Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering
Vol. 29, No. 3(2017), pp.142-147
ISSN 1229-6422(Print), 2465-7611(Online)
https://doi.org/10.6110/KJACR.2017.29.3.142

골심지의 흡습제 함침에 의한 종이 재질 판형 전열교환 소자의 성능 향상

Performance Improvement of a Paper Enthalpy Exchange Element by Impregnation of the Spacer

김내현(Nae-Hyun Kim)†
인천대학교 기계시스템공학부
Division of Mechanical System Engineering, Incheon, 22012, Republic of Korea

(Received September 9, 2016; revision received November 16, 2016; Accepted: December 13, 2016)

Abstract Improvement of the enthalpy exchange element's energy efficiency is of current interest from anenergy-saving viewpoint. In this study, a LiCl-impregnated spacer was devised as a means to improve the performance of the enthalpy exchange element. Two samples were tested : one with and one without impregnated spacers of 338×338×380 mm sizes with 2.0 mm channel spacing. The results showed that the temperature efficiencies of the two samples were approximately the same. The humidity efficiency, however, was strongly affected by the LiCl impregnation. The impregnated sample yielded a 9% higher humidity efficiency under cooling and the difference increased to 14% under aheating condition. It was anticipated that more moisture would beadsorbed on the LiCl-impregnated spacers, which was delivered to their roots and eventually to the air in neighboring channels. Separate moisture adsorption tests revealed that both the adsorption rate and the amount of the adsorbed moisture are higher for the LiCl-impregnated specimen.

Key words Enthalpy exchange element(전열교환소자), LiCl(염화리튬), Spacer(골심지), Impregnation(함침), Paper(종이)

† Corresponding author, E-mail: *knh0001@inu.ac.kr*

기호설명

C : 이산화탄소 농도 [kg_{CO2}/kg_a]
E_G : 이산화탄소 변화율 [-]
i : 엔탈피 [J/kg]
q : 누설량 [m^3/s]
T : 온도 [K]
V_s : 급기량 [m^3/s]
W : 절대습도 [kg_w/kg_a]

그리스 문자

η : 효율 [-]
η_l : 누설률 [-]

하첨자

e : 유효
i : 엔탈피
EA : 배기
OA : 외기
RA : 환기
SA : 급기
T : 온도
W : 절대습도

1. 서 론

산업구조의 변화로 현대인들이 80% 이상의 시간을 주택, 사무실들의 실내공간에서 보내고 있음을 고려할 때 쾌적하고 건강한 실내공기질의 유지는 매우 중요하다. 또한 공동주택을 포함한 건축물들은 에너지 손실을 줄이기 위하려 고기밀화, 고단열화 되는 추세이어서 실내에 오염물질이 축적되고 따라서 환기장치를 이용한 강제 환기가 필요하게 된다. 하지만 환기시 도입되는 실외공기는 실내 냉난방부하를 증가시키는데 이러한 문제는 열교환 소자가 장착된 환기장치를 사용함으로써 완화할 수 있다. 열교환 소자의 재질로는 알루미늄, 폴리프로필렌, 기능성 종이, 고분자 전열막 등이 사용된다.[1-6] 그 중 기능성 종이와 고분자 전열막은 급

ⓒ SAREK

기와 배기사이에서 현열교환은 물론 수분교환도 가능하여(전열교환) 우리나라와 같은 여름철이 고온다습한 지역에서 적합한 재질로 평가되고 있다.[1,2] 특히 종이 재질 전열교환 소자는 가격도 저렴하여 가장 널리 적용되고 있다.

Fig. 1에 열 회수 환기장치의 개략도가 나타나 있다. 실외의 신선한 공기는 송풍기로 흡입되어 전열교환 소자를 거치면서 실내의 배출 공기(RA)와 열 및 수분 교환을 한 후 실내로 공급(SA)된다. Fig. 2에 직교류 형태의 종이 재질 전열교환 소자의 개략도를, Fig. 3에

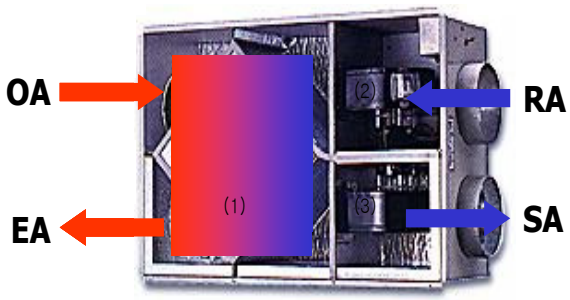


Fig. 1 Enthalpy recovery ventilator.

