

## 모세관을 이용한 멀티형 열펌프의 신뢰성에 관한 실험적 연구

권 영 철<sup>†</sup>, 장 근 선, 이 윤 수\*, 김 대 훈\*, 전 용 호\*, 이 상 재\*\*  
선문대학교 기계공학과, \*선문대학교 대학원, \*\*산업기술시험원 에너지설비팀

### An Experimental Study on the Performance of Multi-type Heat Pump using Capillary Tubes

Young Chel Kweon<sup>†</sup>, Keun Sun Chang, Yun Su Lee\*,  
Dae Hun Kim\*, Young Ho Jun\*, Sang Jae Lee\*\*

Dep. of Mech. Eng., \*Graduate School, Sunmoon University, Chungnam 336-840, Korea

\*\*Energy Evaluation Team, Korea Testing Laboratory, Seoul, 152-848, Korea

(Received February 2, 2002; revision received August 9, 2002)

**ABSTRACT:** In order to develop a multi-type heat pump system with two indoor units of non-uniform capacities, the optimum refrigerant circuit was developed using capillary tubes. The refrigerant circuit was composed of four main parts; a heating circuit, a cooling circuit, a by-pass circuit and a balance circuit. The system characteristics of multi-type heat pump was investigated through the rating test and the reliability test, using the multi-type psychrometric calorimeter. The results of the rating test showed that the capacity of the multi-type heat pump was about 93% of the design value. In particular, the capacity of cooling single mode was about 13% higher than the design value, and the capacity of heating multi mode was about 5% higher than the design value. The reliability of the multi-type heat pump was verified by various reliability tests (overload, extension tube, freeze up, under/over charging, sweat, flood back). The optimal amount of refrigerant charge and compressor capacity were determined from the present work.

**Key words:** Mutli-type heat pump(멀티형 열펌프), Multi-type calorimeter(멀티형 칼로리미터), Rating test(정격시험), Reliability test(신뢰도시험), Capillary tube(모세관)

### 1. 서 론

생활문화의 수준향상과 쾌적한 주거 및 사무환경을 통한 생산성 향상을 추구하기 위해서 공조냉동기의 수요가 급증하고 있으며, 이에 따른 에너지 소비의 증대와 환경문제가 심각하게 거론되고 있다. 따라서 에너지 소비의 증대 및 환경문

제를 해결하면서 보다 나은 쾌적한 실내공간을 창조하기 위하여 시스템의 고효율화에 대한 중요성이 크게 강조되고 있다. 공조시스템의 경우에 열교환기, 팽창장치, 압축기 등의 단위기기의 효율 향상만으로는 공조시스템의 전체 운전효율을 향상시키는 데 어려움이 있으므로 시스템 전체의 성능을 향상시킬 수 있는 기술을 함께 개발하여야 에너지 효율을 극대화시킬 수 있다. 최근 전체 시스템의 성능향상을 위해 개발, 연구되고 있는 공조시스템으로 멀티형 열펌프가 있다.

멀티형 열펌프는 여러 실내 구역에 대해 각 구역의 실내 냉·난방 부하변동에 따라 냉매유량을

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-41-530-2396; fax: +82-41-530-2986

E-mail address: yckweon1@email.sunmoon.ac.kr

조절함으로써 개별 구역에 대한 냉·난방이 가능한 시스템이다. 멀티형 공조시스템은 1대의 실외기에 다수의 실내기가 연결된 구성을 가지므로 기존의 에어컨과는 달리 실내기의 접속상황에 따라 냉매분배의 제어, 열교환량의 제어, 시스템의 안정화를 위한 각 변수들의 설정 등이 매우 복잡하므로 이를 제대로 이해하기 위해서는 많은 실험자료가 필요하다.<sup>(1,2,3)</sup> 이를 통해 실제 시스템을 정확히 해석할 수 있고 설계변경에 따른 성능을 설계단계에서 미리 예측 가능하며 시스템의 전체 효율을 증대시킬 수 있을 것이다.

