

빙축열조를 이용한 냉매과냉각 시스템 기초연구

이 은 지*, 이 동 원†, 김 용 찬**

*고려대학교 대학원, 한국에너지기술연구원†, **고려대학교 기계공학과

Basic Study on Sub-cooling System using Ice storage tank

Eun-Ji Lee, Dong Won Lee, Yong Chan Kim

**Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea
Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

ABSTRACT: Experimental basic study was performed to understand the characteristics of sub-cooled refrigerant using a cold heat storage system. This system was made up general vapor-compression refrigeration cycle added sub-cooler and ice storage tank. The purpose of this study are to application use of cold-heat storage systems multiplicity of fields and to understand of sub-cooling system. At the condition using ice storage system, the ice making process was operated during night time by electric power. And then, the refrigerant was sub-cooled using stored cold-heat after being discharged from the air cooling condenser during the day time. Comparing the result at general operation with the operation using sub-cooling system. This study showed the effects of the sub-cooled degree. The cooling performance was increased owing to the sub-cooling of refrigerant during day time, and the compressor consume power was a little decreased. Thus the COP was also increased owing to the sub-cooling of refrigerant.

Key words: Refrigerant Sub-cooling system(냉매과냉각 시스템), Ice storage system(빙축열시스템), COP(성능계수), Cooling capacity(냉각능력)

기 호 설 명

q : cooling capacity [Mcal/h]
h : enthalpy [kJ/kg]
m : mass flow rate [kg/m]
T : temperature [°C]
W : compressor work [kW]

하첨자

sc : sub-cooling
w : water
r : refrigerant

1. 서 론

최근 산업의 발전과 생활수준 향상으로 더욱 쾌적하고 안락한 환경이 요구되면서 냉난방기와 냉각기기 등이 수요가 증가하였고, 이들 기기

† Corresponding author

Tel.: +82-42-860-3533; fax: +82-42-860-3538

E-mail address: dwlee@kier.re.kr

에 널리 사용되고 있는 히트펌프나 냉동기 등의 수요 역시 꾸준히 증가하고 있다. 대부분의 히트펌프나 냉동기는 전기로 구동되는 압축기를 이용한 압축식으로 현재 이러한 전기이용 냉방공조기의 수요증가에 따른 전력수요량의 증대는 큰 문제가 되고 있다. 특히 주/야간, 평일과 휴일, 계절에 따라 변동하는 전력수요는 여름철 평일 주간시간대에 최대부하(피크부하)가 발생하는 전력부하 불균형을 초래하고 있다. 이러한 전력부하 불균형은 전력공급문제를 야기할 뿐 아니라 전력수급의 효율성면에서도 좋지 않기 때문에 피크부하를 억제하고 이를 이전시켜 발전설비의 가동률 향상을 위한 전력부하 평준화가 요구되고 있다. 국내에서는 1990년대 초부터 하절기 주간시간대의 최대부하 이전을 목적으로 하는 축냉시스템이 보급되기 시작하여 현재까지 건물의 냉방용으로 많이 이용되어 왔으며, 이에 한국전력과 정부에서는 심야전력요금 혜택과 지원금 등을 통해서 축냉시스템 보급을 지원해왔다. 또 2003년부터는 난방이 가능한 축열식 히트펌프 역시 지원대상에 포함되어 지열원이나 공기열원을 이용한 축열식 히트펌프가 보급되고 있으며 현재 인증업체는 대략 30여 곳에 이른다. 하지만 현재 국내에서 사용되고 있는 모든 축냉시스템은 축열한 냉열 또는 온열을 건물의 냉방부하에 직접 이용해야 하는 직접이용방식을 채택하고 있으며, 축열된 냉열이 주간부하의 40% 이상을 담당해야 하는 등 제한요건이 많아서 축냉시스템의 응용분야에 대한 보급 확대가 크게 이루어지지 않고 있다.⁽¹⁾ 따라서 심야전력을 이용하는 축냉시스템의 보급을 확산하고 응용분야를 확대하기 위해서는 많은 연구들이 활발히 이루어져야 한다. 이에 본 연구에서는 그 일환으로 축냉시스템의 간접이용방식을 활용한 냉매과냉각 시스템을 제안하였다.