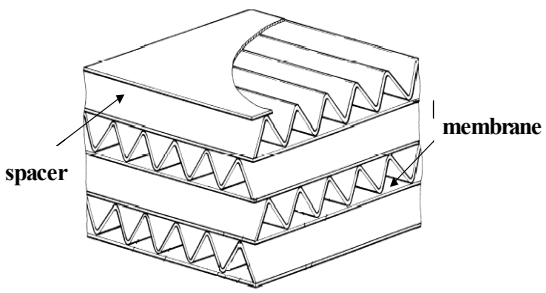


Fig. 2 Schematic drawing of the enthalpy exchange element made of paper.

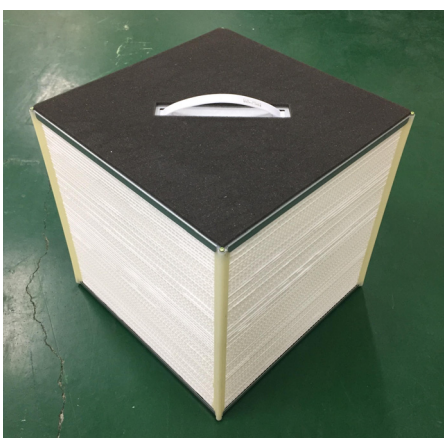


Fig. 3 Photo of the enthalpy exchange element.

는 실물 사진을 나타내었다. 전열교환 소자는 전열막(membrane)과 골심지(spacer)가 교대로 적층되도록 제작된다. 골심지는 전열교환기의 형태를 유지하고 급기와 배기의 유로를 형성한다. 급기와 배기사이의 열 및 수분 전달은 전열막을 통하여 이루어진다. 열은 전도 형태로 전열막을 통과한다. 전도열전달은 열전도도에 비례하고 전열막 두께에 반비례하므로 전열막을 치밀한 구조로 하여 열전도도를 증가시키고 두께를 얇게 하는 것이 바람직하다.

그간 판형 전열교환 소자의 성능에 대해서는 일부 연구가 수행되었다. Shin et al.[1]은 종이 원지에 대한 특성 평가를 통하여 원지 두께가 증가할수록 공기와 수분의 투과 성능이 감소한다고 보고하였다. Kistler and Cussler[3]는 고분자 코팅된 섬유질 전열막으로 판형과 튜브형 전열 소자를 제작하고 수분 전달 실험을 수행하였는데, 튜브형 소자의 수분 전달 특성이 우수하다고 보고하였다. Johnson,[4] Zhang and Niu,[5] Zhang[6]은 고분자 재질 전열교환 소자에 대하여 현열 및 잠열 전달 해석 모델을 제시하였다. 현열 전달의 경우는 열교환기의 일반적인 모델이 적용되었고 잠열전달의 경우는 전열막 재질에 따른 흡습특성이 별도로 고려되었다.

Kim et al.[7]은 기체 차폐도, 밀도 등 물성이 상이한 전열교환 소자에 대한 실험을 통하여 종이 물성이 전열교환 소자의 성능에 미치는 영향을 연구하였다. 전열막의 밀도가 증가할수록 현열교환 성능은 증가하였다. 하지만 잠열교환 성능은 기체 차폐도, 밀도 등에 관계없이 거의 동일하게 나타났다. Kim et al.[8]은 골심지에 염화칼슘을 함침하는 것이 효율 향상에 도움이 된다고 보고하였다. 한편 Kim[9]은 전열교환 소자의 장기 성능에 대한 연구를 수행하였다.

상기 문헌 조사 결과는 전열교환 소자의 성능에 대해 상당한 연구가 수행되었음을 보여준다. 하지만 대부분의 연구는 전열막에 초점을 맞춰 수행되었고 골심지의 역할에 대한 연구는 Kim et al.[8]이 유일하다. 그들은 골심지에 흡습제인 염화칼슘를 함침하여 소자의 성능을 향상시키는 방안에 대해 연구하였다. 하지만 현재 전열교환 소자의 흡습제로는 염화리튬이 주로 사용되고 있다.[9] 본 연구에서는 전열교환 소자 성능 향상 방안의 일환으로 골심지에 염화리튬을 함침하는 방안에 대해 검토하였다. 흡습제가 함침된 시료와 함침되지 않은 시료 두 종류를 제작하고 성능을 실험적으로 비교하였다.

