

축열조를 이용한 냉매과냉각 시스템의 전력수요관리 효과에 대한 연구

김 정 배, 이 은 지*, 이 동 원**†

충주대학교 에너지시스템공학과, *고려대학교 대학원, **한국에너지기술연구원

A Study on the DSM Effect of a Refrigerant-Subcooling Refrigeration System with an Ice Storage Tank

Jeongbae Kim, Eun-Ji Lee*, Dong Won Lee**†

Department of Energy System Engineering, ChungJu National University, ChungJu 380-702, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

**Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

(Received August 31, 2010; revision received September 29, 2010)

ABSTRACT: This study was experimentally performed to find the effects of refrigerant subcooling in the refrigeration system and to propose how to get the efficient use of energy. 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 transfer 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 cooling capacity and COP of this system were higher than those of the conventional system due to the increase in the degree of subcooling. Typically, the refrigerant-subcooling system showed superior performance to the conventional refrigeration system and would also contribute to load leveling.

Key words: Refrigerant-subcooling system(냉매과냉각 시스템), Ice storage tank(빙축열조), Cooling capacity(냉각능력), DSM(수요관리), Load leveling(부하평준화)

기 호 설 명

하첨자

c_p : 정압비열 [kJ/kgK]
 h : 엔탈피 [kJ/kg]
 \dot{m} : 냉매유량 [kg/min]
 \dot{W} : 압축기 소요동력 [kW]
 \dot{Q} : 냉각능력 [kW]

r : refrigerant
 $comp$: compressor
 sc : subcooler
 w : water

1. 서 론

최근 전력수요량의 증가는 큰 문제로 대두되고 있으며, 특히 여름철 주간시간대 집중되는 냉방수요

† Corresponding author

Tel.: +82-42-860-3533; fax: +82-42-860-3535

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

에 의한 전력사용은 발전설비 증설을 야기하고 전력수급의 효율성 면에서도 좋지 않다. 그렇기 때문에 전력수요관리(DSM, Demand Side Management)가 필요하며, 냉동시스템의 효율적인 운전도 요구된다. 전력수요관리의 유형은 크게 부하관리와 효율향상으로 구분할 수 있다. 부하관리는 주간시간대 발생하는 피크부하를 억제하고 심야시간대 수요를 증대시킴으로써 최대부하와 최저부하간의 차이를 감소시켜 부하평준화를 도모하는 것이고, 효율향상은 전력공급설비의 이용효율을 향상시켜 사용하는 것으로 피크억제 및 에너지 절감을 도모할 목적으로 운영된다.⁽¹⁾

하절기 피크부하를 야기하는 냉동기에 있어서 응축기에서 응축된 고온의 포화액냉매를 과냉각시켜 증발기로 보내면 냉동시스템의 냉각능력을 향상시킬 수 있다. 특히, 냉매의 과냉각열원으로 별도의 냉동기를 이용하는 것이 아니라 심야시간대 축열된 냉열을 간접이용하면 전력부하평준화도 동시에 도모할 수 있게 된다.⁽²⁾

Lee et al.⁽³⁻⁵⁾는 축냉시스템을 이용하는 냉매과냉각 시스템의 기존 성능 및 사이클 특성을 파악하였고, 냉매과냉각 시스템의 냉매과냉각 정도에 따른 냉동시스템의 성능변화 결과를 제시하였다.

따라서 본 연구에서는 부하관리의 대표적인 설비 중 하나인 축냉시스템을 적용하여 에너지의 효율적 이용을 도모하고, 효율이 높은 냉동시스템을 설계하고 이를 실험적으로 고찰해보고자 한다. 대부분의 실험결과들은 Lee et al.⁽⁵⁾의 자료를 인용하였다. 또한 경제적인 측면에서의 전력수요관리 및 냉매과냉각에 대한 효과를 살펴보고 이의 결과를 제시하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 일반 압축식 냉동시스템에 빙축열조와 과냉각기를 추가로 설치하여 냉매과냉각 냉동시스템을 구성하였다. 실험장치는 압축기, 응축기, 과냉각기, 증발기, 온도감응식 팽창밸브(TEV), 향온조, 빙축열조 등으로 구성하였으며, 냉매는 R-22를 사용하였다.

