

공기분사식 제상장치 개발에 관한 실험적 연구

한인근* · 김창영* · 김재돌** · 윤정인*
(1999년 3월 31일 접수, 2001년 1월 29일 심사완료)

Experimental Study for Development of Air Eject Defrost Equipment

In-Geun Han, Chang-Young Kim, Jae-Dol Kim and Jung-In Yoon

Key Words: Refrigerator(냉동기), Evaporator(증발기), Nozzle(노즐), Air Eject(공기 분사), Cold Storage(냉동창고), Unit Cooler(유닛 쿨러)

Abstract

One of the problems in a refrigerator operation is the frost formation on a cold surface of the evaporator. The frost layer is formed by the sublimation of water vapor when the surface temperature is below the freezing point. This frost layer is usually porous and formed on the cold surface of the evaporator. The frost layer on the surface of a evaporator will make side effect such as thermal resistance. However, these important factors have not been used in determining the defrosting period. Therefore, the proper defrosting operation period based on the new defrosting method is very important, and make a comparison between conventional method like electric defrost and new method such as air eject defrost. Air eject defrost method was superior to electric defrost method in compression work, evaporation pressure, evaporation temperature.

1. 서 론

습공기가 0℃ 이하 또는 노점온도 이하의 고체 벽에 접하면 공기중의 수증기는 응축된 후 벽면에 상으로 존재하게 된다. 이와 같은 현상을 착상(frost)이라 하며, 이 상은 결정체로 되어 열전도율이 낮은 공기를 포함한 다공질로 열전달면에서는 열적 저항체로 된다. 냉동장치에 있어 종래에는 착상에 대한 예측에 있어서 열전달면에서 장치에 치명적인 영향을 미치지 않는다는 견해⁽¹⁾도 있었기 때문에 체계적인 연구가 이루어지지

않았다. 그러나 최근 착상은 냉동기술의 발전에 따라 냉동·냉장산업뿐만 아니라 공기를 열원으로 한 히트펌프, 액화 천연가스, 극저온 유체의 이용 등 공조분야에서도 여러 가지 문제를 야기시켜 매우 중요한 관심의 대상이 되고 있다. 즉 착상으로 인한 열전달 불량으로 냉장실내의 온도 강하가 어렵고, 증발기의 완전증발이 이루어지지 않아 액압축에 따른 장치의 소손 및 소요동력이 증가하는 등 많은 문제를 야기시킨다. 이러한 문제점들을 방지하기 위하여 적당한 시기에 상을 제거하여 장치의 안전성을 도모함과 동시에 증발기의 효율을 높이고, 냉동능력을 증대시킬 필요가 있다. 이와 같이 상을 제거하는 과정을 제상(defrost)이라 하며, 제상의 방법에는 고압가스를 이용한 제상방법과 물을 살수하는 제상방법, 그리고 전기를 이용한 전열 제상방법 등이 있다. 그러나 이들 제상방법들은 제상과정 중 여러 가지 문제점을 가지고 있다. 즉, 제상중 냉동기의 운전정지에 따른 고내온도 상승, 고내온도 상승에 따른 보관물품의 품질변화, 상승된 온도를 적정온도로 환원하기 위한 전력사용량 증가 및 연

* 부경대학교 대학원 냉동공조공학과

** 회원, 동명대학 건축기계설비과

† 책임저자, 회원, 부경대학교 냉동공조공학과

E-mail : yoonji@dolphin.pknu.ac.kr

TEL : (051)620-6446 FAX : (051)620-6446

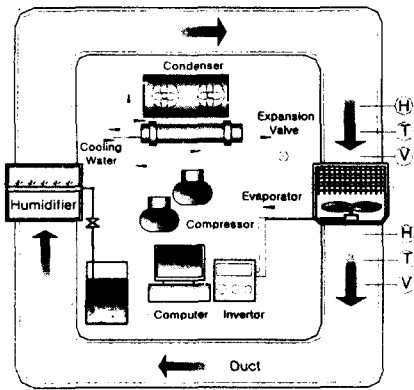


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

속공정의 경우 제상 중에는 상품의 생산은 중단되는 등 여러 가지 문제가 있다. 그러므로 목적에 따라 설비비, 운전중 유지경비, 보수의 용이성, 액백(liquid back)방지, 부하증가 등을 고려하여 가능한 한 짧은 시간에 적절히 제상을 할 수 있는 방식을 선택해야 한다.

