

증발냉각을 이용한 배기열 회수장치의 성능에 관한 연구[§]

유성연* · 김태호** · 김명호*

* 충남대학교 기계설계공학과

Performance of Heat Recovery System using Evaporative Cooling

Seong Yeon Yoo^{*}, Tae Ho Kim^{**†} and Myung Ho Kim^{*}^{*} Dept. of Mechanical Design Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

(Received May 13, 2014 ; Revised October 6, 2014 ; Accepted October 7, 2014)

Key Words: Evaporative cooling(증발냉각), Sensible Cooling(현열냉각), Exhaust Heat Recovery(배기열 회수), Plastic Heat Exchanger(플라스틱 열교환기), Effectiveness(유효도)

초록: 현열 뿐만 아니라 잠열을 이용하는 증발냉각은 배기열 회수에 매우 유용하게 사용될 수 있다. 본 연구의 목적은 증발냉각을 이용한 배기열 회수장치의 성능을 실험적으로 규명하는 것이다. 성능실험장치는 플라스틱 열교환기, 물 분무 노즐, 공기유동용 팬, 물 순환용 펌프, 수조, 온도·습도·유량 측정 센서 등으로 구성되었다. 증발이 없는 현열 회수에서의 유효도와 증발을 수반하는 전열 회수에서의 유효도를 여러가지 작동조건에서 측정하여 비교하였다. 현열냉각과 증발냉각의 유효도는 공기의 유량이 증가함에 따라 감소하고, 대향류에서의 유효도가 평행류에서의 유효도 보다 훨씬 높다. 증발냉각의 경우 물 유량이 증가함에 따라 유효도는 증가하고, 평행류가 대향류보다 물 유량에 더 민감함을 알 수 있다.

Abstract: Evaporative cooling is a very effective way for exhaust heat recovery that uses both latent heat and sensible heat. This study investigated the performance of a heat recovery system using evaporative cooling. The experimental apparatus comprised a plastic heat exchanger, a water spray nozzle, an air blowing fan, a water circulation pump, and measuring sensors for the temperature, humidity, and flow rate. The effectiveness of the sensible heat recovery without evaporation was measured and compared with that of the total heat recovery with evaporation. The effectiveness of the sensible and total heat recoveries decreased as the air flow rate increased, and a much higher effectiveness was obtained with the counterflow arrangement in both cases. For total heat recovery, the effectiveness increased with the water flow rate, and the parallel flow arrangement was found to be more sensitive to the water flow rate than the counterflow arrangement.

1. 서 론

우리나라 전체 에너지 소비의 약 25%를 건물이 차지하고 있으며, 그 중 절반 가량이 냉난방을 위한 공기조화장치에서 사용된다.⁽¹⁾ 따라서 국가적인 에너지 관리를 위해서는 냉난방 에너지 소비를 줄

일 수 있는 에너지 절약형 공기조화장치의 개발이 필요하다.

반도체, 정밀화학, 의약품 등의 산업체와 상업용 건물의 공조기에서 나오는 실내 배기열은 온도는 낮지만 양이 대단히 많으며, 이를 회수하여 실외에서 도입되는 신선한 외기를 가열 또는 냉각하는데 직접 사용함으로써 많은 에너지 절약효과를 거둘 수 있다. 배기열을 회수하기 위해 배출되는 실내공기와 도입되는 외기 사이에 열교환기를 설치한다. 이를 통해 겨울철에는 실내에서 배출되는 따뜻한 공기를 사용하여 도입되는 외기를 가열하

[§] 이 논문은 2014년도 대한기계학회 열공학부문 춘계학술대회(2014. 4. 23.-26., 제주대) 발표논문임

[†] Corresponding Author, thkim2845@naver.com

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

고, 반대로 여름철에는 실내의 차가운 공기를 사용하여 도입되는 외기를 냉각한다. 특히 여름철에는 배출되는 배기에 물을 분무하면 물의 증발열로 외기를 추가적으로 냉각할 수 있으며, 증발냉각시스템은 증기압축냉각시스템에 비해서 4분의 1의 전력만을 소비하므로 냉각에너지를 획기적으로 줄일 수 있다.⁽²⁾