냉매과냉각 시스템이란 응축기에서 응축된 고온의 포화냉매액을 과냉각시키고 과냉각된 냉매를 증발기로 보냄으로써 냉동기의 냉동능력을 증대시키는 시스템이다. 야간에 축열조에 냉열을 저장하였다가 주간 피크시간대에 이 냉열을 냉매의 과냉각열원으로 사용하여 히트펌프 성능향상을 도모하고 동시에 운전비 절감을 기대할 수 있다. 냉각부하가 감소하는 야간시간대에 냉열을 만들어 축열조에 저장하였다가 주간시간대에 저장된 냉열을 이용하여 냉동시스템의 응축기 고압

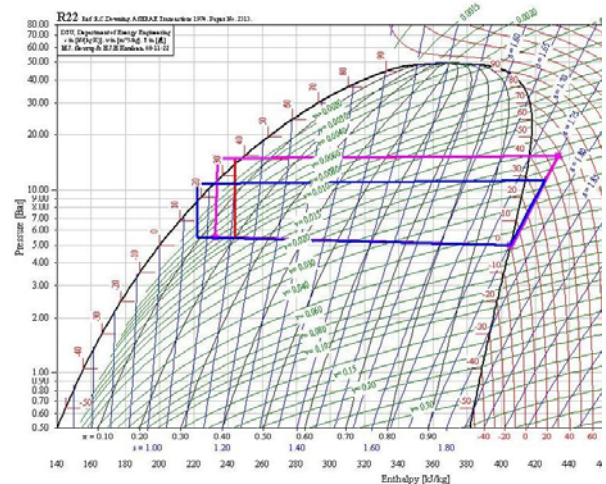


Fig. 1 Pressure-Enthalpy diagram for R-22 & sub-cooling.

축 냉매를 과냉시킴으로써 과냉각에 대한 구체적인 특성을 파악해보고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.

Fig. 1에 나타난 p-h 선도를 보면 응축온도가 저하되면, 즉 냉매가 과냉되면 엔탈피차가 커져 냉동능력이 향상됨을 볼 수 있다. 히트펌프나 냉동기의 성능인 COP 역시 응축온도에 큰 영향을 받기 때문에 응축온도가 낮을수록 성능이 향상되어 전력소모가 감소하게 된다고 알려져 있다. 하지만 이에 대한 구체적인 연구가 부족하고 과냉각에 대한 실험적인 데이터가 없어 보통 과냉도는 경험적으로 다루어져 왔으며, 따라서 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다. 본 연구에서는 축냉시스템을 이용한 냉매과냉각 시스템의 성능특성을 실험을 통해 알아보려고 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 및 측정장치

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 일반 증기압축식 냉동사이클에 과냉각기(subcooler)와 빙축열조(ice storage tank)를 추가로 설치하여 냉매과냉각 시스템을 완성하였다.

주요 실험장치는 압축기(compressor), 응축기(condenser), 과냉각기, 온도감지 팽창밸브(TXV), 또는 전자식 팽창밸브(EEV), 증발기(evaporator), 항온조, 빙축열조(IST) 등이 있고 냉동기의 냉매는 R-22이다.