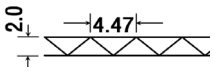
2. 전열교환 소자

Table 1에 실험에 사용된 전열교환 소자의 제원이 나타나 있다. 가로, 세로, 높이는 각각 338 mm, 338 mm, 380 mm이고 골심지의 골 높이는 2.0 mm, 골 핏

치는 4.47 mm이다. 골 형상은 이등변 삼각형에 가깝고 골심지와 전열막은 접착제(아크레졸)를 사용하여 부착되었다. 이 전열교환 소자에 사용된 전열막의 제원은 두께 0.038 mm, 밀도 1,124 kg/m^3, 투기도[10] 7,500초, 40℃, 90% RH에서 측정된 투습도[11] 7,520 g/m^{2}day이고 흡습제로 염화리튬이 사용되었다. 흡습제가 함침된 골심지의 제원은 두께 0.05 mm, 밀도 820 kg/m^3, 투기도 1,000초이다. 흡습제가 함침되지 않은 골심지의 제원은 두께 0.07 mm, 밀도 675 kg/m^3, 투기도 10초이다. 두 종류 골심지의 두께 차이는 흡습제를 함침시키는데 사용된 칼렌더링 공정 때문에 발생하였다. 즉, 두께 0.07 mm의 골심지가 칼렌더링 공정을 거쳐 0.05 mm로 압착되었다. 이 때 밀도는 675 kg/m^{3}에서 820 kg/m^{3}으로 증가하였다. 흡습제의 함침량은 전열막과 골심지 모두 원지 무게의 10%이었다.

투기도는 Gruley법[10]을 사용하여 측정하였다. 투기도는 전열막 시료 전후에 1.23 kPa의 압력차를 형성하고 100 ml의 공기가 단면적 6.42 cm^{2}의 시료를 통과하는데 걸리는 시간으로 정의된다. 투습도는 중량법[11]으로 측정하였는데 건조제(염화칼슘, 염화나트륨 등)가 담겨있는 접시 상부에 전열막을 설치한 후 이 접시를 규정된 온도와 습도로 유지되는 항온항습기 내에 하루 동안 두어 증가한 중량 즉, 전열막을 통과한 수분의 양을 측정하여 투습도(g/m^{2}day)를 구한다.

Table 1 Specification of the enthalpy exchanger

Specification	Dimension
corrugation pitch	4.47 mm
corrugation height	2.0 mm
size	338×338×380 mm
shape	

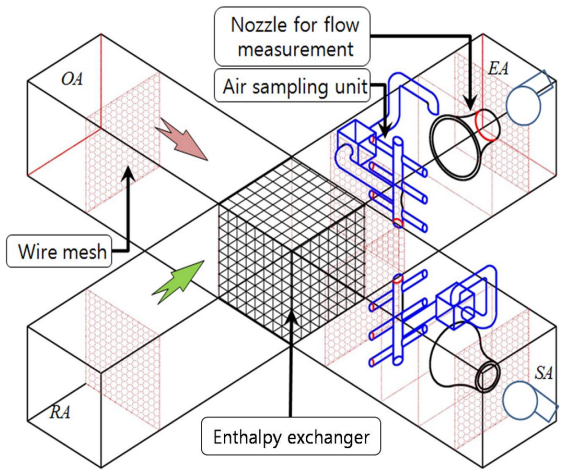


Fig. 3 Enthalpy exchange element test apparatus.

