

복사-대류 겸용 하이브리드 냉방기에 대한 실험 연구

김내현
인천대학교 기계공학과

An Experimental Study on Radiation/Convection Hybrid Air-Conditioner

Nae-Hyun Kim

Department of Mechanical Engineering, Incheon National University, Incheon, Korea

요약 그간 복사 냉방은 천정이나 바닥면을 냉각 표면으로 활용하기 때문에 표면 온도를 노점 온도 이상으로 높이거나 보조적인 제습 에어콘을 설치해야 하는 문제가 있었다. 본 연구에서는 주택 적용을 목표로 복사 판넬 표면에 결로를 유발시킴으로써 냉각 열량을 증가시키고 실내 쾌적감도 개선할 수 있는 1.0 kW 용량의 복사-대류 방식의 하이브리드 냉방기에 대하여 검토하였다. 이 냉방기는 2개의 냉동 사이클 - 강제 대류 제습 사이클과 복사 판넬 냉방 사이클로 구성된다. 시제품 실험 결과 복사 판넬 사이클의 경우 실외 35°C/24°C, 실내 27°C/19.5°C의 표준 조건에서 냉매 순환량은 8.8 kg/h, 응축 온도 51°C, 증발 온도 8.8°C, 냉방 능력은 376 W, 성적계수는 1.75로 나타났다. 또한 복사 판넬의 온도는 13°C ~ 14°C 사이에서 고르게 분포되었다. 또한, 상대 습도가 감소할수록 냉방 능력은 감소하나 소비 전력은 거의 변화가 없었다. 제습 사이클의 경우, 표준 조건에서 냉매 순환량은 21.1 kg/h, 응축온도 61°C, 증발 온도 5.0°C, 냉방능력은 949 W, COP는 2.11로 나타났다. 한편, 복사 판넬과 제습 냉방 사이클을 동시에 가동시키며 표준 조건에서 시험 결과, 복사 판넬의 냉방 능력은 333 W, 제습부의 냉방 능력은 894 W, COP는 1.89로 나타났다. 팬 풍량이 감소하면 복사 판넬, 제습부 모두 냉방 능력이 감소함을 보였는데 특히 제습부에서 감소량이 두드러졌다. 본 실험 데이터를 기반으로 냉방 부하의 변동에 대비하여 가능한 제어 로직을 제시하였다.

Abstract Radiation cooling has used ceilings or floors as cooling surfaces. In such cases, to avoid moisture condensation on the surface, the surface temperature needs be higher than the dew point temperature or an additional dehumidifier is added. In this study, with a goal for residential application, intentional moisture condensation on the cooling surface was attempted, which increased the cooling capacity and improved the indoor comfortness. This method included two separate refrigeration cycles - convection-type dehumidifying cycle and the panel cooling cycle. Test results on the panel cooling cycle showed that, at the standard outdoor (35°C/24°C) and indoor (27°C/19.5°C) condition, the refrigerant flow rate was 8.8 kg/h, condensation temperature was 51°C, evaporation temperature was 8.8°C, cooling capacity was 376 W and COP was 1.75. Furthermore, the panel temperature was uniform within 1°C (between 13°C and 14°C). As the relative humidity decreased, the cooling capacity decreased. However, the power consumption remained approximately constant. In the convection-type dehumidification cycle, the refrigerant flow rate was 21.1 kg/h, condensation temperature was 61°C, evaporation temperature was 5.0°C, cooling capacity was 949 W and COP was 2.11 at the standard air condition. When both the radiation panel cooling and the dehumidification cycle operated simultaneously, the cooling capacity of the radiation panel cycle was 333 W and that of the dehumidification cycle was 894 W, and the COP was 1.89. As the fan flow rate decreased, both the cooling capacity of the radiation panel and the dehumidification cycle decreased, with that of the dehumidification cycle decreasing at a higher rate. Finally, a possible control logic depending on the change of the cooling load was proposed based on the results of the present study.

Keywords : Radiation Panel, Dehumidification, Air-Conditioning, Convection, Hybrid

*Corresponding Author : Nae-Hyun Kim(Incheon National Univ.)

Tel: +82-32-835-4541 email: knh0001@incheon.ac.kr

Received March 18, 2019

Revised April 8, 2019

Accepted June 7, 2019

Published June 30, 2019

1. 서론

현재 공동 주택의 냉방에는 에어컨이라 통칭되는 강제 대류형 공조기가 설치하여 사용되고 있다. 에어컨은 편리하게 냉방에 활용될 수 있지만 하절기의 높은 습도에 따른 과도한 잠열 부하를 감당하기 위하여 필요 이상으로 대용량으로 설계된다. 따라서 에어컨의 낮은 토출 온도에 따른 냉기류가 직접 사람들에게 도달하여 불쾌감을 유발할 뿐만 아니라, 냉방병이나 두통 등 부작용들이 나타날 수도 있다. 특히, 하절기 취침 시 에어컨을 가동하면 너무 낮은 온도와 기류로 인해 오히려 취침을 방해하는 요인으로 작용하기도 한다. Fig. 1에 에어컨 통과 전후의 공기 상태를 나타내었다. 일반적으로 에어컨 증발기의 표면 온도는 실내 잠열 부하를 감당할 수 있도록 낮게 설정된다. 이 때 증발기 출구의 공기 상태는 실내 공기와 증발기 표면 공기 상태의 연결선 (Process Line) 상에 잠열 부하를 만족하는 점에서 형성된다. 그런데 국내 하절기 공기 상태는 Fig. 1에 나타나 있듯이 잠열 부하 (Q_L)에 비하여 현열 부하 (Q_S)가 작기 때문에 과도하게 냉각되어 증발기를 나오게 된다. 즉 잠열 부하를 맞추면 현열량이 과도하게 되고 현열 부하를 맞추면 잠열을 감당하지 못하는 문제가 발생한다.

