

제어방식에 따른 산업용 수냉각기의 운전 특성 비교

A Comparison of Operating Characteristics for Industrial Water Cooler with Variation of Control Methods

백승문*†

Seung-Moon Baek*†

(접수일 : 2014년 11월 01일, 수정일 : 2014년 12월 01일, 채택확정 : 2014년 12월 01일)

Abstract: This paper presents a comparison of operating characteristics for industrial water cooler with variation control methods. The performance analysis regarding the characteristics of condensation capacity, evaporation capacity, compressor load, COP of an on-off type cooler, a hot gas-bypass control type cooler and an inverter control type cooler with respect to the system load is reviewed, respectively. The primary results are as following: the variation of required compressor load of an on-off type cooler with respect to load is 5%, that of hot gas-bypass type is 18% and 66% for an inverter control type cooler. As the result shows, an inverter control type yields relatively huge difference of required compressor load compared to other types of control system. In terms of partial load, COP of an inverter control type cooler presents the highest value, and is considered as the optimized type for the used of the system involving frequent partial load.

Key Words : On-Off control type, Hot gas-bypass control type, Inverter control type, COP(coeffcient of performance), Industrial water cooler

1. 서 론

산업용 공작기계의 초정밀화와 초고속화로 인해 금형, 제품냉각, 구동장치계, 열교환장비 등에 발생하는 열변형을 방지하기 위하여 필수적으로 정밀한온도제어기가 적용된 공작기계용 산업용냉각기가 사용되고 있다. 현재 시판중인 공작기계용 산업용냉각기의 정밀한 온도제어를 위해 적용된 온도제어방식으로는 온오프제어방식, 핫가스제어방식, 인버터제어방식 등이 사용되고 있다. 이 중에서 현재 시중에서 가장 많이 적용되어 사용되고 있는 온오프 방식의 온도제어방식은 단순히

압축기 기동을 온오프하는 방식으로 냉각기가 제거해야하는 부하의 변화에 따른 냉각수의 온도제어가 정밀하지 못하다. 따라서 이를 해결하기 위한 방법으로 핫가스를 이용하는 방법과 인버터압축기를 이용하여 냉각기에 장착된 압축기 회전수 제어를 통한 정밀한 온도제어 연구가 진행되고 있다. ¹⁻⁴⁾

Baek 등^{3,4)}은 핫가스 바이패스를 적용한 산업용 냉각기의 성능특성을 파악하기 위하여 EEV (Electronic Expansion Valve)의 개방에 따른 냉각시스템의 사이클 변화 특성 파악하고, 냉각기로 유입되는 부하변화에 대응하는 정밀한 온도조절

*† 백승문 : 부경대학교 냉동공조공학과
E-mail : baeksm@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6180

*† Seung-Moon Baek : Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Pukyong National University.
E-mail : baeksm@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6180

이 가능한 핫가스 바이패스의 제어알고리즘개발을 위한 실험을 실시하였다. 또한 인버터제어 산업용 냉각기의 응축압력, 증발압력과 압축기소비동력, 성능계수 등이 외기온도와 부하변화에 따라 어떠한 특성을 가지고 있는지에 대한 비교실험을 실시하였다. Yaqub 등^{5,6)}은 핫가스 바이패스방식에는 크게 3가지 방식이 있으며, 3가지 방식을 프로그래밍을 사용한 시뮬레이션과 실험을 통해 냉각 부하 변화와 핫가스 바이패스량에 따른 성적계수의 파악과 외부유체가 어떤 양상을 보이는지에 대해 분석하고 그 특징을 설명하였다. 그리고 Lee 등⁷⁾의 경우 핫가스 우회 방식을 사용한 오일쿨러 성능 평가를 위해 레귤레이팅 밸브의 개폐 정도에 따른 온도변화와 핫가스량의 측정을 통한 분석을 실시하였으며, 핫가스 바이패스를 이용한 오일쿨러의 성능을 평가하고 레귤레이팅 밸브의 개폐량과 제어를 통한 시간에 따른 온도제어 편차를 확인하였다.

이렇게 다양한 제어방식에 대한 연구를 통해 최적화시킨 온도제어방식이 적용된 산업용 냉각기가 시중에 판매되고 있지만, 실제 최종사용자인 현장에서 제품을 구입하는 구매부서에서는 각 제품의 운전 특성과 시스템의 각 부분의 특징과 제어특성에 대한 파악이 없이 단순한 달러의 설명과 제품의 가격에만 의존해서 제품을 선택하여 사용하고 있는 실정이다.