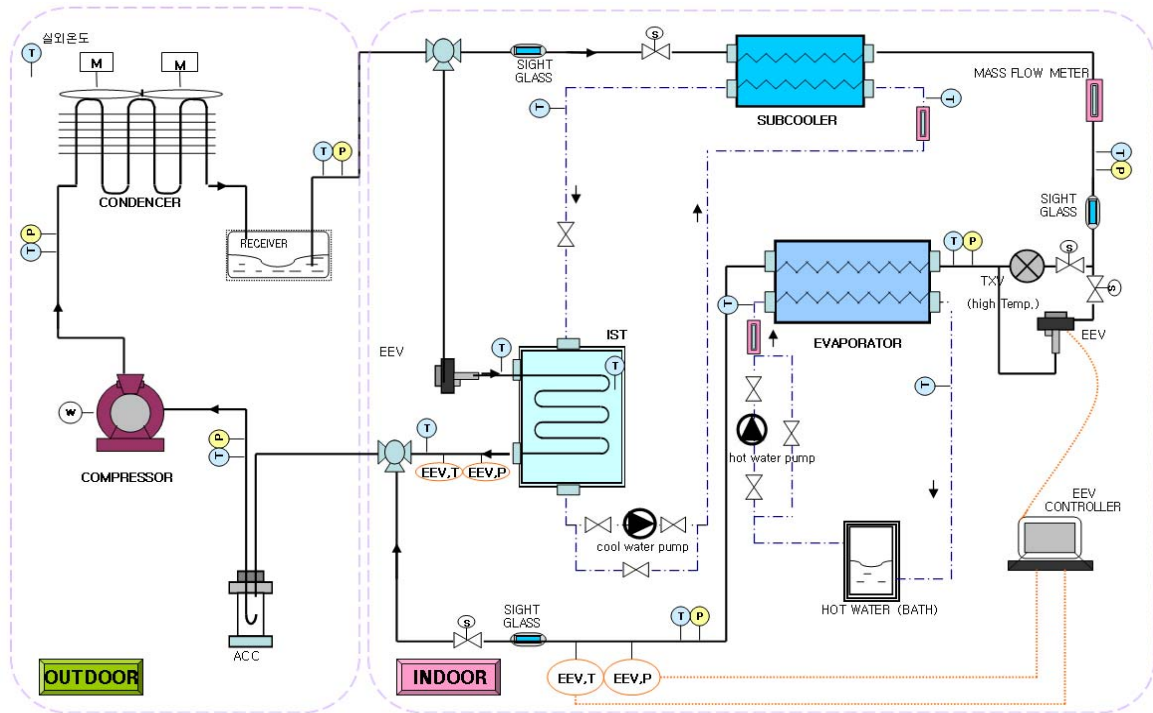


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

Fig. 2에 실선으로 나타낸 경로는 압축기로 구동되는 냉매순환경로로 냉매는 압축기, 응축기, 과냉각기, 팽창밸브, 증발기(또는 빙축열조)를 순환하게 된다. 이점쇄선은 펌프에 의해 구동되는 열원수/냉각수 순환경로이며 열원수는 항온조, 열원수 펌프, 유량계, 증발기를 순환하고, 냉각수는 빙축열조, 냉각수 펌프, 유량계, 과냉각기를 순환한다.

냉동시스템은 약 12.4 kW (3.5 RT) 용량의 왕복동식 압축기를 사용하고, 팽창밸브로 TXV 및 EEV를 병렬로 설치하여 1차 실험과 2차 실험에서 각각 하나의 팽창밸브를 선택하여 실험할 수 있도록 구성하였다. 우선 이번 1차 실험에서는 사용되는 온도감지 팽창밸브(TXV)는 압축기 입구에 균압관을 설치하여 과열도를 정확하게 제어할 수 있도록 하였다. 또 TXV를 사용한 1차 실험 이후에 사용되는 전자식 팽창밸브(EEV)는 측정된 증발기의 과열도를 설정된 과열도와 비교하여 컴퓨터 드라이버에 의해 스텝모터(step motor) 구동기를 사용하여 제어할 수 있도록 미리 설치하였다.

응축기는 공랭식을 사용하였으며, 증발기와 과냉각기는 냉매와 열원수가 반대방향으로 흐르면

서 열교환되는 대향류 판형열교환기를 사용하였다.

일정한 실험조건을 유지해 주기 위해서 항온조를 설치하여 증발기로 유입되는 열원수의 온도 및 유량을 일정하게 하였고, 이를 통해 냉매과냉각 변화에 따른 냉열량 차이를 비교해 볼 수 있도록 하였다.