이러한 문제는 현열 부하와 잠열 부하를 별도로 처리하면 해결이 가능하다. 그 중에서도 특히 현열 부하를 처리하는 방안으로 강제 대류식 보다는 복사식 냉방이 열 쾌적성 면에서 우수한 것으로 알려져 이에 대한 연구가 유럽을 중심으로 활발하게 이루어져 왔다[1-3]. 복사 냉방에서는 현열 열전달은 공기를 우선 냉각해야 하는 대류 열전달과는 달리 복사 형태로 냉각 표면에서 인체로 직접 전달되므로 냉각 효과가 순간적으로 발생하고 쾌적성이 증진된다고 알려져 있다[2,3]. 이와 같은 장점 때문에 국내에서도 복사 냉방에 대한 연구가 꾸준히 수행되어 왔다[4,5].

그간 복사 냉방은 천정이나 바닥면에 냉각 코일을 설치하여 이들을 냉각 표면으로 활용하는 방안이 검토되어 왔다. 하지만 이 경우 천정이나 바닥면에 결로가 생겨서는 안 되기 때문에 표면 온도를 노점 온도 이상으로 높이거나 보조적인 제습 에어컨을 설치해야 하는 문제가 있다[6,7]. 따라서 복사 냉방은 대형 건물에 일부 적용되었을 뿐 가정용으로 개발되지는 않았다. 본 연구에서는 주택 적용을 목표로 복사 패널 표면 온도를 노점 온도 이하로 유지하여 표면에 결로를 유발시킴으로써 냉각 열량을 증가시키고 실내 쾌적감도 개선할 수 있는 1.0 kW 용량

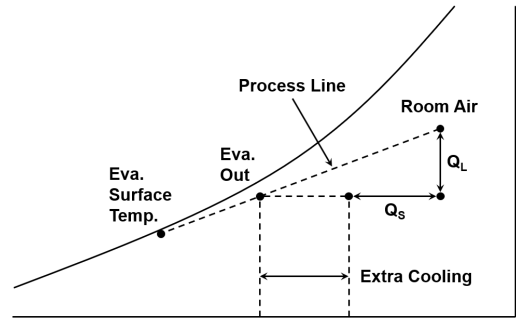


Fig. 1. Air process line across an air-conditioner

의 복사-대류 방식의 하이브리드 냉방기에 대하여 검토하였다. 이 냉방기는 복사 패널 후방에 대류 방식의 제습부가 설치되어 실내 잠열부하를 담당하도록 설계하였다 [8].

2. 하이브리드 냉방기의 구성

Fig. 2에 본 연구의 하이브리드 냉방기 개념도가 나타났다. 당초에는 압축기 하나만을 사용하여 복사 냉방 패널과 제습 증발기를 가동시키는 단일 사이클을 고려하였다. 하지만 이러한 시스템은 부하 변동에 따라 요구되는 복사 패널 단독 운전 또는 복사/대류 병용 운전의 전환이 용이하지 않고 특히 두 모드에서의 전환시점에서 압축기의 압축량 조절이 쉽지 않으며 인버터를 사용한다 하더라도 압축량의 조절 범위는 일정 한도 이상을 넘을 수 없기 때문에 용량 가변이 용이하지 않을 것으로 판단되었다[8].

이를 개선하고자 냉방 패널과 제습 증발기를 독립된 사이클로 구성함으로써 피크 부하 및 부분 부하 등 부하 변동에 대한 대응성을 높이고, 복사 패널 단독 운전 시에도 제습 증발부에 장착된 팬을 가동함으로써 냉방 용량을 일정 범위에서 가변시킬 수 있도록 하였다. 즉, 냉방

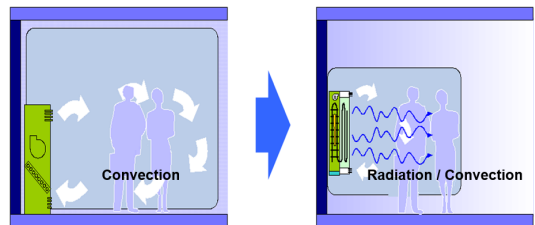


Fig. 2. Conceptual drawing of the radiation/convection hybrid cooling system

부하의 변화에 따라 복사 패널 단독 운전, 복사 패널/팬 운전, 복사패널/대류 병용 운전 등 다양한 운전 모드를 구현할 수 있도록 하였다.