멀티형 열펌프 시스템의 운전에서 가장 중요한 요소들 중 하나는 각 구역에 필요한 냉·난방 용량을 정확히 조절할 수 있어야 한다. 이는 냉매의 유량을 최적 제어함으로써 해결될 수 있다. 멀티 시스템은 여러 대의 실내기가 복수로 연결되어 있으므로 한 실내기의 부하변화에 따른 냉매의 유량변화가 다른 실내기에 공급되는 냉매의 유량에 영향을 미칠 수 있다.<sup>(4)</sup> 이러한 문제점을 해결하기 위해 새로운 냉매회로를 구성하여 다양한 부하변동에 대응할 수 있게 설계하여야 한다.

멀티형 시스템에 대한 연구는 일본에서 많이 수행되고 있으며 냉방전용, 열펌프용, 냉·난방동시용, 빙축열 등을 이용한 다양한 시스템이 연구되고 있다. Nakamura<sup>(5)</sup>는 냉·난방동시용 멀티 시스템의 제어에 관하여 연구하였다. 국내의 경우는 Han<sup>(6)</sup>은 멀티 시스템의 과열도 제어를 위한 EEV의 동적 모델을 연구하여 멀티 시스템의 개발의 기초를 확립하였다.

일반적으로 소형 냉동시스템의 부하를 조절하기 위하여 모세관을 사용하고 있다. 모세관은 보통 내경 0.5~2 mm, 길이 1~6 m 정도이며 고장이 적어 수십 kW의 냉동시스템에서도 사용되기도 한다. 모세관에 대한 연구로, Dudley<sup>(7)</sup>는 초기 비등점이 이론적인 계산에 의한 비등점보다 상당히 지연된 위치에서 발생하는 것을 유동 가시화 실험을 통해 관찰하였으며, Bolstad and Jordan<sup>(8)</sup>은 모세관의 단열조건에서 증발기의 압력이 일정한 압력 이하로 감소하여도 냉매유량은 거의 일정하게 유지되는 임계유동의 존재를 검증하였다. Kuehl and Goldschmidt<sup>(9)</sup>는 모세관 내의 R-22의 이상유동을 균질유동으로 가정하여 유동을 해석하였다. Chang et al.<sup>(10)</sup>은 HFC 계열 순수냉매 및 혼합냉매의 모세관내의 유동실험을 실시하여 모

세관 내 유동의 비등지연을 예측할 수 있는 경험식을 그리고 Kim et al.<sup>(11)</sup>은 모세관의 조도를 고려하여 모세관의 성능을 예측할 수 있는 수치모델을 제시하였다.

본 연구에서는 솔레노이드 밸브와 여러 개의 모세관을 조합한 냉매 제어회로를 구성하여 1대의 압축기로 각기 다른 용량대의 구역을 제어할 수 있는 2실 멀티형 열펌프를 개발하고자 하였으며, 멀티형 칼로리미터를 사용하여 열펌프의 성능 및 신뢰성을 평가하였다. 또한 운전조건에 따른 시스템의 작동상태 및 성능평가를 통해 멀티형 열펌프의 최적 설계기술을 확보하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

본 연구에 사용된 멀티형 칼로리미터는 공기엔탈피식 에어컨 열량계(psychometric calorimeter)로 안정성이 우수하며 많은 시험을 신속하게 수행할 수 있다. 본 설비는 3대의 다른 용량대의 풍량측정장치, 실내 및 실외 공조장치, 자료처리 분석 및 운영장치, 공기샘플링유닛, 온습도제어기 및 전원제어기, 주파수변환기(50, 60 Hz) 등으로 구성되어 있다. 모든 시험상태는 제어기에서 제어하면서 실시간으로 모니터링이 가능하게 되어 있다. 운영 프로그램은 시료의 여러 실험값들을 자동으로 수집, 저장, 분석, 처리할 수 있는 기능을 내장하고 있다.

