

저온창고에서 냉동기 응축폐열을 이용한 제상시스템 성능평가

Performance Evaluation of a Defrosting System Using the Condensation Heat of a Refrigerator in Cold Storage

박천완(Chunwan Park)¹, 이동규(Donggyu Lee)¹, 임관빈(Kwanbin Im)², 강채동(Chaedong Kang)^{3†}

¹전북대학교 대학원, ²㈜쿨테이너, ³전북대학교 지열에너지연구센터

¹Graduate School of Mechanical Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Republic of Korea

²Cooltainer Co., Ltd, 67 Doseon-gil, Iksan 570-814, Republic of Korea

³Geothermal Energy Center, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Republic of Korea

(Received October 29, 2013; revision received November 30, 2013; Accepted: December 2, 2013)

Abstract In a cold chain, the refrigerator is also employed for defrosting, by using an electric heater, which consumes 15% of the power for the system operation. In this study, the condensation heat of the refrigerant was suggested as the heat source of defrosting heat, instead of that from an electric defrost heater. The heat for defrosting was stored to a phase change material (PCM, NMP : 52°C) in thermal storage, and was periodically supplied to the evaporator by a circulation loop of brine. As a result, a defrost time by the PCM was obtained that was less than or equal to that by the electric heater. Moreover, power consumption during defrosting was saved by up to 99% of that of the electric heater.

Key words Waste heat(폐열), Defrost(제상), PCM(상변화물질), Heat storage(축열), Cold storage(저온저장)

† Corresponding author, E-mail: ckang@jbnu.ac.kr

기호설명

COP : 성능계수
 EHD : 전기히터 제상(defrost by electric heater)방식
 F : 유량계 [LPM]
 P : 압력 [kPa]
 NMP : 정상용점(normal melting point)
 \dot{Q}_L : 냉각열전달률 [kW]
 R_{COP} : COP 감소 비율
 T : 온도 [°C]
 t : 작동 시간 [min, hour]
 TSD : 축열이용 제상(defrost by thermal storage)방식
 \dot{W} : 소비전력 [kW]

하첨자

cy : 냉동기 작동
 DF : 제상
 DFP : 제상 소비전력
 R : 냉각시스템
 tl : 과열방지기(Thermolimiter)

1. 서 론

저온저장고의 내부는 저장된 농·식품의 보호를 위해 낮은 온도와 높은 습도를 유지한다. 일반적으로 고 내부 온도는 농·식품의 동결을 방지하기 위해 동결온도보다 높은 온도를 유지하며, 습도는 90% 이상이다.⁽¹⁾ 그러나 위와 같은 조건에서 냉각 시스템이 작동할 경우 고 내부에 위치한 환-튜브 열교환기의 표면은 동결점 이하로 내려가게 되며, 공기중의 수분이 응축·동결되어 열교환기의 표면에 서리가 성장하게 된다.

이러한 서리의 성장은 환 사이의 공기유로를 차단하여 공기 측의 압력강하를 일으키게 된다. Wu et al.⁽²⁾은 서리성장으로 인해 증발기 내부를 통과하는 공기유동의 감소와 증발기 팬의 소비전력 증가를 확인하였다. 또한 Huang et al.⁽³⁾은 서리층이 성장할수록 증가하는 서리층의 단열효과가 공기와 냉매 간 열교환량 감소에 미치는 영향에 대해 확인하였으며, O'Neal et al.⁽⁴⁾은 착상조건 하에서 냉동시스템의 COP가 20~30% 감소를 확인하였다.

한편 Yang et al.⁽⁵⁾은 서리 성장에 의한 열교환기의

성능저하를 줄이기 위해 흰의 형상에 변화를 주는 연구를 진행하였으며, Kim et al.⁽⁶⁾은 표면처리(친수, 발수)가 서리성장에 미치는 영향을 확인하였다. 표면에 형성된 서리를 제거하는 방법으로는 on/off 제어, 전기히터, 냉매 역사이클, 살수제상 등이 이용되지만, Choi et al.⁽⁷⁾의 특허 기술분석 내용을 보면 압축식 열펌프의 보조가열수단에 대한 국내 연구가 부족한 실정이다. 특히 저온 유통과정에서 이용되는 압축식 냉동기의 경우 전기히터를 이용한 제상방법이 대부분이며, Shin et al.⁽⁸⁾는 현장 데이터 측정을 통해 제상을 위한 전력소비량이 시스템 운전의 약 15%를 차지함을 확인하였다. 따라서 냉장유통의 활성화와 함께 증가하고 있는 냉동기의 소비전력이 증가함에 따라 전력소비량을 감소시킬 수 있는 제상열원의 대체가 절실히 요구되어지고 있다.