제상에 관한 학문적 연구로 村井 進⁽²⁾은 핫가스 제상방법을 통하여 상층이 용해되는 과정을 실험을 통하여 밝혔으며, 高田 保⁽³⁾는 천정 코일식 증발기에서 자동제상기를 이용한 제상방법을 제시하였다. 그러나 이와 같은 연구들은 기존 방법^(4~5)과 크게 차이가 없으며 장치의 효율향상에도 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 압축된 고압의 공기를 팽창노즐을 통하여 상에 직접 분사시켜 증발관에 부착된 상층을 제거하는 새로운 제상방법인 고압 공기분사식 제상법을 고안하여 그 적용 가능성을 검토하고, 기존방식과의 비교 실험을 통하여 그 우수성을 밝혔다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸다. 장치는 크게 압축기, 응축기, 팽창밸브 및 시험부인 증발기와 덕트로 구성되어 있다. 그리고 착상실험에 필요한 가습장치와 고압

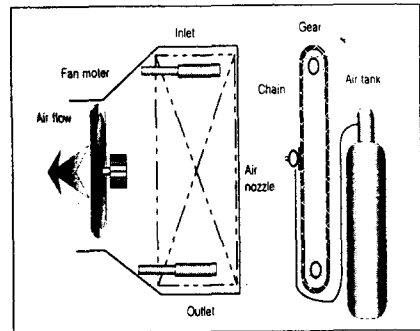


Fig. 2 Detail of test section

Table 1 Specifications of evaporator and fan

	Component	Specification
Design Conditions	Number of columns	11
	Number of rows	6
	Tube O.D.	15.8 (mm)
	Fin material	Aluminium
	Fin pitch	8.5 (mm)
	Fin thickness	0.2 (mm)
	Fin type	Plate type
	Fan	350φ, 100W, 4P



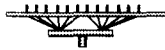
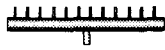
공기 분사장치 및 증발기 입출구에 온도, 습도, 풍속 및 압축기 소요동력 측정을 위한 파워미터 등의 계측장치를 설치하였다.

압축기는 1.5kW급 밀폐형 압축기를 사용하였으며, 응축기는 헬렌튜브식 수냉식을 사용하였다. 팽창밸브는 일반적으로 실재장치에 많이 사용되고 있는 온도식 자동 팽창밸브를 사용하였으며, 실험시 일정한 조건을 유지하기 위해서 수동식 팽창밸브도 병용 설치하였다.

Fig. 2는 시험부인 증발기에 설치된 공기압 제상장치의 세부 상세도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 상·하단의 기어에 의해 구동되는 체인에 고압 공기 분사노즐을 설치하여 노즐이 상하로 이동할 있도록 하였으며, 노즐에서 분사되는 고압공기는 공기탱크로부터 공급하였다.

실험 모델로 사용된 증발기는 Table 1과 같이

Table 2 Specifications of nozzle type

Nozzle Type	Diameter (mm)		Nozzle number (EA)	
	Inlet	Outlet		
	A	15	3	16
	B	15	2.5	24
	C	15	2	25
	D	15	3.5	24