따라서 현재 시판되어 산업현장에서 사용 중인 산업용냉각기의 대표적인 타입인 온오프 제어기가 적용된 냉각기와 핫가스 바이패스 제어기가 적용된 냉각기, 인버터 제어기가 적용된 냉각기의 제어 시스템의 운전 특성을 비교 한다. 이에 본 논문에서는 3가지 제어방식을 적용한 산업용 냉각기의 시제품을 사용하여 응축압력, 증발압력과 압축기소비동력, 성능계수 등을 부하변화에 따른 비교 실험을 통하여 성능특성을 서로 비교 분석한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험대상인 온오프 제어기가 채용된 냉각기와 핫가스 바이패스 제어기가 장착된

냉각기 및 인버터 제어 냉각기를 비교 실험하기 위한 실험장치 개략도이다. 장치는 크게 2개의 파트로 구성이 되며 산업용 냉각기와 공작기계 부하를 담당하는 역할을 하는 보조 열원기기로 구성되었다. 산업용 냉각기의 주요 구성장치인 압축기, 응축기, 팽창장치, 증발기로의 구성은 동일하지만, 온오프 및 핫가스 바이패스 제어기가 장착된 냉각기의 팽창밸브는 모세관이 장착되었으며, 인버터 제어기가 장착된 냉각기의 팽창밸브는 전자팽창밸브가 장착되었다. 그리고 온오프 제어와 핫가스 바이패스 제어 냉각기에 장착된 압축기는 3 kW급 로터리타입 밀폐형 압축기가 사용되었으며, 인버터 타입 냉각기에 사용된 압축기는 동일 용량의 30~90 Hz 가변속 AC 인버터 압축기가 장착 사용되었다. 그리고 응축기와 증발기는 소형 냉각기에 가장 많이 사용되고 있는 핀핀브형 공랭식 응축기와 셀코일식 증발기가 장착되었다. 그리고 실제 공작기계를 부착시킨 실험이 현실적으로 어려운관계로 보조 열원기기로인 5 kW 가열히터가 장착된 열교환기를 설치하였다. 압축기 구동에 필요한 소비전력을 측정하기 위해 파워미터를 설치하였으며, 냉각수 배관 입·출구에 T타입 열전대와 터빈식 유량계를 설치하여 냉각수 온도 및 유량을 측정하여 부하량을 계산할 수 있도록 하였다. 각 주요 계측기는 PC와 연동시켜 실시간으로 측정된 데이터 값이 저장 가능하도록 하였다.

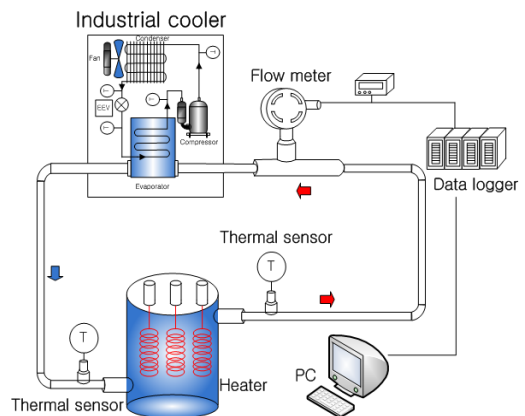


Fig. 1 Schematic experimental diagram

2.2 실험방법

온오프 제어, 핫가스 바이패스 제어, 인버터 제어 냉각기의 운전특성을 비교하는 실험을 위한 실험조건을 Table 1에 나타내었다.

