

판형 종이 재질 전열교환 소자의 장기 성능 변화에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on the Long-Term Performance Variation of the Plate-Type Enthalpy Exchange Element Made of Paper

김내현(Nae-Hyun Kim)[†]

인천대학교 기계시스템공학부

Division of Mechanical System Engineering, Incheon National University, Incheon, 22012, Korea

(Received January 27, 2016; revision received March 18, 2016; Accepted: March 21, 2016)

Abstract Long-term performance of the enthalpy exchange element is a topic of current interest due to the concern of possible performance degradation over time. In this study, a 350 CMH enthalpy recovery ventilator equipped with an enthalpy exchange element was installed in an office room, and the performance has been traced over the past 5 years. The appearance, overall dimension, thermal performance, leakage ratio and anti-bacterial performance were checked annually. Results showed that the change in thermal performance (sensible, latent and enthalpy efficiency) was negligible with periodic cleaning with an air gun. However, the leakage ratio increased with time, measuring 7.3% after 5 years. Anti-bacterial test revealed that no bacteria were found during the test period. The largest change in the dimension occurred at the middle location of the element, although the change was less than 2% of the initial value.

Key words Enthalpy exchange element(전열 교환 소자), Paper(종이), Enthalpy recovery ventilator(열회수환기 장치), Long-term performance(장기 성능)

[†] Corresponding author, E-mail: knh0001@incheon.ac.kr

기호설명

C : 이산화탄소 농도 [$\text{kgCO}_2/\text{kg}_a$]
 c_p : 비열 [J/kgK]
 EG : 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_q : 누설률 [-]

하첨자

e : 유효
 i : 엔탈피
 OA : 외기
 RA : 환기

SA : 급기
 T : 온도
 W : 절대습도

1. 서 론

산업구조의 변화로 현대인들이 80% 이상의 시간을 주택, 사무실들의 실내 공간에서 보내고 있음을 고려할 때 쾌적하고 건강한 실내 공기질의 유지는 매우 중요하다. 또한 공동주택을 포함한 건축물들은 에너지 손실을 줄이기 위하여 고기밀화, 고단열화 되는 추세이어서 실내에 오염물질이 축적되고 따라서 환기장치를 이용한 강제 환기가 필요하게 된다. 하지만 환기시 도입되는 실외공기는 실내 냉난방부하를 증가시키는데 이러한 문제는 열회수 장치가 장착된 환기장치를 사용함으로써 완화할 수 있다. 열회수 환기장치로는 열교환기가 휠 형태로 제작되어 회전하면서 급기와 배기사이에 열교환을 하는 로터리 방식과 열교환기가 판형 고정식으로 제작되어 열교환하는 판형 방식이 있다. 로터리

방식은 판형 방식에 비하여 열교환 효율은 높으나 급기와 배기가 섞이는 문제가 있고 모터가 장착되므로 장치가 복잡해진다. 판형 방식은 구조가 간단하여 소용량의 환기장치에 널리 사용된다. 판형 열교환 소자의 재료로는 알루미늄, 폴리프로필렌, 기능성 종이, 고분자 전열막 등이 사용된다.⁽¹⁻⁶⁾ 그 중 기능성 종이와 고분자 전열막은 급기와 배기사이에서 현열교환은 물론 수분교환도 가능하여(전열교환) 우리나라와 같은 여름철이 고온다습한 지역에서 적합한 재료로 평가되고 있다.^(1,2) 특히 종이 재질 전열교환 소자는 가격도 저렴하여 가장 널리 적용되고 있다.

Fig. 1에 열회수 환기장치의 개략도가 나타나 있다. 실외의 신선한 공기는 송풍기로 흡입되어 전열교환 소자를 거치면서 실내의 배출 공기와 열 및 수분교환을 한 후 실내로 공급된다. Fig. 2에 직교류 형태의 종이 재질 전열교환 소자의 개략도를 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.