왕복동식 압축기와 공랭식 응축기가 적용되었고 대향류형 판형열교환기를 증발기와 과냉각기로 사

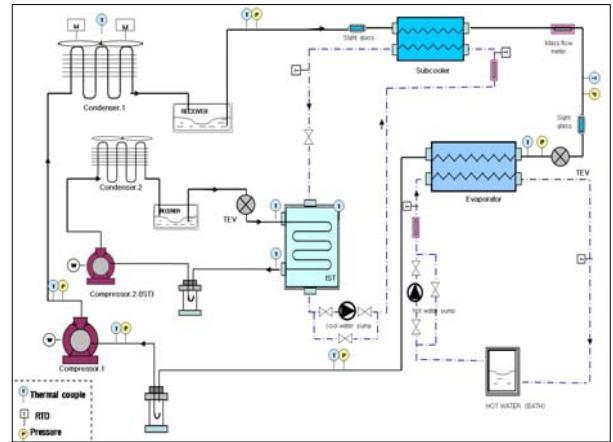


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

용하였다. 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.

냉매의 온도는 T-type 열전대를 냉매배관에 삽입하여, 증발기 냉열회수를 위한 열원수와 과냉각을 위한 냉수의 입·출구 온도는 RTD로 측정하였다. 회로 내 냉매압력 측정을 위해 냉매용 고압계와 저압계를 각각 3개씩 설치하였고, 압축기에 전력량계를 설치하여 압축기 소비전력을 측정하였다. 냉매가 액상영역인 과냉각기 출구에 질량유량계를 설치하여 냉매유량을 측정하고, 과냉각기에 공급되는 냉수의 유량과 증발기에 공급되는 열원수의 유량은 각각 교정된 전자기유량계와 질량유량계를 이용하여 측정하였다.

또한, 가시창을 과냉각기의 입구와 출구(팽창밸브 입구)에 각각 설치하여 냉매의 상변화(phase change)를 시각적으로 관찰할 수 있게 하였다.

센서들을 이용하여 측정된 데이터 신호는 컴퓨터와 연결된 계측기(HP-34980A)를 이용하여 수집하였다.

2.2 실험방법

본 실험에서는 냉매과냉각에 따른 냉동시스템의 성능특성 변화를 살펴보기 위하여 기준 운전(과냉도 0K)과 냉매과냉각 운전을 번갈아 진행하였다. 응축기 팬의 회전수를 조절하여 응축온도를 45°C로 일정하게 유지한 상태에서 증발기로 유입되는 열원수

의 입구온도와 유량을 각각 15°C와 0.03 m³/min으로 일정하게 하였다.

빙축열조 내 냉열저장을 위한 축열 운전은 심야 시간대인 23시부터 다음날 9시 사이에 5시간 정도 진행하였고, 주간운전은 9시부터 17시에 진행하였다. 냉매과냉각 운전시 냉매는 과냉각기를 통과하면서 빙축열조에서 공급되는 냉수와 열교환되어 과냉되어지고, 냉수의 유량을 밸브로 조절하여 원하는 과냉각도를 얻도록 함으로써 실험조건을 변경하였다.

냉동시스템의 냉각능력은 증발기 내부를 순환하는 냉매유량과 엔탈피차에 의한 식(1), 또는 증발기 외부를 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, $h_{r,i}$ 와 $h_{r,o}$ 는 각각 증발기 입·출구에서의 냉매 엔탈피 값을, \dot{m}_w 는 증발기로 유입되는 열원수의 유량을, $c_{p,w}$ 는 물의 정압비열을, ΔT_w 는 증발기 입·출구에서의 열원수 온도차를 의미한다. 온도와 유량은 냉매 측과 열원수 측에서 모두 측정하였다. 증발기 출구가 이상(two-phase) 영역인 경우에는 증발기 출구에서의 엔탈피 값을 측정할 수 없어, 냉각능력은 열원수 측에서의 측정값들을 이용하였다.

냉동시스템의 성능을 나타내는 주요지표인 성능계수(COP)는 식(3)과 같이 계산하였다.

