대한설비공학회 2006하계학술발표대회 논문집 pp.621~626

06-S-099

수평형 재생증발식 냉방기의 성능시험

송 귀 은, 이 대 영†
한국과학기술연구원 열 · 유동제어 연구센터

Performance Test for a Horizontal Regenerative Evaporative Cooler

Gwi-Eun Song, Dae-Young Lee†
Thermal-Flow Control Research Center, KIST, Seoul 120-700, Korea

ABSTRACT: Regenerative evaporative cooling is known as an environment-friendly and energy efficient cooling method. A regenerative evaporative cooler (REC) consisting of dry and wet channels is able to cool down the air stream below the inlet wet-bulb temperature. In the regenerative evaporative cooler, the cooling effect is achieved by redirecting a portion of the air flown out of the dry channel into the wet channel and spraying water onto the redirected air. In this study, a horizontal regenerative cooler is considered. In the horizontal regenerative cooler, the flow direction of evaporating water has a right angle to the flow direction of supply air. This difference was investigated with visualization technique and simplified 2-module performance test was done in a thermo-environment chamber. Optimum design configuration is changed due to the wet channel which are easily fully covered with evaporating water and block the air flow inside the channel. Applying the optimized fin configuration design with the highly wetting surface treatment, a regenerative evaporative cooler was fabricated and tested to identify the cooling performance improvement and operation characteristics. From the experimental results at the intake condition of 32 °C and 50 % RH, the supply temperature was measured to be around 23.4 °C. The cooling effectiveness based on the inlet dewpoint temperature was evaluated 73 % which is almost close to the design expectation.

Key words: Regenerative evaporative cooler(재생증발식 냉방기)

기 호 설 명

H	: 열교환기 높이	[m]	
L	: 열교환기 길이	[m]	
W	: 열교환기 너비	[m]	
k_{fin}	: 핀의 열전도율	[W/m^{2}K]	
NTU	: 전달단위수		
P_c	: 습채널 핀 간격	[m]	
P_h	: 건채널 핀 간격	[m]	
Q	: 열교환기의 총 열전달량	[W]	
δ_{fin}	: 핀 두께	[m]	
δ_{plate}	: 판 두께	[m]	
η	: 유용도		

†Corresponding author
Tel.: +82-2-958-5674; fax: +82-2-958-5690
E-mail address: ldy@kist.re.kr

1. 서 론

간접식 재생증발식 냉방기[1,2]는 에너지를 많이 소요하는 기존의 냉동기에 의존하지 않고, 공기에 물을 분사하여 물 증발에 따른 증발잠열 흡수로 공기의 온도를 낮추어 냉방을 공급하는 방식으로, 물을 분사하여 온도가 낮아진 공기와 실내 공급공기를 열교환시켜 저온을 얻기때문에 실내 공급공기의 습도 증가가 없으며, 공급공기를 흡입공기의 습구온도가 아닌 이슬점 온도까지 냉각할 수 있는 기술이다. 이러한 증발식 냉방시스템은 송풍기를 제외하면, 전혀 에너지의 투입없이 냉방을 얻을 수 있는 큰 장점이 있다. 더욱이 이 기술을 환기장치에 적용하면 환기부하를 크게 경감할 수 있을 뿐만 아니라 환기를 하지 않는 경우에 비해서도 오히려 냉방부하를 줄일 수 있어, 추가적인 에너지 소비 없이 실내 공기질을 향상시킬 수 있으므로, 점차 강화되고 있는 실내 환경 규제에도 적극적으로 대처할 수 있다. 또한 이 기술은, 물 이외의 냉매를 사용하지 않으므로, CFC계열의 냉매에 의한 오존층 파괴, 온실효과 등이 전혀 없으며, 에너지 소비를 절감에 따른 CO_2 배출량 감소효과를 얻을 수 있는 친환경 기술이다.