본 연구에서는 고 내 증발기 표면의 서리를 제거하기 위한 전기히터 제상전력의 대체열원으로 응축폐열의 활용을 제안하였다. 세부적으로는 유기계 잠열축열재(Organic PCM)에 응축폐열을 축열한 후 제상 시점에 작동유체에 의한 순환방열을 통해 증발기 표면의 제상을 진행하는 사이클실험을 실시하였다. 이 때 제상주기, 제상시간 및 과열방지 온도가 제상량, 고 내부 온도 및 시스템소비전력 및 성능에 미치는 영향을 전기식 제상방식과 비교 검토하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 응축폐열을 활용한 제상실험장치

응축폐열의 저장과 제상열원 활용 가능성을 평가하기 위한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 먼저 축열과정은,

압축기(용량 : 2 HP)에서 토출되는 고온·고압의 냉매가 스가 축열조를 통과하면서 1차로 응축하는데 이 때 응축열을 축열조 내의 유기계 잠열재(NMP : 52℃)로 잠열축열 시키도록 되어 있다. 이후 축열조에서 1차적으로 방열한 냉매는 2차적으로 응축기를 통과하며 응축과정을 완료하고 교축과정을 거쳐 챔버(4×2.5×2.5 m) 내에 설치된 증발기에서 증발하며 고 내를 냉각 시키도록 되어 있다. 다음, 제상과정은 압축기 전원이 정지된 후 순환펌프가 작동하여 브라인이 축열조와 증발기 사이를 순환하면서 축열조 내로부터 축열된 잠열량을 증발기로 공급시켜 증발기 표면온도를 상승시켜 제상이 이루어지도록 하였다. Fig. 2는 잠열축열을 위해 52℃의 상변화물질(PCM)이 모듈로 충전·삽입된 축열조(a)와 제상을 위해 중앙열에 동관이 삽입된 증발기(b)의 사진이다.

냉각 사이클 동안 각 지점에서의 작동온도, 고압과 저압 및 축열조 전후단의 압력을 측정하였다. 또한 각각의 작동기기 전압과 전류를 측정하여 소비동력을 산출하였다. 고 내부에는 내부 온도센서에 의해 비례제어가 되는 냉동부하용 히터(Cooling load heater)를 설치해 냉각능력을 간접 측정하였다. 고 내부 습도는 습도센서 및 가습기를 이용해 일정하게 유지하였다. 데이터는 5초 간격으로 데이터로거(NI 9205 ±200 mV~±10 V, NI 9213 ±0.02℃ NI Co.)를 이용해 수집하였고, 온도센서(K-type 열전대, ±0.1℃), 습도센서(-40~110℃, 0~99%, RH ±3%, CONOTEC Co.), 압력센서(0.1~35 bar, ±0.5%, Sensys Co.)가 이용되었으며, 작동유체의 순환량은 유량계(FHKU, 2~30 LPM, ±1%, Turbine, AUTOFLOW Co.)를 이용하여 측정하였다. 또한 사이클 반복에 따른 제상작업의 완료와 증발기 표면온도 분포를 확인하기 위하여 열화상카메라(TVS-200EX, -20~500℃, NEC Co.)를 이용해 2분 간격으로 촬영을 진행하였다.