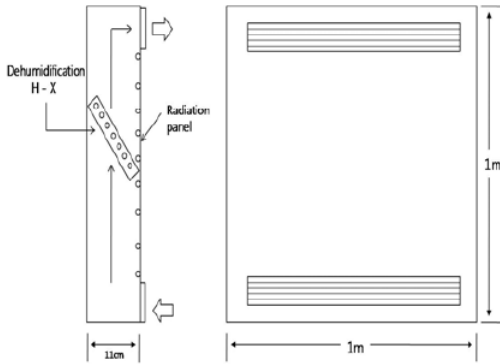


Fig. 3. Schematic drawing of the radiation/convection hybrid cooling system

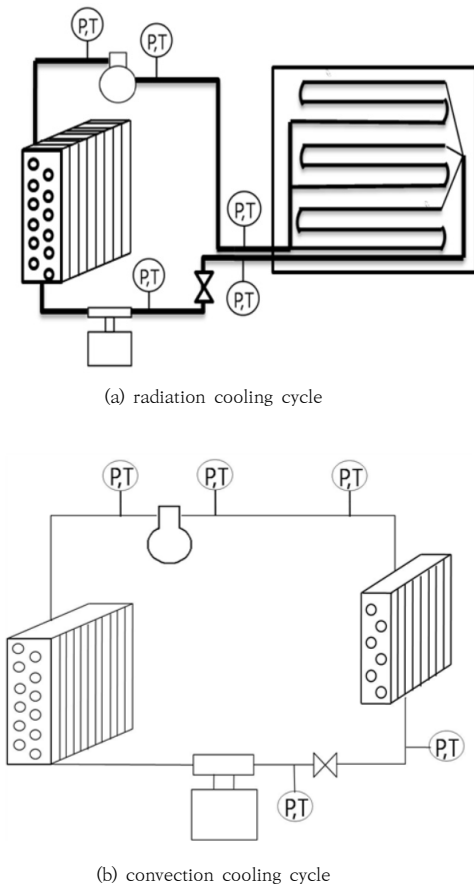

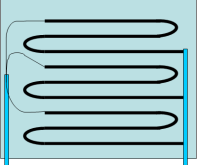






Fig. 4. Refrigeration cycle of the radiation/convection hybrid cooling system

Fig. 3 와 4에 하이브리드 냉방기의 실내기 개략도와 복사냉방 및 제습 냉방 사이클이 나타나 있다. 본 시스템은 분리형으로 실내의 냉방 부하를 담당하는 실내기와 냉방 열을 외부 공기로 방출하는 실외기로 구성된다. 실내기에는 1m × 1m 크기의 복사 냉방 패널과 팬을 후방에 제습 증발기가 장착되는데 복사 냉방 패널에서는 실내공기의 현열부하와 잠열 부하를 일부 담당하고, 제습 증발기에서는 실내의 잠열부하를 주로 담당하도록 하였다. 제습 증발기 상부에는 소형 cross-flow 팬을 설치하여 제습 증발기에 유동을 형성하였다. 한편, 실내기 하부에는 응축수 배출을 위하여 드레인 팬이 설치되어 있다.

시제품은 1 kW 용량으로 복사 패널에서 200 W를, 제습 증발기에서 800 W를 담당하도록 구성하였다. 시제품의 사양은 자체 개발한 성능 해석 프로그램을 활용하여 설계되었다[8]. 프로그램에서 응축기 및 제습 증발기 해석에는 UA-LMTD 방식이 사용되었고 압축기 해석에

Table 1. Specification of radiation cooling cycle

Part	Specification	
Refrigerant	R-134a	
Compressor	Danfoss BD250GH, linear reciprocating, 200 W	
Evaporator	Extruded aluminum panel, (1 m × 1 m) 9 tube row, 3 circuit 9.5 mm O.D. tube	  
Expansion valve	Manual exp. valve Swagelock, 400 W	
Condenser	Fin-tube, 400 mm x 300 mm, 2 row, fin pitch 1.95 mm, slit fin, 9.5 mm O.D. tube	

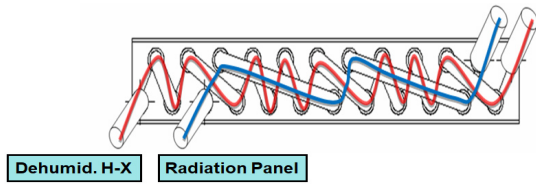


Fig. 5. Condenser circuit division between dehumidification H-X cycle and radiation panel cooling cycle


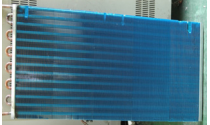

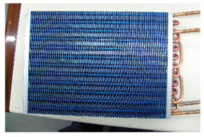

는 제조사에서 제공된 성능 곡선이 사용되었다. 복사 판넬은 복사와 자연대류 열전달을 고려하여 해석되었고 팽창장치는 부하 변동을 고려하여 전자팽창변을 사용하였다. 상세한 내용은 Kim[8]에 설명되어 있다.

