 냉각한도 내에서 과도한 냉각이 없도록 적절히 제어가 가능하게 하기 위하여 인버터를 이용한 압축기 회전수 제어방식으로 크게 나눌 수 있다.

온오프 제어 방식의 냉각기는 다수의 부품 장착과 고가의 부품의 장착이 없어 위 세 가지 방식의 냉각기 중에서 가격이 제일 저렴한 장점을 가지고 있다. 하지만 이 방식은 설정 온도에 대한 2차 유체의 편차가 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 내에서 제어가 되게 한 방식이지만 실제 현장에서의 급격한 부하 변동에 의하여 $\pm 3\sim 5^{\circ}\text{C}$ 까지 차이가 있는 단점이 있어 정밀한 온도제어가 상대적으로 적은 용도로 많이 사용이 되고 있다.

[1,2] 등은 압축기 토출 측에서 팽창기 출구측 등 다양한 바이패스 방법에 대한 열역학적 및 해석적 방법을 통해 고찰하였으나, 이를 실험적으로 검증하지는 않았다.

이러한 토출가스 바이패스 방식은 압축기에서 토출되는 고온·고압의 냉매를 증발기 입구로 바이패스 시켜 저온·저압의 냉매와 혼합시키는 것이 효율적이다. 증발기의 열교환량을 줄여 2차 유체의 온도 제어가 가능하므로 설정 온도에 대한 2차 유체의 온도 편차가 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 내에서 제어가 되어 정밀한 장점을 가지고 있다는 것을 Baek 등이 실험적으로 밝혔다[3,4].

[5] 등은 Hot-gas 우회방식의 오일쿨러를 개발하고 성능 평가를 수행하여 오일쿨러의 성능을 입증하였으며, [6] 등은 정밀한 온도제어를 위해 2개의 전자밸브를 갖는 듀얼 밸브 방식 오일쿨러 시스템을 개발하여 오일쿨러 시스템의 성능을 비교 분석하였다.

본 연구는 현재 시판되어 산업현장에서 사용 중인 산업용냉각기의 대표적인 타입인 온오프 제어가 채용된 냉각기와 토출가스 바이패스 제어가 채용된 냉각기의 성능을 비교분석하는데 그 목적이

있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

실험 장치는 크게 산업용 냉각기와 이를 보완해주는 보조 열원기기로 구성되어 있다. 실제로 현장에서 산업용 냉각기를 동작기계를 부착시켜 가동하는 실험은 부하변동을 일정하게 유지하기 어려운 점과 동작기계의 가동조건 변화에 따른 변수가 너무 많아 냉각기를 외부공기온도를 일정하게 유지시킬 수 있는 항온실을 설치하였으며, 냉각기를 항온실로 옮겨 실험 장치를 설치하였다. 테스트에 사용된 온오프 타입 냉각기는 3.0 kW급 로터리 타입 밀폐형 압축기가 사용되었으며 응축기는 냉각기에 많이 사용되고 있는 핀튜브형 공랭식 응축기가 장착되었다. 토출가스 바이패스 타입 냉각기는 온오프 타입 냉각기의 주요 장치와 동일한 부품이 사용되었으며, 압축기의 고온고압의 가스를 증발기 입구 쪽으로 바이패스를 시켜 팽창기에서 나오는 냉매와 열교환량 조절을 위하여 작동범위 0~480 step, 12V입력, 한계압력 3.3 MPa인 EEV (Electronic expansion valve)가 장착되어 있다.

증발기와 응축기, 압축기, 팽창기 등 주요 장치 입구와 출구에는 오차범위 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 인 T형 온도센서를 설치하여 실시간으로 온도가 측정될 수 있도록 하였으며, 냉각기 출구 냉수 유량은 디지털 수유량계로 측정하였다. 또한 항온실 상단에는 팬을 설치하여 설정온도 이상 및 이하가 되면 자동적으로 팬이 가동 및 정지가 되도록 하여 설정한 온도가 일정하게 유지 될 수 있도록 하였다. 열손실이 발생하는 곳은 단열재를 사용하여 단열하여 열손실이 최소화 될 수 있도록 하였다.

