

쇼케이스의 적상 및 제상 특성

노현일* · 박윤철** · 김용찬***

Frosting and defrosting characteristics of a showcase system

H. I. Noh, Y. C. Park and Y. Kim

Key Words : Refrigerator(냉장고), Freezer(냉동고), Multi-evaporator(복수 증발기), Frost(서리), Frosting(적상), Defrosting(제상), On-off cycle(단속운전)

Abstract

An experimental study was conducted to analyze the characteristics of the showcase refrigeration system during frosting and defrosting process. Test showcase was constructed with a cooling capacity of 3RT including 3 evaporators. The dynamic characteristics of the system under frosting and defrosting conditions were investigated. Refrigerant temperature and pressure of the system, dry bulb and wet bulb temperature of air passing through the evaporator, air flow rate and compressor power were measured.

1. 서 론

1.1 연구배경

현대식 냉장 냉동기는 냉동/냉장 식품을 장기간 신선하게 저장할 수 있도록 하는 간단하고 효율적인 시스템으로서, 가정에서 쓰이는 냉장고부터 대형 유통 상가에서 사용하는 오픈 쇼케이스(open showcase)까지 다양하다. 최근 들어서는 유통 구조의 선진화와 대형화에 따라 초대형 쇼케이스의 수요가 급증하고 있는 추세이며 이에 관련한 연구와 개발이 필요하다.

쇼케이스는 저장되는 식품 또는 제품의 신선도를 장기간 유지하고 적절한 온도를 항상 유지할 수 있어야 한다. 기존 쇼케이스 시스템은 냉각 효과를 얻기 위하여 일정 용량의 냉동 시스템을 구성한 후 시스템의 단속운전(on-off)을 통하여 저장 공간의 온도를 조절하기 때문에, 고(庫)내 온도 변화가 불가피하게 존재한다. 또한, 시스템을 장시간 운전했을 경우 증발기에 서리가 생성되며, 이때 증발기에 생성된 서리는 공기 유동을 감소시키고 열교환시 열저항으로 작용하여 열교환기 성능을 저하시키므로 서리 제거의 필요성이 대두된다. 이러한 서리를 제거하기 위한 제상과정이 시작되면

냉동 시스템은 정지하게 되고 이로 인해 저장고내 온도가 상승하며, 이러한 온도 상승은 저장 식품 및 제품에 좋지 않은 영향을 끼치게 된다. 그러므로 식품을 적상에 관계없이 장시간 일정한 상태로 보관할 수 있는 제상 시스템의 개발이 절실히 요구되는 바이다.

본 연구에서는 고내 온도 변화를 최소로 하는 제상 시스템을 개발하는 것을 최종 목적으로 삼아 대형 냉장 냉동기의 적상 및 제상 시스템의 성능 평가에 대한 연구를 수행하였다.

1.2 연구 동향

열교환기 전열면 온도가 0℃이하인 시스템은 착상이 필연적으로 발생하며, 열교환기의 착상 조건에 대한 많은 연구가 국내외적으로 진행되어 왔다. 그러나 열교환기에 발생한 서리가 쇼케이스 시스템의 성능에 미치는 영향 및 제상에 따른 시스템의 성능 변화에 대한 연구는 미미한 실정이다.

서리가 생성된 열교환기에서는 냉매와 공기의 현열 열전달과 잠열 열전달이 동시에 일어나는데, 전자는 냉매와 공기 사이의 온도차로 일어나는 열전달 현상이며 후자는 착상으로 인한 수증기의 질량 전달 및 상변화에 의한 열전달 현상이다. 이 현상에 대해 Kondepudi[1][2] 등은 대수 평균 엔탈피차(LMED)란 개념을 도입하여 현열 및 잠열 열전달을 하나의 값으로 계산할 수 있도록 하고 이

* 고려대학교 기계공학과 대학원

** 고려대학교 공학기술연구소

*** 고려대학교 기계공학과

를 착상 조건에서 작동하는 열교환기의 성능 해석에 적용하였다. 또한 Kondepudi[3] 등은 여러 가지 흰 형상 (평판 흰, 웨이비 흰, 루버 흰)에 대해 착상 실험을 실시하여 각각의 성능을 비교 하였는데, 서리가 성장함에 따라 열교환기 전후의 압력 강하가 점차 커지며, 현열 열전달 계수 및 열교환기 유용도(effectiveness)는 별다른 감소를 나타내고 있지 않다고 발표하였다. 이[4] 등은 냉장고용 증발기의 성능 해석을 위한 실험 및 해석적 연구를 수행하여 증발기의 전열 성능이 공기 유량 또는 냉매 유량에 대한 함수 관계임을 밝혀내고 증발기의 최적 운전 조건 설정을 위한 관계식을 도출하였다.