공랭식 응축기가 적용된 3가지 냉각기의 특성상 외기온도를 정밀하게 조절할 수 있는 항온실로 장치를 옮겨 실험을 실시하였다. 항온실의 온도는 Table 1과 같이 25~35℃로 5℃ 차이로 실제 동작기계가 사용되고 있는 현장과 계절상황에 맞게 온도를 맞춰 설정하였으며, 냉각기에서 냉매배관내의 냉매와 열교환하여 배출되는 냉수의 온도는 일반적으로 산업용 동작기계에 많이 사용되는 냉수온도인 25℃가 유지되도록 설정하였다. 충전된 냉매는 동일한 R-22를 충전하여 상호 비교가 될 수 있도록 하였으며, 실제로 동작기계를 직접 부착시켜 가동하는 실험은 현실적으로 어려운 점과 실내 실험으로 인해 위험부담이 크며 동작기계의 가동조건 변화에 따른 변수가 너무 많아 동작기계의 부하를 담당하기 위해 부하조절이 가능한 히터가 내장된 열교환기를 설치하여 1 kW, 2 kW, 3 kW로 부하 당 1시간씩 열교환기 내의 히터 발열량을 변화시켜 실험하였다. 하지만 인버터 제어 냉각기의 경우 1 kW의 부하를 인가하여 실험하는 경우 인버터 제어 냉각기에 장착된 압축기가 제조업체의 권장 구동값을 벗어나는 것이 사전 실험에서 발견되어 인버터 제어 냉동기의 경우에는 1 kW의 부하가 아닌 1.5 kW의 부하를 주어 실험을 실시하였다. 또한 냉각기를 가동시킨

Table 1 Test conditions

Parameter	Conditions	
Refrigeration load	[kW]	1~3.5
Outdoor temperature	[℃]	25, 30, 35
Water temperature of evaporator outlet	[℃]	25
Chilled water flow rate	[l/min]	10
EEV step		0~480
Superheating degree	[℃]	10
Refrigerant	-	R-22
Inverter	[Hz]	30~90

후 각 부위 장치에 부착된 온도센서의 데이터를 실시간 모니터링 하면서 응축온도와 증발온도가 30분 이상 평형 상태로 유지되는 정상 상태가 되었을 때 필요한 데이터의 평균값을 산정 하였다.

측정된 데이터는 MX-100 (Yokogawa) 모델을 사용하여 PC에 저장하는 동시에 모니터에서 각 측정값을 실시간 확인되도록 하여 문제 발생시에 긴급히 대처가 가능하도록 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 온오프, 핫가스 바이패스, 인버터제어 냉각기의 외기온도 30℃에서 부하 변동에 따른 압축기 회전수변화를 나타낸 그래프이다. 온오프 및 핫가스 바이패스 방식의 냉각기에 장착된 압축기는 회전수 고정방식으로 부하변화에 따른 회전수의 변화가 없으나, 인버터 제어 냉각기의 압축기 회전수는 부하가 클수록 압축기 회전수가 큰 폭으로 상승하는 경향을 확인 할 수 있었다. 그리고 1 kW 부하에서 인버터 제어 냉각기의 실험값이 없는 이유는 사전 실험에서 40 Hz이하에서 냉각기 구동시 압축기의 진동 및 소음 문제가 발견되었다. 이 문제를 해결하기 위하여 냉각기에 장착된 인버터 압축기의 보호차원에서 40 Hz이상으로 제어하도록 세팅하였기 때문이다.

압축기 제조업체에서 제시하는 한계 값 이상으

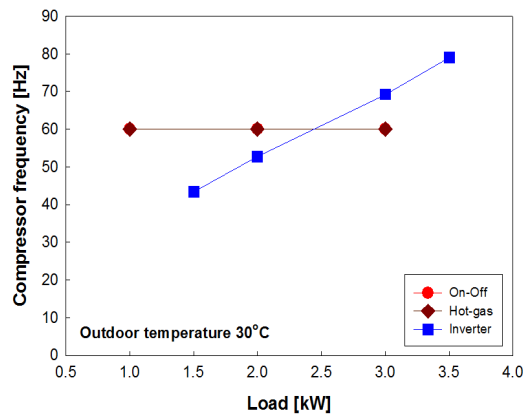


Fig. 2 Variation of compressor frequency with respect to load

로 시스템을 장시간 구동시킬 경우 압축기의 이상발생으로 압축기 크랙이나 파손이 생겨 시스템 전체에 문제가 생길 수 있다. 따라서 냉각기 성능 비교실험에서 구동 한계값 이내의 시스템 작동 확인은 필수적이다. 특히 인버터 제어 냉각기의 경우 사전 시험 구동을 통하여 낮은 부하에서의 압축기 흡입 압력인 저압과 높은 부하에서의 압축기 토출 압력인 고압을 확인 하여 구동 한계값 이내의 분포와 경계값을 확인하여 실험을 실시하였다. Fig. 3은 온오프, 핫가스 바이패스, 인버터제어 냉각기의 외기온도 30℃에서 부하 변동에 따른 압축기 토출 냉매온도를 나타낸 그래프이다. Fig. 3에서 보듯이 온오프, 핫가스 바이패스, 인버터제어 냉각기 모두 부하변동에 따른 압축기 토출 냉매온도는 압축기 제조사에서 제시하는 최대 구동조건온도 이하의 온도대를 보였으며, 압축기 토출온도는 온오프, 인버터제어, 핫가스 바이패스 제어 냉각기 순으로 높게 나타났다. 온오프제어 냉각기 대비 핫가스 바이패스 제어 냉각기의 토출가스 온도는 최소 12%에서 최대 19.5% 낮게 나타남을 보였으며, 온오프제어 냉각기 대비 인버터제어 냉각기의 토출가스 온도는 최대 9.1% 낮게 나타남을 보였다.