Fig. 1은 재생 증발식 냉방장치의 개략도를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 고온의 흡입공기는 열교환기를 통과하며 온도가 낮아지며, 온도가 낮아진 저온 공기 중 일부는 주 공기의 통로와 평행하게 설치된 물통 위를 주 공기의 유동방향과 반대로 이동한다. 물통 위를 통과하는 공기는 물통에서 물이 증발하면서 공기를 냉각하여 저온이 되어, 주공기 통로로부터 현열을 빼앗아 주공기의 온도를 감소시킨다.

기존의 연구[1,2]에서는 재생증발식 냉방기는 공기의 유동방향과 증발수의 흐름 방향이 일치하였으나 건물 공조 등에 사용하기위해서 냉방기의 크기가 커져야하는 경우에는 추가적 압력 손실 등의 어려움에 이르게 되어 수평적 구조를 가지는 재생증발식 냉방기의 개발이 필요하게 되었다. 이 경우에는 증발수는 중력방향으로 흘러가게 되고, 공기는 이와 수직으로 수평한 채널을 따라 흘러가게 되므로 수직형에 비하여 열교환기 채널들을 막아서 성능을 크게 감소시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 열교환기 최적 형상의 결정뿐만 아니라 서로 직교하며 흐르는 증발수에 의한 영향을 살펴보았다.

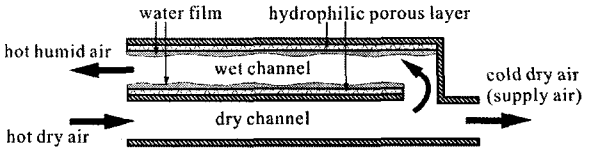


Fig. 1 Principle of regenerative cooler

2. 증발수를 고려한 최적설계

2.1 최적 설계

열교환기 전면면적과 유동방향 길이가 주어진 경우에 대하여, 핀 간격, 판 간격 등 열교환기 최적 구조를 기존의 잘 정립되어있는 핀이 삽입된 채널 내에서의 열전달 및 물질전달에 대한 연립미분 방정식[3]들을 이용하여, 압력손실 제한 조건하에서 열전달량을 최대화하는 열교환기의 구조를 결정하였다.

Fig. 2는 해석 모델의 개략도를 나타낸 것으로 본 연구에서 냉방기의 폭(W)과 너비(H)는 각각 단위길이(1 m X 1 m)로 설정하였고 길이(L)는 195.2 mm로 선정하였다. 건습채널에서 판의 두께를 모두 0.15 mm 로 하였으며 실제 제작 가능한 구조에 기반을 두어 선정하였다. 또한, 냉방기의 재질은 알루미늄 (k=202 W/mK)으로 하였으며, 외기 조건은 여름철 공조 조건을 감안하여 건구온도 32 °C, 상대습도 50 %로 설정하였다.

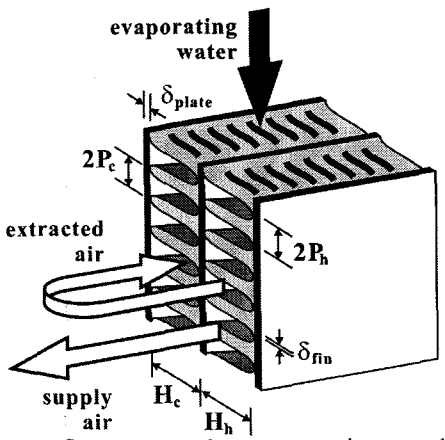
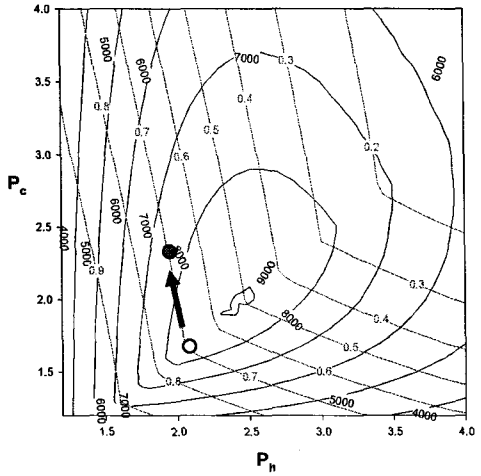
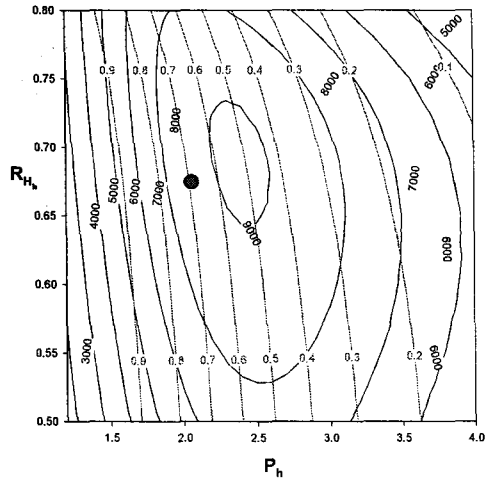