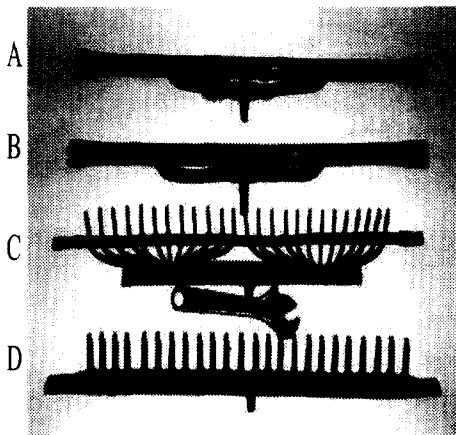


Fig. 3 Photograph of nozzle type

나관에 0.2mm의 알루미늄 핀이 부착된 플레이트 핀 코일형 열교환기로서 전체 열전달 면적은 핀 면적을 합쳐 4.14m²이며, 현행 냉장창고에 많이 사용되고 있는 것을 이용하였다.

덕트는 냉장고 조건을 고려한 축소형으로 내부 관찰이 용이하도록 아크릴로 제작하였다. 제어장치로는 증발기에 온도센스를 부착하여 전자밸브를 자동으로 개폐시키는 온도식 자동제어방식을 사용하였다. 그리고 Table 2와 Fig. 3은 본 연구에 사용된 4가지 형태 노즐의 개략도와 사진을 나타낸다.

2.2 실험방법⁽⁶⁻⁸⁾

실험은 먼저 증발기에서 착상실험을 수행한 후 제상실험을 실시하였다. 착상실험에서는 냉매의

증발온도를 -20℃로 일정하게 유지하였고, 습도를 조절할 수 있는 초음파 가습기를 사용하여 상대 습도를 85%, 90%, 95%의 세 가지 조건으로 조절하였으며, 착상의 진행속도를 관찰하기 위하여 증발기에서의 풍량을 일정하게 조절 유지하였다.

풍량조절은 환에 인버터를 설치하여 회전수를 1480 rpm과 1600 rpm의 2가지 종류로 선택하여 실험을 하였다. 착상실험이 완료되면 고압공기 분사노즐을 통하여 일정한 압력으로 고압의 공기를 증발기에 분사하여 상을 제거하는 제상실험을 실시하였다.

제상실험에서는 8kgf/cm²의 고압공기를 압력탱크로부터 공급받아 일정한 압력으로 착상된 증발기에 분사하였다. 이때, 각 노즐에 있어서 고압의 공기 공급부인 입구직경은 동일하고, 출구직경 및 노즐 개수는 달리하였으며, 분사되는 공기압력은 각 노즐 개당 약 0.35~0.5kgf/cm² 범위에서 풍량 1.8×10⁻⁴~5.5×10⁻⁴m³/min에서 실험하였다.

그리고 노즐은 증발기 상하부로 왕복운동이 가능하도록 설치하여 증발기의 핀에 부착된 상을 제거하였다. 또한 기존의 제상방법과 비교 검토하기 위하여 본 연구에서는 전열식 제상방법을 선택하였다. 전열제상에는 증발기의 냉각코일 사이에 전열히터 0.4kW, 6개를 삼입하고 착상이 진행된 후 히터를 가열하여 제상을 할 수 있도록 하였으며, 2가지 제상방식에 있어서의 실험조건은 서로 동일한 조건에서 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 노즐 형상에 따른 풍량 특성

Fig. 4는 공기압력을 8kgf/cm²으로 일정하게 공급하였을 경우 Table 2에서와 같은 4가지 종류의 노즐을 대상으로 각 노즐길이에 따른 풍량변화를 나타낸 것이다. 그림에서 A형 노즐이 길이에 따라 거의 일정한 압력(각 노즐당 약 0.5kgf/cm²)하에서 균일한 풍량으로 가장 많은 풍량이 분사되는 것으로 나타났다. B, C형의 경우도 각 노즐별 분사되는 풍량은 일정하지만 A형에 비해 분사되는 풍량이 적고, D형 노즐은 노즐길이에 따른 풍량의 분배가 일정하지 못하고 양 끝 쪽으로 높은 경향을 나타내며, 풍량도 적어 본 실험의 제상 조건에는 적합하지 못하였다. 따라서, 상기의 결