또 야간에 냉열을 저장하였다가 주간시간에 과냉각기의 냉열원을 공급하는 수단으로써 제작된 1000mm(W)×1000mm(L)×1000mm(H) 크기의 빙축열조는 축열조 내에 동관(coil)을 설치하여 물을 채우고 냉매가 동관을 흐르면서 제빙하는 관외착제빙(ice-on-coil) 방식을 사용하였다. 축열조 내 설치된 열교환기는 외경 1/2" (12.7mm), 전장 5000mm이고 피치는 200mm로 하였다.

시스템의 주요 위치에 각 센서들을 Fig. 2와 같이 설치하여 온도, 압력, 유량, 전력 등을 측정하였다. 냉매의 온도측정은 교정된 T형 열전대(TC)를 냉매배관에 삽입하여 측정하였고, 열원수/냉각수의 온도는 4-wire RTD를 설치하여 측정하였다. 회로 내 냉매압력의 측정은 고압계와 저압계를 각각 3개씩 설치하여 측정하였고, 전력량계측기(power meter)를 압축기에 설치하여 압축

기의 소비전력을 측정하였다. 냉매유량측정에 쓰인 질량유량계(mass flow meter)는 액상영역인 과냉각기 출구 쪽에 설치하여 측정하였으며, 과냉각기와 증발기로 흐르는 물의 유량은 전자기유량계와 질량유량계를 이용하여 측정하였다. 또 냉매상태의 상변화를 보다 쉽게 시각적으로 보기 위하여 응축기출구, 과냉각기출구, 증발기출구 쪽 배관에 각각 1개씩, 3개의 가시관(sight glass)을 설치하였다. 실험에 쓰인 실험장치를 Fig. 3에 나타내었다.

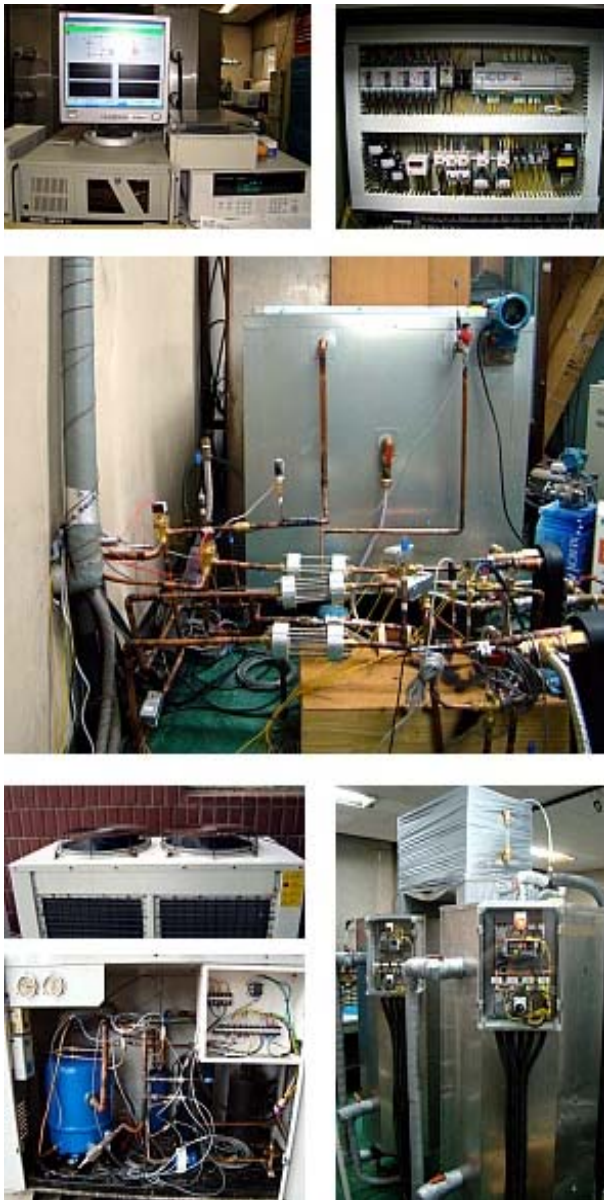


Fig. 3 Experiment instruments.