실내측과 실외측의 건구온도는 PID 제어기로 히터의 열량을 조절함으로써 실내측은 15~40℃, 실외측은 -15~60℃까지, 습구온도는 가습히터의 열량을 조절하여 상대습도 30~90%까지 유지할 수 있다. 멀티형 칼로리미터의 재현성은 ±0.5% 이내, 신뢰성은 ±1.4% 이내, 온습도 정밀도는 ±0.1℃ 이내이다.<sup>(12)</sup> Fig. 1은 본 연구에 사용된 멀티형 칼로리미터의 개략도이며, 실험된 멀티형 열펌프는 6160 W의 용량을 가지는 실외기 1대와 각각 2640 W(A type)와 3520 W(B type)의 용량을 가지는 실내기 2대로 구성되었다.

### 2.2 실험방법

모세관의 길이와 내경을 선정 후, 응축기 후

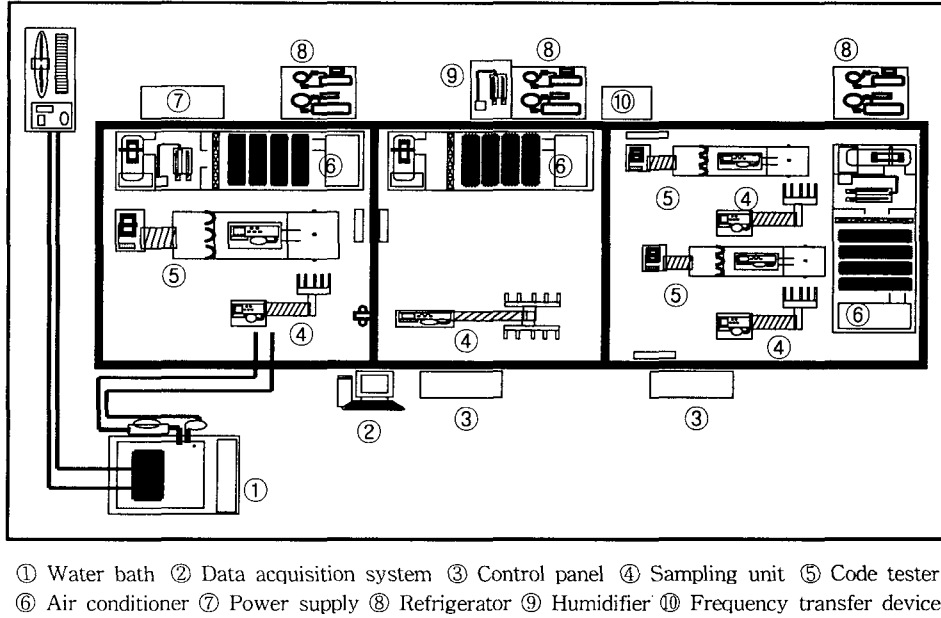


Fig. 1 Schematic diagram of the multi-calorimeter.

단(고압)에서 증발기 전단(증발압력)까지 압력강하를 계산하여 시스템의 요구 냉매량을 산정하였고, 냉매회로를 이용한 멀티형 열펌프의 성능은 KS규격<sup>(13)</sup>의 냉방시험 기준에 따라 평가하였다.

칼로리미터 내부의 온도와 습도가 프로그램화되어 미리 설정된 안정조건범위에 도달한 후에 열펌프를 1시간 정도 계속 운전한다. 그리고 이때 측정된 능력 및 전력의 변동폭이 설정범위 이내에서 만족될 때 데이터를 수집하였다. 시험은 10분 간격으로 연속 6회를 실시하여 평균값을 획득한다. 멀티형 열펌프의 열량은 ANSI/ASHRAE Standard 58-1986(RA 99)에서 규정한 시험방법에 의하여 측정된 온도와 습도, 풍량을 이용하여

공기 엔탈피법을 이용하여 냉·난방 능력을 계산하였다. 따라서 열펌프의 풍량을 정확히 측정하기 위해서 공기의 유입흐름을 고려하여 덕트를 제작한 후 풍량측정장치(Fig. 1의 ⑤)에 부착하였으며, 공기의 누설 및 단열을 위해 3mm의 접착성 단열재를 사용하여 최대한 마감처리를 하였다.