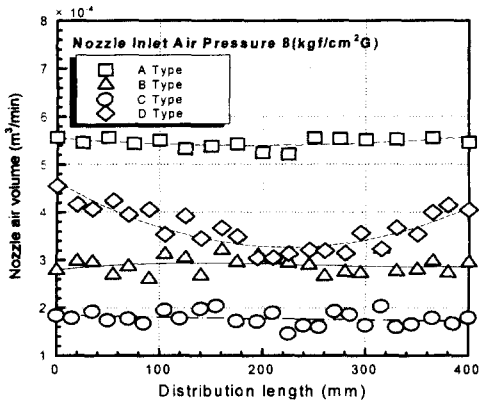


Fig. 4 Distribution air volume of each nozzle

과를 바탕으로 본 실험에서는 A형 노즐을 채택하여 기존의 전열 제상법과 비교하였다.

3.2 시간경과에 따른 착상현상

Fig. 5는 냉매의 증발온도를 -20℃로 일정하게 유지하고, 팬의 회전수를 1480 rpm과 1600 rpm으로 유지한 상태에서 상대습도를 85%, 90%, 95%의 조건하에서 시간에 따른 착상 두께의 변화를 나타낸 것이다. 착상 두께의 측정위치는 판관 전체에서 측정하는 것이 곤란하여 증발기를 상중단으로 나누어 1, 3, 9단에서 각각 반복 측정하여 평균하였다. 착상의 두께는 그림에서와 같이 팬의 회전수가 높을수록 초기운전에서부터 높게 나타났으며, 동일 회전수 조건에서 보면 상대습도가 낮은 쪽보다 높은 쪽이 착상두께가 높고, 시간이 경과함에 따라 각각 일정하게 증가하는 것으로 나타났다.

그림에서 팬의 회전수가 높을수록 착상두께가 높게 나타나는 것은 상대적으로 많은 양의 습공기가 냉각관을 통과하기 때문으로 생각된다. 또한 상대습도가 높은 쪽의 상 두께가 높은 것은 많은 양의 수증기가 냉각관에 접촉되기 때문으로 판단된다.

상층의 결정구조도 회전수가 높은 쪽이 조밀한 상태의 결정상으로 나타났으며, 회전수가 낮을수록 밀도가 낮은 결정상이 형성되었다. 상층의 결정구조 차이는 회전수가 높을 때 부착된 상이 늦을 때 부착된 상보다 전열제상이나 공기분사에 의한 제상시 모두 상 제거에 많은 시간이 소요되

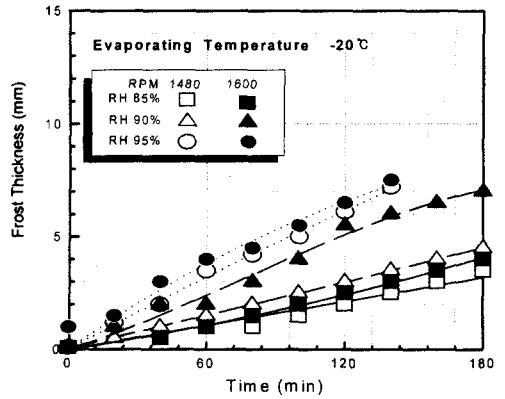


Fig. 5 Variation of frost thickness on time in the evaporator

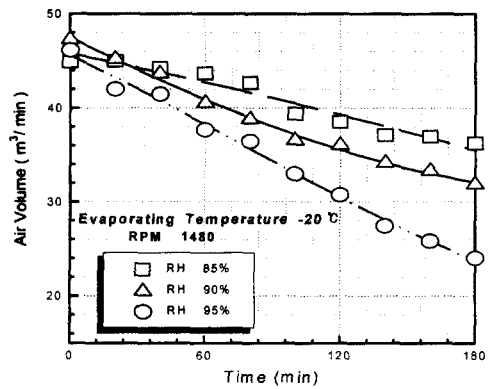


Fig. 6 Variation of air volume on time

어 조밀한 형태로 착상되는 것을 확인 할 수 있었다. 이것은 상대적으로 공기의 압력과 습공기 중의 수증기가 냉각관에 접촉할 수 있는 시간적 여유차에 의한 결과로 생각된다.