이는 온오프제어 냉각기가 토출가스 온도가 가장 높은 것은 압축기와 냉각 시스템의 회로 보호 위해서 압축기의 작동이 멈춘 후 3분 동안 작동을

강제적으로 멈추는 보호 회로를 가지고 있기 때문에 부하 대응이 신속하지 않기 때문으로 판단되며, 인버터 제어 냉각기의 경우 증발기 부하량에 따라 압축기 회전수를 조절하여 부하에 따라 냉매량을 순환시키기 때문에 온오프제어 냉각기에 비해 압축기 토출가스 온도가 낮은 것으로 판단된다. 반면에 핫가스 바이패스 제어 냉각기는 압축기에서 토출되는 고온의 가스를 바이패스 시켜 증발기의 열교환량을 조절할 때 바이패스 되는 고온 고압의 냉매는 증발기를 지나는 동안 일부 냉매가 응축되며, 응축되어 액상태가 된 냉매가 압축기로 유입하게 되어 액압축을 하게 되어 타 방식에 비해 토출가스의 온도가 낮아진 것으로 판단된다.

Fig. 4는 온오프, 핫가스 바이패스, 인버터제어 냉각기의 외기온도 30℃에서 부하 변동에 따른 응축압력변화를 나타낸 그래프이다. 온오프제어, 핫가스 바이패스 제어, 인버터제어 냉각기 제어방식 모두 압축기 제조사에서 제시하는 최대 구동조건압력 이하의 압력대를 보였다. 온오프제어 냉각기 대비 핫가스 바이패스 제어 냉각기의 응축압력은 최소 8.3%에서 최대 10.2% 낮게 나타남을 보였으며, 온오프제어 냉각기 대비 인버터제어 냉각기의 응축압력은 최소 1.5%에서 최대 7.3% 낮게 나타남을 보였다. 그리고 Fig. 4에서 보듯이 온오프제어, 핫가스 바이패스 제어, 인버터제어

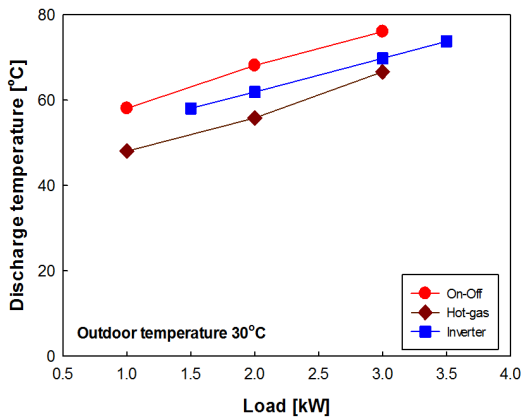


Fig. 3 Variation of discharge temperature with respect to load

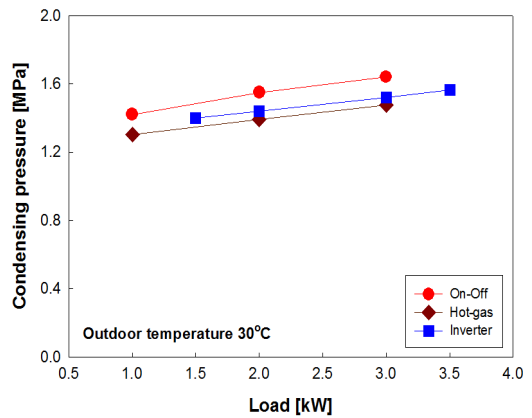


Fig. 4 Variation of condensing pressure with respect to load

냉각기 제어방식 모두 부하가 증가할수록 응축압력이 증가함을 보였다. 이것은 부하가 증가할수록 증발기에 피냉각유체와 열교환시켜야 되는 냉매가 많이 필요하게 되며 응축기에서 더 많은 냉매를 응축시켜야 되기 때문에 용량이 한정된 응축기가 장착되었기 때문에 응축압력이 올라가게 되는 것이라 판단된다.