3. 실험장치 및 방법

Fig. 2에 전열교환 소자 성능 실험장치가 나타나 있다. 실험장치는 아크릴 덕트로 제작되고 전열교환 소자는 덕트가 교차하는 중앙에 장착된다. 덕트 출구에는 공기의 온습도를 측정하기 위한 샘플링 유닛과 풍량을 측정하기 위한 노즐, 그리고 휀이 설치되어 있다. 풍량은 휀 모터에 연결된 인버터로 조절된다. 덕트 입구에는 와이어 메쉬가 설치되어 균질한 유동이 공급될 수 있도록 한다. 덕트 입구측 공기 온습도는 별도의 샘플링 유닛을 실험장치 입구에 설치하여 측정한다. 공기측 풍량은 ASHRAE 41.2[12]에 규정된 노즐차압을 이용하여 측정하고 시료의 입출구 온습도는 ASHRAE 41.1[13]에 규정된 샘플링 방법에 의해 측정한다. 온습도 측정에는 고정밀 Pt-100Ω 센서(정밀도 ±0.01℃)를 사용하였다. 실험장치는 실내와 실외의 온습도 조건을 모사하는 2개의 항온항습 챔버 사이에 설치된다. 실험은 KS 규격[14](KS B 6879 : 열 회수형 환기장치)에 따라 수행되었다. 냉방조건일 경우 실내측 온습도는 24℃/17℃(건구/습구)로 유지되었고 실외측 온습도는35℃/24℃로 유지되었다. 난방조건일 경우는 실내측 온습도는 22℃/14℃로 유지되었고 실외측 온습도는 2℃/0.5℃로 유지되었다.

소자의 전열 성능은 배기로부터 회수되는 열 회수 효율로 나타내는데 여기에는 온도교환효율, 습도교환효율, 전열교환효율이 있다. 온도교환효율은 현열전달에 의한 현열교환효율을 의미하고, 습도교환효율은 수분전달에 의한 잠열교환효율을 의미한다. 전열교환효율은 잠열과 현열을 모두 고려한 엔탈피 교환효율이다. 각각에 대한 정의는 다음과 같다.[14]

$$\text{Temperature efficiency} : \eta_T = \frac{T_{OA} - T_{SA}}{T_{OA} - T_{RA}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Humidity efficiency} : \eta_W = \frac{W_{OA} - W_{SA}}{W_{OA} - W_{RA}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Total efficiency} : \eta_i = \frac{i_{OA} - i_{SA}}{i_{OA} - i_{RA}} \times 100 \quad (3)$$

상기 정의는 급기와 배기의 유량이 같다면 열교환기의 유용도(실제 전열량/최대 가능 전열량)의 정의와 동일하다.

전열교환기는 가능하면 기체 차폐성을 높여 배기와 급기가 섞이지 않도록 하는 것이 바람직하다. 하지만 실제로는 골심지와 전열막의 틈새, 전열교환기의 전열막 등을 통하여 누설이 발생한다. 따라서 누설이 발생

ⓒ SAREK

하는 경우를 고려하여 측정치에서 누설에 의한 전열량을 제외한 값으로 상기 효율들을 다시 정의할 필요가 있다. KS 규격에서는 이를 유효 효율로 칭한다.[14]

$$\text{Effective temp. efficiency} : \eta_{Te} = \frac{\eta_T - \eta_l}{100 - \eta_l} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{Effective humi. efficiency} : \eta_{We} = \frac{\eta_W - \eta_l}{100 - \eta_l} \times 100 \quad (5)$$

$$\text{Effective total efficiency} : \eta_{ie} = \frac{\eta_i - \eta_l}{100 - \eta_l} \times 100 \quad (6)$$

여기서 η_l은 누기율로 다음 절에 상술되어 있다.

Fig. 4에 누기율 실험장치가 나타나 있다.[14]

누기율은 이산화탄소 이행법으로 측정한다. 즉, 환기(RA)부에 고농도의 이산화탄소를 공급하고 누설로 인한 외기(OA)부와 급기(SA)부의 이산화탄소 농도 변화를 측정하여 누기량을 결정한다. 측정 중 환기부의 이산화탄소 농도가 균일하게 유지되는 것이 중요한데 이를 위하여 환기부에 별도의 소형 챔버를 설치하고 이산화탄소 봄베로부터 공급되는 고농도 이산화탄소와 유입되는 환기가 잘 섞이도록 한다. 실험은 환기부 챔버의 농도가 7,000 ppm을 유지한 상태에서 수행되었다. 이산화탄소의 농도 측정은 외기(OA), 급기(SA), 환기(RA) 덕트 세 곳에 이산화탄소 센서를 설치하여 측정하였다. 누기율은 누기량을 급기량으로 나눈 값으로 다음 식으로 정의된다.[16]