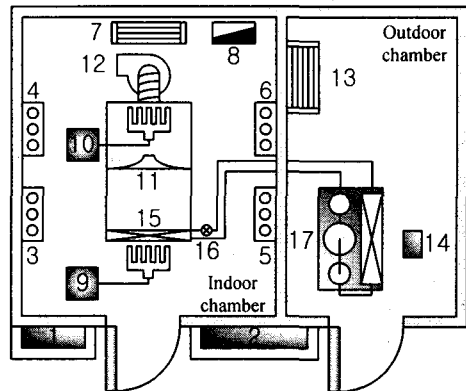
적상 및 제상시 시스템 특성에 관한 연구로서 Martinez-Frias[5] 등은 착상중의 증발기가 공기 대 공기 열펌프의 성능에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하여 열펌프의 운전 조건들과 성능 계수를 예측하였다. 증발기의 공기측 압력강하량, 웬 소요동력, 열펌프의 성능계수 및 서리층의 두께를 시간 흐름에 대해 고찰하였으며, 시간 흐름에 따라 증발기 공기측 압력강하 및 웬 소요동력은 증가하며 열펌프 성능계수는 약간씩 감소하다 급격히 감소하는 경향을 결과로서 제시하였다. O'Neal 등[6]은 오리피스 구경이 공기 열원 열펌프의 역사이클 제상 과정이 시스템의 성능에 미치는 영향에 대해 연구를 수행하여 오리피스 직경의 영향과 제상 사이클 동안 열펌프의 전반적인 성능에 대해 비교하였다. 오리피스의 직경이 커질수록 시스템 성능과 제상 성능이 향상 됨을 고찰하였으나, 시스템과 팽창 장치 사이의 특성 차이를 좀더 명확하게 고찰할 수 있는 연구가 필요함을 지적하였다. 또한 O'Neal 등[7]은 역사이클 제상동안 냉동 시스템의 동적 특성에 관한 연구를 통해 어큐뮬레이터(accumulator)와 TXV가 시스템 응답에 큰 영향을 끼침을 밝혀내었다. 특히, TXV가 가변면적 팽창장치이기 때문에 제상 사이클에 매우 적합하다고 언급하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

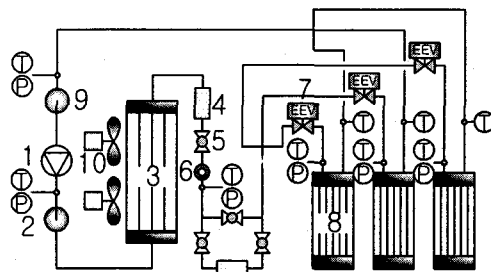
본 실험 장치는 크게 냉동 시스템, 덕트 시스템, 향온 향습실로 구성되어 있다.

냉동 시스템은 냉매로 HCFC-22 를 사용하고 압축기, 응축기, EEV 및 증발기를 각각 3 개씩 사용하는 시스템으로서 그 개략도는 Fig. 1 및 2 와 같다. 각 구성품을 동관으로 연결하고 응축기 출구와 압축기 입구에 각각 수액기(receiver)와 어큐뮬레이터를 장착하였다. 3 대의 증발기에 가능한 동일한 냉매유량이 흐르도록 하기 위하여 응축기 출구부터 압축기 입구까지 냉매 배관을 동일한 길이



1 - Data acquisition system 11 - Nozzle
2 - Chamber control panel 12 - Fan
3, 4, 5, 6 - Heater 13 - Outdoor refrigerator
7 - Indoor refrigerator 14 - Outdoor psychrometer
8 - Humidifier 15 - Evaporator
9 - Inlet psychrometer 16 - Expansion valve
10 - Outlet psychrometer 17 - Outdoor Unit