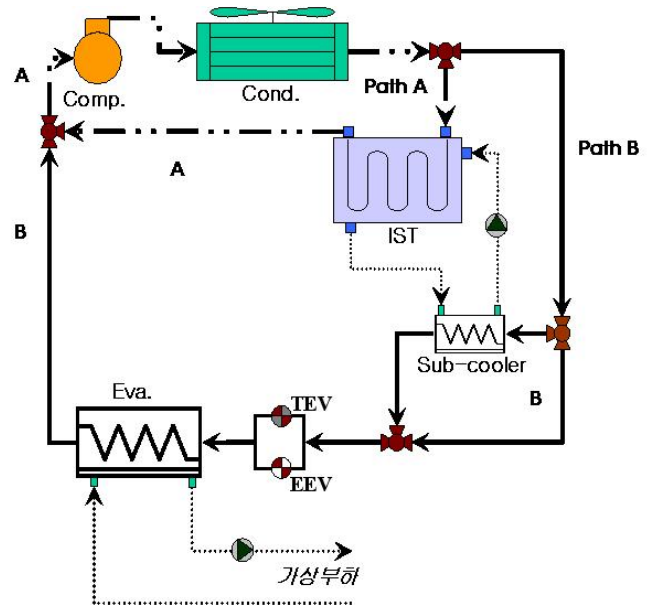


Fig. 4 Schematic diagram of the apparatus.

2.2 실험방법

본 연구는 냉매과냉각 시스템의 성능과 일반 냉동시스템의 성능을 비교하기 위하여, 두 시스템의 사양 및 실험조건을 동일하게 하여 실험하였다.

축열운전은 심야전력제도 적용시간인 야간시간대인 밤 10시부터 다음날 8시 사이에 적당시간 동안 실시하여 축열조내 물을 얼리고 이를 저장하도록 하였다. 축열운전시 냉매는 Fig. 4에 나타난 path A의 경로를 따라 압축기, 응축기, 수액기, 축열용 팽창밸브, 빙축열조, 액분리기, 압축기를 순환하도록 밸브를 설치하였다. 이 때 증발기로 냉매가 유입되는 것을 방지하기 위하여 솔레노이드밸브를 조절하여 축열운전을 실행하였다.

한편 주간시간대에는 냉매가 path B를 따라 순환하면서 냉매과냉각운전과 일반운전이 각각 가능하게 하였다. 냉매과냉각 운전을 할 때에는 응축기를 통과한 냉매가 과냉각기로 유입되고 과냉각기의 냉열원으로 빙축열조에 저장된 냉열을 사용하도록 하여 과냉이 가능하도록 하였다. 과냉각기를 순환하는 냉각수의 유량을 조절하여 과냉각도를 변경하면서 실험하였다. 일반운전은 과냉각을 시키지 않으면서도 과냉각기를 통과하도록 하여 혹시 과냉각기를 통과하면서 생길 수 있는 열손실 등을 고려해 시험조건이 같을 수 있도록 하였다. 또 주간운전시 항온조의 온도를 항상 3

0℃로 일정하게 유지시켜 과냉각변화에 따른 냉열량의 차이를 비교해 볼 수 있도록 하였다.

데이터는 6초 간격으로 측정하여, 1분 동안 10개의 데이터를 얻을 수 있도록 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축기 소비전력

Fig. 5는 과냉각을 이용한 냉동사이클에서 과냉각에 따른 소비전력을 나타내고 있는 그래프이다. 여기서 x축은 과냉각기를 통과한 후의 온도를 나타내는 것으로 그래프에 나타낸 온도가 작을수록 과냉각을 많이 주었다고 볼 수 있다. 그래프를 살펴보면 과냉각도를 크게 할수록 소비전력이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 과냉 후 온도에 따른 소비전력만을 비교해 본 결과이기 때문에 전체 시스템을 고려해 보았을 때는 차이가 있을 것으로 생각된다.