증발냉각을 이용하여 배기열을 회수하는 방법으로는 주유동에 직접 물을 분무하여 증발냉각하는 직접식 증발냉각방법(DEC : Direct Evaporative Cooling)과 분리된 채널을 통해 증발냉각된 유체와 냉각될 유체를 열교환시키는 간접식 증발냉각방법(IEC : Indirect Evaporative Cooling)이 있다. 본 연구에서 사용한 간접식 증발냉각은 직접식 증발냉각에서 발생할 수 있는 습도 증가에 따른 실내 쾌적성 문제와 오염된 수증기의 흡입을 통해 야기되는 재향 군인병(Legionnaire's disease)의 문제를 야기하지 않으며, 손쉬운 수질관리 등의 장점을 가진다.^(3,4) 많은 연구자가 증발 냉각을 위해 종이,⁽⁵⁾ 중공사막,⁽⁶⁾ 식물성섬유⁽⁷⁾ 등의 다양한 매개체를 사용하였으며, 박테리아의 이동은 막고 습기만을 통과시킬 수 있는 다공성의 세라믹 재질을 사용한 증발냉각까지 제안된 바 있으며, 이를 반간접식 증발냉각이라 부른다.⁽⁴⁾ 특히 Pescod⁽⁸⁾는 창문형 IEC 장치에 최초로 플라스틱 판형 열교환기를 적용한 바 있으며, 플라스틱 열교환기는 온도와 압력이 적절히 낮은 곳, 특히 공기조화 분야에서 매우 적절하게 사용될 수 있다고 평가하였다. Maclaine-cross 와 Banks⁽⁹⁾는 Pescod의 판형 열교환기에 대해 예측된 유용도가 보고된 측정치보다 상당히 높음을 보였고, 이를 판형 열교환기가 충분히 젖지 않는 현상으로 인한 결과로 평가하여 고른 수분증발이 증발냉각의 성능향상을 위한 주요 인자임을 보였다. 또한 간접식 증발냉각의 성능향상을 위한 형상 최적화 및 기존 공조시스템과 결합한 시스템, 그리고 다양한 성능실험 및 현장검증에 대한 연구가 진행되어 왔다.⁽¹⁰⁾ 특히 국내에서는 IEC 와 DEC 를 통해 기존 VAV 공조시스템에 비해 냉난방에너지를 절약할 수 있는 공조시스템이 제안된 바 있고,⁽¹¹⁾ 해외에서는 일반 건물은 물론 데이터센터에 증발냉각을 적용하는 연구가 많이 수행되고 있다.⁽¹²⁾

본 연구에서는 열전달 촉진기술을 적용하여 본 저자가 직접 개발한 고효율 플라스틱 판형 열교환기를 사용한 증발냉각 배기열 회수장치를 설계·제작하고, 여러가지 작동조건에서의 성능을 실험

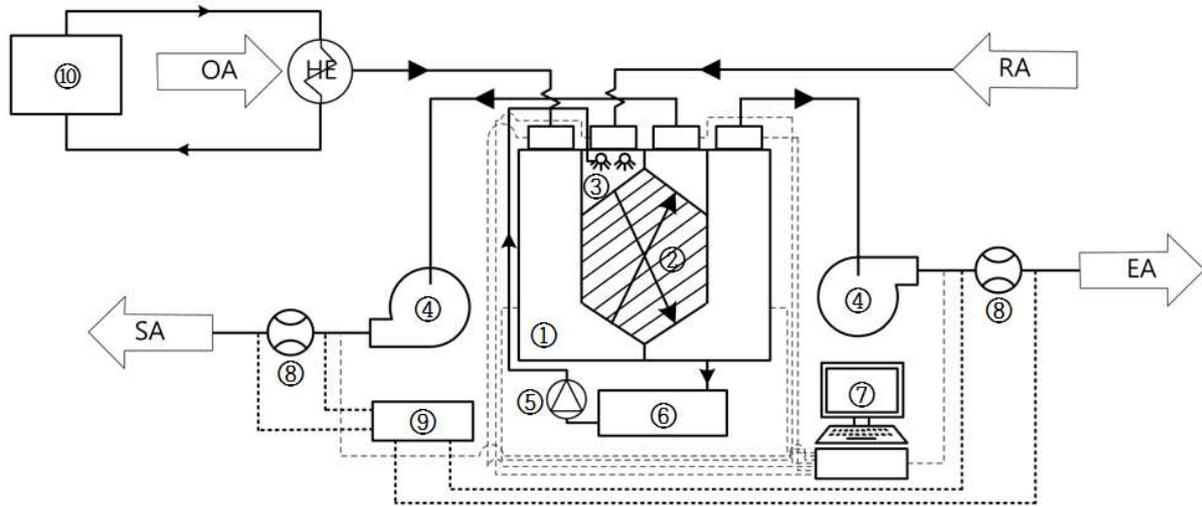
적으로 규명하였다. 증발이 없는 현열 회수의 경우는 공기의 유동이 평행류와 대향류인 경우에 공기의 유량을 변화시켜가면서 실험을 수행하여 성능을 고찰하였다. 증발냉각의 경우는 공기의 유동은 대향류로 고정된 상태에서 물 분무방향과 공기의 유동 방향이 평행류인 경우와 대향류인 경우에 대해 공기와 물의 유량을 변화시켜가면서 실험을 수행하여 성능을 비교·분석하였다.