Fig. 1 Schematic diagram of chamber and system



⊙ Thermocouple ⊕ Pressure transducer

1 - Compressor 6 - Sight glass
2 - Receiver 7 - Electronic expansion valve
3 - Condenser 8 - Evaporator
4 - Filter dryer 9 - Accumulator
5 - Ball valve 10 - Condenser fan

Fig. 2 Schematic diagram of refrigeration system

로 하였다. 초기 시스템 내의 잔존 불순물을 제거하기 위해 필터 드라이어(filter dryer)를 응축기 출구에 장착하였다.

덕트 시스템은 덕트, 노즐, 건습구 온도 측정장치, 웬, 차압계 및 열교환기 고정대로 구성되어 있다. 열교환하는 공기의 풍량을 측정하기 위해 덕트에는 노즐과 차압계를 설치하였으며, 열교환기 입출구 온도 측정을 위해 건습구 온도 측정 장치를 사용하였다. 또한 증발기와 열교환하는 공기는 웬을 이용하여 흡입 방식으로 순환시켰고 응축수 받이를 설치하여 서리량을 간접적으로 측정할 수 있도록 하였다.

향온 향습실은 건구 및 습구를 제어할 수 있도록 제어하였으며, 저온을 유지하기 위해 추가적으로 2RT 의 냉동기를 장착하였다.

2.2 실험 방법

실험은 크게 적상에 따른 시스템 특성 평가와 단속 운전에 의한 적상/제상 특성 평가의 두 가지로 나누어 수행하였다.

적상에 따른 시스템 특성 평가 부분은 실내 조건을 일정하게 유지한 상태에서 시험 냉동기를 가동하여 운전 시간에 따른 적상량과 시스템의 성능 특성을 함께 고찰하였다. 시스템을 1시간부터 6시간까지 운전하여 운전시간에 따른 서리량을 측정하였으며, 운전 시간에 따른 압축기 소요동력, 냉동용량, 성능계수와 시스템 주요 부위의 온도 및 압력 변화를 측정하였다.

단속 운전에 의한 제상/적상 특성 부분은 적상에 따른 시스템 특성 평가 결과를 기초로 하여 제상 시작 시간과 제상 유지 시간을 결정하였다. 결정 방법은 시스템을 최적 제상 시점까지 운전한 후 적상 시간의 일정 시간 동안 시스템을 정지시킨 다음 다시 시스템을 가동하여 운전 성능을 측정하였다. 측정된 성능을 이용하여 냉동 용량, 압축기 일 및 성능계수를 계산하고 각 값을 비교 고찰하였다.

두 실험 모두 일정한 조건 아래에서 실험을 수행하였으며, 실험 조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Test condition for frost/defrost experiment

Outdoor temperature	Dry bulb temp. 35°C	
Indoor temperature	Dry bulb temp. 15.4°C Relative humidity 80%	
EEV step	EEV 1	178/356 pulse
	EEV 2	178/356 pulse
	EEV 3	178/356pulse
Air flow rate	Evap. 1	0.074 kg/s
	Evap. 2	0.119 kg/s
	Evap 3	0.116 kg/s

3. 결과 및 고찰

3.1 적상에 따른 시스템 특성 평가

Fig. 3은 운전시간에 따른 적상량을 그래프로 나타낸 것이다. 초기 운전시 적상량은 점차로 증가하지만 일정시간 이상이 흐르면 적상량은 거의 증가하지 않는 경향을 볼 수 있다.

