

## 축냉시스템을 이용한 냉매과냉각형 냉동시스템의 성능특성에 관한 실험적 연구

이 은 지, 이 동 원<sup>\*\*</sup>, 김 용 찬<sup>\*\*</sup>  
고려대학교 대학원, <sup>\*</sup>한국에너지기술연구원, <sup>\*\*</sup>고려대학교 기계공학과

### An Experimental Study on the Performance Characteristics of a Refrigerant-Subcooling Refrigeration System with an Ice Storage Tank

Eun-Ji Lee, Dong Won Lee<sup>\*\*</sup>, Yong Chan Kim<sup>\*\*</sup>  
*Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea*  
*<sup>\*</sup>Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea*  
*<sup>\*\*</sup>Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea*

(Received February 25, 2010; revision received April 1, 2010)

**ABSTRACT:** A refrigerant-subcooling refrigeration system consisted of a typical single vapor-compression refrigeration cycle, a subcooler, and an ice storage tank. The degree of subcooling at the exit of the condenser can be increased by the heat exchange between the subcooler and the ice storage tank. The cold heat in the ice storage tank was stored by using the refrigeration cycle during night time and then used to absorb the heat from the subcooler during daytime. The performance of the refrigerant-subcooling refrigeration system was measured by varying the degree of subcooling. In addition, the performance characteristics of the present system were compared with those of a conventional refrigeration system. The mass flow rate of the present system was higher than that of the conventional system due to the increase in the degree of subcooling. Generally, the refrigerant-subcooling system showed superior performance to the conventional refrigeration system.

**Key words:** Refrigerant-subcooling system(냉매과냉각 시스템), Ice storage system(빙축열시스템), Degree of subcooling(과냉각정도), Cooling capacity(냉각능력)

#### 기 호 설 명

#### 하첨자

$\dot{m}$  : 냉매유량 [kg/min]  
 $\dot{W}$  : 압축기 소요동력 [kW]  
 $\dot{Q}$  : 냉각능력 [kW]  
 $COP$  : 성능계수(Coefficient of Performance)

$r$  : 냉매축  
 $w$  : 물축

#### 1. 서 론

소득수준의 향상과 함께 쾌적한 주거 및 작업환경이 요구되면서 각종 냉방, 냉동기기의 수요가 증가하였고, 이러한 기기의 보급에 따라 전력사용량이 특정

† Corresponding author

Tel.: +82-42-860-3533; fax: +82-42-860-3538  
E-mail address: hakuta23@korea.ac.kr

시간대에 크게 증가하는 문제가 나타나고 있다. 특히 여름철 주간시간대 집중되는 냉방수요에 의한 전력 사용량은 발전설비 증설을 야기하고 전력수급의 효율성 면에서도 좋지 않기 때문에, 전력부하 평준화를 위한 흡수식 냉방기나 축냉시스템의 보급이 장려되어 왔다. 전력부하가 적은 심야시간대에 냉열을 만들어 저장하였다가 저장된 냉열을 건물의 주간 시간대 냉방에 직접 이용하는 축냉시스템은, 전력부하 평준화에 기여도가 크면서 실용화가 비교적 용이하기 때문에 현재 많은 건물에 적용되고 있다. 한편, 최근에는 각종 냉동기의 주간 전력소비를 감소시키는 방안의 하나로, 이러한 축냉시스템을 간접적으로 이용하는 냉매과냉각형 냉동시스템이 제안되고 있다.

냉매과냉각형 냉동시스템이란 응축기에서 응축된 포화냉매액을 축열된 냉열을 이용하여 과냉각시키고, 이 과냉각된 냉매를 증발기로 보냄으로써 냉동시스템의 냉각능력을 향상시켜 보다 효율적으로 냉동기를 이용하는 방법이다. 즉, 축냉시스템에 저장된 냉열을 주간시간대에 냉매의 과냉각 열원으로 활용하여 응축온도를 저하시킴으로써, 주간시간대 냉동시스템의 냉각능력을 향상시키고 전력부하 평준화를 도모하는 시스템을 말한다.<sup>(1)</sup> 하지만 아직까

지 응축온도 저하에 따른 냉동시스템의 성능향상에 대한 실험적인 연구와 냉매과냉각에 대한 구체적인 데이터 및 문제점 등에 대한 연구가 많이 부족한 실정이다. 따라서 냉동시스템의 성능향상 뿐만 아니라 시스템의 신뢰성 확보를 위해서는 정확한 실험적 연구가 지속적으로 필요하다.