Fig. 5는 온오프, 핫가스 바이패스, 인버터제어 냉각기의 외기온도 30℃에서 부하 변동에 따른 증발압력변화를 나타낸 그래프이다. 온오프제어 냉각기 대비 토출가스 바이패스 제어 냉각기의 증발압력은 거의 비슷함을 보였으며, 온오프제어 냉각기 대비 인버터 제어 냉각기의 증발압력은 최소 8%에서 최대 12.4% 높게 나타남을 보였다. 그리고 온오프제어 냉각기와 핫가스 바이패스 제어 냉각기에 비해 인버터 제어 냉각기의 증발압력이 높게 나타났는데 이는 인버터 압축기 보호를 위하여 압축기 흡입냉매의 과열도를 제어기를 통해 10℃로 EEV 스텝을 조절을 통해 압축기의 흡입냉매의 압력이 압축기 구동 한계값을 벗어나는 것에 대한 방지하도록 하였는데 이로 인한 것으로 판단된다.

Fig. 6은 온오프, 핫가스 바이패스, 인버터제어 냉각기의 외기온도 30℃에서 부하 변동에 따른 압축기 소요동력 변화를 나타낸 그래프이다. 냉각기에서 소비하는 전력으로는 압축기 구동에 필요

한 전력과 공랭식 응축기에 장착된 펜 구동전력과 제어컨트롤부의 소요전력과 유체의 순환을 위해 장착된 워터펌프의 구동 전력 등이 있다. 압축기 구동소요전력을 측정하기 위하여 압축기에 별도 장착된 파워미터를 통해 압축기 소요동력을 측정하였다.

온오프 제어 냉각기의 경우에는 부하변화에 따른 소요동력의 차는 5%, 핫가스 바이패스 제어 냉각기의 경우에는 부하변화에 따른 소요동력의 차이는 18% 증가함을 보였으나, 인버터 제어 냉각기의 경우에는 부하변화에 따른 소요동력의 차이가 큼을 보였다. 그리고 온오프제어 냉각기 대비 핫가스 바이패스 제어 냉각기의 응축압력은 최소 6.2 %에서 최대 10.1% 낮게 나타남을 보였으나, 온오프제어 냉각기 대비 인버터 제어 냉각기의 응축압력은 최소 2.8%에서 최대 8.5% 낮게 나타남을 보였다. 이는 온오프 제어 냉각기는 압축기 구동을 통해 단순히 설정온도에 도달하게 되면 작동을 멈추며 벗어나는 경우 구동하는 것으로 온도 조절을 대신하게 되지만, 핫가스 바이패스 제어 냉각기는 낮은 부하에서도 압축기 멈춤 없이 일정한 소요 동력을 사용하며 압축기를 구동하며 온도조절 하는데 이러한 이유로 인해 핫가스 온오프 제어 냉각기에 비해 소요 동력이 상대적으로 큰 것으로 판단된다. 그리고 인버터 제어