2.2 실험 방법

온오프 제어 냉각기와 토출가스 바이패스 제어 냉각기 운전특성 비교 실험 조건을 Table 1에 나타내었다. 산업용 동작기계에 사용되는 외기온도의 변화에 따른 시스템의 특성을 살펴보기 위하여 항온조 내부 외기 온도를 25, 30, 35 $^{\circ}\text{C}$ 로 변화시켜 실험하였다.

Table 1: Experimental conditions

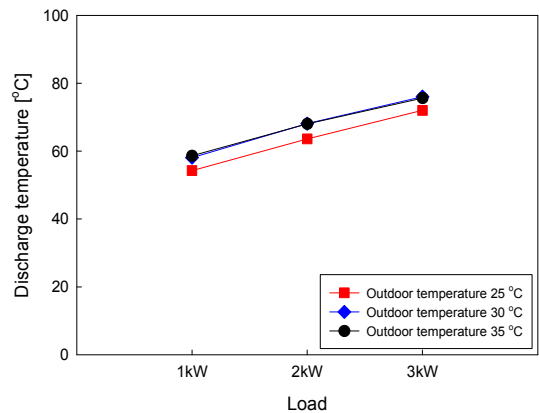
Parameters	Conditions
Chilled water flow rate [m ³ /s]	0.000167
Chamber temperature [°C]	25, 30, 35
Chilled water outlet temperature [°C]	25
Refrigerant	R-22
Load [kW]	1, 2, 3

또한 실제로 공작기계를 직접 부착시켜 가동하는 실험은 현실적으로 어려운 점과 공작기계의 가동조건 변화에 따른 변수가 너무 많아 공작기계에서 발생하는 열을 대신하기 위해 부하조절이 가능한 히터를 설치하여 1 kW, 2 kW, 3 kW로 부하당 1시간씩 히터의 발열량을 변화시켜 실험하였다. 장치를 가동한 후 장치에 부착된 온도센서에서 측정되는 데이터를 모니터링 하면서 30분 이상 평형상태로 유지되는 정상 상태가 되었을 때 필요한 데이터의 평균을 산정 측정하였으나, 온오프 제어 냉각기의 경우는 설정한 온도 25°C에 도달하면 압축기의 기동이 멈추게 되므로 압축기 기동이 Off 일때의 데이터 값을 제외한 압축기가 가동중인 경우의 데이터의 평균을 산정하였다. 또한 온도, 유량 및 전력량 등은 MX-100(Yokogawa) 모델을 사용하여 PC에 저장하는 동시에 모니터에서 각 측정값을 실시간 확인할 수 있도록 하였고 이렇게 수집한 데이터는 PC에 저장하여 데이터 해석을 위한 프로그램을 이용하여 분석하였다.

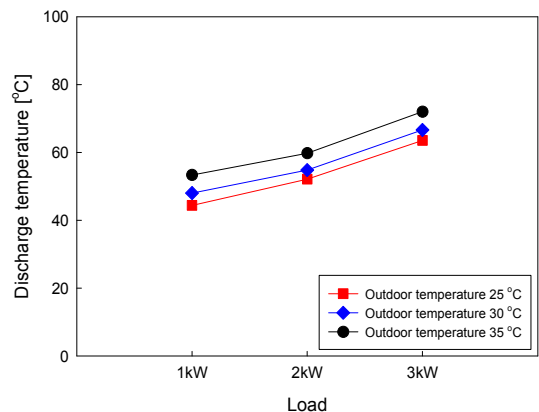
3. 실험결과 및 고찰

산업용 냉각기에 채용되는 온도제어 방식 중 온오프방식은 정속운전 냉각기가 대부분 사용되고 있지만 이는 가동 및 정지를 반복함으로써 시스템효율이 낮고, 부하변동에 적절히 대응하지 못하여 정밀한 온도 제어가 되지 못하는 약점이 있으나, 시스템이 간단하여 제작 및 고장요인이 적은 이점이 있다. 반면에 토출가스 바이패스 방식은 압축기에서 토출되는 고온·고압의 냉매를 증발기 입구로 바이패스 시켜 저온·저압의 냉매와 혼합시킴으로