적상은 증발기 입구쪽부터 시작하여 점차로 열교환기 전부분으로 퍼지면서 이루어지는데, 약 4시간이 지나면 열교환기 면적의 반정도가 서리에 덮히게 되며 열교환기 하부는 서리에 의해 공기의 유동이 완전히 차단된다. 이후 열교환기를 덮고

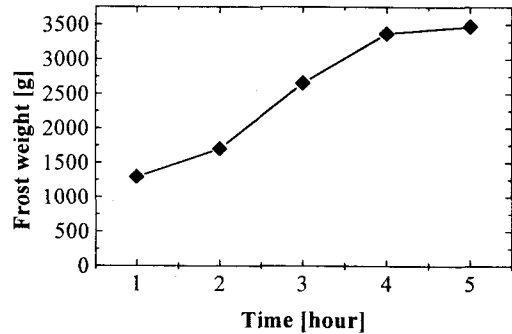


Fig. 3 Variation of frost weight with time

있는 서리의 면적이 일정한 상태에서 점차 흰사이를 막는 역할을 한다. 그 후 서리가 덮혀 있는 열교환기 부분의 공간을 모두 막게 되면 더 이상 서리는 거의 증가하지 않고 일정한 양을 유지한다.

특히 적상 과정에서 유의하여 관찰할 부분은 열교환기 하부에서 일어나는 공기 중의 수증기가 열교환기 표면에서 얼어붙어 서리가 생성되는 과정과 열교환기 중상부에서 생성된 응축수가 흰을 따라 미끄러지면서 열교환기 하부로 이동하여 얼어붙는 서리 생성 과정이다. 기존의 서리에 관한 연구 논문들은 두 번째 서리 생성과정을 고려한 것이 거의 없었으며, 앞으로 연구가 진행되어야 할 부분이다.

Fig. 4는 운전시간에 따른 성능계수를 나타낸 것이다. 기존의 연구 결과는 적상이 진행될수록 초기 성능계수는 약간씩 감소하나 일정 시간이상 적상이 진행되면 성능계수가 급격히 감소하는 경향을 보인다. 그러나 본 연구에서는 초기 성능계수가 약간 상승한 후 점차로 계속해서 감소하는 경향을 보인다. 이는 첫째, 흰 간격이 10 mm인 증발기의 특성상 상당한 양의 서리가 쌓이기 전까지는 서리가 흰과 흰 사이를 막아 공기의 유동을 급격히 감소시키지 않기 때문이다. 둘째, 열교환기 용량의 감소에 따라 압축기 동력도 감소하기 때문에 성능계수가 급격히 감소하지 않는다.

냉동 용량과 압축기 소요동력의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 냉동용량은 시스템을 가동한 후 점차로 증가하여 최고 5 kW의 냉동용량을 발휘하였으며 이후 감소하는 경향을 보여준다. 초기 냉동용량의 증가는 착상으로 인한 열교환기 면적 증가가 가장 큰 영향으로 사료된다. 이후 냉동 용량의 감소는 착상이 더 진행되면서 서리의 열저항 작용 및 공기 유로 간섭 작용을 원인으로 볼 수 있다.

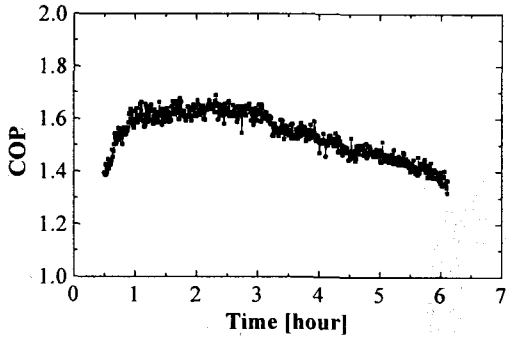


Fig. 4 Variation of COP with time

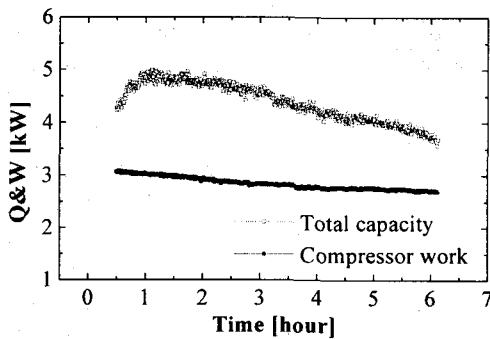


Fig. 5 Variation of refrigeration capacity and compressor power with time

Fig. 6은 시스템의 각 주요 부분 압력 변화를 나타낸다. 운전 시간이 길어질 수록 전체 압력이 점차로 낮아지는 경향을 확인할 수 있다. 이런 경향이 나타나는 원인은 열교환기 용량 감소에 따른 냉매유량의 감소가 원인으로 생각된다.