본 연구에서는 전력부하 평준화를 위한 주간시간대 냉동시스템의 효율적 이용을 목적으로 축냉 시스템을 적용한 냉매과냉각형 냉동시스템을 구성하고, 냉매과냉각이 냉동시스템의 성능에 미치는 영향을 실험적으로 고찰해보고자 한다. 이러한 실험적 연구결과는 냉매과냉각형 냉동시스템의 신뢰성 확보와 최적 운전조건 도출을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 일반 압축식 냉동시스템에 빙축열조와 과냉각기를 추가로 설치하여 냉매과냉각형 냉동시스템을 구성하였다. 실험장치는

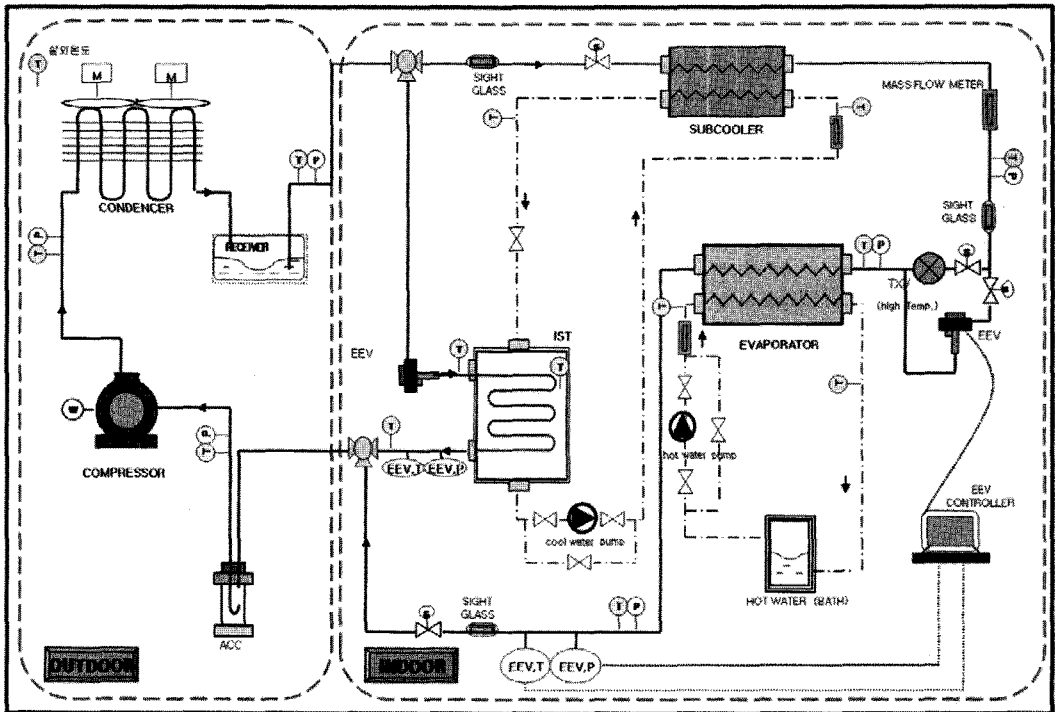


Fig. 1 Schematic of experimental setup.

압축기, 응축기, 과냉각기(subcooler), 증발기, 온도식 팽창밸브(thermostatic expansion valve, TEV), 전자식 팽창밸브 (electronic expansion valve, EEV), 항온조, 빙축열조 등으로 구성하였으며, 냉매는 R-22를 사용하였다.

왕복동식 압축기와 공랭식 응축기가 적용되었고 대향류형 판형열교환기를 증발기와 과냉각기로 사용하였다. 팽창밸브로는 TEV와 EEV를 병렬로 설치하여 필요에 따라 선택하여 사용할 수 있도록 구성하였다. 빙축열조는 관외착빙형(ice-on-coil)방식으로, 축열조내 설치된 냉매배관은 외경 12.7 mm와 전장 5000 mm의 동관으로 제작하고, 얼음의 브리지현상을 방지하기 위하여 동관 사이의 간격은 200 mm로 설정하였다.