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

여기서, \dot{Q} 는 냉각능력(kW)을, \dot{W} 는 전력량계로 측정한 압축기 소비전력(kW)을 의미한다.

주간 과냉각을 위한 빙축열조 방열량은 \dot{Q}_{dis} 로 계산한다.

$$\dot{Q}_{dis} = \dot{m}_r C_{p,r} (T_{si} - T_{so}) \quad (4)$$

여기서, T_{si} 와 T_{so} 는 축열조 입구와 출구의 냉수 온도를 각각 의미한다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 과냉각기 출구온도가 저하됨에 따른 냉매유량의 변화를 나타내고 있다. 그래프의 x축은 과냉각기를 통과한 후의 냉매온도를 나타내는 것으로 온도가 낮을수록 과냉각도가 크다는 것을 의미한다.

기준 운전일 때 냉매유량이 평균적으로 약 2.5 kg/min 인데 반하여, 냉매과냉각 운전인 경우에는 최소 2배 이상 증가한 것을 확인할 수 있다. 이는 냉매가 과냉되면서 증발기 입구의 냉매건도가 감소하여 거의 포화액상태가 되고, 증발기내에서 증발할 수 있는 액상(liquid phase) 냉매량이 증가하였기 때문인 것으로 판단된다.⁽⁶⁾

또한, 냉매과냉각 운전시 일반운전에 비해 증발압력이 상승하게 되는데, 이 때 증발기 온도감지통에 봉입된 냉매의 포화압력도 함께 상승한다. 이 경우 TEV의 개도는 증가하게 되고, 이러한 팽창밸브 개도증가는 유량증가의 요인으로 작용한다. TEV의 경우 기준 모세관에 비하여 냉매 사이클 변화에 따른 냉매유량의 변화증가폭이 크기 때문에 냉매과냉각 운전과 기준 운전의 냉매유량 차이가 크게 나타난 것으로 판단된다. 그러나 과냉각기 출구온도가 저하될수록 냉매유량의 감소폭은 작아지는데, 이는 증발압력의 영향으로 증발압력의 감소율과 냉매유량의 감소율은 비슷한 경향을 보임을 확인하였다.

Fig. 3은 과냉각기 출구온도에 따른 압축기 소비전력의 변화를 나타낸 것으로 기준 운전보다 냉매과냉각 운전일 때 미소하게 증가하는 것을 알 수 있다. 압축기 소비전력의 경우, 압축비와 냉매유량에 크게 영향을 받는데 일정한 조건에서 냉매를 과

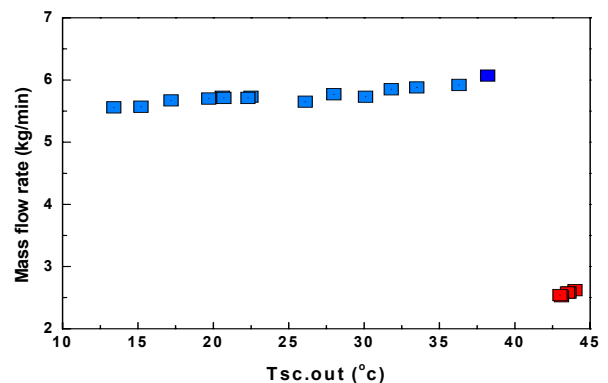


Fig. 2 Variation of mass flow rate with T_{sc.out}.

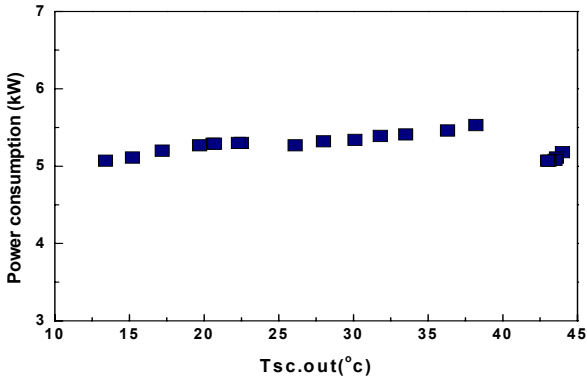


Fig. 3 Variation of power consumption with $T_{sc.out}$.