Fig. 7은 운전시간에 따른 각 증발기 입구 냉매 온도의 변화를 나타낸다. 각 증발기 입구 냉매 온도는 점차로 낮아지며, 이는 증발기 표면에 착상된 서리가 열저항으로 작용하여 증발압력을 점차로 낮추기 때문이다.

특히, 각부의 압력 및 온도는 측정이 용이한 상태량이므로 제상 시점을 결정하는데 좋은 제어 변수가 될 수 있다.

3.2 단속 운전에 따른 적상/제상 특성 평가

최고 냉동용량의 10% 감소 시기를 판별하여, 그 지점을 제상 시작 지점으로 결정하였다. 최고 냉동용량의 10% 감소 지점은 시스템 운전 후 약 4시간 경과 후이며, 4시간을 기준 시간으로 제상 시간을 40분, 60분 및 80분으로 하여 시스템을 사이클 운전하였다.

Fig. 8은 각 제상 시간에 따른 시스템의 성능계

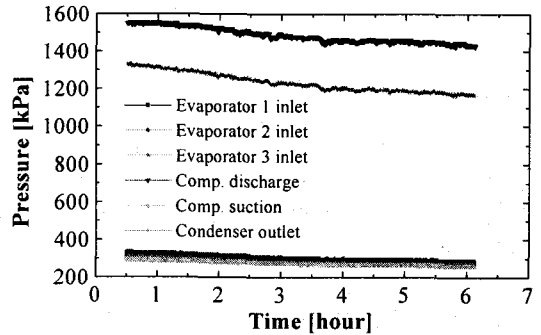


Fig. 6 Pressure variation of each component with time

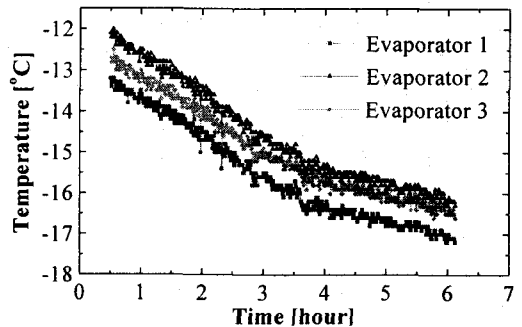


Fig. 7 Variation of evaporator inlet refrigerant temperature with time

수를 보여준다. 적상 중의 성적 계수의 변화는 제상 시간에 따라 첫번째 운전과 제상을 마치고 난 두번째 운전이 별다른 차이를 보이고 있지 않다. 그 원인은 제상 전 후 사이클을 비교하여 냉동용량은 줄었지만, 그에 따라 압축기 소요 동력도 같이 감소했기 때문이다.

Fig. 9와 10은 제상 전 후 냉동용량과 압축기 소요동력을 비교한 그래프이다. 냉동용량은 제상 시간이 40분일 때 약 10%정도 감소하였으며 제

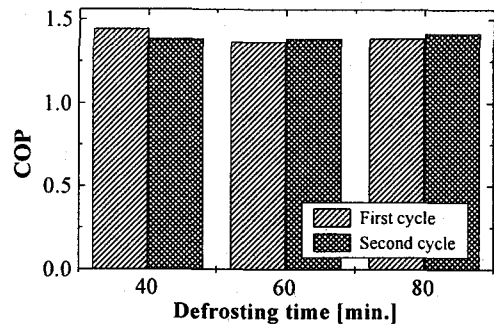


Fig. 8 Integrated COP of before and after defrosting with defrosting time

상시간이 80분일 때 약 1%정도 감소하였다. 40분 제상 시간 운전에서 냉동용량이 크게 감소한 이유는 증발기 표면의 서리가 모두 제거되지 않은 상태에서 사이클이 다시 운전되어, 열교환기 능력이 회복되지 않았기 때문이다. 반면에 80분간 제상 시간을 거친 증발기는 거의 초기 상태의 냉동능력을 회복하였다. 그러므로 적절한 제상 시간의 확보가 제상 시스템을 구성하는데 중요한 인자임을 알 수 있다.