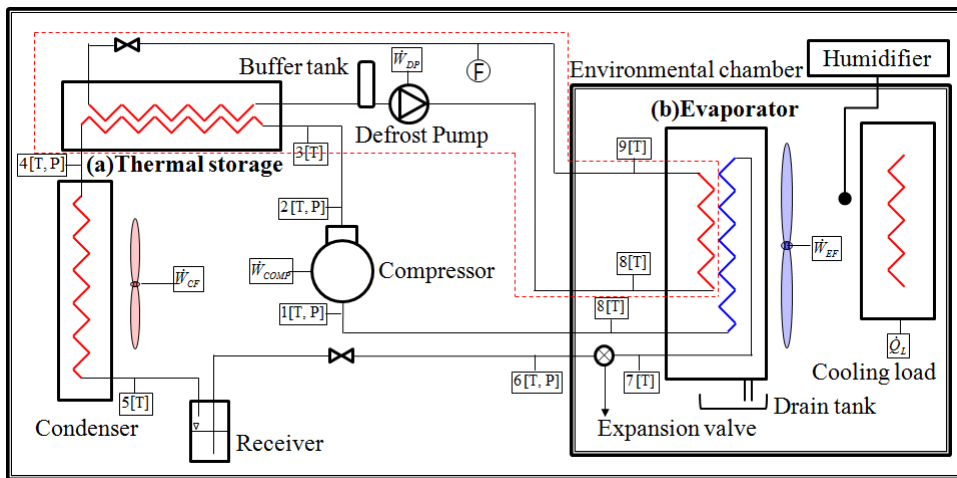


Fig. 1 Schematic of experimental device for defrost cycle test.

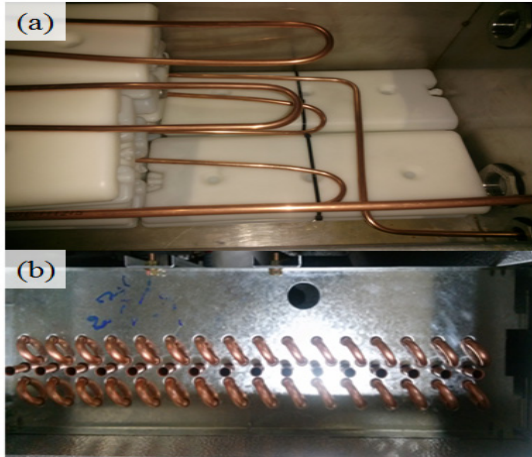


Fig. 2 Images of apparatus for defrosting (a) Thermal storage tank (b) Evaporator.

2.2 제상성능 실험 방법

제상 성능 실험을 위한 실험조건을 Table 1에 나타내었다. 즉 제상주기, 제상시간 및 증발기의 과열방지온도를 조절하여 증발기에 전기히터를 이용한 제상(EHD)과 축열을 이용한 제상(TSD) 시의 시스템 성능을 평가하였다. 제상에 사용된 증발기는 흰-튜브(fin-tube)형으로 기본적인 제원은 Table 2와 같다.

먼저 전기 히터식 제상(EHD)에 사용된 증발기는 흰-튜브형 증발기의 3, 7, 10, 13렬 및 집수조에 총용량 2.6 kW의 시즈히터(sheath heater)가 삽입되어 타이머에 의해 전원의 자동 단락을 통하여 가열되도록 하였다. 다음, 축열식 제상(TSD)에 사용된 증발기는 응축기 방열을 저장시킨 축열조로부터 브라인을 전기히터 대신 삽입 시킨 제상용 동관(관경 9.52 mm의 직관)에 순환시켜 가열되도록 하였으며 제상용 동관을 확관시켜 흰과의 접촉면적을 확보하였다. 또한 제상된 물은 증발기 하부의 배출구를 통해 탱크에 저장하여 1사이클당 착상량을 예측하였다. 착상량은 냉동기 및 제상사이클 3회 작동 후 탱크 내 수집된 제상수를 저울(NT-502a, 0 ~ 150 kg, +0.005 kg, CAS Co.)로 측정 하였고, 측정된 값을 이용해 1회 제상당 발생하는 착상량을 산출하였다. 제상실험은 농산물 저온저장고 시험 기준인 고 내부온도 1°C, 습도 90 %RH에 맞추어 지속적으로 항온, 가습이 이루어지도록 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 제상사이클 분석