Fig. 6은 냉매 증발온도 -20℃, 팬 회전수 1480 rpm일 때, 상대습도 85%, 90%, 95% 조건에서 시간경과에 따른 증발기 입출구 풍량의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 시간이 경과함에 따라 증발기에서의 풍량변화는 상대습도가 높을수록 풍량은 현저하게 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 시간이 경과할수록 그리고 상대습도가 높을수록 상두께의 증가에 따라 공기의 통과면적이 감소하기 때문이며, 이것은 상대적으로

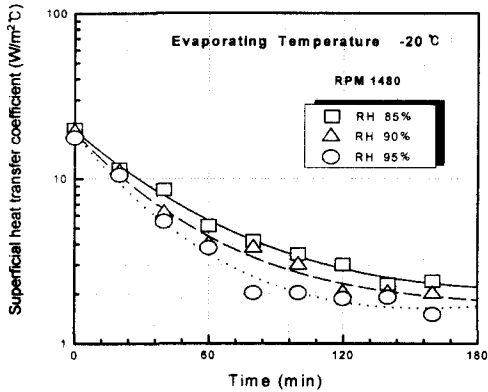


Fig. 7 Variation of superficial heat transfer coefficient on time

팬의 압력손실 증대와 동시에 급속한 열전달 감소를 야기시킬 것으로 판단된다.

Fig. 7은 Fig. 6과 동일한 조건에서 착상시 시간경과에 따른 증발기에서의 겉보기 열전달계수의 변화를 나타낸 것이다. 겉보기 열전달계수의 계산은 다음과 같은 식⁽⁹⁻¹⁴⁾을 사용하였다.

$$h_{af}^* = \frac{Q_a}{A_T \cdot \Delta t_m} \quad (1)$$

여기서, Q_a 는 증발기에서 공기측으로의 전열량(kcal/h)이며, A_T 는 착상을 고려한 관부와 핀부의 면적(m^2)을 나타낸다. 그리고 Δt_m 은 대수평균 온도차로 다음과 같이 계산하였다.

$$\Delta t_m = \frac{t_{ai} - t_{ao}}{\ln \frac{t_{ai} - t_p}{t_{ao} - t_p}} \quad (2)$$

여기서, t_{ai} , t_{ao} 는 증발기의 입·출구측 공기온도이고, t_p 는 관벽온도를 각각 나타낸다. 그리고 증발기에서 공기측으로의 전열량은 다음 식과 같이 계산하였다.

$$Q_a = V_a \cdot A_T \cdot c_p \cdot \rho \cdot (t_{ai} - t_{ao}) \quad (3)$$

여기서, V_a 는 공기의 풍속(m/s), A_T 는 전열면적

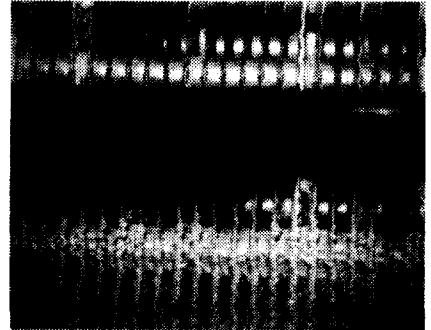


Fig. 8 Defrost phenomenon of air eject defrost in the evaporator

(m^2), c_p 는 공기의 비열(kcal/kg·°C), ρ 은 공기의 밀도(kg/m^3)를 각각 나타낸다.