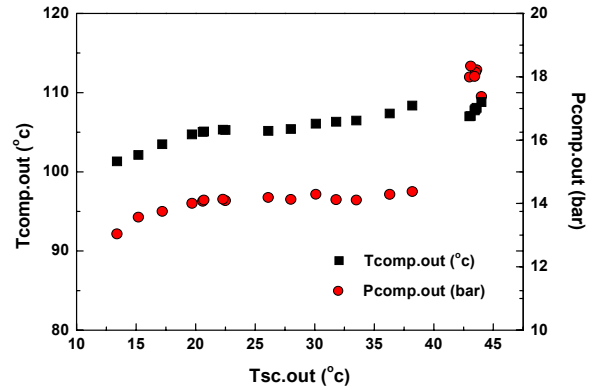


Fig. 5 Variation of temperature and pressure at compressor outlet with $T_{sc.out}$.

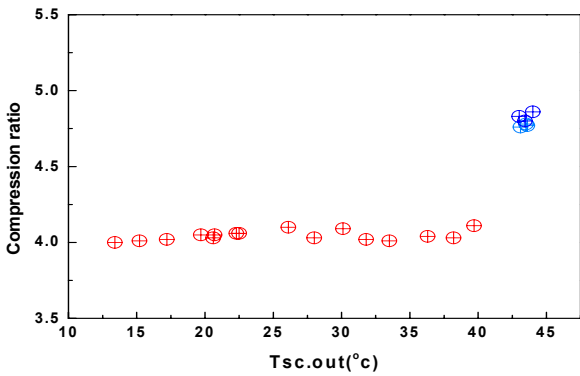


Fig. 4 Variation of compression ratio with $T_{sc.out}$.

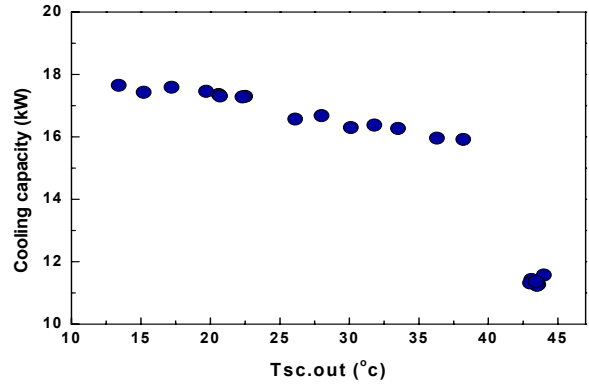


Fig. 6 Variation of cooling capacity with $T_{sc.out}$.

냉각시켰을 경우에 압축비는 16.7% 감소하지만 냉매유량은 53.8% 증가하여 냉매과냉각 운전시 압축비의 감소보다 냉매유량의 증가로 인한 압축일의 증가폭이 더 크게 되면서 소비전력은 증가하였다고 판단된다(Fig. 4 참조).

하지만 과냉각기 출구온도가 낮아질수록 냉매유량이 감소함을 보이기 때문에 압축기 소비전력 역시 감소함을 보였다. Fig. 5에 나타난 압축기 토출가스 온도와 압력을 살펴보면 과냉각 운전시 더 낮은 조건에서 운전하는 것을 확인하였다. 따라서 압축비의 감소 및 토출가스 온도의 저하 등의 이유로 기준 운전에 비해 압축기 측면에서 안정적인 운전이 가능하고 기계의 수명이 늘어나는 부수적인 효과도 기대할 수 있다.

Fig. 6은 과냉각기 출구온도 변화에 따른 냉각능력을 나타내고 있다. 냉매과냉각 운전인 경우에 기준 운전과 비교하여 냉각능력이 향상되고, 과냉각기 출구온도가 낮을수록 냉각능력이 더욱 증가되는 것을 확인할 수 있다.