Fig. 3은 냉각시스템이 4시간 작동 이후 20분 제상하

Table 1 Experimental conditions for defrost cycle

Defrost method	Refrigerator operating time [hour]	Defrost time [min]	Thermo limiter Temp. [°C]
Defrosting by electric heater (EHD)	4	20	30
	4	20	40
	5	20	40
Defrosting by thermal storage (TSD)	6	20	40
	6	20	30
	6	20	20
	6	15	20
	6	10	20

Table 2 Specification of fin-tube evaporator

Item	specification	
	material	aluminum
fin	type	plate
	thickness/pitch(mm)	0.2/6
	material	copper
tube	D/t(mm)	Φ9.52/0.7
	row/column/pass	16/4/
heater	type	sheath
	output {kW}	0.9×2, 0.8×1
defrost coil	D/t(mm)	Φ9.52/0.7
	row	16

는 EHD와 TSD 사이클 동안 고 내부 온도 및 소비전력의 시간변화를 비교하여 나타낸 그래프이다. 초기 상온부터 냉각시스템의 작동에 따라 고 내부온도는 1°C까지 강하하였다. 특히 냉각시스템의 작동이 끝나고 제상사이클이 작동하는 구간에서는 EHD의 경우 전기히터의 작동으로 인해 2.3 kW의 높은 소비전력을 나타내었다. 반면에 TSD의 경우 제상을 위한 순환펌프만이 작동하기 때문에 상대적으로 낮은 소비전력으로 작동되는 것을 알 수 있다. 이때 제상열원이 공급되면서 고 내부로 냉각부하가 침투하기 때문에 고 내부온도는 다음 냉각사이클이 작동되기 전까지 지속적으로 상승하는 것을 알 수 있다.

Fig. 4에 제상이 진행됨에 따라 증발기 표면에 잔류한 서리 모습과 동일 시간, 장소에 대하여 열화상카메라로 관찰한 표면의 온도분포 사진을 나타내었다. 제상 완료시간은 열전달 면적이 가장 작은 EHD 제상(Fig. 4(a))

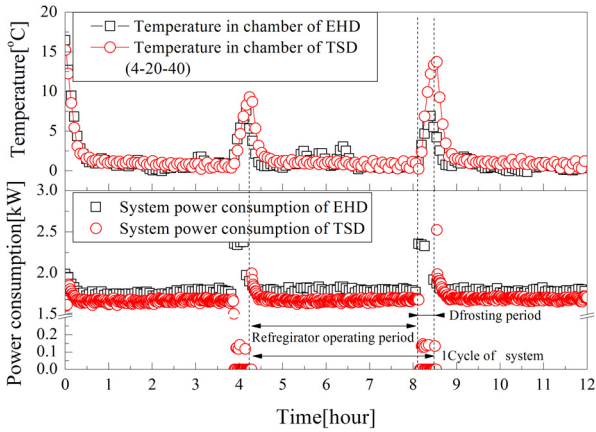


Fig. 3 Time variation of temperature in chamber and power consumption during refrigerating/defrosting cycle.

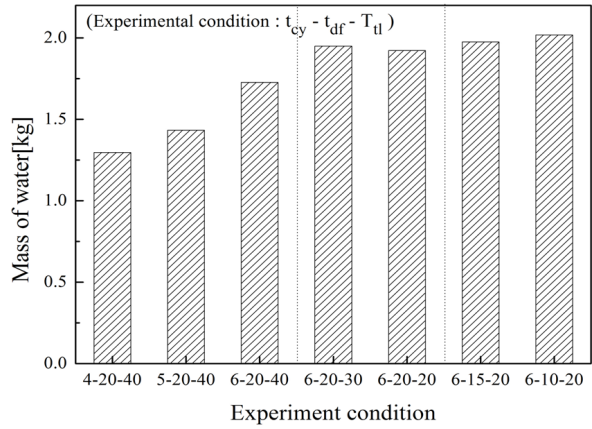


Fig. 5 Mass of defrosting water according to each condition.