냉·난방 동시구동이 가능한 2실 멀티형 열펌프를 개발하기 위해 정격시험과 Table 1에 제시된 신뢰성 시험을 수행하였다. 신뢰성 시험은 시험종류에 따라 각각의 온도조건, 냉매량의 변화, 배관길이의 변화, 입력전압의 변화 등으로 진행되었으며, 본 실험에서 적용한 온도조건을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Temperature conditions for rating and reliability tests of multi-heat pump (Source: KS, JIS)

Test		Indoor room	Outdoor room
		Dry Bulb Temp./Wet Bulb Temp. [°C]	
Cooling	Rating	27.0 / 19.0	35.0 / 24.0
	Overload	32.0±1.0 / 23.0±0.5	43.0±1.0 / 26.0±0.5
	Freeze up	21.0 / 15.0	21.0 / 15.0
	Flood back	19.5 / 14.0	19.5 / 14.0
	Sweat	27.0 / 24.0	27.0 / 24.0
Heating	Rating	20.0 / *	7.0 / 6.0
	Overload	27.0±2.0 / *	21.0±1.0 / 15.0±0.5
	Flood back	21.0 / *	-8.0 / -9.0

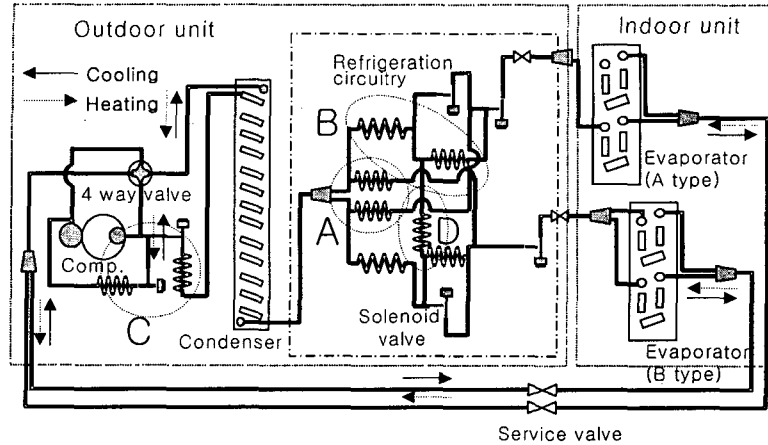


Fig. 2 Schematic diagram of the refrigeration circuit of multi-heat pump.

### 3. 냉매 회로 설계

시스템에서 요구하는 능력(A type, B type)을 획득하고자 먼저 계산으로 모세관의 내경과 길이를 선정하였고 이를 실험으로 확인하는 방법을 이용하였다.

모세관 크기가 선정되면 토출압력과 질량유량이 결정되게 된다. 본 연구에서 개발되는 멀티형 열펌프는 다른 용량의 냉·난방 부하에 적절히 대응할 수 있도록 모세관방법을 이용하여 냉매회로를 설계하였다. 한편, 부하변동으로 인한 압축기의 습압축을 방지하기 위해 압축기 전단에 액분리기를 부착하였다. 멀티형 열펌프의 순환냉매량을 제어하기 위해서 Fig. 2에 표시된 여러 냉매회로를 순환하는 냉매량을 정확히 예측하여야 한다. 이를 위해 먼저 포화압력의 질량유량과 시스템의 요구 질량유량의 계수를 산출하여 Hopkins에 의한 데이터와 Whitesel에 의한 수정 데이터를 이용하여 모세관의 내경<sup>(14)</sup>을 그리고 모세관 출구까지의 압력강하로 길이를 계산하였다. 계산으로 구해진 모세관의 크기를 바탕으로 냉매회로를 구성하여 다양한 부하변동에 적용 가능한 최적의 모세관 냉매회로를 실험으로 도출하였다.