써 증발기의 열교환량을 줄이고, 온도 편차를 줄일 수 있는 이점이 있으나, 시스템을 항상 풀가동하면서 부분부하에 대응해야 하는 약점이 있다.[3,4] Figure 1은 온오프 제어 냉각기와 토출가스 바이패스 제어 냉각기의 외기온도 변화와 부하 변동에 따른 압축기 토출 냉매온도를 나타낸 그래프이다. 압축기 토출 냉매온도가 압축기 제조사에서 제시한 한계온도 이상으로 지속적으로 사용 시에는 압축기 과열로 인한 오일의 열화 및 냉동유의 탄화 등의 발생 우려가 크다. 따라서 회전수 변화에 따른 압축기 토출 냉매온도의 확인은 냉각기의 내구성 및 안정성 측면에서는 대단히 중요하다. 냉각기에 장



(a) On-off control system



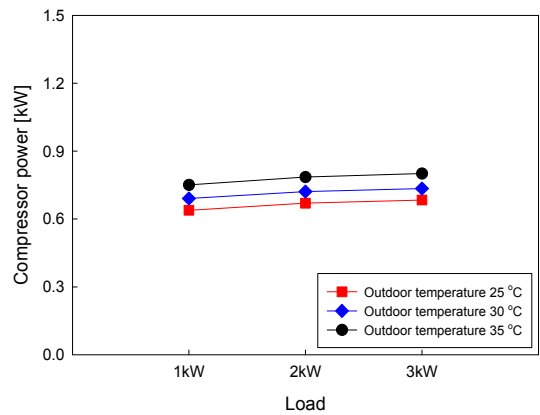
(b) Hot-gas bypass control system

Figure 1: Variation of discharge temperature with respect to load

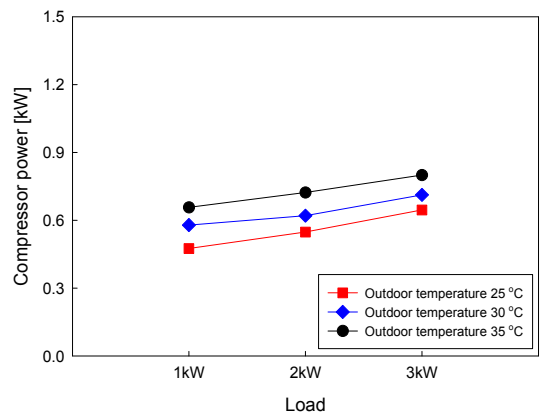
착된 압축기의 토출 냉매온도 임계값은 115°C인데 온오프 제어 냉각기 부하변동에 따른 압축기 토출 냉매온도는 54~76°C 사이의 온도로 나타났으며, 토출가스 바이패스 제어 냉각기의 부하변동에 따른 압축기 토출 냉매온도는 44~72°C사이의 온도로 나타났다. 모두 압축기 한계토출온도 이하로 측정되었는데, 온오프 제어 냉각기의 토출 냉매온도가 토출가스 바이패스 제어 냉각기에 비하여 최소 5.5%에서 최대 22% 높게 나타남을 보였다. 이는 토출가스 바이패스 제어 냉각기는 압축기에서 발생되는 토출가스를 증발기 입구로 바이패스 시켜 증발기의 열교환량을 조절하게 되는데 이때 바이패스 되는 고온 고압의 냉매가 증발기를 거치는 동안 일부 냉매가 응축되는데, 액상태의 냉매를 압축기가 흡입하게 되어 습압축을 하게 된다. 이로 인하여 온오프 제어 냉각기에 비해 상대적으로 토출가스의 온도가 낮음으로 판단된다. 압축기의 습압축을 방지 방지하기 위하여 토출가스 바이패스 제어 냉각기에는 온오프 제어 냉각기에 비해 용량이 더 큰 액분리기가 장착이 되어야 할 필요성이 있음을 확인 할 수 있었다.