시스템의 주요위치에 센서들을 그림과 같이 설치하여 온도 및 압력, 유량, 소비전력 등을 측정하였다. 냉매의 온도는 T-type 열전대를 냉매배관에 삽입하여 측정하였고, 증발기 냉열회수를 위한 열원수와 과냉각을 위한 냉수의 입출구 온도는 RTD를 이용하여 측정하였다. 회로 내 냉매압력 측정을 위하여 냉매용 고압계와 저압계를 각각 3개씩 설치하고, 전력량계를 압축기에 설치하여 압축기 소비전력을 측정하였다. 냉매가 액상영역인 과냉각기 출구에 질량유량계를 설치하여 냉매유량을 측정하였고, 과냉각기에 공급되는 냉수의 유량과 증발기에 공급되는 열원수의 유량은 각각 교정된 전자기 유량계와 질량유량계를 이용하여 측정하였다. 또한 냉매상태를 관찰하기 위하여 가시관(sight glass)을 과냉각기 입구와 출구에 설치하였다. 각 센서를 이용하여 측정된 데이터 신호는 컴퓨터와 연결된 데이터로거를 통하여 수집하였다.

## 2.2 실험방법

본 실험에서는 냉매과냉각에 따른 냉동시스템의 성능특성 변화를 살펴보기 위하여 일반운전과 냉매과냉각운전을 번갈아 수행하였으며, 냉매과냉각정도를 변경하면서 실험을 진행하였다. 응축기 팬의 회전수를 조절하여 응축온도를 45℃로 일정하게 하고, 냉매과냉각 정도에 따른 냉각열량 차이를 비교하기 위하여 증발기로 유입되는 열원수의 입구온도와 유량을 각각 15℃와 0.03 m<sup>3</sup>/min으로 동일하게 설정하여 실험을 수행하였다.

빙축열조 내 냉열저장을 위한 축열운전은 심야시간대인 23시부터 다음날 9시 사이에 5시간 정도 진

행하였다. 축열운전에서는 냉매가 압축기-응축기-축열용 팽창밸브-빙축열조-압축기 순으로 순환하도록 유로를 구성하였다. 주간시간대에는 일반운전과 냉매과냉각운전을 번갈아 수행하였으며, 냉매는 압축기-응축기-과냉각기-팽창밸브-증발기-압축기를 순환하도록 구성하였다. 냉매과냉각운전시 냉매는 과냉각기를 통과하면서 빙축열조에서 공급되는 냉수와 열교환하여 과냉되어지는데, 이 때 냉수의 유량을 밸브로 조절하여 원하는 냉매과냉각 정도를 얻도록 함으로써 실험조건을 변경하였다. 데이터 측정은 6초 간격으로 이루어졌다.

냉동시스템의 냉각능력은 증발기 내부를 순환하는 냉매유량과 엔탈피차에 의한 식(1), 또는 증발기 외부 순환하는 열원수의 유량 및 입·출구 온도차에 의한 식(2)로 계산할 수 있다.

$$\dot{Q}_r = \dot{m}_r \times (h_{r,0} - h_{r,i}) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_w = \dot{m}_w \times c_{p,w} \times \Delta T_w \quad (2)$$

여기서  $\dot{m}_r$ 은 냉매유량을 나타내고,  $h_{r,i}$ 와  $h_{r,o}$ 는 각각 증발기 입·출구에서의 냉매 엔탈피값을 나타낸다. 한편  $\dot{m}_w$ 는 증발기로 유입되는 열원수의 유량이며,  $c_{p,w}$ 는 물의 정압비열,  $\Delta T_w$ 는 증발기 입·출구에서의 열원수 온도차를 의미한다. 온도와 유량은 냉매 측과 열원수 측에서 모두 측정하였으나 증발기 출구가 이상영역인 경우 증발기 출구에서의 엔탈피 값을 측정할 수 없으므로, 냉각능력은 열원수측에서의 측정값을 이용하였다.

또 냉동시스템의 성능을 나타내는 주요지표인 COP는 식(3)과 같이 계산하였다.

$$COP = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}} \quad (3)$$

여기서  $\dot{Q}$ 는 위에서 계산한 냉각능력(kW)을 나타내며,  $\dot{W}$ 는 전력량계로 측정된 압축기 소비전력(kW)을 의미한다.

## 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 일반운전과 냉매과냉각운전을 번갈아 수행하였을 때, 응축기와 과냉각기 출구의 냉매온도,

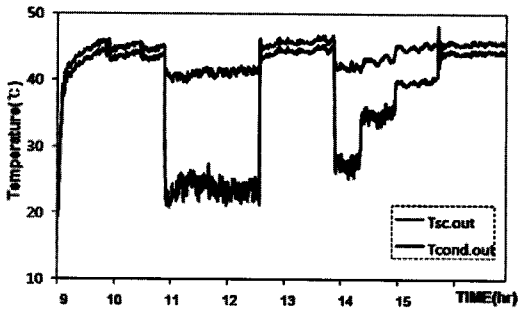


Fig. 2 Variation of refrigerant temperature at the outlet of subcooler and condenser.