상기의 식으로부터 공기측으로의 전열량은 착상이 진행됨에 따라 공기의 풍속, 전열면적 및 입출구 공기의 온도차에 따라 차이가 났으며, 본 실험의 범위에서는 약 11.8kW~2.0kW 범위로 나타났다. 그림에서 착상이 이루어지지 않은 초기 운전시와 착상이 수반되었을 경우를 비교하면 착상이 시작되면서부터 급격하게 열전달 계수는 감소하고 있으며, 상대습도가 높을수록 감소 폭은 증가하고 있다. 이것은 시간이 경과함에 따라 상층이 증가하고, 증가된 상층은 열저항체로 작용하여 증발기의 관부와 핀부에서의 전열효율이 저하되고, 따라서 공기측 열량의 감소로 겉보기 열전달계수는 감소하는 것으로 생각된다.

3.3 공기분사식 제상효과

Fig. 8, 9, 10은 동일조건에서 착상이 이루어진 후 냉매의 증발온도를 일정하게 유지한 상태에서 기존의 전열에 의한 제상과 공기분사식 제상에 의한 제상결과를 나타낸 것이다.

Fig. 8은 착상이 된 후 고압분사 노즐로 상을 제거하는 과정을 나타낸 것이다. 제상 직전 착상의 상태는 냉각면의 국소적인 불균일 핵 형성 과정을 지나 상층의 성장기로, 상층이 다공성인 상태에서 제상을 실시하였다. 그림에서 사진의 상부는 고압공기에 의해 상이 제거된 상태를 나타내며, 하부는 착상이 이루어진 상태를 나타낸다.

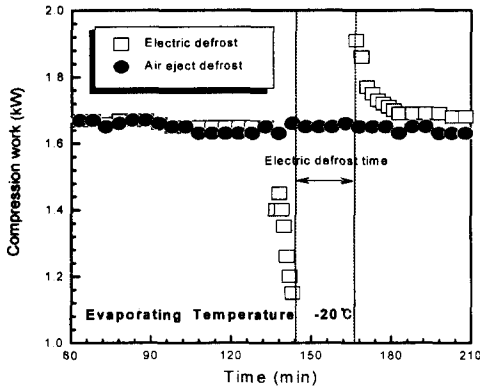


Fig. 9 Variation of compression work on time in the evaporator

그림에서와 같이 상이 제거된 경우와 제거되지 않은 경우가 뚜렷이 구분되고 있다.

Fig. 9는 2가지 제상법으로 제상을 실시하였을 경우 압축기 소비동력의 변화를 나타낸 것이다.

그림에서 가운데 실선은 전열제상의 시작과 종료시간을 나타낸다.

전열식 제상의 경우 증발기의 관균이나 핀부가 완전히 건조한 상태에 이르기까지 제상 시간은 약 20분이나 소요되었다. 그리고 제상 종료 후 압축기의 재 기동시에는 기동 소비동력이 1.91 kW 정도로 급격하게 증가한 후 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 실제 장치에 있어서 냉동기의 운전시간이 장시간에 걸쳐 이루어질 경우 반복될 결과이므로 소비동력의 관점에서는 대단히 불리할 것으로 판단된다. 그러나 공기분사식 제상법은 제상 중에도 압축기의 소비동력은 일정하게 유지되고 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 제상 시간도 제상노즐이 증발기 상하부로 이동하면서 제상하는데 약 10초 정도 소모되어 상당히 짧아 현재 사용되고 있는 제상 방법들의 결점인 제상시간을 상당히 단축할 수 있었다. 그리고 제상시 노즐로부터 분사되는 공기량은 고내 순환 공기량에 비해 약 0.02% 정도로 미소하여 고내온도의 시간적 변화에는 거의 영향을 미치지 않았다. 또한, 압축기가 정지할 필요가 없으므로 제상 후에도 압축기의 무리한 소비동력