과냉각기 출구온도가 13.4°C일 때의 냉각능력은 기준 운전일 때의 냉각능력과 비교하여 약 55% 증가하였다. 냉각능력의 증가는 증발기로 유입되는 냉매유량의 증가와 증발기 내에서 열원수와 냉매의 열교환이 활발하게 일어나기 때문이라고 판단된다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 과냉각도가 커질수록 증발기에서 열교환되는 열원수의 온도차가 더 큰 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8에 나타난 그래프를 살펴보면 냉매과냉각 운전시 기준 운전에 비하여 향상된 냉열량과 축열조에서 발생한 방열량이 비슷한 양임을 확인하였다. 축열운전을 5시간 수행하였을 때, 주간운전에 냉매과냉각 운전시 축열조에서 발생하는 방열량은 평균 7.3kW 정도로 나타났다.

과냉각기 출구온도 변화에 따른 시스템의 COP 변화는 Fig. 9와 같이 나타난다. 냉매과냉각 운전시 COP는 기준 운전에 비하여 크게 향상되었고, 과냉각기 출구온도가 낮아질수록 더욱 증가하였다. 냉매과냉각 운전일 때 냉매유량이 기준 운전일 때보

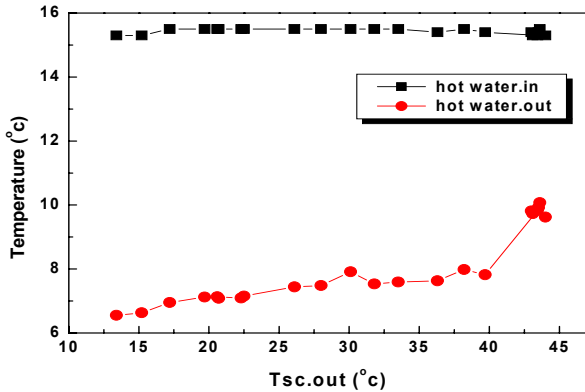


Fig. 7 Variation of inlet and outlet temperature of hot water with $T_{sc,out}$.

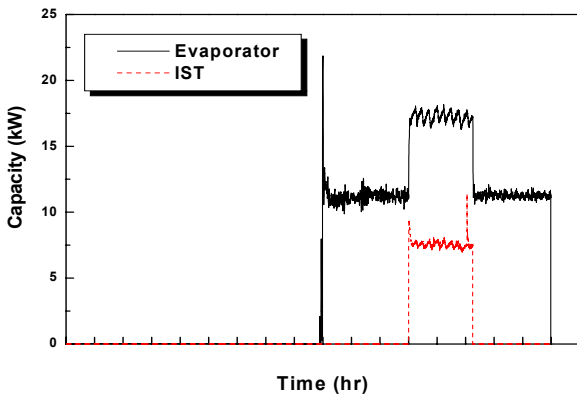


Fig. 8 Cooling capacity and heat output of IST under the refrigerant subcooling operation.

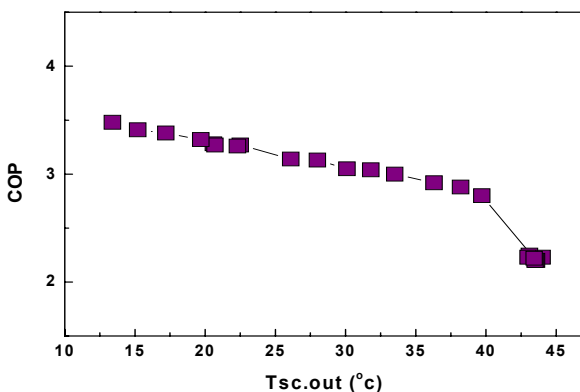


Fig. 9 Variation of COP with $T_{sc,out}$.

다 약 2배 이상 증가하여 압축기 소비전력과 냉각 능력이 모두 증가하게 되지만 압축기 소비전력이 2~4% 정도의 증가로 미미한 반면, 냉각능력은 37~55% 정도로 크게 나타난다.