3.2 냉각능력(cooling capacity)

Fig. 6에 나타난 냉각능력은 증발기를 순환하는 냉매의 유량과 엔탈피차에 의한 방법과 증발기 내를 순환하는 열원수의 입·출구 온도차에 의한 방법으로 다음 식을 가지고 계산하였다.

$$q_r = m_r \times (h_{r,0} - h_{r,i}) \quad (1)$$

$$q_w = m_w \times c_{p,w} \times \Delta T_w \quad (2)$$

여기서 m_r 은 냉매 R22의 유량을 나타내고 $h_{r,i}$ 와 $h_{r,o}$ 는 각각 증발기 입·출구에서의 냉매엔탈피(kcal/kg)값을 나타낸다. 또 m_w 는 증발기로 유입되는 열원수의 유량, $c_{p,w}$ 는 물의 정압비열(=1 kcal/kg℃), ΔT_w 는 증발기 입·출구에서의 열원수의 온도차를 의미한다.

그래프를 나타난 냉각능력을 보면 과냉각이 클수록 냉각능력이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 기존의 이론을 뒷받침 하는 결과로 이번 실험에서는 과냉각기를 통과한 후의 온도가 8℃일 때의 냉각능력이 과냉각을 주지 않은 일반운전일 때 보다 약 7%정도 향상되었다. 이와 같은 결과는 응축기를 나온 냉매액이 팽창밸브를 통과할

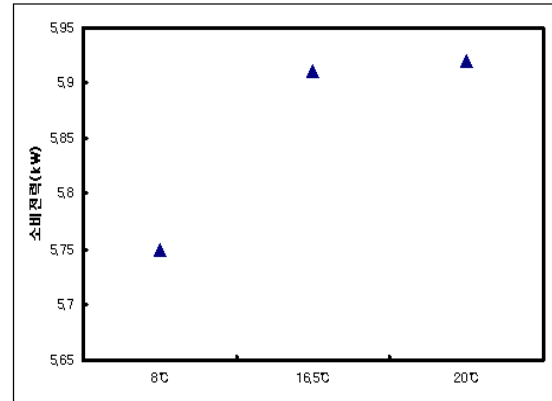


Fig. 5 Comparison between compressor consumption power of the sub-cooled.

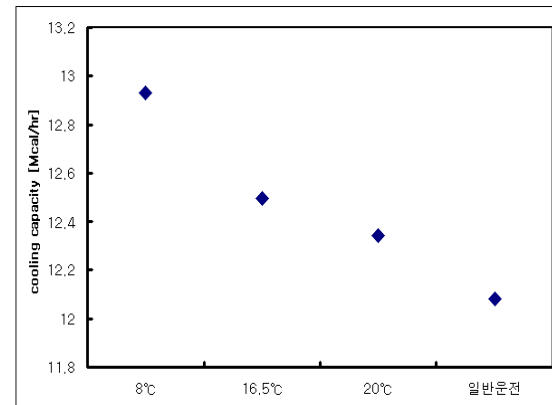


Fig. 6 Comparison between cooling capacity of the sub-cooling system & general system.

때 냉매가스로 되는 냉매량이 감소하기 때문이라고 생각된다.⁽²⁾

3.3 냉매순환량

Fig. 7은 과냉각을 이용한 냉동사이클과 일반운전사이클에서 각각 과냉각기 출구에 설치한 질량유량계에서 측정된 냉매유량을 평균적으로 나타낸 그래프이다. 이 그래프를 보면 과냉각이 커지면 일반운전일 때 보다 오히려 냉매순환량이 작아지는 것을 볼 수 있다.

3.4 성능계수(COP)

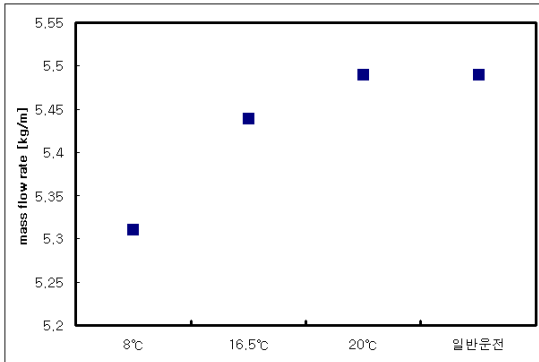


Fig. 7 Comparison between mass flow rate of the sub-cooling system & general system.