Figure 2는 온오프 제어 냉각기와 토출가스 바이패스 제어 냉각기의 외기온도 변화와 부하 변동에 따른 압축기 소요 동력을 나타낸 그래프이다. 냉각기에서 소비하는 전력으로는 압축기에서 소비하는 전력과 응축기 팬의 소요전력 및 워터펌프의 소요 전력으로 크게 나눌 수 있는데 이 중에서 거의 절반을 차지하고 있는 압축기의 소요 동력의 측정 비교는 필요하다. 온오프 제어 냉각기의 압축기 기동시의 소요 동력은 0.64~0.8 kW 사이로 나타났으며, 토출가스 바이패스 제어 냉각기의 압축기 소요 동력은 0.48~0.8 kW 사이로 나타났다. 그리고 1 kW 부하를 주었을 경우 토출가스 바이패스 제어 냉각기가 온오프 제어 냉각기에 비해 소요 동력이 적게 나타났다. 이는 토출가스 바이패스 제어 냉각기는 1 kW의 적은 부하에서 압축기 꺼짐이 없이 적은 소요 동력을 지속적으로 기동하며 온도 조절을 하지만 온오프 제어 냉각기는 초기 소요 동력을 사용하여 온도조절을 하며 단순히 설정온도 이하가 되면 작동을 멈추는 것으로 온도 조절을 대

신하게 되므로 그에 따른 소요 동력이 상대적으로 크게 되는데 이로 인한 것으로 판단된다. 온오프 제어 냉각기의 기동시의 외기온도와 부하변동에 따른 압축기 소요 동력의 부하에 따른 편차는 외기온도 모두 약 6%이내로 거의 변화가 없음을 보였으나, 토출가스 바이패스 제어 냉각기의 부하변동에 따른 압축기 소요 동력의 편차는 외기온도 25°C에서 35%, 외기온도 30, 35°C에서는 20%로 온오프 제어 냉각기에 비해 편차가 큼을 보였다. 토출가스 바이패스 제어 냉각기는 부하가 클수록 바이패스 밸브를 통해 증발기로 유입되는 냉매량이 작아짐을 보였는데 이는 그만큼 압축기가 더 많이 일을 했다



(a) On-off control system



(b) Hot-gas bypass control system

Figure 2: Variation of compressor power with respect to load

는 것으로 해석 가능하다. 이로 인한 것으로 판단 된다.

Figure 3은 온오프 제어 냉각기와 토출가스 바이패스 제어 냉각기의 외기온도 변화에 따른 평균 압축기 소요 동력을 나타낸 그래프이다. 온오프 제어 냉각기는 토출가스 바이패스 제어 냉각기에 비하여 외기온도 25°C에서는 17%, 외기온도 30°C에서는 12%, 외기온도 35°C에서는 8%의 소요 동력이 큼을 보였다. 본 실험에 사용된 데이터 값은 온오프 제어 냉각기의 경우는 설정한 도달하면 압축기의 기동이 멈추게 되므로 압축기 기동이 Off 일 때의 데이터 값을 제외한 압축기가 기동중인 경우의 데이터의 평균을 산정으로 인해 토출가스 바이패스 제어 냉각기에 비해 상대적으로 소요 동력이 큰 것으로 판단되며, 또한 온오프 제어 냉각기는 압축기와 냉각 시스템의 회로를 보호하기 위해서 일반적으로 압축기의 작동이 멈춘 후에 3분 동안 작동을 강제적으로 멈추는 보호 회로를 가진 후 기동을 하게 되어 많은 전력을 소모하게 되는데 이로 인한 것으로 판단된다. 차후 온오프 제어 냉각기의 기동중일 때와 기동이 멈췄을 때의 값을 포함한 전체 데이터를 비교 분석 할 예정이다.