Fig. 2는 반복실험을 통해 개발된 냉매회로이며 난방회로(A), 냉방회로(B), 바이패스회로(C), 밸런스회로(D) 4부분으로 크게 구분된다. 멀티형 열펌프는 냉·난방운전 및 2실 동시 또는 개별 운전에서 따른 다양한 부하변동에 적절히 대응하도록 그림에 나타난 여러 밸브들의 개폐로 냉매의 순환량을 제어할 수 있다. 그리고 난방운전에 사

용되는 모세관은 냉방운전에 사용되는 모세관의 길이보다 길게 설계하였다. 이는 난방운전시 실외측의 외기온도가 낮아 냉방운전조건에서 선정된 모세관으로 냉매의 충분한 증발이 어렵기 때문이다.

압축기 출구에는 바이패스 회로를 설치하여 2대의 실내기에 의한 단독구동과 동시구동 운전시에 냉매량 조절을 용이하게 하였으며, 냉매량의 슬립현상을 방지하기 위해 두 냉매회로 사이에 밸런스 회로도 고려하였다.

모세관방법을 이용하여 개발된 냉매회로의 성능은 멀티형 열펌프 시스템의 정격시험을 통해 확인되었다.

### 4. 실험결과

#### 4.1 정격시험

멀티형 열펌프 시스템의 설계능력 대비 실제능력을 확인하기 위하여 본 연구에서 개발된 모세관을 이용한 냉매회로를 열펌프 시스템에 설치하여 1차 정격시험을 수행하였다. 1차 정격시험에서 나타난 문제점을 보완하여 2차 정격시험을 반복 수행하였다.

Fig. 3은 1차 및 2차 정격시험의 결과를 나타낸다. 1차 정격시험의 결과, 냉·난방 운전시 설계능력의 80% 정도의 능력이 나타났으며, 냉방운전에서는 증발기의 온도가 난방운전에서는 응축기의 온도가 낮게 예측되었다. 이를 해결하기 위하여 반복실험을 수행하면서 냉매량 및 모세관의

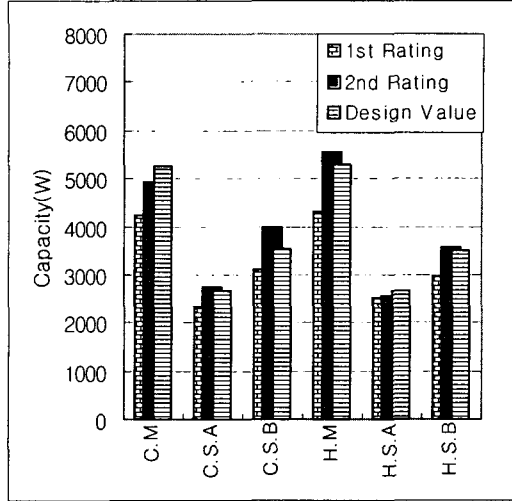


Fig. 3 Rating test of multi-heat pump (C: cooling, H: heating, M: multi, S: single, A: A type, B: B type).

내경과 길이를 재설정하였으며 동시에 Type A의 단독 냉방 운전시 실외 열교환기의 온도변화에 따라 팬을 ON/OFF 제어하여 시스템의 냉매 사이클을 최적화하였다. 이를 이용한 2차 정격시험의 결과, 냉·난방능력은 설계기준의 93% 이상을 만족하였으며, 냉방시험에서는 단독시험이 설계기준을 약 13% 정도, 난방시험에서는 동시시험이 설계기준의 약 5% 정도 초과함을 알 수 있었다. 그리고 정격시험에서 압축기의 온도는 정상적인 온도범위에서 작동함을 확인하였다. 이로부터 5.9 kW 용량의 압축기를 채택한 멀티형 열펌프 시스템의 경우에 최적 냉매량은 약 2100 g으로 선정되었다.