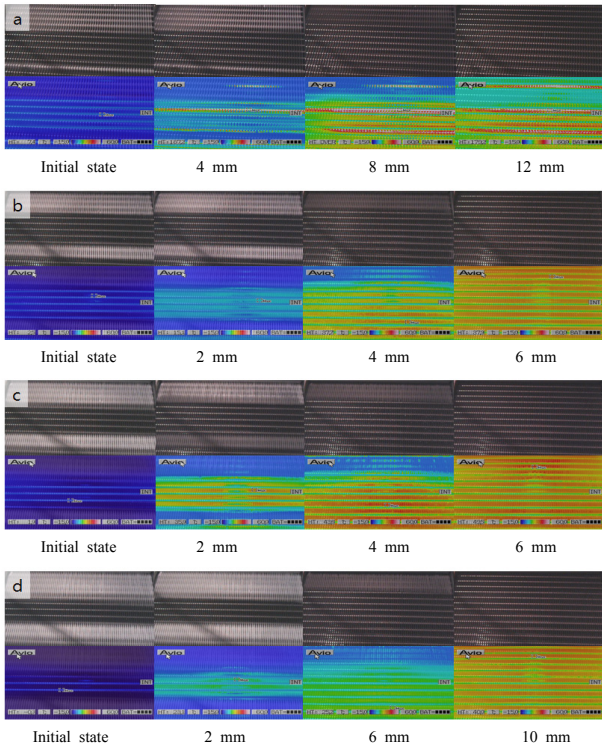


Fig. 4 Snapshot of defrost for defrost period(hr)-defrost time(min)-thermo limiter temp.(°C)
 (a) EHD 4-20-30 (b) TSD 4-20-40 (c) TSD 6-20-40 (d) TSD 6-10-20

에서 12분으로 가장 늦게 나타났다. 제상개시 후 히터 주위를 중심으로 급격하게 온도가 상승하였고 이와 함께 과열방지기에서 전원의 공급/차단이 빈번하게 나타났다. 이는 히터가 증발기 표면적에 비해 작은 열

전달 면적을 가지고 있어서 증발기 전체 표면온도 상승을 지연시키고 이와 함께 제상시간이 지연되기 때문에 판단된다. 반면, TSD 제상방식(Fig. 4(b)~Fig. 4(d))의 경우 제상사이클 개시로부터 각각 6, 10분 이내에 제상이 완료되었다. 이는 16열의 동관이 증발기에 삽입·확관되어 있어서 축열된 열을 증발기 표면 전체에 보다 신속히 공급하여 증발기 표면온도를 빠르게 상승시키기 때문으로 판단된다. 특히 증발기 표면온도를 측정하여 열량공급을 제어할 수 있는 과열방지기의 온도조건이 감소하게 되면 증발기의 표면온도 상승폭과 공급열량이 줄어들게 된다. 그 결과 동일 제상주기를 갖는 Fig. 4(c), Fig. 4(d)에서 과열방지도가 40°C에서 20°C까지 낮아짐에 따라 제상완료시간이 6분에서 10분으로 지연됨을 알 수 있다.

Fig. 5에 각 실험 조건에 따른 제상 완료 이후 수집된 평균 제상수의 질량을 나타내었다. 제상주기가 4, 5, 6 시간으로 증가할수록 제상과정동안 수집된 평균 제상수의 질량은 각각 1.3, 1.4, 1.7 kg으로 증가하였고, 이는 증발기 표면의 착상량이 증가하였음을 뜻한다. 또한 제상주기를 6시간으로 일정하게 유지시킨 상태에서 수집된 제상수의 질량은 제상시간이 길어짐에 따라 조금씩 줄어들고 있다. 그 원인으로서 증발기 표면에 부착된 서리는 제상과정동안 증발기 표면온도가 높게 유지될수록 용해되어 제상수로 포집되는 양에 대해 제상관 및 증발기 표면에서 용해 후 증발되는 양의 비율이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 증발기 표면온도 관찰

Fig. 6은 각각의 실험 조건에 따라 제상사이클이 진행되는 동안 열화상카메라를 통해 2분 간격으로 관찰한 각 조건별 최대표면온도의 평균을 나타낸 것이다.