2. 성능실험장치 및 실험방법

2.1 배기열 회수 성능실험장치

증발냉각을 이용한 배기열 회수장치는 플라스틱 열교환기, 공기 유동용 팬, 물 분무 노즐, 물 순환용 펌프, 수조, 유동통로 등으로 구성되어 있으며, Fig. 1 은 성능실험장치의 개략도를 나타내고 있다. 외기(OA)-급기(SA)와 환기(RA)-배기(EA) 간의 공기유동은 평행류 혹은 대향류가 될 수 있도록 설계하였으며, 터보팬을 사용하여 유동을 발생시켰다. 증발냉각을 위해 RA 측에 분무노즐을 설치하여 물이 미세하게 분무되도록 하였으며, 증발되지 않고 흐르는 물은 배기열 회수장치 하단의 유로를 통해 수조에 재유입되고, 펌프를 통해 재순환될 수 있도록 하였다. OA 측에 항온조를 설치하여 약 35℃ 내외의 온도를 유지하도록 하였으며, RA 는 공기조화 공간으로부터 유입되도록 하여 20℃ 내외의 온도를 유지하였다. 각 지점의 건구온도와 습구온도를 측정하기 위해 T-type 의 열전대를 사용하였으며, 이때 습구온도는 열전대에 물을 적신 솜으로 감싸서 측정하였다. 공기유량은 차압식 유량계인 노즐 전후단의 차압을 측정하여 계산하였으며, 물의 유량은 분무노즐에서 나온 물을 비이커에 일정시간동안 담아 측정하였다. 모든 측정자료는 자료획득장치를 통해 컴퓨터에 자동으로 저장되도록 하였다.

본 연구에서 사용한 열교환기의 전열판은 두께 0.4 mm 의 플라스틱 재질로 산과 산의 간격이 6 mm 인 물결 모양의 유로를 가지고 있다. 전열판의 형상은 육각형으로 입구너비 125 mm, 유동방향 직선부 길이 250 mm, 폭 230 mm 이며, 면적은 0.065 m² 이다. 이러한 전열판 92 개를 3 mm 간격으로 적층하여 약 30 cm 높이의 열교환기를 만들었으며, 조립된 열교환기의 사진은 Fig. 2 와 같다. 공기의 누설을 살펴보기 위해 Smoke generator 를 통해 가시성 있는 연기를 분사하였으며, 유로간의 연기 침입이 없는 것으로 보아 각각의 유로가 잘



① heat recovery system, ② heat exchanger, ③ water spray nozzle, ④ fan, ⑤ pump, ⑥ water tank, ⑦ data acquisition system, ⑧ flow meter, ⑨ micro-manometer, ⑩ hot water tank

Fig. 1 Experiment apparatus for heat recovery system



Fig. 2 Photo of plastic heat exchanger

밀폐되었음을 확인할 수 있었다.

2.2 배기열 회수 성능실험방법

먼저 환을 틀어 공기를 순환시키고, 인버터로 공기의 유량을 조절하였다. 다음으로 펌프를 가동하여 물을 분무시키고 밸브를 조절하여 분무유량을 설정하였다. 이후 항온조를 사용하여 공기의 온도를 조절하였으며, 온도변화가 정상상태에 도달한 후 각 지점의 건구온도와 습구온도를 측정하였다. 이때 열교환기 전후의 각 지점에 각각 2개의 건구온도와 3개의 습구온도를 설치하고 5초마다 측정하여 산술평균함으로써 위치에 따른 편차를 최소화하였다. 분사되는 물의 온도는 증발냉각 성능에 거의 영향을 미치지 않으므로 물의 온도는 따로 측정하지 않았다. 또한 실험결과가 정상상태에 도달하도록 하기 위해 현열만을 이용한 배기열 회수실험은 약 15 분, 증발냉각을 이용한 배기열 회수실험은 약 30 분간 예비가동을 시킨 후 측정을 수행하였다. 물의 분무방향과 물이 분무되는 유로의 공기유동 방향을 대향하게 혹은 평행하게

만들기 위해 환에 연결된 덕트의 위치를 바꾸었다. 평행류를 이루는 경우는 분무방향과 공기유동 방향이 중력방향이고, 대향류를 이루는 경우의 공기유동 방향은 중력방향과 반대이다.