4.2. 신뢰성 시험

냉매량 과/저충전이 열펌프의 능력에 어떠한 영향을 미치는지를 조사하기 위해 정격 냉매량 대비 130%와 70%를 충전하여 실험을 수행하였다. 냉매량이 30% 과충전되었을 경우에 여러 시험조건들 중 난방 단독구동시에 정격시험결과보다 약 10% 정도의 능력향상을 보였지만, 압축기 입구에서 포화냉매의 유입과 EER의 감소현상이 확인되었다. 난방시는 냉매량이 정격 냉매량의 70%일 경우에 약 10%의 성능저하가 관찰되었다. 냉매량이 부족한 경우 난방운전에서는 시스템 내부의

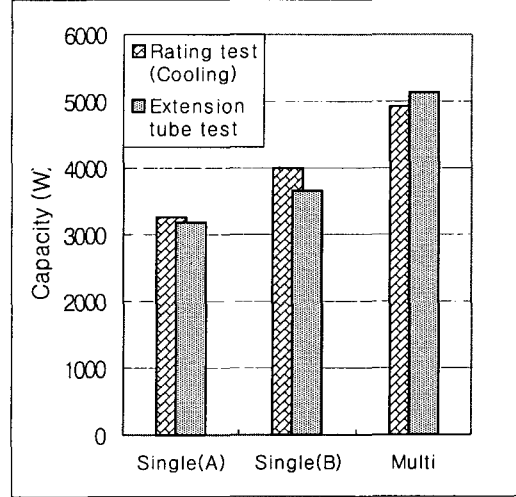


Fig. 4 Extension tube test of multi-heat pump for 15 m tube length (A: A type, B: B type).

고압과 저압이 동시에 낮아지게 되며, 이 경우 온도가 낮은 실외에서의 냉매의 증발이 유리한 측면도 있으나 냉매순환량의 감소가 동시에 유발되므로 난방능력의 감소가 나타나는 것으로 판단된다.

열펌프 시스템의 연장배관(15m)에 의한 이상유무를 판단하기 위해 단독 및 동시 연장배관시험을 수행하였다. 실험에 사용된 시스템의 정격배관길이는 5m이며 냉매회로에 수액기가 부착되어 있어 냉매를 추가로 충전하지는 않았다. Fig. 4는 연장배관시의 실험결과로, A type 단독시험(single test)은 정격시험과 비슷한 능력을 나타내

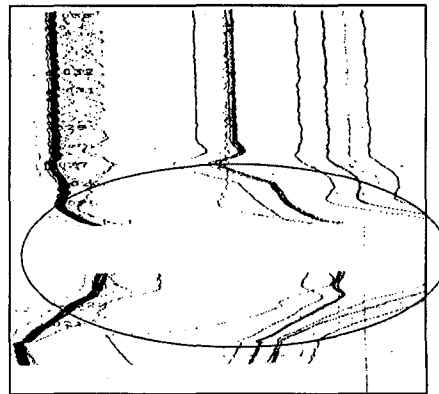


Fig. 5 Flood back test of multi-heat pump.

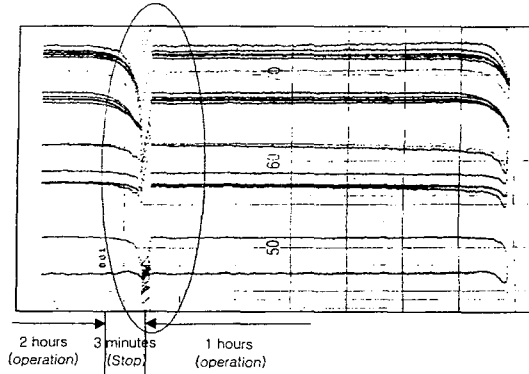


Fig. 6 Overload test of multi-heat pump.

있으며, B type는 약 8%의 성능저하를 그리고 동시시험(multi test)시는 약 4% 정도 능력이 향상되었다.