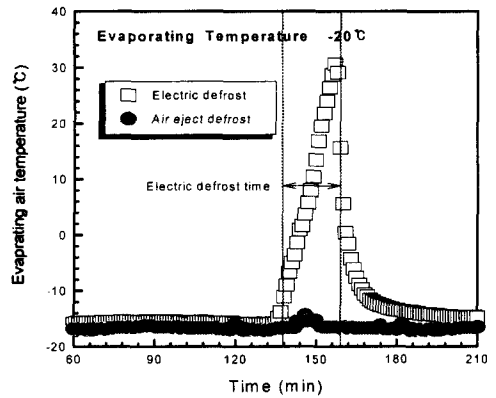


Fig. 10 Variation of evaporating outlet air temperature on time

의 변화가 없고, 매우 안정된 상태로 장치를 운전할 수 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 전열식 제상법과 공기분사식 제상법과의 제상 운전시 증발기 출구측 공기 온도변화를 나타낸 것이다. 그림에서 전열식 제상은 제상시 전열로 인한 발열에 의하여 증발기 주위온도가 급격히 상승하여 제상이 완료된 후 압축기 재 기동시 강하하고 있다. 이때, 공기온도는 약 30°C 정도까지 상승하였으며, 이와 같은 경우는 실제 냉동창고 등에 있어서는 고내 온도변화에 큰 영향을 미치고 보관물품의 온도변화를 야기시켜 물품의 품질변화에도 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 그러나 공기분사식 제상은 제상 중에도 거의 일정한 온도 변화를 유지하는 것으로 나타났다. 이 경우 출구측 공기온도 변화는 공급된 압축 공기에 의해 약 2°C 정도의 온도상승을 보였다. 상기의 전열식 제상 결과는 村井 進⁽²⁾가 보고한 핫가스 제상법으로 제상을 하였을 때, 증발기 출구 공기온도가 약 30°C 정도로 상승하고, 제상 시간도 약 20분 정도 소모되는 것과 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 11은 증발기에서 제상운전시 냉매측 증발 압력의 변화를 전열식과 공기분사식 제상법을 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 10의 공기온도 변화와 유사하게 냉매의 증발압력은 전열식의 경우 제상 중 급격히 상승하고 있고, 공기분사식의 경

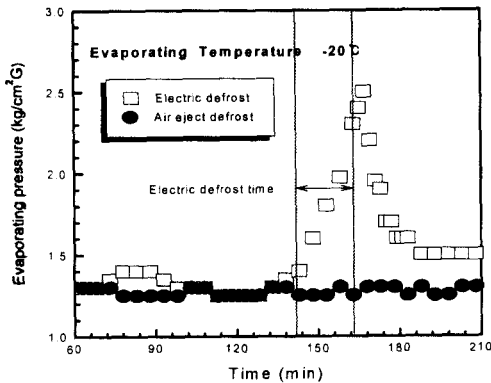


Fig. 11 Variation of evaporating pressure on time

우는 상당히 안정적인 경향을 나타내고 있다.

따라서 공기분사식의 경우는 냉동기의 운전 중에도 제상이 가능하므로 정상적인 운전상태의 증발압력을 나타내어 장치를 안정적으로 운전할 수 있다. 그러나 전열식의 경우는 제상운전시 전열에 의한 히터의 가열로 인하여 냉매측 압력이 급격하게 상승하며 장치의 운전면에서 상당히 불안정하게 운전되는 것을 알 수 있다.

4. 결론

저온용 증발기에서 착상의 기초적 현상을 파악하고, 새로운 제상장치 개발을 위해 기존의 전열식 제상법과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 증발기에서의 착상은 상대습도가 높을수록, 그리고 팬의 회전수를 증가시켜 통과 공기량이 증가할수록 착상 두께는 증가하였다.