3. 성능실험결과 및 고찰

플라스틱 열교환기의 현열회수 성능을 알기 위해 물을 분무하지 않은 상태에서 공기의 유동을 평행류와 대향류로 바꾸어가면서 실험을 수행하여 결과를 분석하였다. Fig. 3 은 현열 열교환만을 이용하여 배기열을 회수하였을 때의 공기의 Re 수에 따른 유용도 변화를 나타낸 것이다. 이때 Re 수의 특성길이는 식 (1)과 같이 정의되며, 여기서 a 는 열교환기 입구 유로의 폭을 의미하며, b 는 하나의 유로의 높이를 의미한다. 이때 입구의 높이에 비해 폭이 훨씬 크므로(a>>b) 분모항의 b 를 무시하면 특성길이는 2a 가 된다.

$$D_h = \frac{4A}{P} = \frac{4ab}{2a+2b} \quad (1)$$

정의된 특성길이에 따라 실험조건인 50, 100, 150, 200 CMH 의 Re 수를 구하면 각각 156, 312, 469, 625 이다.

현열 열교환기에서의 유용도는 식 (2)와 같이 정의되며, 공기측의 실제 열전달률을 가능한 최대 열전달률로 나눈 값이다. 이때 이용하고자 하는 공기는 외기이므로 실제 열전달률은 식 (3)과 같

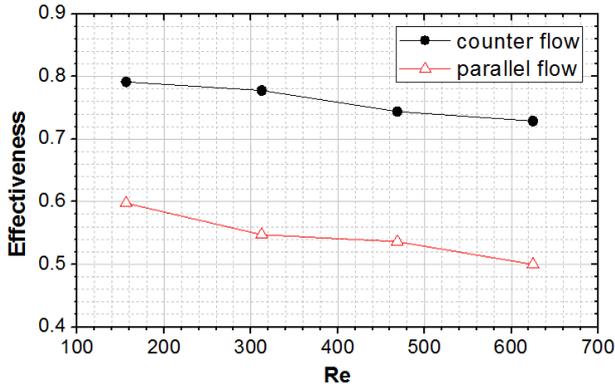


Fig. 3 Variation of effectiveness with Reynolds number of air for sensible cooling

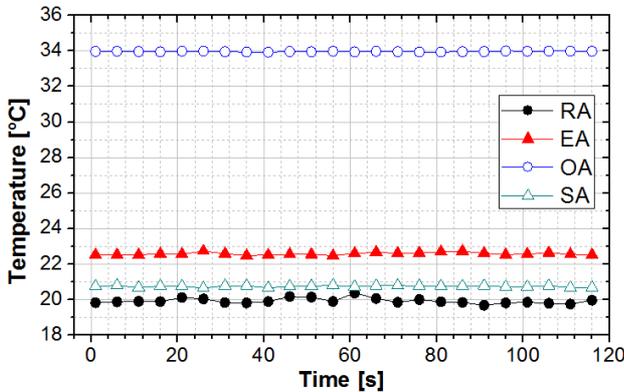


Fig. 4 Variation of temperature with measuring time for evaporative cooling in case of parallel flow

이 외기가 배기열 회수를 통해 잃은 열전달률이며, 최대 열전달률은 장치 전후에서의 최대 온도차에 외기 혹은 실내공기 중 최소 열용량을 곱한 값으로 정의되며, 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{actual}}{\dot{Q}_{max}} \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{actual} = \dot{m}_h C_p (T_{OA} - T_{SA}) \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{max} = (\dot{m} C_p)_{min} (T_{OA} - T_{RA}) \quad (4)$$

RA-EA 측 공기유동과 SA-OA 측 공기유동이 엇갈리도록 한 대향류인 경우의 유용도는 0.7 에서 0.8 사이이며, 평행류인 경우의 유용도는 0.5 에서 0.6 사이로 대향류의 경우가 평행류의 경우에 비해서 훨씬 높은 유용도를 보이고 있다. 공기유량이 증가함에 따라 유용도는 감소하며, 공기유량이 4 배까지 증가하여도 유용도 감소는 0.1 미만이다.