열원수 입구온도 변화를 나타내고 있다. 일반운전 시에도 과냉각기를 통과하면서 약간의 열손실이 발생한 것을 알 수 있으며, 냉매과냉각 운전일 때는 일반운전에 비해 응축기 출구의 냉매온도가 낮아지며 과냉각 정도가 커질수록 더 낮아지는 것을 확인하였다. 이는 냉매가 과냉각되면서 증발온도가 감소하고, 응축기 출구 냉매온도 역시 영향을 받은 것으로 판단된다.

Fig. 3은 과냉각기 입·출구에서의 냉매상태를 가시관을 통해 확인한 결과이다. 일반운전의 경우에는 액냉매에 약간의 기포가 함께 섞여 팽창밸브로 유입되는데 반해, 냉매과냉각운전의 경우에는 기포의 발생이 적어지고 순수한 액냉매만이 팽창밸브에 유입되는 것을 확인할 수 있었다. 즉 냉매과냉각운전을 통하여 플래시가스(flash gas)발생이 억제됨을 알 수 있다. 플래시가스의 발생은 냉매유량을 감소시켜 냉동시스템의 능력 및 효율을 감소시킬 뿐 아니라 시스템의 신뢰성을 크게 저하시킨다.<sup>(2)</sup> 따라서 냉매과냉각운전은 플래시가스의 발생을 억제함으로써, 일반운전인 경우와 비교하여 냉동시스템의 성능과 신뢰성 측면에서 향상효과를 얻을 수 있다.

Fig. 4는 과냉각기 출구온도가 저하됨(냉매과냉각정도)에 따른 냉매유량의 변화를 나타내고 있다. 그래프의 x축은 과냉각기를 통과한 후의 냉매온도를 나타내는 것으로 온도가 낮아수록 과냉각 정도가 크다는 것을 의미한다. 일반운전일 때 냉매유량이 평균적으로 약 2.5 kg/min인데 반하여, 냉매과냉각운전인 경우에는 약 2배 이상 증가함을 알 수 있다. 냉매과냉각 운전시 냉매유량의 증가는 증발기 내 유효 전열면적 증가 및 냉매밀도 증가로 인한 단위체적당 질량증가에 따른 것으로 판단된다.

냉매가 과냉각되면 증발기 입구 냉매건도가 감소

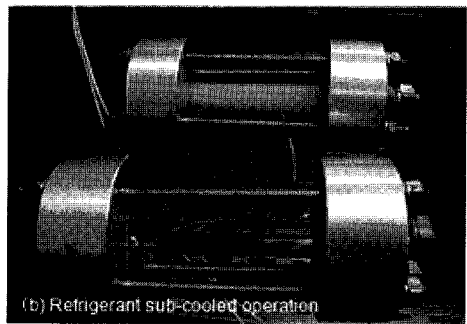
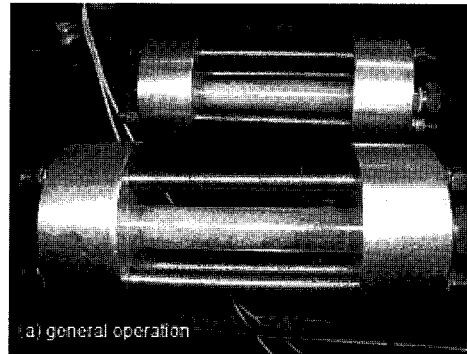


Fig. 3 Refrigerant states at the inlet and outlet of the sub-cooler.

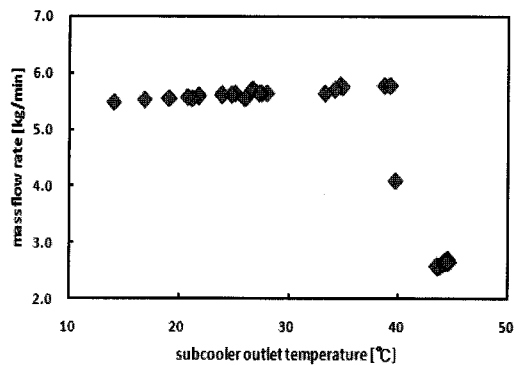


Fig. 4 Variation of refrigerant mass flow rate according to subcooling.