주위 온도가 저온일 경우, 열펌프 시스템의 난방운전시 실외 열교환기의 미증발 냉매에 의한 압축기의 과피 유무를 확인하기 위해 난방 액복귀시험을 실시한다. 이 시험에서 압축기 하부의 온도는 냉매 고압측 포화온도보다  $5^{\circ}\text{C}$  이상이어야 압축기의 정상적인 작동을 보장한다. 그리고 과부하 운전시에 열펌프 시스템의 정상 운전 여부와 사용자의 안전성을 확보하기 위해 냉·난방 과부하시험을 수행하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 실시간으로 측정된 열펌프 시스템의 여러 측정점(30 point)에서의 온도변화를 나타낸다. Fig. 5는 5분간 정지한 열펌프의 시간변화(수직축)에 따른 액복귀 실시간 측정기록을 보여준다. 그림에 표시된 타원형 부분(실선)이 5분간 정지된 구간으로, 운전중 미증발액이 존재하였지만 5분간 정지 후 압축기가 정상 가동함을 확인할 수 있다. Fig. 6은 시간변화(수평축)에 따른 과부하 시험결과의 실시간 측정기록을 보여주고 있다. 정격시험 조건 하에서 174 V와 266 V의 2종류의 전압을 인가한 후, 2시간 운전 → 3분간 정지(타원 실선) → 1시간

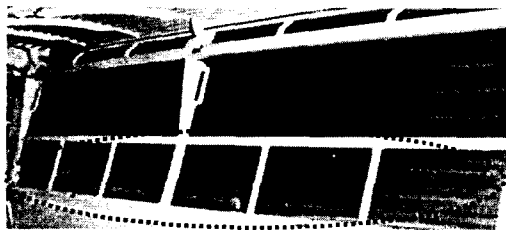


Fig. 7 Freeze up test of multi-heat pump.

운전 후에 시스템이 정상적으로 재가동하였다.

압축기가 무리 없이 운전할 수 있는 최저 기동전압을 확보하기 위해 극한정지시험을 수행하였다. 냉·난방 표준조건으로 열펌프를 가동하면서 220 V의 정격전압으로부터 10%씩 전압을 감소시켜 가면서 OLP(Over Load Product) 트립이 일어나는 가장 낮은 기동전압을 실험으로부터 구하였다. 이때 압축기의 입구와 출구의 온도를 실시간으로 측정하면서 시스템의 안정성을 점검하였다. 실험결과, 동시 및 단독운전시에 기동전압은 정격전압의 75%까지 가동하였으며, 이때 압축기 전후단의 온도변화는 매우 안정적이었다.

저온 냉방운전시 실내 열교환기의 표면에 생성된 서리나 물이 실내로 유입되는지의 여부를 확인하기 위해 저온시험을 수행하였다. Fig. 7은 저온실험을 수행한 후의 증발기 모습으로, 증발기 하단에 서리가 맺혀 있는 것을 알 수 있다. 6시간 동안 정상운전을 실시한 후에 1시간 동안 송풍운전을 시켜 증발기를 관찰한 결과 증발기 전체 표면의 약 20% 정도에서 서리가 나타났다. 그러나 운전시 실내로 얼음이나 물방울 등이 유입되지 않음을 확인하였다.

저온 냉방운전시에 열교환기 표면 및 블로워에 맺힌 응축수가 실내로 유입되는지를 알아보기 위해 이슬맺힘시험을 수행되었다. Fig. 8은 이슬맺힘 시험의 가시화 결과로, 실내기에 이슬이 맺혀 있는 것을 볼 수 있다. 실내기를 풍량측정장치의 혼합챔버와 덕트에서 분리한 후 실내기의 팬을 저속으로 4시간 동안 연속운전을 실시하였다. 공기의 습도가 80%일 때에 토출구 및 실내기에 이슬이 맺혔지만, 운전시 이슬이 흘러내리지 않았다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 1대의 압축기로 각기 다른 용량대를 가지는 2실 열펌프 시스템을 개발하기 위하

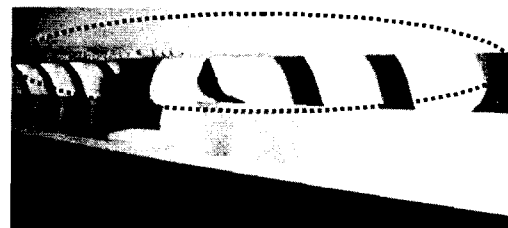


Fig. 8 Sweat test of multi-heat pump.