증발냉각을 이용한 경우의 배기열 회수 성능을 알기 위해 물을 분무한 상태에서 실험을 수행하여

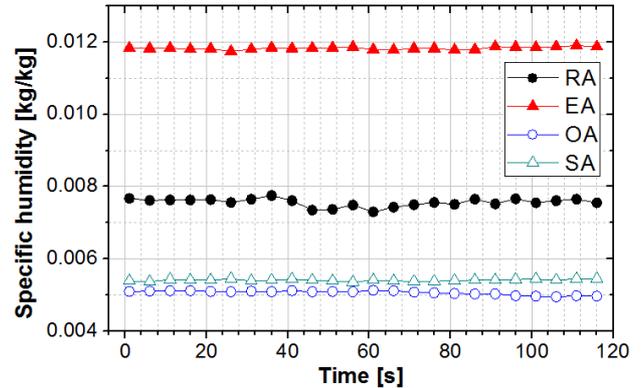


Fig. 5 Variation of specific humidity with measuring time for evaporative cooling in case of parallel flow

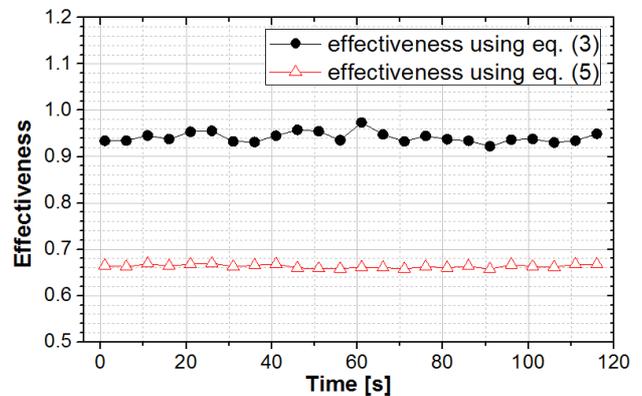


Fig. 6 Variation of effectiveness with measuring time for evaporative cooling in case of parallel flow

결과를 분석하였다. 이때 외기와 실내공기의 유동은 더 높은 유용도를 보이는 대향류가 되도록 하였으며, 물 분무와 실내공기의 유동은 평행류 혹은 대향류가 되도록 하였다. Fig. 4는 증발냉각을 이용하여 배기열을 회수할 때 각 지점의 온도변화를 나타낸 것이다. 이때 공기유량은 150 CMH 이고, 분무유량은 0.2 l/min 을 유지하였으며, 공기유동은 물 분무방향과 평행류를 이루도록 하였다. 시간에 따른 온도변화가 거의 없는 것으로 보아 정상상태가 잘 유지되고 있음을 알 수 있다. 증발냉각을 통해 34°C의 OA 가 RA 의 온도에 근접한 20.7°C까지 냉각된 것을 알 수 있다. 그러나 RA 는 증발을 통해 추가로 냉각된 후에 OA 로부터 열을 전달받으므로 단지 2.7°C의 온도 상승만을 보이고 있다. Fig. 5 는 위와 동일한 조건에서 각 지점의 절대습도를 비교한 것으로 RA, EA, OA, SA 모두 시간에 따른 습도변화는 거의 없는 것을 볼 수 있다. RA 측에 수분이 분무됨에 따라 EA 의 절대습도는 0.0043 kg/kg 이 높아졌으며, 이는 총 분무유량 0.2 l/min 중에서 약 6.4%인 0.0128 l/min 만이 증발되었음을 의

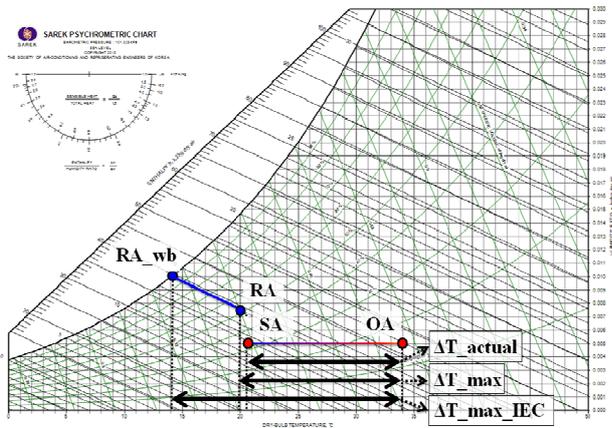


Fig. 7 Psychrometric chart for effectiveness calculation

미한다. 반면 SA 측은 OA 측에 비해 약 0.003 kg/kg 의 습도증가를 보였는데, 이는 수분 누설의 영향과 측정오차 때문으로 생각된다.