수분이 섬유 재질의 전열막을 통과하는 메카니즘에 대해서는 아직 명확하게 알려져 있지 않다. 고분자 전열막의 경우는 수분이 전열막 표면의 친수성 고분자에

흡착되고 흡착된 수분은 전열막 내부의 미소 기공을 확산 이동한 후 반대편 표면에서 탈착되는 방식으로 이동한다고 알려져 있다.⁽⁵⁾ 이러한 메카니즘은 종이 재질의 경우도 유사하리라 예측된다. 종이 재질의 전열막의 경우는 수분 흡착을 강화하기 위하여 표면에 염화칼슘, 염화리튬등 흡습제를 코팅하기도 한다. 전열막의 수분 투과 성능은 중량법⁽⁷⁾으로 측정한다. 중량법에서는 건조제(질산 칼륨, 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/m² day)를 구한다.

전열막은 열 및 수분 전달 성능 외에도 높은 기체 차폐성을 가져 급기와 배기가 섞이는 것을 막아야 한다. 높은 기체 차폐성을 가지려면 조직이 치밀해야 하는데 종이의 경우는 제지 공정 중 칼렌더링(calendering)을 통하여 조직의 치밀도를 높인다. 칼렌더링이란 원지를 간극이 점차로 좁아지는 원통형 롤러(칼렌더) 사이로 연속적으로 통과시키며 섬유 조직의 치밀도를 증가시키는 작업을 말한다. 전열막의 기체 차폐성은 Gurley 법⁽⁸⁾을 사용하여 측정한다. 실험원리는 전열막 시료 전후에 1.23 kPa의 압력차를 형성하고 100 mL의 공기가 시료 단면적 6.42 cm²을 통과하는데 걸리는 시간을 측정하여 기체 차폐도로 정의한다.⁽⁸⁾ 참고로 일반 복사지의 기체 차폐도는 4초 정도이고 전열교환 소자로 사용되기 위해서는 1,000초 이상이 되는 것이 바람직하다. 종이 재질에서는 기체 차폐도가 크면 투습도가 감소하는 경향을 보이므로⁽¹⁾ 최적의 전열성능을 위해서는 둘 사이의 적절한 조화가 필요하다.

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 잠열전달 해석 모델을 제시하였다. 현열 전달의 경우는 열교환기의 일반적인 모델이 적용되었고 잠열전달의 경우는 전열막 재질에 따른 흡습특성이 별도로 고려되었다. Kim et al.⁽⁹⁾은 동일 펄프를 사용하여 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.

상기 문헌 조사 결과 전열교환 소자의 성능에 대해

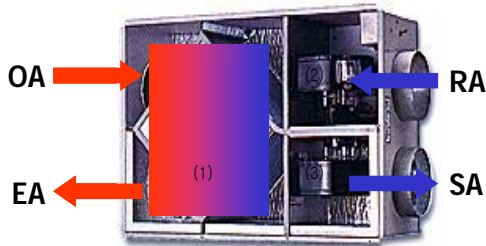


Fig. 1 Enthalpy recovery ventilator.

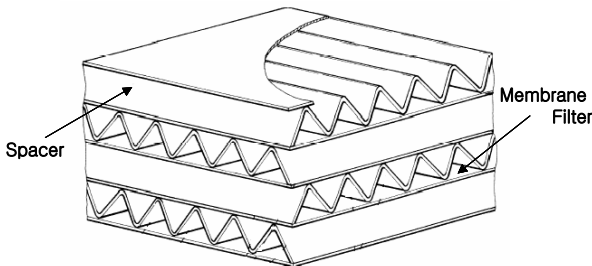


Fig. 2 Schematic drawing of the enthalpy exchange element made of paper.

연구가 다수 수행되었음을 알 수 있다. 하지만 장기간에 걸친 소자의 성능 변화에 대한 연구는 전무하다. 전열교환 소자는 일반 금속 재질 제품과는 달리 재질이 종이이고 표면에 흡습제가 코팅되어 있으므로 장기간 사용 시 성능이 저하하고 외곽 치수가 변화할 가능성이 있다. 이는 소자의 교환 주기와의 관련이 있는 중요한 사항이다. 이를 위하여 본 연구에서는 C사 사무실에 350 CMH급 열회수 환기장치를 설치하고 5년간 소자의 성능 변화를 추적하였다. 대략 매년 1회씩 환기장치로부터 소자를 탈착하여 소자의 외관, 외곽 치수, 전열 성능, 누설률, 항균 성능을 측정하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 전열교환 소자 및 설치 위치

본 연구에 사용된 열회수 환기장치는 S사 350 CMH 제품으로 C사의 전열교환 소자가 장착되어 있다. C사의 전열교환 소자는 Fig. 3에 보여지는데 가로, 세로 높이가 각각 350 mm, 350 mm, 400 mm이다. 또한 골 높이는 2.0 mm, 골 핏치는 4.5 mm이다. 소자 상부와 하부에는 두께 0.8 mm의 아연 도금 강판이 장착되어 있고 모서리에는 ABS 재질의 사이드 바가 설치되어 종이 소자를 견고하게 유지한다. 강판과 사이드 바는 종이 소자에 실리콘으로 부착된다.