Figure 4는 온오프 제어 냉각기와 토출가스 바이패스 제어 냉각기의 외기온도 변화와 부하 변동에 따른 COP를 나타낸 그래프이다. 온오프 제어 냉각기의 COP 범위는 1.19~3.84, 토출가스 바이

패스 제어 냉각기의 COP범위는 1.38~3.84 사이로 나타났다. 그리고 온오프 제어 냉각기에 비하여 토출가스 바이패스 제어 냉각기는 부하가 적은 부하 1 kW에서 16%정도 COP가 높게 나타났다.

부하 적은 경우 온오프 제어 냉각기에 비해 토출가스 바이패스 제어 냉각기의 COP가 높게 나타난 것은 온오프 제어 냉각기의 기동이 멈췄을 때의 값을 제외한 것으로 인함으로 판단되며 향후 기동 때만의 값과 기동이 멈췄을 때의 값을 포함한 경우에 대한 비교 분석을 할 예정이다. 또한 전체적으로 부하가 클수록 COP값이 크게 나타났다. COP는 압축기소비동력과 냉각능력의 비로 산정이 되는데, Figure 2의 결과에서 알 수 있듯이 압축기 소요

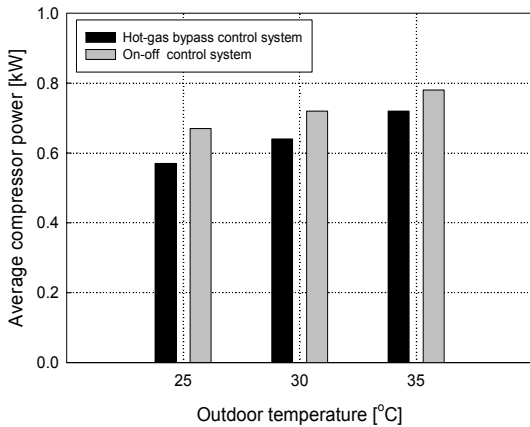
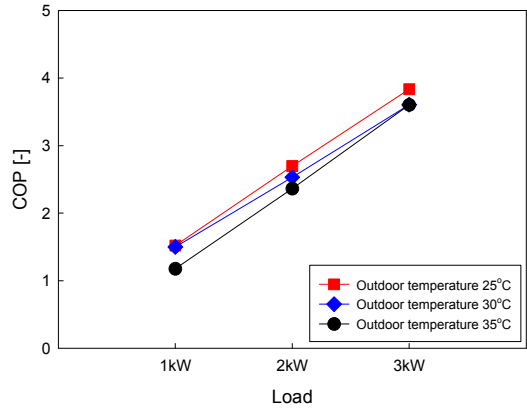
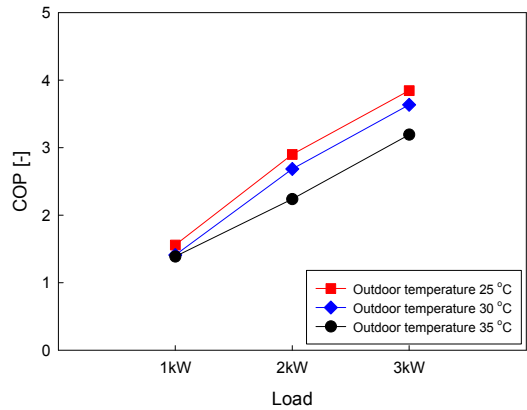