결국, COP는 기준 운전과 비교하여 26~52% 정

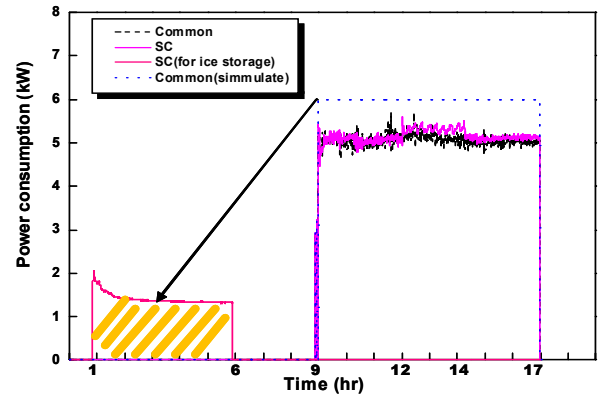


Fig. 10 Compressor operation of common and subcooling operation with time and load leveling.

도 향상된 값을 나타나게 된다. 다만, 일반적인 유사 사이클의 과냉도가 5K 정도인 것을 고려하면, COP는 최대 약 27% 정도만 향상된 값이다.

이와 같이, 냉매과냉각 시스템이 기존시스템에 비해 향상된 COP로 운전하기 때문에 동일한 냉동기에서 보다 고효율의 운전이 가능해지고, 냉동기의 용량축소가 가능하게 된다. 기준 운전과 냉매과냉각 운전일 때 소비전력의 형태가 Fig. 10과 같이 나타난다. 기준 운전의 경우 주간운전시 평균소비전력은 5.1 kW로 총 8시간 운전하여 총소비전력량은 40.8 kWh이고, 이 때 발생하는 총냉열량은 89.7 kWh이다. 반면 냉매과냉각 운전의 경우 주간시간 냉매과냉각 운전시 냉매유량의 증가로 인하여 압축일이 증가하고, 축열운전이 추가되기 때문에 총소비전력량은 기준 운전과 비교하여 21~23% 정도 증가하게 된다. 하지만, 총냉열량(kWh)이 기준 운전 대비 15~18% 정도 증가하기 때문에 증가된 냉각열량만큼 냉동기 축소가 가능하게 된다.

기준 운전 중 2시간 동안 출구온도를 23.9°C로 하여 냉매과냉각 운전을 진행한 경우 발생한 총냉열량은 105.5 kWh이다. 과냉각운전이 없는 기준 운전으로 동일한 냉열량을 얻기 위해 Fig. 10의 결과를 이용하면, 6 kW급 냉동기가 필요함을 예상할 수 있다. 즉 2시간 냉매과냉각 운전을 함으로써 주간 사용전력량 7.2 kWh 정도를 야간으로 이전시키는 효과를 얻을 수 있게 된다. 이 때 부하이전율은 15% 정도가 되고, 축냉 및 과냉각운전시간을 늘린다면 전력부하의 이전효과가 더욱 커질 것으로 판단할 수 있다. 과냉각기 출구온도에 따라 총소비전력량과 발생한 총냉열량은 Table 1과 같다.

Table 1 Power and cooling capacity with $T_{sc.out}$

$T_{sc.out}$ [°C]	Subcooling degree [°C]	Night [kWh]	Day [kWh]	Cooling capacity per day [kWh]	Δ Cooling capacity [kWh]
43.4	0	-	40.8	89.7	-
38.1	5.3	8.5	41.6	92.1	2.4
29.5	13.9	8.0	41.2	103.3	13.6
23.9	19.5	7.7	41.1	105.5	15.8

Table 2 Cost saving effect

$T_{sc.out}$ [°C]	Subcooling degree [°C]	Cost for 100kWh cooling capacity [won]	cost saving [won]
43.4	0	11,908	-
38.1	5.3	11,135	773
29.5	13.9	10,338	1,570
23.9	19.5	10,124	1,784

또한, 과냉각기 출구온도에 따라 발생하는 냉열량을 기준으로 100 kWh의 냉열량을 얻는데 필요한 운전비용을 Table 2에 나타내었다.

전력의 단가는 한국전력의 전기요금표를 기준으로 산업용 고압전력(을)을 참고하였고, 비교의 단순화를 위하여 기본요금은 무시하고 계산하였다.⁽⁷⁾ 표를 살펴보면 기준 운전일 때보다 냉매과냉각 운전인 경우 동일한 열량을 얻기 위해 필요한 운전비용이 적게 발생하는 것을 알 수 있고, 과냉각기 출구온도가 23.9°C인 냉매과냉각 운전에서 100 kWh의 냉열량을 얻는데 필요한 운전비용은 기준 운전($T_{sc.out} = 43.4^\circ\text{C}$) 대비 약 15% 감소하는 것을 확인하였다.