전열막 원지의 특성은 전술한 투습도 및 기체 차폐도, 두께, 평량(단위 면적당 무게)으로 기술할 수 있다. 본 연구의 C사 제품의 경우 투습도는 3,500 g/m² day, 기체 차폐도는 5,200초, 두께는 40 μm, 평량은 40 g/m²이다. Fig. 4에 열회수 환기장치 설치도를 나타내었다. 환기장치는 C사 사무실에 2010년 5월에 설치되었다.

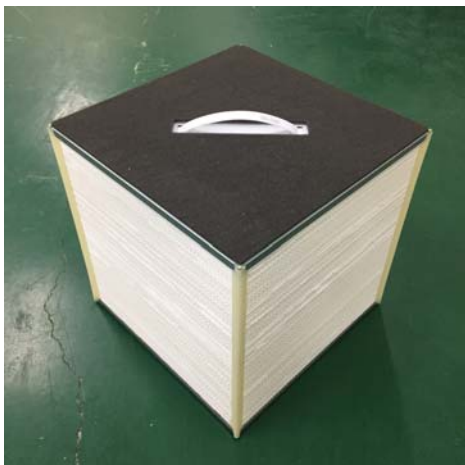


Fig. 3 Photo of the 350 CMH enthalpy exchange element.

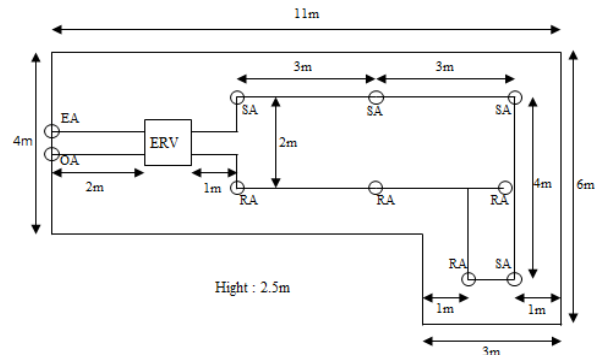


Fig. 4 Installation sketch of the enthalpy recovery ventilator.

2.2 성능 시험

전술한 바와 같이 대략 매년 1회씩 소자의 외관, 외곽 치수, 전열 성능, 누설률, 항균 성능을 측정하였다. 외관 상태는 육안으로 색상, 접착 부위, 골심지 상태 등을 검사하였다. 외곽 치수는 소자의 폭(상, 중, 하)과 높이를 외기(OA), 급기(SA), 환기(RA), 배기(EA)부에서 각각 측정하였다.

소자의 전열 성능은 소자가 장착된 열회수 환기장치의 전열 성능을 측정함으로써 평가하였다. 열회수 환기장치의 성능은 배기로부터 회수되는 열의 회수 효율로 나타내는데 여기에는 온도 교환효율, 습도 교환효율, 전열 교환효율이 있다. 온도 교환효율은 현열전달에 의한 현열 교환효율을 의미하고, 습도 교환효율은 수분전달에 의한 잠열 교환효율을 의미한다. 전열 교환효율은 잠열과 현열을 모두 고려한 엔탈피 교환효율이다. 각각에 대한 정의는 다음과 같다.⁽¹⁰⁾

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

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

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

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 발생하는 경우를 고려하여 측정치에서 누설에 의한 전열량을 제외한 값으로 상기 효율들을 다시 정의할 필요가

있다. KS 규격에서는 이를 유효 효율로 칭한다.⁽¹⁰⁾

$$\text{유효온도교환효율} : \eta_{Te} = \frac{\eta_T - \eta_q}{100 - \eta_q} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{유효습도교환효율} : \eta_{We} = \frac{\eta_W - \eta_q}{100 - \eta_q} \times 100 \quad (5)$$

$$\text{유효전열교환효율} : \eta_{ie} = \frac{\eta_i - \eta_q}{100 - \eta_q} \times 100 \quad (6)$$

여기서 η_q 는 누설률로 누설량을 급기량으로 나눈 값이다.