$$\text{CO2 concentration change} : E_G = \frac{C_{SA} - C_{OA}}{C_{SA} - C_{RA}} \quad (7)$$

$$\text{Leakage rate} : q = V_s \times E_G \quad (8)$$

$$\text{Leakage ratio} : \eta_l = \frac{q}{V_s} \times 100 \quad (9)$$

본 시험에 사용된 전열교환 소자의 흡습제 함침 유무에 따른 누설율은 각각 2.8%, 3.0%로 나타났다. 이산화탄소 농도 측정에는 SenseAir사의 CO_2 센서가 사용되었는데 이 센서는 측정범위 0~20,000 ppm에서 정확도는 ±30 ppm이다. 오차해석[15]결과 온도, 습도 및 전열교환효율의 최대 오차는 각각 ±2.7%, ±4.4%, ±3.9%로 나타났고 누기율의 최대 오차는 ±1.8%로 나타났다.

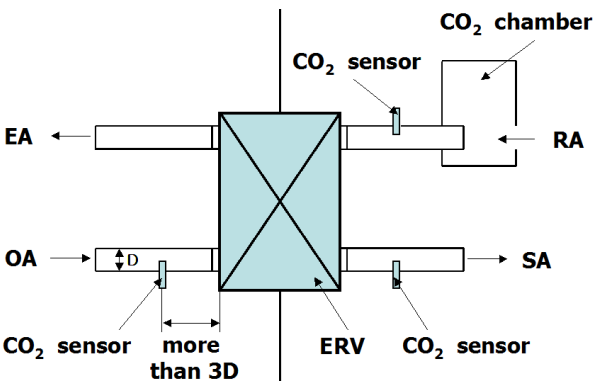


Fig. 4 Leakage test equipment.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 5~Fig. 7에 골심지의 흡습제 함침 유무에 따른 냉방과 난방시 유효 효율을 나타내었다. Fig. 5는 현열교환효율을 보여준다. 현열교환효율의 경우 흡습제 함침 유무(함침시 "O", 비 함침시 "X")에 따른 차이는 거의 없음을 알 수 있다. 흡습제 함침에 따른 칼렌더링으로 골심지 두께는 0.07 mm에서 0.05 mm로 감소하고 밀도는 675 kg/m^{3}에서 820 kg/m^{3}으로 증가하였으나 그 차이가 현열 전달에 미치는 영향은 미미하였다. Fig. 5는 또한 난방시 온도교환효율이 냉방시 값보다 다소 높음을 보여준다. 동일 풍량에서 난방시 공기의 질량 유량은 낮은 공기 밀도로 인하여 냉방시 값보다 작게 된다. 질량 유량이 작으면 소자의 NTU가 증가하고 따라서 효율도 증가하게 된다.

Fig. 6에 습도교환효율을 나타내었다. 흡습제를 함침한 소자의 경우 냉방에서 9%, 난방에서 14% 우수한 성능을 보였다. 골심지에 흡착된 수분은 골심지를 타고 골 방향으로 이동하여 최종적으로는 전열막을 통하여 이웃 채널의 공기로 전달된다. 골심지에 흡습제가 함침된 경우 골심지에 흡착되는 수분량이 증가하고 따라서 채널 간 수분전달량도 증가하는 것으로 판단된다. Fig. 6은 또한 난방시 습도교환효율이 냉방시의 값보다 큼을 보여준다. 이는 본 연구의 염화리튬이 함침된 원지의 흡습특성 때문인데 상대습도가 증가할수록 원지의 흡습 능력이 증가한다.[16] 난방시 평균 상대습도는 58%로 냉방시의 값 45%보다 크다. Fig. 7에 전열교환효율을 나타내었다. 골심지에 흡습제를 함침한 전열교환 소자에서 효율이 5% 가량 높게 나타났다. 이는 수분전달에 의한 잠열교환량이 증가하였기 때문이다.