Fig. 6 은 앞서 측정한 결과로부터 증발냉각 유용도를 구한 결과로, 정상상태에 도달한 후 일정한 유용도를 보이고 있으며, 그 값은 약 0.66 이다.

증발냉각의 유용도는 현열냉각과 동일하게 가능한 최대 열전달률에 대한 실제 열전달률의 비로 정의된다. 그러나 실제 열전달률은 식 (5)와 같이 현열냉각과 동일한 반면 최대 열전달률을 계산할 때 최대 온도차는 식 (6)와 같이 외기온도와 RA 의 습구온도의 차이로 정의된다.

$$\dot{Q}_{actual} = \dot{m}_h C_p (T_{OA} - T_{SA}) \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{max} = (\dot{m} C_p)_{min} (T_{OA} - T_{RA_wb}) \quad (6)$$

현열냉각과 증발냉각의 유용도 정의의 차이를 습 공기 선도에 나타내면 Fig. 7 과 같다. 동일한 OA 와 SA 조건 하에서 증발냉각 유용도의 경우 유용도의 분모항인 최대 온도차가 증가하여 유용도 값이 낮아진다. 현열냉각과 비교하기 위해서 식 (4) 의 최대 온도차를 사용하면 유용도가 약 0.94 까지 올라가며 조건에 따라서는 1 보다 클 수도 있다. 따라서 증발냉각은 현열냉각에 비해 냉각능이 훨씬 우수함을 알 수 있다.

Fig. 8 은 물을 공기유동과 평행하게 혹은 대향하게 분무하여 증발냉각하였을 때 공기의 Re 수에 따른 유용도의 변화를 나타낸 것으로, 이때 분무 유량은 0.2 l/min 으로 일정하게 유지하였다. 모든 공기유량에서 대향류의 유용도가 더욱 높게 나타났으며, 그 이유는 물 분무는 중력방향으로 이루어지나 공기는 중력과 반대방향으로 불어 공기유

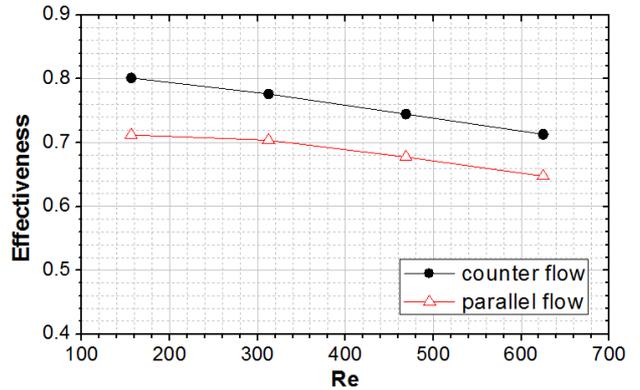


Fig. 8 Variation of effectiveness with Reynolds number of air for evaporative cooling

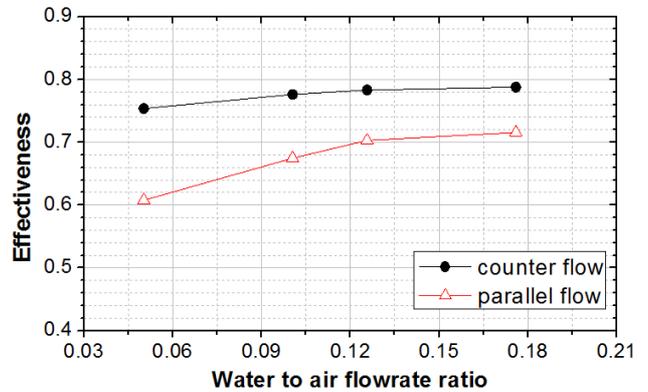


Fig. 9 Variation of effectiveness with water to air flowrate ratio for evaporative cooling