Fig. 5에 열회수 환기 장치의 효율 실험장치가 나타나 있다.⁽¹⁰⁾ 실험장치는 2개의 항온항습 챔버, 흡입식 풍동(cord tester), 온습도 측정 장치, 자료획득 장치로 구성된다. 환기 장치 시료를 두 챔버 사이에 설치하고 실내와 실외의 챔버의 온습도를 일정하게 유지한 상태에서 환기, 급기, 외기 덕트 내의 온습도를 측정하고 이 측정 값으로부터 온도, 습도 및 전열교환효율을 계산한다. 공기측 풍량은 ASHRAE 41.2⁽¹¹⁾에 규정된 노즐 차압을 이용하여 측정하고 시료의 입출구 온습도는 ASHRAE 41.1⁽¹²⁾에 규정된 샘플링 방법에 의해 측정한다. 온습도 측정에는 고정밀 Pt-100Ω 센서(정밀도 ±0.01℃)를 사용한다. 실험은 KS 규격(KS B 6879 : 열회수형 환기 장치)에 따라 수행되었다. 냉방 조건일 경우 실내측 온습도는 24℃/17℃(건구/습구)로 유지되었고 실외측 온습도는 35℃/24℃(건구/습구)로 유지되었다. 난방조건일 경우는 실내측 온습도는 건구/습구(22℃/14℃)로 유지되었고 실외측 온습도는 건구/습구(2℃/0.5℃)로 유지되었다.

누설률 실험장치는 Fig. 6에 나타나 있다.⁽¹⁰⁾ 누설률은 이산화탄소 이행법으로 측정하였다. 즉, 환기(RA)부에 고농도의 이산화탄소를 공급하고 누설로 인한 외기(OA)부와 급기(SA)부의 이산화탄소 농도 변화를 측정하여 누설량을 결정한다. 측정 중 환기부의 이산화탄소 농도가 균일하게 유지되는 것이 중요한데 이를 위하여 환기부에 별도의 챔버를 설치하고 이산화탄소 bombe로부터 공급되는 고농도 이산화탄소와 유입되는 환

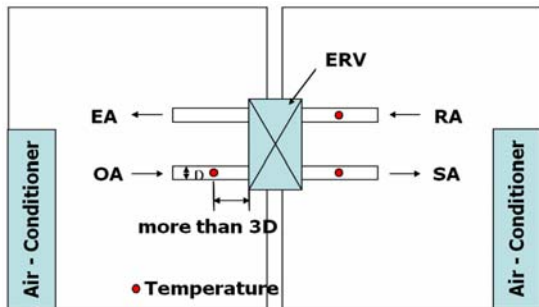


Fig. 5 Test facility for heat exchange efficiency.

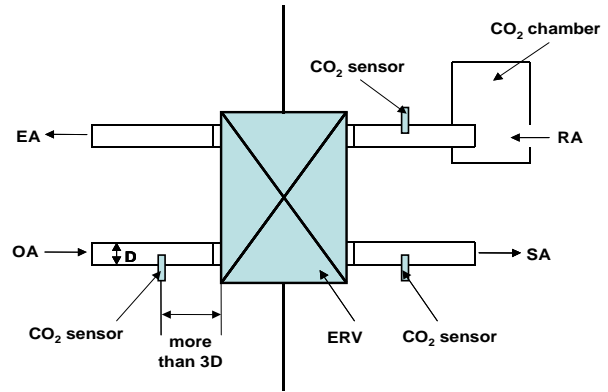


Fig. 6 Leakage test equipment.