Fig. 8에 두 골심지의 시간에 따른 수분 흡착량을 비교하였다. 실험은 38.5 cm^2 크기의 원형 골심지로부터 수분을 완전히 제거한 후 30℃, 50% RH로 유지되는 항온항습실에서 수분 흡착량의 변화를 측정하였다. 골심지를 완전히 건조시키기 위하여 골심지를 크기 1 m×1 m×1 m의 진공 챔버에 넣고 골심지의 무게가 더 이상 변화하지 않을 때까지 진공 펌프를 작동시켰다. 대략 1시간이면 무게가 변하지 않았는데 이때를 완전 건조 시점으로 판단하였다. Fig. 8은 흡습제를 함침한 골심지에서 초기 흡착속도도 높고 최종 흡착량도 2배 이

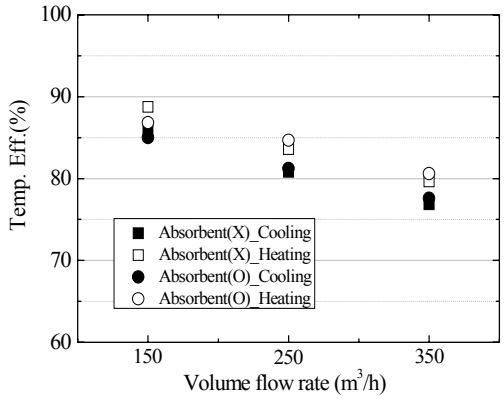


Fig. 5 Effective temperature effectiveness.

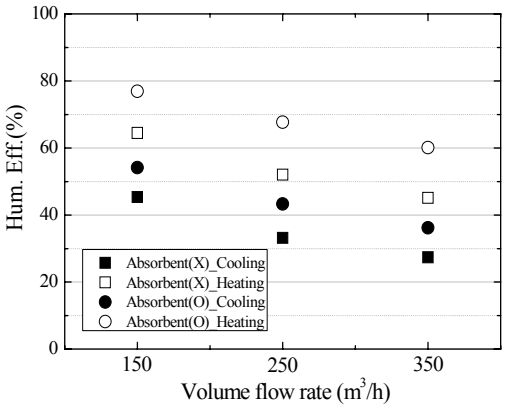


Fig. 6 Effective humidity effectiveness.

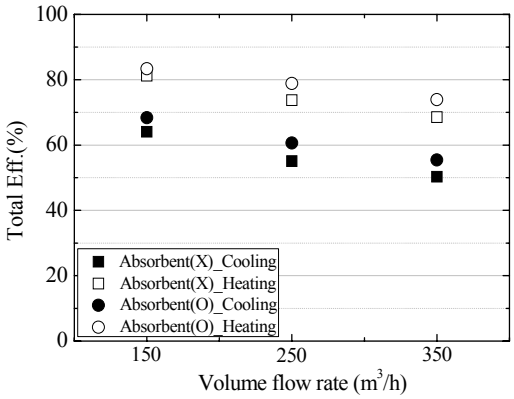


Fig. 7 Effective total effectiveness.

상이 됨을 보여준다. 따라서 흡습제 함침에 따른 수분 흡착량의 증가가 전열교환효율의 향상의 주된 요인으로 이해된다. 한편 골심지에 흡습제를 함침하면 골심지의 내구성이 영향을 받을 수 있다. 또한 시료의 성능이 시간 경과에 따라 변화할 수도 있다. 이 부분은 장기간 시험을 통하여 확인되어야 할 것이다.

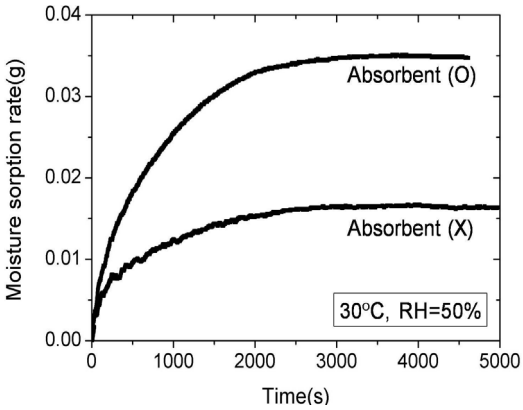


Fig. 8 Moisture sorption rate of the spacers.

5. 결 론

본 연구에서는 전열교환 소자의 골심지에 염화리튬 흡습제를 함침하여 전열성능을 향상시키는 방안에 대하여 검토하였다. 시료 크기는 가로, 세로, 높이 각각 338 mm, 338 mm, 380 mm이고 골심지의 골 높이는 2.0 mm, 골 핏치는 4.47 mm이다. 골심지에 흡습제를 함침한 시료와 함침하지 않은 시료 두 종류에 대하여 성능 실험을 수행하였다. 주된 결론은 다음과 같다.