하여 거의 포화액 상태가 된다. 즉, 냉매과냉각에 의해 팽창장치 입구에서 플래시가스 발생이 억제되며 냉매유량이 증가하게 된다.<sup>(3)</sup> 하지만 일반운전과 냉매과냉각운전의 냉매흐름을 비교해보면 Fig. 5와 같이 일반운전인 경우보다 냉매과냉각 운전인 경우에 냉매유동이 더 불안정하게 나타남을 알 수 있다. 따라서 냉매과냉각 시스템에서 안정적이고 최적화된 냉동시스템 운용을 위해서는, 좀 더 효율적이고

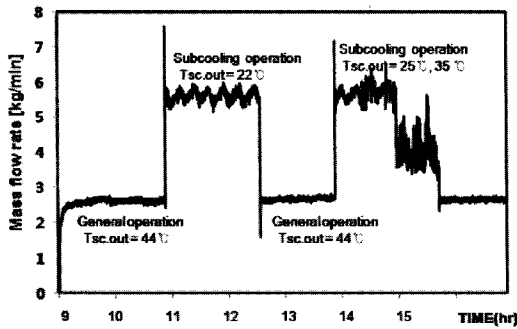


Fig. 5 Unstability of refrigerant mass flow rate for sub-cooling operation.

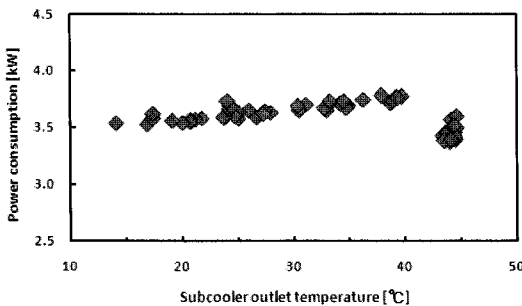


Fig. 6 Variation of compressor power consumption according to subcooling.

정밀한 냉매 제어가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 6은 과냉각 정도에 따른 소비전력 변화를 나타낸 것으로 일반운전인 경우보다 냉매과냉각 운전인 경우에 압축기 소비전력이 미소하게 증가하는 것을 알 수 있다. 압축기 소비전력은 압축비와 냉매 유량에 의해 결정되는데 일정한 조건에서 냉매를 과냉각시켰을 경우에 압축비는 감소하였지만 냉매 유량은 크게 증가하였다.

따라서 냉매과냉각 운전의 경우 소비전력의 변화가 크게 나타나지 않았지만, 냉매유량의 증가로 인하여 미소하게 압축기 소비전력이 증가하였다고 판단된다. 반면 압축기 토출가스 온도는 Fig. 7에 나타난 바와 같이 냉매과냉각 운전인 경우 일반운전에 비해 낮아지는 것을 확인하였다. 일반운전에서 120°C 정도로 높게 나타나는 냉매 토출가스 온도는 압축기 윤활유 열화와 같이 압축기 내구성을 저하시키는 문제를 야기할 수 있다.

따라서 냉매과냉각 운전의 경우, 압축비 감소와 토출가스 온도저하 등의 이유로 압축기 측면에서 좀 더 안정적이고 신뢰성 있는 운전이 가능하다고 판단된다.

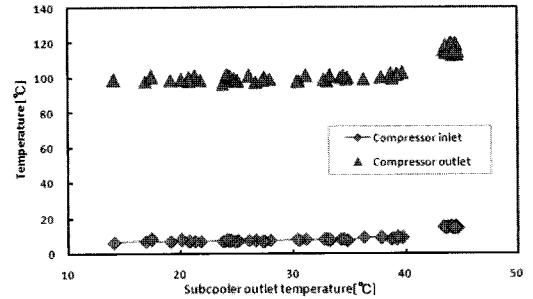


Fig. 7 Variations of compressor discharge and suction temperature with subcooling.

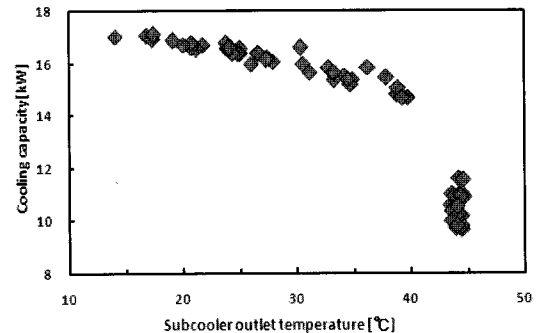


Fig. 8 Variation of cooling capacity with sub cooler outlet temperature.