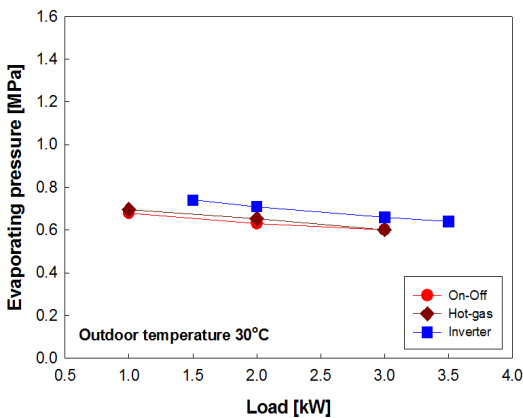


Fig. 5 Variation of evaporating pressure with respect to load

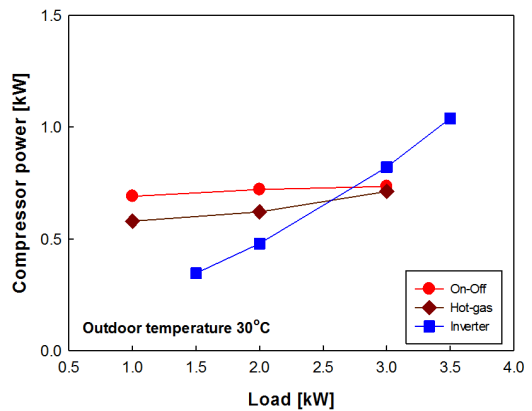


Fig. 6 Variation of compressor power with respect to load

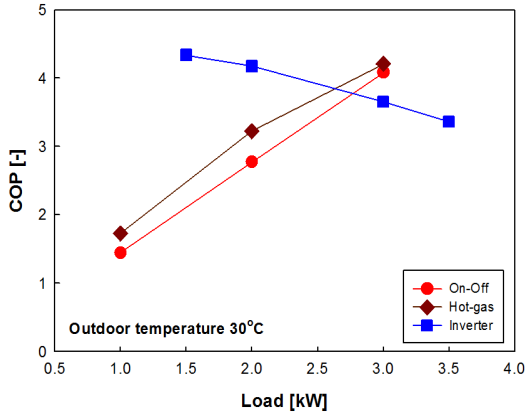


Fig. 7 Variation of COP with respect to load

냉각기의 경우에는 부하가 적은 경우 구동소요전력의 2/3 이상을 사용하는 압축기의 회전수를 제어하기 때문에 낮은 부하에서는 두가지 방식에 비해 낮은 소요동력을 나타내는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 온오프, 핫가스 바이패스, 인버터제어 냉각기의 외기온도 30°C에서 부하 변동에 따른 COP의 변화를 나타낸 그래프이다. 냉각기별 COP 경향은 Fig. 6의 압축기소요동력 변화 그래프와 같은 경향을 보였다. 이는 COP는 압축기소비동력과 냉각능력의 비로 산정이 되기 때문이다.

온오프 제어 냉각기의 COP 범위는 1.44~4.08, 핫가스 바이패스 제어 냉각기의 COP범위는 1.72~4.2 사이로 나타났으며, 인버터 제어 냉각기의 COP의 범위는 3.36~4.3 사이로 나타났다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 2.5 kW 이하 부분부하에서의 COP값은 인버터 제어 냉각기가 가장 우수한 값을 보였는데, 이를 통해 인버터 제어 방식 냉각기는 부분 부하 가동이 많은 기기에 사용시 가장 성능이 우수한 제어 방식임을 확인 할 수 있었다.

5. 결 론

온오프, 핫가스 바이패스, 인버터제어 냉각기의 온도 제어 시스템의 부하변화에 따른 운전 특성을 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 온오프 제어 냉각기 부하변화에 따른 소요동

력의 차는 5%, 핫가스 바이패스 제어 냉각기는 18%, 인버터 제어 냉각기는 66%로 인버터 제어 냉각기는 나머지 두 가지 방식에 비해 소요동력의 차이가 크다.

2. 부분부하에서는 인버터 제어 냉각기의 COP 가장 우수하며, 부분 부하 가동이 많은 기기에 사용시 가장 성능이 우수한 온도 제어 방식이다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

Reference

1. H. W. Kim, S. M. Baek, C. G. Moon, E. Kim, and J. I. Yoon, 2010, "The Characteristics on the Capacity Control of Inverter Type in an Industrial Water Cooler," ICCHT2010-5th Indonesia, pp. 016-1~016-6.
2. Hua. Li, J. I. Yoon, and S. K. Jeong, 2004, "Dynamic Characteristics of Refrigeration System for Control Evaporator Superheat and Compressor Capacity", The Korean Society for Power System Engineering, KSPSE The 2004 Spring Conference, pp. 170-174.
3. S. M. Beak, J. H. Choi, J. Y. Byun, C. G. Moon, H. S. Lee, S. K. Jeong, and J. I. Yoon, 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. 55-62.
4. S. M. Beak, 2014, "The Characteristic of Inverter Control by Variation of Refrigeration Load and Outdoor Temperature on Industrial Cooler", The Korean Society for Power System Engineering Vol.18, No. 5, pp. 150-155.
5. Yaqub. M, Zubair S. M., Khan S. H., 1995, "Second-law-based Thermodynamic Analysis of

- Hot-gas Bypass, Capacity-control Schemes for Refrigeration and Air-conditioning Systems,” Energy-The International Journal 20(6), pp. 483-493.
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 25, pp. 543-561.
 7. S. W. Lee and C .W. Lee, 2007, “Assessment Capability of Oil Cooler with Hot-gas,” Korean society for precision engineering, No. 6, pp. 459-460.