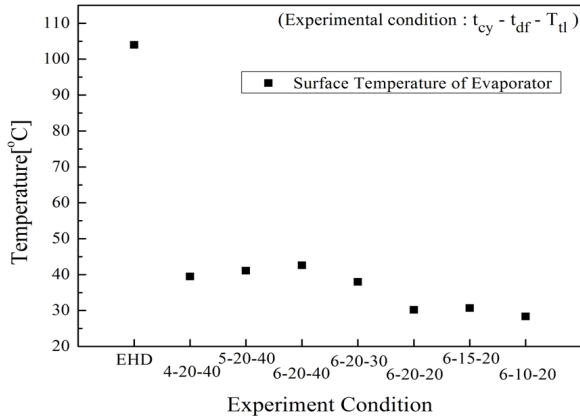


Fig. 6 Maximum temperature average of evaporator surface.

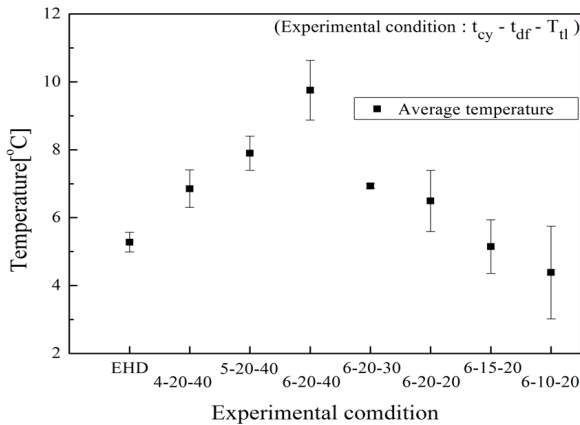


Fig. 7 Average temperature in chamber for defrost cycle.

EHD의 경우 과열방지온도는 30°C로 제한되어 있지만, 실제 관찰된 증발기 최대표면온도의 평균 값은 70°C 이상 높게 나타났고 극소적으로 나타나는 순간 최대표면온도는 231°C까지 나타나 매우 심한 온도격차를 보였다. 이는 증발기 내부에 삽입된 4열의 히터에 의해 가열되는 동안 히터와 흰 사이의 열전달 면적이 작아 흰으로의 열전달이 원활하지 못하고 히터 쪽으로 치우쳐 고온이 나타나기 때문으로 추정된다.

반면에 TSD의 경우 20, 30, 40°C로 제한된 과열방지온도에 대해 10°C 이내에서 최고 평균온도값이 산출되었으며, 6-20-40의 조건에서 측정 최고온도는 51.8°C로 가장 높게 측정되었다. 이는 TSD에 이용되는 증발기 내부에 16열의 동관이 삽입되어 EHD보다 상대적으로 많은 열전달 면적을 가질 뿐만 아니라, 확관에 의해 흰과의 밀착률 향상으로 열교환 효율이 향상되었기 때문으로 판단된다. 따라서 TSD의 경우 EHD에 비해 과

열방지 온도 설정을 통한 제상열원 공급의 제어가 용이하며, 상대적으로 최고 표면온도를 낮게 유지할 수 있다.

3.3 제상조건에 따른 고 내부 온도 변화

제상이 진행되는 동안 고 내부 온도가 상승하는데 이는 다음 냉각사이클의 부하로 작용한다. 각 조건 하에서 제상진행 과정동안 변화하는 온도를 산술평균하여 Fig. 7에 나타내었다. 과열방지 온도가 40°C로 제한된 EHD의 경우 히터를 중심으로 온도 상승폭이 크게 나타났지만, 축열식에 비해 상대적으로 적은 4열의 히터가 삽입되어 있고 고 내부 기류와의 열전달이 적게 일어나기 때문에 평균 고 내부온도는 5.2°C로 나타났다.

반면, EHD와 동일한 과열방지온도(40°C)하에서 TSD의 경우 제상코일로부터의 활발한 열전달에 의해 증발기의 표면온도가 낮게 유지되어 제상사이클의 완료시간은 짧게 나타났다. 하지만 TSD의 경우 역시 고 내부 주변 공기와의 열전달도 이루어져 제상주기를 4, 5, 6시간으로 증가시키기에 따라 고 내부 평균 온도가 증가하여 침투부하는 EHD의 경우 보다 상대적으로 높게 나타났다.

이에 과열방지온도 및 제상시간을 줄인 조건, 즉 제상주기 6시간, 제상시간 10분, 과열방지온도 20°C의 조건에서 TSD 방식으로 운전한 결과, 고 내부 평균 온도는 4.3°C로 EHD 방식에 비해 제상주기가 2시간 늘어났지만 고 내부 평균 온도는 약 1.1°C 줄어들어 고 내부 침투부하는 줄어들었다.