Table 1에 각 판넬 냉방 사이클에 사용된 부품의 주요 사양을 나타내었다. 가정용 에어컨 증발기내 냉매 증발온도는 5~10°C 이고 이러한 증발온도에 사용되는 냉매로는 R-22 또는 R-410A가 적합하다. 본 연구의 증발기 증발온도도 유사하리라 예상되어 따라서 냉방 능력 200 W급 R-22 또는 R-410A 압축기를 찾았으나 너무 소용량이라 본 연구에 적합한 압축기가 없었다. 이러한 작은 용량의 압축기는 R-134a용으로 개발되어 있는데 R-134a는 증발온도 -10 ~ -20°C의 저온에 주로 사용되는 냉매이다. 본 연구에서는 복사 판넬용으로 냉방능력 200 W급 R-134a용 DC 압축기 (Danfoss사 모델 BD250GH)를 사용하였고 제습용으로 냉방능력 800 W급 R-134a용 AC 압축기(Danfoss사 모델 SC10GH)를 사용하였다. 복사 판넬은 알루미늄을 압출하여 제작되었다. 후면에는 동관을 삽입할 수 있도록 U형 홈을 가공하고 외경 9.5 mm 동관을 100 mm 피치로 9 줄 삽입하였다. 한편, 냉매 라인에 분배기를 사용하여 3 circuit으로 분배하였다.

판넬 냉방부는 실내 부하의 변동 따라 제습이 발생할 수도 있고 안할 수도 있다. 제습이 발생하는 경우는 냉각 부하가 급증하므로 냉매 유량 변동의 폭이 크게 되고 따라서 유량 조절 장치로는 전자 팽창변이 적합하다. 본 연구에서는 우선 미세조절이 가능한 Swagelok사의 수동 팽창 밸브를 사용하여 증발 압력의 변화에 따른 시스템 거동을 살펴보고있다. 응축기는 판넬 냉방부와 제습부를 동시에 냉각할 수 있도록 하였는데 핀-튜브형으로 폭 0.4 m, 높이 0.3 m, 2 열, 슬릿 핀으로 제작되었다. Fig. 5에 응축기를 제습부와 판넬 냉방부로 나누어 사용한 회로도 가 나타나 있다.

Table. 2에 제습 냉방 사이클에 사용된 부품의 주요 사양을 나타내었다. 제습 증발기는 핀-튜브형으로 폭 0.8 m, 높이 0.35 m, 2열, 슬릿 핀으로 제작되었다. Fig. 2에 나타나 있듯이 증발기는 제품의 두께 (0.11 m)를 최소화하기 위하여 72°로 경사지게 설치되었다. 증발기 상단에는 cross-flow 팬을 설치하여 증발기에 풍량을 공급하였다.

Table 2. Specification of the humidification cycle

Part	Specification	
Refrig.	R-134a	
Comp.	Danfoss SC10GH, AC, 800 W	
Eva.	Fin-tube, 800 mm x 350 mm, 2 row, fin pitch 2.5 mm, slit fin, 9.5 mm O.D. tube	
Exp.	Manual exp. valve Swagelock, 800 W	
Cond.	Fin-tube, 400 mm x 4300 mm, 2 row, fin pitch 1.95 mm, slit fin, 9.5 mm O.D. tube	
Fan	Cross-flow type	

3. 성능 시험

복사 판넬과 제습부의 냉각 성능은 냉매 측과 공기 측의 열정산으로부터 구할 수 있다. 복사 판넬의 경우 후면에 장착된 증발관 입출구의 냉매 엔탈피와 냉매유량(m)을 측정하면 전열량을 구할 수 있는데 증발관 입구의 냉매 엔탈피 (h_{in})는 응축기 출구의 엔탈피와 같으므로 응축기 출구에서 온도와 압력을 측정하여 구하고, 증발관 출구의 엔탈피 (h_{out})는 그 곳에서 온도와 압력을 측정하여 구하였다 [식 (1)]. 다만 증발관에서 2상으로 배출되어

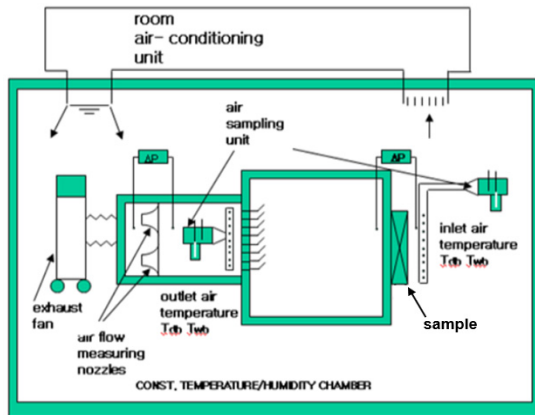


Fig. 6. Schematic diagram of the test facility

과열이 형성되지 않는 경우는 후방에 장착된 수액기 출구의 온도를 측정하여 엔탈피를 구하였다.