Figure 3: Variation of average compressor power with respect to load



(a) On-off control system



(b) Hot-gas bypass control system

Figure 4: Variation of COP with respect to load

동력의 경우, 온오프 및 바이패스 제어 모두 큰 차이가 나지 않는다. 이는 온오프의 경우는 부분부하 때 압축기의 기동회수가 그 만큼 더 많아져 압축기 소요동력이 별로 줄지 않는 원인, 그리고 바이패스 제어의 경우는 부분부하 때 상당부분의 냉매가 바이패스 관을 통해 바이패스 되므로 압축기는 정상운전을 계속하는 경우와 같게 된다. 하지만 부하가 작을 때는 약간 실제 부하가 줄어들어 따라 소요동력이 약간 줄어드는 것을 알 수 있다. 이러한 압축기 소요동력의 변화에 비해 COP를 나타내는 또 하나의 요소인 냉동능력의 경우는 부하량이 바로 반영되므로 부분부하의 경우가 부하가 훨씬 적게 되어 전체 COP가 작아지고, 부하가 클수록 소요동력 증가분보다 부하증가분이 커서 큰 COP를 나타내게 되는 것이라 판단된다.

Figure 5는 온오프 제어 냉각기와 토출가스 바이패스 제어 냉각기의 냉각 부하별 냉각기의 출구 온도 변화를 나타낸 그래프이다. 온오프 제어 냉각기는 컨트롤러에서 온도편차를 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 로 일정하게 유지하도록 설정하였지만, 압축기 보호 특성상 3분간의 압축기 기동 정지로 인해 온도편차를 일정하게 유지하기가 불가능하여 온도편차는 부하가 클수록 커지게 된다. 온오프 제어 냉각기는 1 kW의 적은 부하에서는 온도 편차가 $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ 를 나타내어 최저 온도와 최고 온도차가 약 5°C 를 나타냈으며, 부하 2 kW에서는 온도 편차가 $\pm 3.2^{\circ}\text{C}$ 를 나타내어 최저 온도와 최고 온도차가 약 6.4°C 를 나타냈으며, 부하 3 kW에서는 온도 편차가 $\pm 4^{\circ}\text{C}$ 를 나타내어 최저 온도와 최고 온도차가 약 8°C 를 나타냈다. 또한 1 kW 부하를 주었을 경우 온오프 횟수는 10회, 2 kW 부하를 주었을 경우 6회였으며, 3 kW 부하를 주었을 경우는 2회로 부하가 커질수록 온오프 횟수 즉 시간당 주기가 길어짐을 보였는데, 이는 부하가 클수록 3분 정지 기간 동안 유체의 온도는 상승하고 이것을 목표 온도까지 냉각 시키는데 많은 시간이 소요 되므로 부하의 크기가 커질수록 온오프 주기는 길어지는 특성을 보이는 것으로 판단된다. 그리고 토출가스 바이패스 제어 냉각기는 최저 온도와 최고 온도의 편차가 약 $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ 로 유지가 가능함을 보였다.

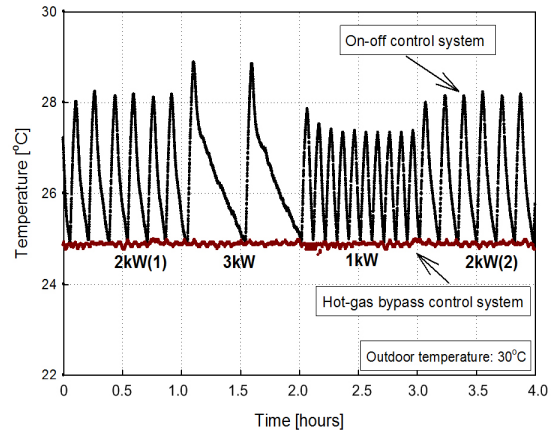


Figure 5: Temperature response under on-off and hot-gas bypass control system

4. 결 론

산업용냉각기의 대표적인 타입인 온오프 제어기가 채용된 냉각기와 토출가스 바이패스 제어기가 채용된 냉각기의 온도 제어 시스템의 운전 특성을 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 토출가스 바이패스 제어 냉각기에는 온오프 제어 냉각기에 비해 용량이 더 큰 액분리기가 장착이 되어야 할 필요성이 있음을 확인할 수 있었다.