여 모세관방법을 이용하여 최적의 냉매회로를 구성하였다. 냉매회로의 성능 및 신뢰성을 확인하기 위해 멀티형 칼로리미터를 사용하여 정격시험과 신뢰성 시험을 수행하였다. 정격시험을 통해 얻어진 멀티형 열펌프 시스템의 냉·난방능력은 설계기준의 93% 이상을 만족하였으며, 냉방시험에서는 단독시험이 설계기준을 약 13% 정도, 난방시험에서는 동시시험시 설계기준의 약 5% 정도 우수하였다. 이로부터 2실형 열펌프의 정격냉매량 및 압축기의 용량을 확인하였다. 그리고 냉매량 과/저충전시험, 연장배관시험, 냉·난방 과부하시험, 저온시험, 극한정지시험, 이슬맺힘시험, 난방액복귀시험 등의 신뢰성 시험을 수행하여 멀티형 열펌프의 신뢰성 및 안정성을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 선문대학교 공조기술연구센터(RRC)의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사한다.

## 참고문헌

- Han, D. Y. and Chung, M. Y., 2000, Multi type heat pump system computer simulation experimental verification, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 12, No. 1, pp. 12-19.
- Kim, Y. C., Park, K. W., Yun, Y., Min, M. G. and Choi, Y. D., 2001, Performance Analysis of a Multi-type Inverter Heat Pump, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering Vol. 13, No. 3, pp. 153-159.
- Kweon, Y. C., Chang, K. S. and Jeong, J. H., 2000, Study on Multi-type HVAC System Development, RRC Annual Report, Vol. 2, pp. 35-52.
- Kim, Y. C. and Choi, J. M., 1998, Comparison of refrigerant flow through capillary with short tube orifice, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering Vol. 10, No. 1, pp. 118-128.
- Nakamura, T., 1992, City multi R-22 pipe-multi split type air conditioners for simultaneous cooling and heating operation, Refrigeration, Vol. 67, No. 774, pp. 417-422.
- Han, D., 2000, Dynamic model of the electric expansion valve for the development of superheat temperature control algorithm, proceedings of SAREK, pp. 1343-1347.
- Dudley, J. K., 1962, A photographic study of the two-phase flow of Freon in small bore tubes, M. S. Thesis, Univ. of Wisconsin.
- Bolstad, N. M. and Jordan, R. C., 1948, Theory and use of the capillary tube expansion device, Refrigerating Engineering, Vol. 56, No. 6, pp. 519-523
- Kuehl, S. J. and Goldschmidt, V. W., 1991, Modeling of steady flows of R-22 through capillary tube, ASHRAE Trans., Vol. 97, Part 1, pp. 139-148.
- Chang, S. D. and Ro, S. T., 1995, Flow of pure HFC refrigerants and their mixtures through a capillary tube, Proceeding of the SAREK '95 Summer annual Conference, pp. 263-268.
- Kim, C. N. and Hwang, E. P., Investigation of the Performance of Capillary Tube with the Roughness Effect, Proceeding of the SAREK '95 Summer annual Conference, pp. 283-289.
- Choi, J. Y., Park, J. U. and Seo, S. M., Air Enthalpy Calorimeter Performance of Sunmoon University, Korea Testing Laboratory, Final Report, p. 118.
- KATS, 2000, Air Conditioners, KS. C930 6.
- Stoecker, W. F. and Jones, J. W., 1994, Refrigeration and Air Conditioning, pp. 263-274.