$$Q = m_r (h_{out} - h_{in}) \quad (1)$$

또한 압축기에 유입되는 소비 동력도 측정하여 복사 패널의 COP (= 전열량 / 소비 동력)를 구하였다. 압축기 소비 동력은 와트 미터를 사용하여 측정하였다. 이 외에도, 응축기 출구 온도와 압력, 복사 패널 출구 온도와 압력, 수액기 출구 온도, 압축기 입구와 출구의 온도를 측정하였다. 또한, 패널 뒷면에 9 개의 열전대를 부착하여 패널 표면 온도를 측정하였다. Fig. 4에 측정 위치를 나타내었다. 냉매 유량은 정밀도 $\pm 1.5 \times 10^{-6}$ kg/s인 질량유량계, 압력은 정밀도 ± 0.1 kPa인 압력계, 온도는 정밀도 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 인 열전대를 사용하여 측정하였다. 한편, 복사 패널의 냉방 실험은 표준 조건으로 실외 건/습구온도 $35^\circ\text{C}/24^\circ\text{C}$, 실내 $27^\circ\text{C}/19.5^\circ\text{C}$ 의 KS-C-9306 [9]의 규정을 따랐다. 또한 실내 상대습도를 변화시켜 가며 냉방 능력 시험도 수행하였다.

제습부의 냉각성능은 냉매 측과 공기 측을 동시에 측정하였다. 냉매 측은 복사 패널과 동일한 방법으로 측정하고 공기 측은 공기 측 입출구 엔탈피 (h_{in} , h_{out})와 공기 측 풍량 (m_a)을 측정하여 구하였다 [식 (2)].

$$Q = m_a (h_{out} - h_{in}) \quad (2)$$

Fig. 4에 냉매 측 측정 위치를 나타내었다. 공기측 입출구 온도는 ASHRAE 41.1 [10]에 규정된 샘플링 방법으로 구하고 공기측 풍량은 ASHRAE 41.2 [11]에 규정

된 방법으로 구한다. Fig. 6에 공기측 실험 장치의 개략도를 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 복사 패널 냉방 시스템

복사 패널 시스템은 전술한 압축기, 응축기, 증발기, 팽창장치 외에도 액 압축을 방지하기 위하여 증발기 후단에 1/2 HP급 수액기를 부착하였다. 실험은 우선 실외 $35^\circ\text{C}/24^\circ\text{C}$, 실내 $27^\circ\text{C}/19.5^\circ\text{C}$ 의 표준 조건에서 증발 온도와 냉매 충전량을 변화시켜가며 수행되었는데 최적의 (COP가 최대로 되는) 증발 온도는 8.8°C , 냉매 충전량은 850g으로 나타났다.

Table 3에 실험 결과를 정리하였다. 이 때 냉매 순환량은 8.8 kg/h, 응축 온도 51°C , 증발 온도 8.8°C , 과냉도 15°C , 과열도 1.0°C 로 나타났다. 여기서 응축 온도와 증발 온도는 포화 압력을 온도로 환산한 값이다. 한편, 냉방능력은 376 W, 압축기 소비동력은 215 W, 성적계수는 1.75로 나타났다. 또한 복사 패널의 온도는 $13^\circ\text{C} \sim 14^\circ\text{C}$ 사이에서 고르게 분포됨을 보여준다. 증발온도를 8.8°C 보다 높이면 패널 표면 온도가 실내 공기의 노점온도인 15°C 이상이 되어 성능이 감소하고, 낮추면 유량이 감소하여 성능이 감소하였다. 냉매 충전량도 너무 작으면 유량이 형성되지 않았고 너무 크면 응축 압력이 너무 상승하여 압축기의 고온 트랩이 작동하였다.

냉방이 진행됨에 따라 온도와 함께 실내의 습도도 감소한다. 실내의 습도가 감소하면 노점 온도도 감소하므로

Table 3. Radiation panel cooling data at standard air condition (outdoor $35^\circ\text{C}/24^\circ\text{C}$, indoor $27^\circ\text{C}/19.5^\circ\text{C}$ (50% RH))

Spec.	Data	Ref.
Cond. out	36°C , 1.383 Mpa	15°C sub
Exp. out	10.4°C , 0.392 Mpa	
Panel out	9.8°C , 0.398 Mpa	
Recv. out	9.8°C	1.0°C super
Comp. in	12.7°C	
Comp. out	51.5°C	
P_{comp}	0.215 kW	
m_{ref}	8.8 kg/h	
q_{ref}	0.376 kW	
COP	1.75	
Panel temp. ($^\circ\text{C}$)	14.0, 13.7, 13.6, 13.3, 12.9, 13.2, 13.7, 14.0, 13.7	Max. 1.1°C diff.

Table 4. Radiation panel cooling data at standard air condition (outdoor 35°C/24°C, indoor 27°C/15.8°C (30% RH))

Spec.	Data	Ref.
Cond. out	38.3°C, 1.257 Mpa	9°C sub
Exp. out	6.9°C, 0.328 Mpa	
Panel out	6.1°C, 0.351 Mpa	1.0°C super
Recv. out	6.2°C	1.0°C super
Comp. in	9.2°C	
Comp. out	60.8°C	
P_{comp}	0.220 kW	
m_{ref}	8.0 kg/h	
q_{ref}	0.330 kW	
COP	1.50	
Panel temp. (°C)	9.7, 9.5, 8.7, 9.2, 9.6, 8.6, 8.7, 9.3, 9.2	Max. 1.0°C diff.