기가 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. 누설률은 누설량을 급기량으로 나눈 값으로 다음 식으로 정의 된다.⁽¹⁰⁾

$$\text{이산화탄소 변화율} : E_G = \frac{C_{SA} - C_{OA}}{C_{SA} - C_{RA}} \times 100 \quad (7)$$

$$\text{누설량} : q = V_s \times \frac{E_G}{100} \quad (8)$$

$$\text{누설률} : \eta_q = \frac{q}{V_s} \times 100 \quad (9)$$

이산화탄소 농도 측정에는 SenseAir사의 CO₂ 센서가 사용되었는데 이 센서는 측정범위 0~20,000 ppm에서 정확도는 ±30 ppm이다. 오차해석⁽¹³⁾결과 온도, 습도 및 전열교환효율의 최대 오차는 각각 ±2.7%, ±4.4%, ±3.9%로 나타났고 누설률의 최대 오차는 ±4.8%로 나타났다. 본 실험에 사용된 Fig. 5와 Fig. 6의 실험장치는 KOLAS⁽¹⁴⁾ 인증 설비로 한국산업기술시험원의 실험장치와 비교실험을 통하여 동일한 정확도로 보정, 유지되고 있다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 7에 소자 외기(OA)부의 5년간 사진을 나타내었다. 이 사진은 환기장치에서 소자 탈착 후 표면의 먼지를 에어 건(air gun)으로 제거하고 찍은 사진이다. 소자의 전단에는 공기 중의 먼지를 걸러내기 위하여 프리 필터와 미디엄 필터가 장착되어 있다. 탈착된 소자에는 소량이긴 하지만 먼지가 존재하였다. 이 먼지는 에어 건으로 손쉽게 제거되었다. Fig. 7은 소자의 색상이 시간이 지날수록 검게 변해나감을 보여준다. 검은 색은 필터에서 걸러지지 않은 미세 먼지가 소자의 섬유

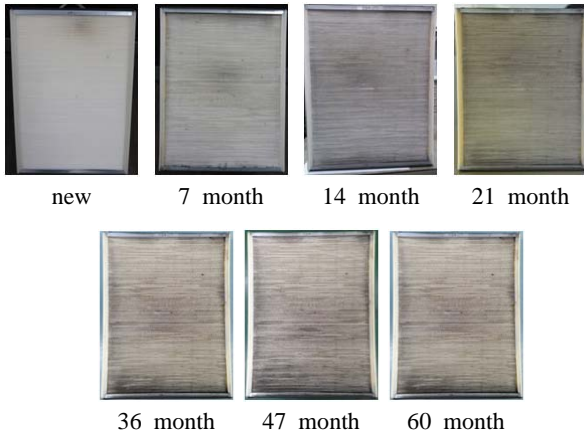


Fig. 7 Appearances of the element over time.

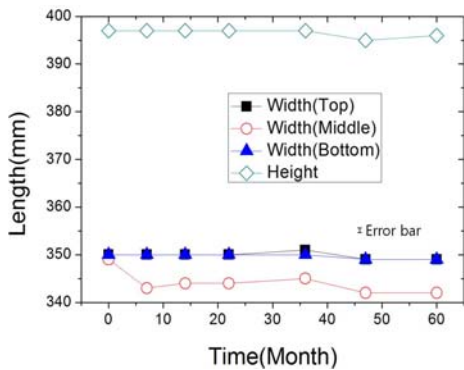


Fig. 8 Change of overall dimensions over time.

에 부착된 것으로 나타났다. 검은 부분은 에어 건으로 제거되지 않았다. 전열막과 골심지 접착 상태, 골심지 형상을 육안으로 살펴본 결과 상태가 양호함을 확인하였다. 소자의 다른 부분(RA, SA, EA)은 외기(OA)부 보다 상태가 양호하였다.

Fig. 8에 외기(OA)부에서 소자의 외곽 치수 변화를 나타내었다. 외곽 치수로 소자의 폭(상, 중 하)과 높이를 측정하였다. Fig. 8은 소자 중심부를 제외하고는 치수의 변화가 거의 없음(2 mm 이내)을 보여준다. 중심부의 경우는 작동 7개월 후 349 mm에서 343 mm로 약 2%(양쪽에서 1%) 줄어들고 그 이후로는 큰 변화가 없다. 측정 오차는 1 mm이었다.