(1) 온도교환효율은 흡습제 함침 유무에 상관없이 유사함을 보인다. 또한 난방 시 온도교환효율이 냉방시 값보다 다소 높게 나타났다.
(2) 습도교환효율은 흡습제를 함침한 소자의 경우 냉방에서 9%, 난방에서 14% 크게 나타났다. 골심지에 흡습제가 함침된 경우 골심지에 흡착되는 수분량이 증가하고 따라서 채널 간 수분전달량도 증가하는 것으로 판단된다.
(3) 골심지에 대한 수분 흡착 실험 결과 흡습제를 함침한 골심지에서 초기 흡착속도도 높고 최종 흡착량도 2배 이상으로 나타났다.
(4) 난방시 습도교환효율이 냉방시의 값보다 크게 나타났다. 이는 본 연구의 염화리튬이 함침된 원지의 경우 상대습도가 증가할수록 원지의 흡습 능력이 증가하기 때문이다.

References

1. Shin, S.-Y., Cho, M.-C., Lee, S.-H., Kim, B.-S., Kim, I.-K., and Lee, G.-G., 2004, Performance test of heat recovery ventilator element, Proceedings of the Summer Conference, The Society of Air-Conditioning and Refrigeration Engineers, pp. 729-733.

ⓒ SAREK

2. Cho, M.-C., Lee, S.-H., Shin, S.-Y., Hong, Y.-K., Lee, S.-H., and Kang, T.-W., 2003, Development of HRV element using functional paper, New Technology Presentation, HARFKO Exhibition, pp. 73-77.
3. Kistler, K. R. and Cussler, E. L., 2002, Membrane modules or building ventilation, Trans. IChemE, Vol. 80, Part A, pp. 53-64.
4. Johnson, J. E., 1997, Heat and mass transfer between two fluid streams separated by a thin, permeable barrier, Ph.D thesis, University of Minnesota, Department of Mechanical Engineering.
5. Zhang, L. Z. and Niu, J. L., 2002, Effectiveness correlations for heat and moisture transfer processes in an enthalpy exchanger with membrane cores, J. Heat Tranfer, Vol. 124, pp. 922-929.
6. Zhang, L. Z., 2008, Heat and mass transfer in plate-fin sinusoidal passages with vapor permeable wall materials, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 51, pp. 618-629.
7. Kim, N.-H., Cho, J.-P., Song, K.-S., and Kim, D.-H., 2008, Performance of a plate-type enthalpy exchanger made of papers having different properties, Korean J. Air-Cond. Refrig., Vol. 20, No. 8, pp. 547-555.
8. Kim, K.-H., Kim, H.-Y., and Lee, J.-J., 2007, A performance evaluation on the element cores of total heat recovery ventilator according to spacer's materials and manufacturing methods, J. Architectural Institute of Korea, Vol. 23, No. 9, pp. 189-196.
9. Kim, N.-H., 2016, An Experimental study on the long-term performance variation of the plate-type enthalpy exchange element made of paper, Korean J. Air-Cond. Refrig., Vol. 28, No. 4, pp. 165-170.
10. KS M 7020, 2001, Paper and board-Determination of air permeability (medium range)-Part 5 : Gurley method.
11. KS M 7019, 2001, Sheet materials-Determination of water vapor transmission rate-Gravimetric(dish) method.
12. ASHRAE Standard 41.2, 1986, Standard method for laboratory air-flow measurement, ASHRAE.
13. ASHRAE Standard 41.1, 1986, Standard method for temperature measurement, ASHRAE.
14. KS B 6879, 2007, Heat-recovery ventilators.
15. ASHRAE Standard 41.5, 1986, Standard measurement guide, engineering analysis of experimental data, ASHRAE.
16. Lee, E.-J., Lee, J.-P., and Kim, N.-H., 2013, Moisture transfer characteristics of a LiCl-impregnated paper membrane used for an enthalpy exchanger, J. Mech. Sci. Tech., Vol. 25, No. 5, pp. 1527-1537.

ⓒ SAREK