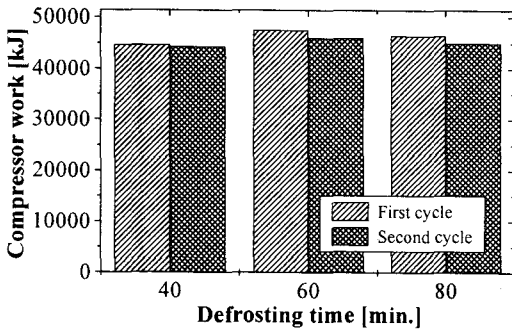


Fig. 9 Total capacity of before and after defrosting with defrosting time.

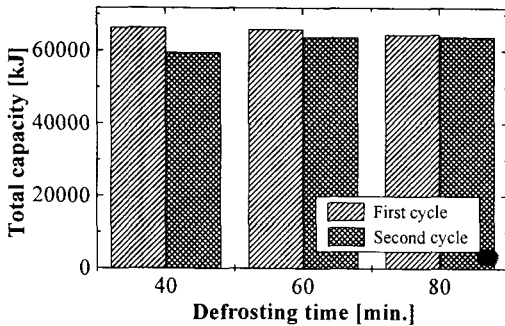


Fig.10 Compressor work of before and after defrosting with defrosting time.

4. 결론

쇼케이스용 열교환기에 대해 적상 및 제상 실험을 실시하였다. 적상 과정 중 시스템의 특성을 고찰하였으며 제상 시간에 따른 시스템의 응답에 대해서도 고찰하였다.

적상이 진행될 수록 성능계수와 냉동용량이 증가하다 감소함을 알 수 있었다. 그러나 냉매유량이 감소하기 때문에 압축기 동력은 지속적으로 감소하였다. 또한 시스템 주요부의 압력과 온도가 감소함을 알 수 있었는데, 제상 시점 결정시 두

가지 인자가 널리 쓰일 수 있음을 알 수 있다.

4시간 운전 후 제상 시간을 40분 확보하였을 경우, 제상 후 냉동능력이 초기 운전시 냉동능력에 비해 약 10% 감소하였으며, 제상 시간을 길게 할 수록 냉동능력 감소가 적었다. 따라서 연구결과 적절한 제상 시간 확보가 제상 시스템을 구성하는데 중요한 인자임을 알 수 있다.

후 기

본 논문은 산업자원부 산업기반기술의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) S.N. Kondepudi and D.L. O'Neal, 1993, "Performance of Finned-Tube Heat Exchangers under Frosting Conditions : I. Simulation Model", *Int. J. of Refrig.*, Vol. 16, No.3., pp. 175~180
- (2) S.N. Kondepudi and D.L. O'Neal, 1993, "Performance of Finned-Tube Heat Exchangers under Frosting Conditions : II. Comparison of Experimental Data with Model", *Int. J. of Refrig.*, Vol. 16, No.3., pp. 181~184
- (3) S.N.Kondepudi and D.L. O'Neal, 1990, "The Effect of Different Fin Configurations on the Performance of Finned-Tube Heat Exchangers Under Frosting Conditions", *ASHRAE Trans.*, Vol.96, Pt 2, pp. 439-444
- (4) 이태희, 이장석, 박종진, 김병조, 이상욱, 윤점열, 1997, "냉장고용 증발기의 성능 해석을 위한 실험 및 해석적 연구", *공기조화 냉동공학회 '97 동계학술발표회 논문집*, pp. 196-203
- (5) J. M. Frias and S. M. Aceves, 1997, "Effects of Evaporator Frosting on the Performance of an Air-To-Air Heat Pump", *Proceeding of the ASME Advanced Energy Systems Division, AES-Vol.37*, pp. 357~363
- (6) D.L. O'Neal, K. Peterson and N.K. Anand, 1991, "Effect of Short-Tube Orifice Size on the Performance of an Air Source Heat Pump During the Reverse-Cycle Defrost", *Int. J. of Refrig.*, Vol 14, pp. 52~58
- (7) D.L. O'Neal, K.T. Peterson, N.K. Anand and J.S Schliesing., 1989, "Refrigeration System Dynamics During the Reverse Cycle Defrost", *ASHRAE Trans. VA-89-9-1*, pp. 689~698