Fig. 2 Structure of regenerative cooler



(a) P_h-P_c



(b) P_h-R_h

Fig. 3 Contour plot of Q and η

Table 1 Condition and variables

Operation condition	$T_{h,in}$=32 °C, RH_{in} =50 %, R_m=0.3
Constraint and requirement	$\Delta P \le 25$Pa, $\eta \ge 0.7$
Given quantities	W=1 m, H=1 m, L=195.2 mm δ_f=0.15 mm, δ_p=0.15 mm, $H_s = H_h + H_c$=48mm
Design variables	P_h, P_c, R_{H_h}

연구에서의 해석 모델[3]은 건채널과 습채널의 반복적인 구조로 이루어져 있으므로 해석 영역을 Fig. 2와 같이 한 쌍의 채널로 하였으며, 냉방 효율 70 %를 유지하면서 열전달량을 최대로 얻을 수 있는 핀 간격, 판 간격, 추기비율, 두께 등을 결정하였다. 건채널과 습채널에서의 열전달과 물질전달에 관한 식들을 풀어서 최적화에 필요한 계산들이 이루어지며 유용도와 냉방용량의 정의는 다음과 같다.

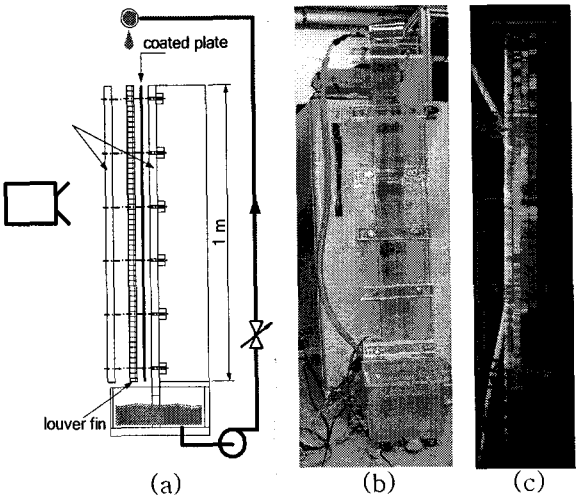
$$\eta = \frac{T_{h,in} - T_{h,out}}{T_{h,in} - D_{h,in}} \tag{1}$$

$$Q = \dot{m}_h (1 - R_m) c_p (T_{h,in} - T_{h,out}) \tag{2}$$

최적의 설계 형상은 Fig.3에 냉방용량과 유용도의 그림에 정리되어 있듯이 건채널에서 2.1 mm, 습채널은 1.6 mm로 계산되었다. 건채널을 통과한 공기는 30%가 습채널로 추기(R_{mc}=0.3)되는 것이 최적 성능에 가까움을 확인할 수 있었다. 또한 채널을 통과하는 공기의 최대 허용 압력강하를 25 Pa로 설정하여 이를 바탕으로 열교환기의 높이의 비(H_d/H_s)는 0.33이 최적조건임을 확인할 수 있었다. 이러한 최적 조건들을 Table 1에 정리하였다.