복사 패널의 온도도 감소하게 된다. Table 4에 상대 습도 30% (표준 조건의 상대 습도는 50%임)에서의 데이터를 수록하였다. 패널 표면의 온도가 8°C ~ 9°C 사이로 형성되고 상대 습도 30%에서 노점 온도가 8°C로 강하함에 따라 패널 표면에 부분적으로 결로가 형성됨을 확인할 수 있다. 또한 표준 조건에 비하여 냉매순환량은 8.0 kg/h, 응축온도는 47.3°C, 증발 온도는 5.1°C, 냉방능력은 330 W, 성적계수는 1.50으로 모두 감소하였다.

Fig. 7에는 상대 습도 변화에 따른 응축, 증발 및 패널 온도의 변화를 나타내었다. 상대 습도가 감소할수록 모든 온도가 감소함을 보여준다. Fig. 7에는 냉방 능력, 소비동력, COP의 변화를 나타내었다 상대 습도가 감소할수록 냉방 능력은 감소하나 소비 동력은 거의 변화가 없었

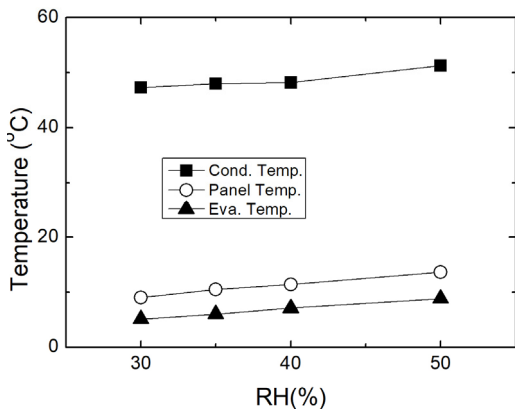


Fig. 7. Condensation, evaporation and panel temperatures at different relative humidity

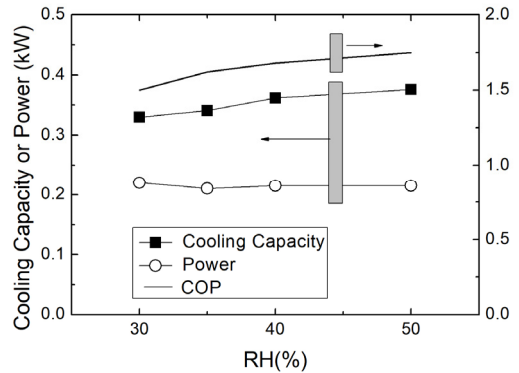


Fig. 8. Cooling capacity, power and COP at different relative humidity

다. 전술하다시피 상대 습도가 감소하면 제습량과 노점온도가 감소하고 따라서 냉방능력과 증발 온도가 감소한다. 증발 온도의 감소는 압축기 체적 효율의 감소를 유발하나 냉방 능력의 감소에 따라 유량도 감소하므로 이들이 소비동력에 미치는 효과가 상쇄되어 소비동력의 변화는 거의 없는 것으로 판단된다. 따라서 COP도 상대 습도의 감소에 따라 감소한다.

4.2 제습 냉방 시스템

제습 냉방 시스템은 압축기, 응축기, 증발기, 팽창장치로 구성된다. 실험은 우선 실외 35°C/24°C, 실내 27°C/19.5°C의 표준 조건에서 증발온도와 냉매 충전량을 변화시켜가며 수행되었는데 최적의 (COP가 최대로 되는) 증발 온도는 10°C, 냉매 충전량은 750g으로 나타

Table 5. Dehumidification cooling data at standard air condition (outdoor 35°C/24°C, indoor 27°C/19.5°C (50% RH))

Spec.	Data	Ref.
Cond. out	37.7°C, 1.765 Mpa	23.0°C sub
Exp. out	10.0°C, 0.357 Mpa	
Eva. out	21.0°C, 0.351 MPa	16.0°C super
Comp. in	27.5°C	
Comp. out	87.1°C	
P_{comp}	0.440 kW	
m_{ref}	21.1 kg/h	
q_{ref}	0.968 kW	
$T_{d,in}/T_{w,in}$	26.95°C/19.47°C	
$T_{d,out}/T_{w,out}$	18.27°C/15.43°C	
h_{in}	55.36 kJ/kg	
h_{out}	43.14 kJ/kg	
m_{air}	3.54 CMM	
q_{air}	0.892 kW	
q	0.930 kW	
COP	2.11	

났다. Table 5에 실험 결과를 정리하였다. 이 때 냉매 순환량은 21.1 kg/h, 응축온도 60.7°C, 증발 온도 5.0°C, 과냉도 23°C, 과열도 16°C이다. 한편, 냉매 측 냉방능력은 968 W, 압축기 소비동력은 440 W로 나타났다. 또한 공기 측 냉방능력은 Fig. 6의 실험 장치를 이용하여 측정하였는데 입구 공기의 엔탈피는 55.36 kJ/kg, 출구 공기의 엔탈피는 43.14 kJ/kg, 공기 풍량은 3.54 CMM, 냉방 능력은 930 W가 나타났다. 즉, 냉매 측과 공기 측 냉방 능력은 8% 이내에서 일치함을 보이고, COP 계산 시는 공기와 냉매 측의 평균치로 계산하였는데 그 값은 2.11이 되었다.