물론 이러한 결과는 실제 시스템에서의 과냉도 5 K 정도를 고려한다면, 약 9% 정도의 운전비용 감소를 나타내는 것이다.

따라서 냉매과냉각 운전시 과냉도가 증가함에 따라 동일한 냉동기에서 향상된 냉열량만큼 용량기기의 축소가 가능하고, 주간시간대 발생하는 부하를 심야에 이전시킴으로써 전력부하평준화에 기여할 수 있다. 운전비용 역시 절감되어 소비자의 입장에서 도 경제적인 시스템이라고 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존시스템에 빙축열조와 과냉각

기만을 추가로 설치하여 시스템의 효율을 향상시켜 이용할 수 있는 냉매과냉각 시스템을 구성하고, 과냉각도에 따른 냉동시스템의 성능특성 변화 및 전력수요관리 효과를 알아보기 위한 실험을 수행하였다.

(1) 냉매과냉각 운전의 경우, 냉매유량의 증가로 냉각능력과 압축기 소비전력이 동시에 증가하지만 냉각능력의 증가가 소비전력의 증가보다 월등히 크기 때문에 시스템의 COP는 과냉각기 출구온도가 저하될수록 증가하였다. 과냉각기 출구온도가 13.4°C일 때, 과냉도 0K 기준으로 하여 냉각능력은 최대 55%, COP는 최대 57% 증가하였다.

(2) 과냉각기 출구온도가 낮을수록 압축기 토출가스 온도는 저하되고, 압축비가 감소하여 압축기 측면에서 냉매과냉각운전이 더 안정적이고 신뢰성 있는 운전이라 할 수 있다.

(3) 전력수요관리 측면에서 고려하였을 때 기준 운전(과냉도 0K)에 비해 냉매과냉각 운전시 운전시간이 증가하여 총소비전력량은 증가한다. 하지만 동일한 냉동기에서 발생하는 냉열량이 더 크기 때문에 동일한 냉열량을 고려하였을 때 운전비용은 15% 정도 절감되었다. 또한, 주간 운전시 2시간의 냉매과냉각 운전을 통하여 15%의 부하율을 심야시간으로 이전함으로써 전력부하평준화에도 기여할 수 있음을 확인하였다.

따라서 본 시스템을 적용하면 기존 일반시스템에 비하여 효율적인 에너지 이용이 가능하고, 경제적이며, 보다 우수한 성능의 냉동기 운전이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 한국에너지기술평가원의 에너지자원기술개발사업-효율향상분야 단위과제인 ‘축냉시스템을 이용한 냉매과냉각형 고효율 히트펌프 개발’사업으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee, M. H., 2005, The incentive programs of cool storage system and energy efficient equipments for DSM, Proceedings of SAREK Summer Annual Conference, pp. 350-356.
2. Lee, D. W., 2007, Sub-cooling effect using cold

- storage system, Proceedings of SAREK Summer Annual Conference, pp. 1067-1071.
3. Lee, E. J., Lee, D. W. and Kim, Y. C., 2009, Basic Study on Sub-cooling System using Ice storage tank, Proceedings of SAREK Summer Annual Conference, pp. 990-995.
 4. Lee, E. J., Lee, D. W. and Kim, Y. C., 2009, An Experimental Research on the Refrigerant Sub-cooling Effects in Refrigeration System Performance, Proceedings of SAREK Winter Annual Conference, pp. 239-244.
 5. Lee, E. J., Lee, D. W. and Kim, Y. C., 2010 An Experimental Study on the Performance Characteristics of a Refrigerant-Subcooling Refrigeration System with an Ice Storage Tank, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 22, No. 6, pp. 369-374.
 6. Lee, H. L., 1999, Study on performance enhancement of the heat pump using a liquid distributor, SAREK Summer Annual Conference, pp. 203-208.
 7. 2009, KEPCO Report for Electricity Rate(Total).