Fig. 8은 과냉각기 출구온도 변화에 따른 냉각능력을 나타내고 있다. 냉매과냉각운전인 경우에 일반운전과 비교하여 냉각능력이 향상되고, 과냉각기 출구온도가 낮을수록(과냉각 정도가 커질수록) 냉각능력이 더욱 증가되는 것을 확인할 수 있다. 과냉각기 출구온도가 15°C 일 때 냉각능력은 일반운전일 때와 비교하여 약 1.7배 높게 나타났다. 이러한 냉각능력의 향상은 증발기로 유입되는 냉매유량의 증가와 증발기 내에서 열원수와 냉매의 활발한 열교환 때문이라고 판단된다. 과냉각 정도가 커질수록 진술한 바와 같이 유효 전열면적이 증가하여 냉각능력이 향상된다.

과냉각기 출구온도 변화에 따른 시스템의 COP 변화는 Fig. 9와 같이 나타난다. 냉매과냉각 운전의 경우, COP는 일반운전에 비하여 크게 향상되었고, 과냉각기 출구온도가 낮아질수록(과냉각정도가 증가할수록) 더욱 증가하는 것을 알 수 있다.

이는 냉매과냉각 운전일 때, 냉매유량이 증가하고 이로 인해 압축기 소비전력이 다소 증가하지만 그 증가 정도가 미미한 반면, 냉각 능력의 향상 정도가 더 크게 나타났기 때문이다. 이러한 결과는 과

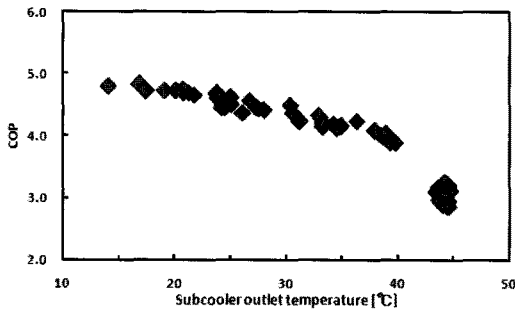


Fig. 9 Variation of COP with sub-cooler outlet temperature.

냉각정도 증가에 따라 증발기의 유효 흡열량은 증가하고 COP도 비례적으로 향상된다는 이전 연구<sup>(4,5)</sup>들과 같은 결과이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 빙축열조가 추가되고 R-22를 작동유체로 하는 냉매과냉각형 냉동시스템을 구성하고, 냉매과냉각 정도에 따른 냉동시스템의 성능변화에 대한 실험을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 냉매과냉각 운전의 경우, 냉매유량이 증가하여 냉각능력과 압축기 소비전력은 동시에 증가하였다. 하지만 냉각능력의 증가가 소비전력의 증가보다 크게 나타났기 때문에 시스템의 COP는 과냉각정도가 커질수록 점차 증가하였다. 과냉각기 출구온도가 15°C인 경우, 기본 시스템 대비하여 냉각능력은 최대 1.7배,

COP는 최대 1.6배 증가하였다.

- (2) 냉매과냉각 정도가 클수록 팽창밸브 입구에서 플래시가스의 발생이 억제되고, 압축기 토출가스 온도의 저하로 인하여 시스템의 신뢰성이 향상되는 효과를 얻을 수 있다.
- (3) 하지만 냉매과냉각 운전인 경우, 냉매의 유동이 불안정한 것을 확인하였기 때문에 보다 효율적이고 정밀한 냉매제어가 필요할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. Lee, D. W., Joo, M. C., Choi, B. J., 2007, Sub-cooling effect using cold storage system, Proceedings of SAREK Summer Annual Conference, pp. 1067-1071.
2. Lee, S. I., 2006, Influence of flash gas at the E/D inlet on the dynamic characteristics of a refrigeration system, Proceedings of SAREK Winter Annual Conference, pp. 416-421.
3. Lee, H. L., 1999, Study on performance enhancement of the heat pump using a liquid distributor, SAREK Summer Annual Conference, pp. 203-208
4. Koh, J. Y. and Seo, T. B., 2008, Dynamic analysis of cool thermal storage air conditioning system, Journal of KSES, Vol. 28, No. 1., pp. 65-68.
5. Yoon, C. I., Park, S. J. and Lee, S. H., 2001, Study on performance of heat pump using a subcooled refrigerant, KOSME, pp. 159-164.