Table 6. Radiation panel/dehumidification cooling data at standard air condition (outdoor 35°C/24°C, indoor 27°C/19.5°C (50% RH), 3.6 CMM)

(a) Radiation panel		
Spec.	Data	Ref.
Cond. out	35.8°C, 1.632 Mpa	23.0°C sub
Exp. out	10.9°C, 0.406 Mpa	
Panel out	11.1°C, 0.395 Mpa	2.6°C super
Comp. in	21.8°C	
Comp. out	71.08°C	
m _{ref}	7.7 kg/h	
q _{ref}	0.333 kW	
(b) Dehumidification H-X		
Spec.	Data	Ref.
Cond. out	38.9°C, 1.896 Mpa	26.0°C sub
Exp. out	10.2°C, 0.397 Mpa	
Eva. out	21.5°C, 0.354 MPa	15.0°C super
Comp. in	27.2°C	
Comp. out	89.9°C	
P _{comp}	0.65 kW	
m _{ref}	20.7 kg/h	
q _{ref}	0.925 kW	
T _{d,in} /T _{w,in}	27.44°C/19.47°C	
T _{d,out} /T _{w,out}	17.53°C/15.32°C	
h _{in}	55.49 kJ/kg	
h _{out}	42.95 kJ/kg	
m _{air}	3.60 CMM	
q _{air}	0.862 kW	
q	1.227	
COP	1.89	

4.3 복사 판넬/제습 동시 냉방 시스템

복사 판넬과 제습 냉방부를 동시에 가동시키며 35°C/24°C, 실내 27°C/19.5°C의 표준 조건에서 실험을 수행하고 그 결과를 Table 6에 수록하였다. 이 때 환은 최대 풍량인 3.6 CMM으로 유지되었다. 시험 결과, 복사 판넬의 냉방 능력은 333 W, 제습부의 냉방 능력은 894 W, 총 냉방 능력은 1,227 W로 나타났고 두 개의 압축기에 소비된 동력은 650 W로 COP는 1.89가 되었다. 여기서 제습부의 냉방 능력은 공기 측과 냉매 측의 평균값으로 구하였다. Fig. 9에 환 풍량을 감소시키며 측정한 냉방 능력을 나타내었다. 복사 판넬, 제습부 모두 환 풍량이 감소하면 냉방 능력이 감소함을 보였는데 특히 제습부에서 감소량이 두드러졌다. 환 풍량이 감소하면 공기 측 전열 성능이 감소하고 따라서 냉방 능력이 감소하게 된다.

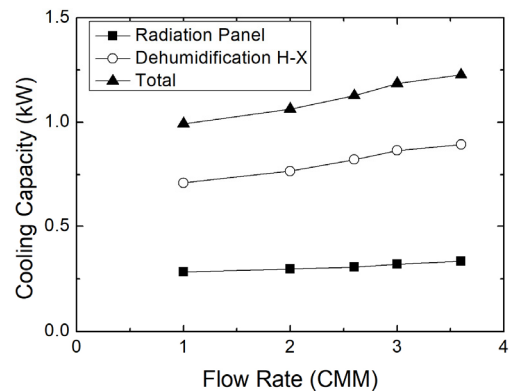


Fig. 9. Cooling capacities at different flow rates

Table 7. Possible control logic for different cooling load

Capacity (W)	Control Logic		
	Radiation cycle	Dehumid. cycle	Air speed*
376	on	off	very slow
711	off	on	slow
768	off	on	medium
866	off	on	fast
930	off	on	very fast
993	on	on	slow
1063	on	on	medium
1186	on	on	fast
1277	on	on	very fast

*'very slow' is approximately 1.0 CMM, 'slow' is 2.0 CMM, 'medium' is 2.6 CMM, 'fast' is 3.0 CMM

Fig. 9의 데이터를 기반으로 냉방 부하의 변동에 대비하여 가능한 제어 로직을 만들어 보았다 (Table 7). 즉, 376 W 미만의 저 부하에서는 복사 패널부만을 작동시키고 그 이후 711 W 까지는 제습부만을 작동시킨다. 그 이후 930 W 까지는 환 풍량을 조절하여 부하에 대응한다. 그 이후 최대 부하인 1127 W까지는 복사 패널부를 작동시키며 동시에 환 풍량을 조절하여 부하에 대응한다.