3.4 제상 소비전력 산출

Fig. 8은 제상주기, 시간 및 증발기의 과열방지온도 제한에 따른 각각의 조건에서 제상에 투입된 소비전력을

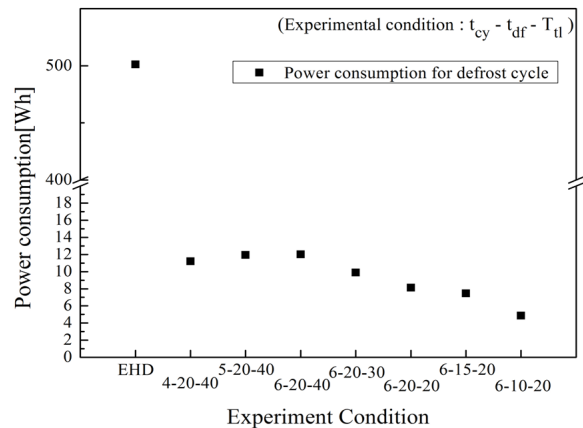


Fig. 8 Power consumption of defrost cycle.

나타내었다. EHD 방식으로 4-20-30조건 하에서 작동할 경우 제상에 소비된 전력은 1사이클당 평균 501.2 Wh로 산출되었다. 이는 전체소비전력의 7%에 해당한다. 이와 동일조건 하에 TSD 방식으로 운전할 경우 11.2 Wh의 소비전력 만으로 제상이 완료되었다. 이는 냉각시스템 전체 소비전력의 0.17%에 해당하는 전력량이다. 또한 제상조건을 6-10-20으로 하였을 때 최소 4.8 Wh의 전력으로 제상사이클이 완료되어 EHD에 비해 99% 이상의 소비전력이 감소하였다. 특히 제상시간의 감소와 증발기 표면온도의 적절한 제한을 통해 소비전력을 대폭 감소시킬 뿐만 아니라 제상과정에서 발생하는 고내부부하를 효율적으로 제어할 수 있음을 확인하였다.

3.5 냉동시스템의 COP 분석

실제 운전 가동비율이 적용될 경우 냉동기의 가동비율은 4시간 동안 100%로서, 전체 소비전력 대비 제상에 요구되는 소비전력의 비율이 상승할 것으로 예측된다. 이에 냉동 시스템의 성능을 살펴보았다. 이를 위한 냉동 시스템의 COP계산식을 식(1)~식(3)에 나타내었다. COP는 제상전력을 포함한 것과 포함하지 않은 것으로 구분하여 각각 산출하였다. 또한 각각의 COP 감소율을 이용해 제상시스템이 냉동기 성능에 미치는 영향을 파악하였다.

$$COP_R = \frac{\dot{Q}_L [kW]}{W_{Comp} [kW]} \quad (1)$$

$$COP_{DFP} = \frac{\dot{Q}_L [kW]}{W_{Comp} [kW] + W_{DFP} [kW]} \quad (2)$$

$$R_{COP} = \left(1 - \frac{COP_{DFP}}{COP_R}\right) \times 100 \quad (3)$$

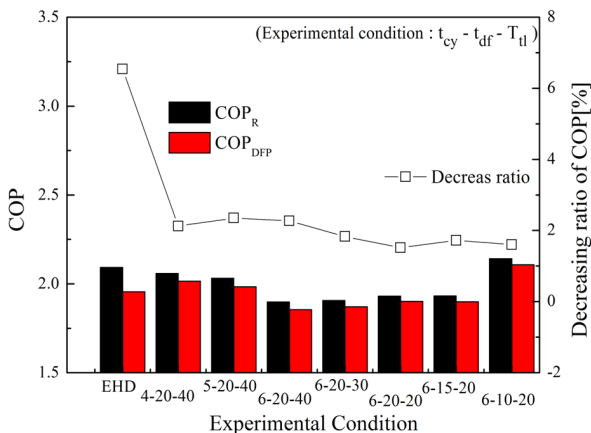


Fig. 9 Comparison of refrigerator COP between with EHD and TSD.