로 내의 수분의 체류시간이 길어지고, 물과 공기의 접촉 및 혼합이 촉진되어 증발효율이 높아졌기 때문이다. 분무방향과 상관없이 유용도는 공기유량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이고 있으며, 50 CMH 일 때 대향류와 평행류는 각각 0.80, 0.71, 200 CMH 일 때는 각각 0.71, 0.65 의 유용도를 나타내고 있다. 또한 공기유량이 증가함에 따라 대향류와 평행류에서 유용도의 감소는 거의 동일한 기울기를 가지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9 는 공기유량을 100 CMH 로 고정하였을 때 분무유량에 따른 유용도의 변화를 비교한 것이다. 앞서와 마찬가지로 대향류가 평행류에 비해 항상 유용도가 높으며, 공기유량과는 반대로 분무유량이 증가할수록 유용도가 증가하는 경향을 가진다. 그러나 유용도의 증가폭은 분무유량이 증가함에 따라 점차 감소하며 평행류가 대향류에 비해서 분무유량에 더 민감하다는 것을 알 수 있다. 증가폭의 기울기로 보아 분무유량을 증가시켜도 평행류는 대향류의 경우와 비슷한 성능을 얻기 어려우며, 따라서 분무유량보다는 분무특성이 배기열 회수장치의 성능에 더욱 큰 영향을 미치는 인자임을 알

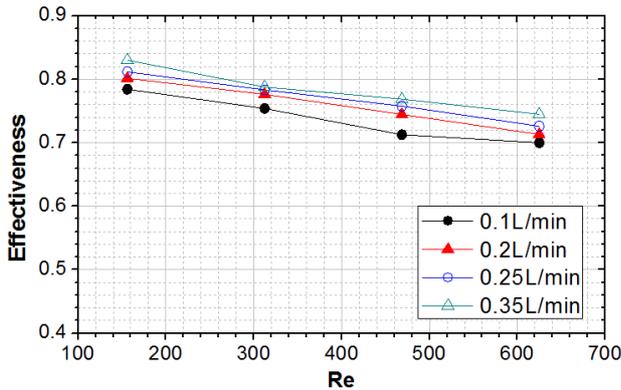


Fig. 10 Variation of effectiveness with Reynolds number of air and water spray rate in case of counter-flow

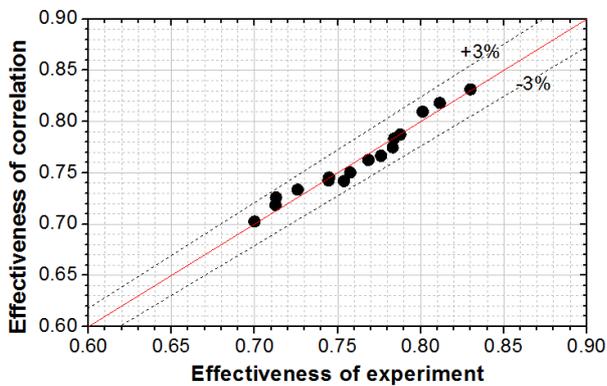


Fig. 11 Comparison of effectivenesses of experiment with those of correlation

수 있다.

Fig. 10 은 분무방향과 공기유동이 대향류를 이루는 경우에 공기의 Re 수 및 분무유량에 따른 유용도 변화를 나타낸 그래프이다. 앞선 분석과 동일하게 공기유량이 증가함에 따라 유용도는 감소하는 경향을 보이고, 분무유량이 증가함에 따라 유용도는 증가하는 경향을 보인다. 공기유량이 50 CMH 일 때 평균 유용도는 약 0.81 이고, 200 CMH 일 때는 약 0.72 이었다. 반면 분무유량이 0.1 l/min 일 때 평균 유용도는 약 0.74 이고, 0.35 l/min 일 때는 0.78 이다. 풍량이 4 배 증가할 때 유용도는 0.09 가 감소한 반면 분무유량이 3.5 배 증가할 때 유용도는 0.05 증가하였다. 따라서 분무유량보다는 공기유량이 유용도에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Fig. 10 의 유용도를 공기유량을 무차원화 시킨 Re 수와 분무수 유량을 무차원화시킨 액기비(L/G) 를 변수로 상관식을 구하면 식 (7)과 같다. Fig. 11 은 실험으로 구한 유용도와 상관식으로부터 구한 유용도를 비교한 것으로 대부분의 데이터가 $\pm 3\%$ 이내에 들어오는 것을 볼 수 있다. 따라서 유용도

는 공기의 Re 수의 증가에 따라 지수적으로 감소하며, 액기비의 증가에 따라 지수적으로 증가하는 관계를 가짐을 알 수 있다.

$$\varepsilon = 1.0238 \text{Re}^{-0.0315} L/G^{0.0473} \quad (7)$$

4. 결론

육각물결형 플라스틱 열교환기를 사용한 현열냉각 및 증발냉각 배기열 회수장치를 설계·제작하고, 여러가지 작동조건에서 성능을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 플라스틱 열교환기를 사용한 현열냉각 배기열 회수장치는 공기유동을 대향류로 하였을 경우 평행류보다 훨씬 높은 0.7 에서 0.8 사이의 유용도를 보였으며, 공기유량이 증가할수록 유용도는 감소하나 4 배의 공기유량 증가에도 감소량은 0.1 미만이다.