4. 결론

공간 복사 냉방은 천정이나 바닥면을 냉각 표면으로 활용하기 때문에 표면 온도를 노점 온도 이상으로 높이거나 보조적인 제습 에어컨을 설치해야 하는 문제가 있었다. 본 연구에서는 주택 적용을 목표로 복사 패널 표면에 결로를 유발시킴으로써 냉각 열량을 증가시키고 실내 쾌적감도 개선할 수 있는 1.0 kW 용량의 복사-대류 방식의 하이브리드 냉방기에 대하여 검토하였다. 이 냉방기는 복사 패널 후방에 대류 방식의 제습부가 설치되어 실내 잠열부하를 담당하도록 하였다. 주된 결론은 다음과 같다.

- (1) 복사 패널의 경우 실외 35°C/24°C, 실내 27°C/19.5°C의 표준 조건에서 냉매순환량은 8.8 kg/h, 응축온도 51°C, 증발 온도 8.8°C, 냉방능력은 376 W, 성적계수는 1.75로 나타났다. 또한 복사 패널의 온도는 13°C ~ 14°C 사이에서 고르게 분포되었다. 한편 제습부의 경우 표준 조건에서 냉매 순환량은 21.1 kg/h, 응축온도 60.7°C, 증발 온도 5.0°C, 냉방능력은 949 W, COP는 2.11로 나타났다.
- (2) 복사 패널과 제습 냉방부를 동시에 가동시키며 표준 조건에서 시험 결과, 복사 패널의 냉방 능력은 333 W, 제습부의 냉방 능력은 894 W, COP는 1.89로 나타났다. 환 풍량이 감소하면 복사 패널, 제습부 모두 냉방 능력이 감소함을 보여는데 특히 제습부에서 감소량이 두드러졌다. 환 풍량이 감소하면 공기 측 전열 성능이 감소하고 따라서 냉방 능력이 감소하게 된다.
- (3) 복사 패널의 경우 상대 습도가 감소할수록 냉방 능력은 감소하나 소비 동력은 거의 변화가 없었다. 이는 상대 습도의 감소에 따라 냉방능력과 증발 온도가 감소하는데 증발 온도의 감소는 압축기 체적 효율의 감소를 유발하고 냉방 능력의 감소는 유량

을 감소시키므로 이들의 효과가 상쇄되어 소비동력의 변화는 거의 없는 것으로 판단된다.

- (4) 본 실험 데이터를 기반으로 냉방 부하의 변동에 대비하여 부하가 적을 때는 복사 패널만 가동하고 부하가 증가함에 따라 제습부를 가동시키되 부하 변동에 따라 풍량을 조절하는 방식의 제어 로직을 제시하였다.

References

- [1] F. Sodec, "Economic Viability of Cooled Ceiling Systems," *Energy and Buildings*, vol. 30, no. 2, pp. 195-201, 1999.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00087-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00087-5)
- [2] J. Niu, J. V. D. Kooi, H. V. D. Rhee, "Energy Saving Possibilities with Cooled Ceiling Systems," *Energy and Buildings*, vol. 23, no. 2, pp. 147-158, 1995.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(95\)00937-X](https://doi.org/10.1016/0378-7788(95)00937-X)
- [3] J. W. Jeong, S. A. Mumma, "Practical Cooling Capacity Estimation Model for a Suspended Metal Ceiling Radiant Cooling Panel," *Buildings and Environment*, vol. 42, no. 9, pp. 3176-3185, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.08.006>
- [4] J. Y. Lee, "Evaluation of Thermal Comfort in Ceiling Cooling System," *Korean J. Air-Conditioning and Refrigeration*, vol. 20, no. 4, pp. 287-293, 2008.
- [5] D. S. Song, "A proposal of Hybrid Cooling System Coupled with Radiation Panel Cooling and Natural Ventilation," *Korean J. Air-Conditioning and Refrigeration*, vol. 15, no. 6, pp. 543-550, 2003.
DOI: <https://doi.org/10.7782/JKSR.2012.15.6.543>
- [6] J. H. Lim, M. S. Yeo, I. H. Yang, K. W. Kim, "A Study on the Application of the Dehumidification System for Radiant Floor Cooling Using Ondol," *Korean J. Air-Conditioning and Refrigeration*, vol. 14, no. 7, pp. 607-616, 2002.
- [7] S. Y. Lee, S. H. Hwang, K. H., Kim, S. B. Leigh, "An Experimental Study for Evaluating Performance of Radiant Floor Cooling System Integrated with Dehumidification," *Korean J. Air-Conditioning and Refrigeration*, Vol. 14, No. 2, pp. 142-152, 2002.
- [8] H.-K. Kim, "Development of Radiation/Convection Hybrid Air-Conditioner," *Korea Construction and Traffic Technology Development Program*, 2008.
- [9] KS C 9306 "Air-Conditioner," *Korea Standard Association*, 2010.
- [10] ASHRAE Standard 41.1, "Standard Method for Temperature Measurement," *ASHRAE*, 1986.
- [11] ASHRAE Standard 41.2, "Standard Method for Laboratory Air-Flow Measurement," *ASHRAE*, 1987.

김 내 현(Nae-Hyun Kim)

[정회원]



- 1989년 12월 : Penn. State University Pennsylvania, PA, U.S.A (공학박사)
- 1994년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 기계공학과 교수

〈관심분야〉

열전달, 공기조화 및 내용