Fig. 9는 EHD 및 TSD 각각의 제상시스템을 운용하였을 때의 냉동시스템의 COP를 실험조건에 따라 나타낸 것이다. 실험조건에 따른 COP는 제상주기가 길어질수록 COP가 감소하였다. 이는 착상량이 증가하여 냉동효과가 감소되어 냉동기 성능저하로 이어진 것으로 보인다. 또한 제상 시 고 내부 온도(부하)가 증가함에 따라 COP는 점차로 감소하였고, 이에 과열방지온도와 제상시간을 작게 하여 냉동부하를 줄임에 따라 COP가 증가하였다. 특히 EHD 방식에서는 제상 소비전력이 높게 나타나 COP 감소율이 6.5%로 증가하였다. 하지만 TSD 방식에서는 냉동운전 시 COP 감소율이 최소 1.5%로 나타났다.

4. 결 론

냉동시스템의 제상방식에 있어서 기존의 전기히터의 응축폐열을 대체열원으로 이용한 축열식 제상방식을 제시하였고 제상시스템의 성능평가를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 제상에 있어서 축열식 제상(TSD) 방식의 경우 증발기 표면온도 상승 및 제상완료 시간이 작게는 6분 이내로 전기식 히터(EHD)방식에 비해 빠르게 나타났다.
- (2) 증발기 표면 온도는 EHD의 경우 최고 231℃, 최고 온도 평균 103℃로 과열방지온도와 최대 약 73℃, TSD의 경우 과열방지온도와 최대 약 12℃의 온도차를 나타내었다.
- (3) 과열방지온도와 제상시간을 줄여 제상시간동안 고 내부 평균 온도는 전기식 제상의 경우 5.2℃, 축열식 제상의 경우 최소 4.3℃로 고 내부 침투부하를 최소화 하였다.
- (4) 축열식 제상의 경우 전기히터식 제상보다 제상전력이 최대 99% 감소하였다.
- (5) COP 감소율은 전기식 제상 이용 시 6.5%, 축열식 제상 이용 시 최소 1.5%로 나타났다.
- (6) 증발기 표면의 균일한 열량공급과 소비전력의 감소량 및 제상시간 단축의 효과를 비교하여 전기히터의 대체열원으로 축열식 응축폐열의 가능성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2012년 중소기업청 산학협력 중점사업의 지원을 받아 수행한 연구임.

Reference

1. Tashtoush, B., 2000, Natural losses from vegetable and fruit products in cold storage, Food Control, Vol. 11,

- No. 6, pp. 465-470.
2. Wu, J. H., Guang, O., Hou, P., and Xiao, H. B., 2011, Experimental investigation of frost formation on a parallel flow evaporator, *Applied Energy*, Vol. 88, No. 5, pp. 1549-1556.
 3. Huang, J. M., Hsieh, W. C., Ke, X. J., and Wang, C. C., 2008, The effects of frost thickness on the heat transfer of finned tube heat exchanger subject to the combined influence of fan types, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, No. 7, pp. 728-737.
 4. O'Neal, D. L., Peterson, K. T., Anand, N. K., and Schliesing, J. S., 1989, Refrigeration system dynamics during the reverse cycle defrost. *ASHRAE Transactions*, Vol. 95, No. 2, pp. 689-698.
 5. Yang, D. K., Lee, K. S., and Song, S., 2006, Fin spacing optimization of a fin-tube heat exchanger under frosting condition, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 2619-2625.
 6. Kim, K. and Lee, K. S., 2011, Frosting and defrosting Characteristics of a fin according to surface contact angle, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 2758-2764.
 7. Choi, J. M., Shim, Y. H., Lee, S. H., Lee, J., Park, S. R., Kim, Y., and Yoon, J., 2005, An analysis of the control and defrost patents for heat pump, *Journal of SAREK*, Vol. 17, No. 12, pp. 1192-1203.
 8. Shin, Y. H., Oh, W. K., Park, K. H., Kim, Y., and Shin, Y., 2005, Measurement and analysis of show-case field data, *Journal of SAREK*, Vol.17, No. 5, pp. 436-443.