2.2 증발수의 영향

증발수는 습채널의 위에서 아래로 흘러내리고,



(a) (b) (c)

Fig. 4 Visualization test

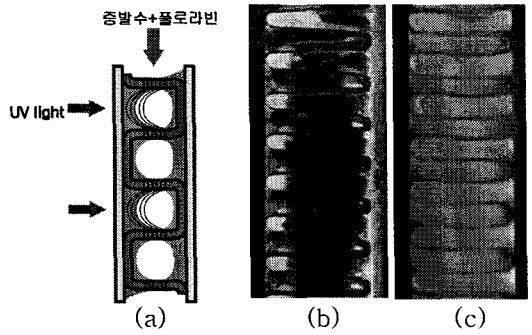


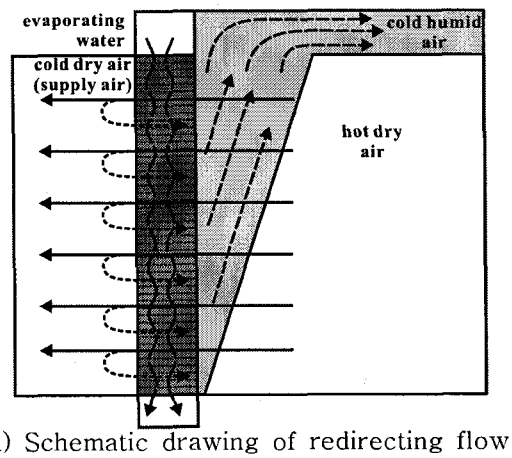
Fig. 5 evaporating water in wet channel

측면에서는 공기가 불어오는 상황이므로 증발수가 습채널을 표면장력에 의해서 막고 공기의 흐름을 방해할 수 있는 가능성이 있다. 따라서 채널의 크기와 간격, 증발수 유량 등등의 요인으로 인해서 원래 설계한 것과는 다른 모습을 가질 수 있다. 이러한 이유로 습채널 내의 물맺힘을 최소화하면서 모든 습채널을 적실 수 있는 형상을 결정하는 것이 중요하다.

실험을 위해 아래의 Fig. 4의 사진들에처럼 2개의 핀 구조에 대하여 실험을 수행하였다. 설계조건에 맞추어 전체 길이는 1 m로 하였으며 가시화와 온습도 측정을 위해 투명아크릴 구조에 배치 및 측정할 수 있도록 하였다. 이러한 젖음성을 가시화하기위해서 유동이 있는 경우에 플로라빈이라는 형광물질을 증발수에 혼합하여 UV광을 쏘여주어 습채널 내의 맺힘 영향과 증발수의 흘러내림을 관찰하였다. 물길이 없는 경우 (78.6 mm), 물길이 없고 핀 간격을 늘린 경우, 물길이 있고 핀 간격을 수정하진 않은 경우, 핀 형상을 키운 경우 (97.6 mm, 2*97.6 mm) 등의 여러 경우에 증발수가 핀에 맺히지않고 잘 흘러갈 수 있는 핀 형상을 연구하였다. Fig. 5의 (b) 사진에서 볼 수 있듯이 UV광에 의해서 발광된 증발수가 잘 흘러 내려가는 모습을 관찰할 수 있었다. 그러나 측면에서 공기를 2~3 m/s의 속도로 흘려주면 증발수가 유동 방향으로 쓸려가는 것을 Fig.5 (c)에서 관찰 할 수 있었다.

증발수가 위에서 아래로 중력에 의해서 떨어지게 되면 루버 핀들의 배열 구조상의 특징들로인해 특별한 영역으로만 흘러내리는 것을 관찰할 수 있었다. 따라서 표면 젖음성이 상당히 떨어질 수도 있음이 관찰되었으나 사용된 표면 코팅의 영향으로 이러한 점이 큰 문제가 되지는 않을 것이란 것을 확인하였다. 루버 핀들에 의한 영향, 측면 공기 유동의 영향을 완화시키기 위해서 습채널에 물길을 추가적으로 내어 증발수의 흐름이 루버 핀이나 공기 흐름에 영향을 받지않고 흐를 수도 있는지도 연구하였다.