(2) 온오프 제어 냉각기의 COP 범위는 1.19~3.84, 토출가스 바이패스 제어 냉각기의 COP범위는 1.38~3.84 사이로 나타났으며, 온오프 제어 냉각기에 비하여 토출가스 바이패스 제어 냉각기는 부하가 적은 부하 1kW에서 16%정도 COP가 높음을 알 수 있었다.

(3) 온오프 제어 냉각기는 정밀온도 제어가 필요한 곳에는 적합하지 않음을 알 수 있었으며, 토출가스 바이패스 제어 냉각기는 정밀온도 제어가 가능함을 확인할 수 있었다. 하지만 이 제어방식은 시스템을 연속적으로 가동해야 하는 단점을 안고 있어 인버터 압축기 등의 새로운 방법의 접근이 필요하리라 생각된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

- [1] Yaqub. M, Zubair S. M. and 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 vol. 20, no. 6, pp. 483-493, 1995.
- [2] Yaqub. M, Zubair S. M. and Jameel-ur-Rehman Khan., "Performance evaluation of hot-gas bypass capacity control scheme for refrigeration and air-conditioning systems," Energy, vol. 25, pp. 543-561, 2000.
- [3] J. I. Yoon, S. T. Oh, S. M. Baek, J. H. Choi, J. Y. Byun, S. K. Jeong and C. G. Moon, "Temperature control of industrial water cooler using hot-gas bypass," WCSET Bali-2009, pp. 377-381, 2009.
- [4] 백승문, 최준혁, 변중영, 문춘근, 이호생, 정석권, 윤정인 "핫가스 바이패스 유량에 따른 산업용 냉각기의 온도제어 특성", 한국마린엔지니어링학회, vol. 33, no. 8, pp. 55-62, 2009.
- [5] 이승우, 염한길, 박길중, "Hot Gas를 이용한 오일쿨러의 성능평가", 한국정밀공학회지 vol. 26, no. 3, pp. 73-80, 2009.
- [6] 염한길, 이승우, 박길중, "가스 바이패스 사이클을 적용한 오일쿨러 연구" 기계와 재료, vol. 22 no. 1, pp. 54-64, 2010.

저 자 소 개



백승문(白承文)
 2001년 부경대학교 대학원 냉동공조공학과 졸업(공학석사), 2004년 부경대학교 교육대학원 수산교육과 졸업(교육학석사), 현재 부경대학교 대학원 냉동공조공학과 재학 (박사과정)



문춘근(文春根)
 2004년 부경대학교 대학원 냉동공조공학과 졸업(공학박사), 2006년 The University of Auckland 연구원, 현재 주식회사 대일 수석 연구원



김은필(金恩弼)
 1987년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1991년 미국피츠버그 대학 기계공학과 졸업 공학석사, 1995년 미국 피츠버그 대학 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 부경대학교 냉동공조공학과 교수



정석권(鄭碩權)
 1995년 Yokohama National Univ. 전자정보공학과 졸업(공학박사), 현재 부경대학교 냉동공조공학과 교수, 자동제어계설계, 고장진단·허용제어, 신뢰성 평가 등의 연구에 종사



윤정인(尹政仁)
 1995년 Tokyo Univ. of A&T 졸업(공학박사), 현재 부경대학교 냉동공조공학과 교수, 한국마린엔지니어링학회 편집이사, 한국동력기계공학회 편집이사, 냉동기기의 정밀온도제어 및 초저온 액화사이클 개발 등의 연구에 종사