냉동장치의 성능을 나타내는 중요한 지표인 성능계수(COP)는 식(2)로부터 계산된 냉각능력 q 와 소비전력 w 로 식(3)과 같이 계산하여 Fig. 8에 나타내었다.

$$COP = \frac{q}{w} \quad (3)$$

이 그래프는 냉매과냉각 시스템에서의 과냉각도에 대한 COP와 과냉각을 주지 않은 일반 냉동시스템 운전에서의 COP를 비교한 것으로 이 그래프를 보면 냉매과냉각 시스템과 일반시스템을 비교하였을 때 냉매과냉각 시스템의 COP가 더 높은 것을 확인할 수 있다. 또 과냉각 시스템에서도 과냉각이 커질수록 COP가 더 향상된 결과를 얻었다. 이는 과냉각이 증가할 때 냉각능력은 향상되고 압축기 소비전력은 감소하였기 때문에 당연히 성능계수가 증가되었다고 생각된다. 하지만 이 값은 전체적인 시스템에서의 값으로 계산한 것이 아닌 일정시간동안 냉매과냉각운전과 일반운전을 비교한 것이기 때문에 전체적인 운전 시스템에서는 차이가 날 것이라고 예상된다. 축냉 시스템을 이용하면 심야에 사용되는 소비전력 증가를 고려하여야 하기 때문에 전체적인 COP값에는 변화가 있을 것으로 판단되나 과냉각을 함으로써 COP가 향상되는 것은 확인할 수 있었다.

4. 결론

축냉시스템을 이용한 냉매과냉각 시스템을 설계하고 실험하여 성능 및 사이클의 특성을 파악

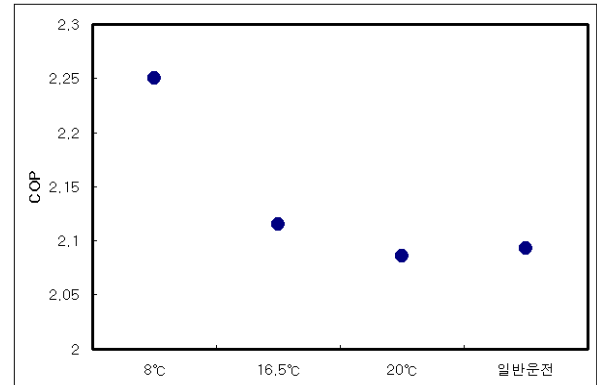


Fig. 8 Comparison between COP of the refrigerant sub-cooling system & general system.

해보고 일반운전 시스템과 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 과냉각시스템에서 냉각능력과 COP는 일반 시스템보다 향상된 값을 얻었고 과냉각이 커질수록 그 값이 증가하였다. 또 압축기의 소비전력은 감소하였기 때문에 냉각열량이 증가한 만큼 열원 기기의 용량축소가 가능할 것으로 판단된다.

(2) 축냉시스템을 이용하여 냉매를 과냉각시키기 때문에 전력부하평준화가 가능해지고 이로 인해 에너지의 효율적 이용이 가능할 수 있게 된다.

아직 실험이 초기 단계이기 때문에 많은 데이터를 정리 할 수 없었지만 과냉각을 함으로써 향상된 COP를 얻을 수 있는 것은 확인할 수 있었고 냉매과냉각 시스템의 기본적인 특성을 파악했다. 추후에는 좀 더 많은 실험을 통해 많은 데이터를 산출하고 보다 정확하고 명확한 결과를 제시할 수 있도록 할 것이다.

참고문헌

1. Lee, D-W., 2007, Sub-cooling effect using cold storage system, magazine of the SAREK, Vol. 30, No. 6, pp.6-15
2. Son, C-H., 2001, Performance enhancement of the heat pump using the refrigerant subcooling system,