측면 공기 공급에 의한 영향이 상대적으로 작아질 수 있는 핀 간격을 결정하기위해서 다양한 핀 간격에 대하여 증발수 실험을 수행하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 핀 간격이 촘촘한 경우에 습채널 전체를 증발수가 막아서 공기가 흐를 수 있는 공간을 막는 것을 볼 수 있으며 적절한 크기로 핀 간격이 넓은 경우에는 증발수자 습채널의 일부만을 막으면서 흘러내리므로 측면 공기의 흐름을 방해하지 않게됨을 관찰할 수 있었다. 이를 통해 핀 간격이 최소 2.3 mm 이상이 되어야 하며 이 값은 최적 설계된 습채널 간격보다 큰 값으로 설계되어야함을 의미한다. 이러한 이유로 최적 형상에서의 습채널 핀 간격인 1.7mm이 아닌 2.3mm으로 설계되었으며 냉방 효율 70% 조건에서 냉방용량의 약 7%정도의 감소를 예상할 수 있다.



(a) Schematic drawing of redirecting flow

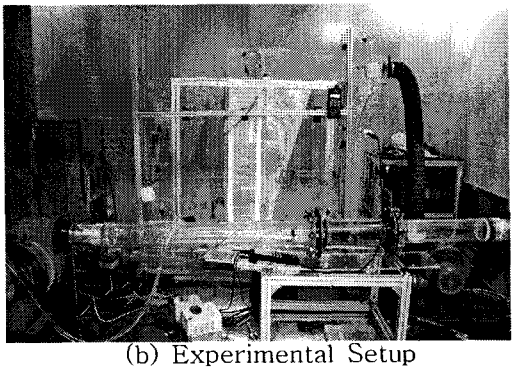

(b) Experimental Setup

Fig. 6 Performance test setup

3. 냉각 성능 시험

3.1 모듈 제작

시험용 모듈의 열교환기는 이전 절들에서 설명된 최적 형상에서 증발수의 영향을 고려하여 증발수 맺힘이 적은 형상들로 재설계하여 제작이 이루어졌다. 또한 열교환기는 열전달 계수가 평판보다 우수한 루버핀(louver fin)이 사용되었다. 각 모듈에서의 핀과 판 사이의 열전달 저항을 줄이기 위해서 브레이징(brazing)과정을 통해서 접합하였으며 제작된 열교환기의 습채널은 증발수의 핀내의 젖음성 향상과 물 맺힘을 줄이기 위해서 표면을 다공성 코팅[5,6]을 하였다. 증발수는 직수를 사용하였으며 솔레노이드 밸브를 사용하여 60초를 주기로 하여 1초 동안만 증발수를 뿌려지도록 조절하였다.

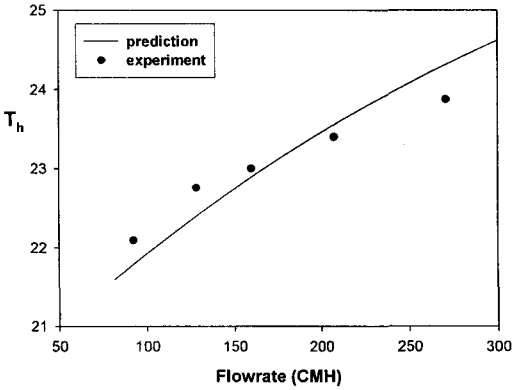
건채널 입출구에서의 온습도와 습채널 입출구에서의 온습도를 측정하였으며, 건채널과 습채널에서의 유량과 압력 손실을 차압계와 터빈 유량계를 사용하여 측정하였다.

Fig. 6 (a)의 실선들은 건채널을 통해서 들어오는 공기를 의미하며 점선들은 건공기의 일부가 습채널을 통과하는 것을 그린 것이다. 추기된 건공기는 습채널을 통과하며 증발수와 접촉하며 온도와 습도가 낮아지며 삼각형 형태의 습채널 공기 가이드를 통해서 배출된다. 건채널과 습채널이 교대로 브레이징된 상태이며 습채널에 공기 가이드가 부착되어 있다.