(2) 증발냉각을 이용한 배기열 회수장치에서 물 분무방향을 공기유동과 대향류로 하였을 때 평행류보다 약 0.06 ~ 0.11 만큼 높은 유용도를 보였으며, 물유량이 증가할수록 차이는 감소하였다.

(3) 증발냉각 배기열 회수의 경우 공기유량이 증가할수록 유용도가 감소한 반면 물 분무유량이 증가할수록 유용도가 증가한다.

(4) 증발냉각의 경우 평행류가 대향류에 비해 분무유량에 더 민감하며, 분무유량보다는 분무특성이 배기열 회수장치 성능에 더 큰 영향을 미친다.

(5) 공기유량과 분무수 유량을 각각 Re 수와 액기비로 무차원화하여 유용도에 대한 다음과 같은 상관식을 얻었다.

$$\varepsilon = 1.0238 \text{Re}^{-0.0315} L/G^{0.0473}$$

후 기

본 연구는 충남대학교 산학협력선도대학육성사업단의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

- (1) Lee, B. Y., Chung, M. H. and Rhee, E. K., 2013, "Comparative Analysis of the University Building's Energy Consumption and Architectural Planning Factors," *Proceedings of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 33, No. 1, pp. 257~258.

- (2) Cerci, Y., 2003, "A new Ideal Evaporative Freezing Cycle," *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46, pp. 2967~2974.
- (3) Joudi, K. A. and Mehdi, S. M., 2000, "Application of Indirect Evaporative Cooling to Variable Domestic Cooling Load," *Energy Conversion & Management* 41, pp. 1931~1951.
- (4) Gomez, E. V., Martinez, F.J.R., Diez, F. V., Leyva, M.J.M. and Martin, R. H., 2005, "Description and Experimental Results of a Semi-indirect Ceramic Evaporative Cooler," *International Journal of Refrigeration* 28, pp. 654~662.
- (5) Dai, Y. J. and Sumathy, K., 2002, "Theoretical Study on a Cross-flow Direct Evaporative Cooler Using Honeycomb Paper as Packing Material," *Applied Thermal Engineering* 23(13), pp. 1417~1430
- (6) Johnson, D. W., Yavuzturk, C. and Pruis, J., 2003, "Analysis of Heat and Mass Transfer Phenomena in Hollow Fibre Membranes used for Evaporative Cooling," *Journal of Membrane Science* 227(1/2), pp. 159~171.
- (7) Anyanwu, E. E., 2004, "Design and Measured Performance of a Porous Evaporative Cooler for Preservation of Fruits and Vegetables," *Energy Conversion Manage* 15, pp. 2187~2195.
- (8) Pescod, D., 1968, "Unit Air Cooler Using Plastic Heat Exchanger with Evaporatively Cooled Plates," *Australian refrigeration, Air conditioning and heating* 22(9), pp. 22~26.
- (9) Maclaine-cross, I. L. and Banks, P. J., 1981, "A General Theory of Wet Surface Heat Exchangers and its Application to Regenerative Cooling," *ASME J. Heat Transfer* 103, pp. 578~585.
- (10) Duan, Z., Zhan, C., Zhang, X., Mustafa, M., Zhao, X., Alimohammadisagvand, B. and Hasan, A., 2012, "Indirect Evaporative Cooling: Past, Present and Future Potential," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, pp. 6823~6850.
- (11) Kim, M., H., Kim J., H., Kwon, O., H., Seok, Y., J. and Jeong, J., W., 2010, "Energy Saving Potentials of an 100% Outdoor Air System Integrated with Indirect and Direct Evaporative Coolers," *Proceedings of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 26, No. 4, pp. 313~320.
- (12) Keith, D., 2011, "Indirect Air-Side Economizer Cycle – Data Center Heat Rejection," *ASHRAE Journal*, No. 3, pp. 44~54.