(2) 기존의 전열식 제상법은 제상 운전시 냉동기가 정지되고, 전기히터 가열로 인하여 냉매의 증발온도 및 압력이 상승하였으며, 이로 인하여 증발기 출구의 공기온도도 상승하여 실제 장치에서는 여러 가지 문제를 야기시킬 수 있다. 그러나 공기분사식 제상법은 제상 중에도 장치의 연속운전이 가능하며, 냉매의 증발온도, 압력 및 출구 공기온도도 거의 변화가 없이 안정적인 운전이 가능하였다.

(3) 공기분사식 제상법의 경우는 아직 최적 노출설계에 대한 추가적인 연구가 필요하지만 기존

의 제상법 보다는 제상시 시스템의 안정적 운전, 제상시 추가적인 동력소비, 고내 온도변화의 영향 등에서 상당히 우수한 결과를 얻을 수 있었다.

(4) 본 제상법은 증발온도가 0°C이하인 각종 핀코일식 증발기에 사용가능하며, 특히 증발온도가 낮고, 제상회수가 많은 식품가공용, 아이스크림 제조공장 등 연속적으로 물품을 생산하는 분야에서 더욱 효과적일 것으로 판단된다. 또한 비용면에서도 기존의 압축공기나 장치의 용량에 맞는 별도의 공기압축기 정도면 사용 가능하여 기존 제상법과 비교하면 상당히 경제적인 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Hayashi, Y., et al, 1977, "Study of Properties Correlating with Frost Formation Types," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 99, No. 239, pp. 885~892.
- (2) 村井 進, 1987, "ホットガスデフロストの省エネルギー効果," *冷凍*, Vol. 62, No. 716, pp. 56~61.
- (3) 高田 保, 1992, "天井冷却管自動除霜機," *冷凍*, Vol. 67, No. 779, pp. 50~55.
- (4) 青木和夫·林 勇二郎, 1980, "霜層の成長と融解," *冷凍*, Vol. 55, No. 632, pp. 1~10.
- (5) 安立正明, 1997. "ヒートポンプ式ルームエアコンにおける着霜現象について," *日本冷凍協會論文集*, Vol. 52, No. 598, pp. 9~20,
- (6) 이관수, 이태희, 김우승, 1995, "착상시 설계인자에 따른 핀-관 열교환기의 성능변화에 관한 실험적 연구," *대한기계학회논문집*, Vol. 19, No. 10, pp. 2657~2666.
- (7) 이관수, 이태희, 김우승, 1994, "착상조건하에서 평행 평판 열교환기의 열 및 물질전달," *공기조화·냉동공학논문집*, Vol. 6, No. 2, pp. 155~165.
- (8) 이관수, 김규우, 지성, 1998, "핀-관 열교환기에 대한 제상 거동에 관한 실험적 연구," *공기조화·냉동공학논문집*, Vol. 10, No. 6, pp. 649~657.
- (9) 青木和夫, 1986, "ヒートポンプの着想と除霜," *日本冷凍協會論文集*, Vol. 3, No. 2, pp. 1~9.
- (10) Brian, P.L. T., Reid, R. C., and Stah, Y. T., 1970, "Frost Deposition on Cold Surfaces," *Ind. Eng. Chem. Fundamentals*, Vol. 9, No. 3, pp. 375~380.
- (11) Yoshida, Z., 1950, "Heat Transfer by Water Vapor in Snow Cover," *Low Temperature Science*,

Vol. 5, pp. 93~100.

(12) Hayashi, Y., Aoki, K., and Yuhara, H., 1976, "Study of Frost Formation in Forced Convection," *Trans. JSME*, Vol. 42, No. 355, pp. 885~892.

(13) Rite, R. W., and Crasford, R. R., 1991, "The Effect of Frost Accumulation on the Performance of

Domestic Refrigerator freezer Fined-tube Evaporator Coils," *ASHRAE Transaction*, Vol. 97, Pt. 2, pp. 428~437.

(14) 岩田 博 · 坂爪秋郎, 1985, "二温度検出による除霜開始制御装置," *冷凍*, Vol. 60, No. 691, pp. 51~55.