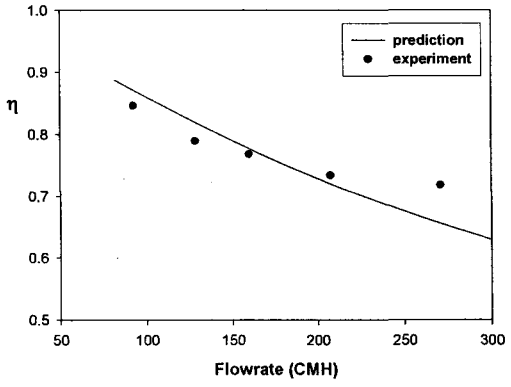
3.2 성능 시험

이 실험을 위해서 건채널용 송풍기와 습채널용 송풍기를 사용하여 각각에 송풍기에 연결된 인버터를 통해서 회전수를 제어하여 유량을 조절하였으며 추기되는 유량이 30%가 될 수 있도록 조절하며 실험이 이루어졌다. 모든 실험은 열환경 챔버 내에서 온도 32 °C, 상대습도 50 %의 조건 속에서 이루어질 수 있도록 하였다. 송풍 유량을 변화시켜 가면서 입출구에서의 온습도의 변화를 측정하여 출구 공기온도와 유용도를 측정 및 계산하였다.

Fig. 7의 그림은 예상 냉방 성능과 실험을 통해서 측정된 냉방 성능을 그린 것이다. 모든 경우에 온습도조건을 32도 50 %에 해당하는 경우로 정리되었다. 전체적인 경향은 이론 결과와 실험 결과가 유사하게 나왔으며, 유량이 커질수록 습채널에서의 NTU가 감소하여 출구 온도가 높아지게 되며 유용도는 작아지게 된다. 그러나 공급 풍량의 증가로 냉방용량은 증가하게 된다. 고유량 범위에서는 루버핀에 의한 열전달 계수의 향상으로 루버핀이 고려되지 않았던 예상 성능에 비하여 크게 측정되었다.



(a) Supply air temperature



(b) Cooling effectiveness

Fig. 7 Cooling performance

5. 결 론

수평형 재생 증발식 냉각기의 최적 설계, 제작 및 시험을 수행하였으며, 기존의 방법인 수직형에 비하여 대용량에 적용하기위한 수평형은 증발수의 흐름 방향과 공기의 흐름 방향이 직교하여,

증발수가 습채널의 공기흐름을 방해하여 냉방성능을 저하시킬 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 이러한 이유로 증발수가 루버핀 사이로 원활이 흘러 내려갈 수 있는 최소 핀 간격을 가시화의 방법으로 결정할 수 있었으며, 최적 핀 간격보다 넓은 2.3 mm 이상이 되어야 됨을 확인할 수 있었다. 이러한 조건에서 냉방용량과 유용도를 측정하여 32 °C 50 % 조건에서 공급온도 23.4 °C와 효율 73 %을 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. Lee, D.Y., Yoon, Y.I., and Lee, J.H., 2003, Optimal design and performance evaluation of a finned regenerative evaporative cooler, IHTC 12, Grenoble, France.

2. Maclaine-Cross, I.L. and Banks, P.J., 1983, A general theory of wet surface heat exchangers and its application to regenerative evaporative cooler, J. Heat Transfer, 103, 579-585.
3. Erens, P. J. and Dreyer, A.A., 1993, Modelling of indirect evaporative air coolers, Int. J. Heat Mass Transfer, 36, 17-26.
4. Hsu, S.T., Lavan, Z., and Worek, W., 1989, Optimization of wet-surface heat exchangers, Energy, 14, 757-770.
5. Lee, D.Y., Lee, J.W., and Kang, B.H., 2004, Effects of hydrophilic porous layer treatment on evaporation heat transfer from an inclined surface, ISHT 2004, Beijing, China.
6. Kim, H.Y. and Kang, B.H., 2003, Effects of hydrophilic surface treatment on evaporation heat transfer at the outside wall of horizontal tubes, Applied Thermal Engineering, 23, 449-458.