Fig. 9와 Fig. 10에는 냉방과 난방시 유효온도교환효율, 유효습도교환효율, 유효전열교환효율을 나타내었다. 이 그림은 각 효율들이 난방의 경우는 초기 7개월간(1.7%~4.4%), 냉방의 경우는 초기 14개월간 다소 증가(5.3%~5.5%)하였다가 다시 초기 값으로 수렴됨을 보여준다. 초기 수 개월간 효율이 증가하는 이유는 명확치 않으나 증가치는 오차 범위 내에 있다. Fig. 11에는 누설률을 나타내었다. 누설률은 초기 22개월간 다

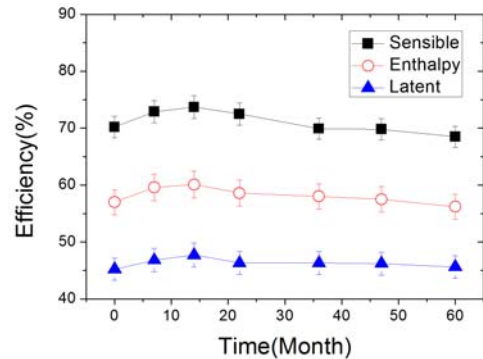


Fig. 9 Change of thermal efficiencies over time (cooling).

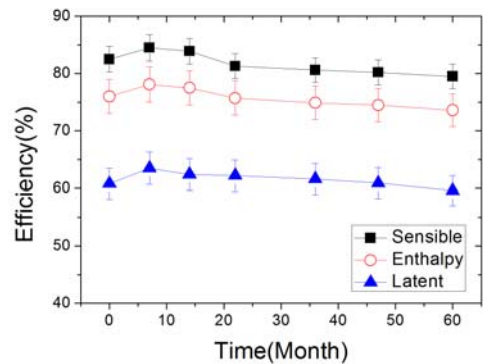


Fig. 10 Change of thermal efficiencies over time (heating).

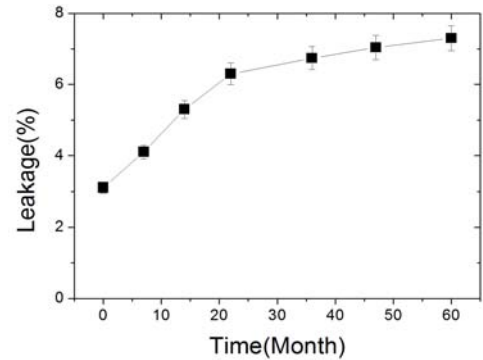


Fig. 11 Change of leakage ratio over time.



Fig. 12 Typical photo showing the anti-bacterial test results of the element.

소 급하게 증가하였다가 그 이후로는 완만하게 증가함을 보인다. 작동 5년 후 누설률은 7.3%로 나타났다.

소자에 대한 세균 검사도 수행하였다. 세균 검사는 I대학교 환경연구소에서 수행되었는데 소자의

외기(OA)부와 급기(SA)부 각각 2곳에 대하여 평판도말법(Streak Plate Method)으로 녹농균(*Pseudomonas aeruginosa*), 대장균(*Escherichia coli*), 포도상구균(*Staphylococcus aureus*)에 대해 실험을 수행하였다. 실험 결과의 한 예를 Fig. 12에 나타내었다. 그림에 보이듯이 세균은 전혀 검출되지 않았다. 이는 소자 원지의 투습도를 높이기 위하여 함침한 염화리튬의 살균 효과에 기인한 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 사무실에 350 CMH급 열회수 환기장치를 설치하고 5년간 소자의 성능 변화를 추적하였다. 대략 매년 1회씩 환기장치로부터 소자를 탈착하여 소자의 외관, 외곽 치수, 전열 성능, 누설률, 항균 성능을 측정하였다. 주된 결론은 다음과 같다.

- (1) 5년간 전열교환 성능(유효온도교환효율, 유효습도교환효율, 유효전열교환효율)의 변화는 무시할 만하였다.
- (2) 누설률은 시간이 지남에 따라 증가하였다. 작동 5년 후 누설률은 7.3%로 나타났다.
- (3) 세균 검사 결과 소자 내에서 세균이 전혀 검출되지 않았다.
- (4) 외곽 치수 변화는 소자의 중심부에서 가장 크게 나타났다. 초기 값의 2%이내이었다.

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.
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. 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.
4. Kistler, K. R. and Cussler, E. L., 2002, Membrane modules or building ventilation, Trans. IChemE, Vol. 80, No. A, pp. 53-64.
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 Transfer, 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. KS M 7019, 2001, Sheet materials-Determination of water vapor transmission rate-Gravimetric(dish) method.
8. KS M 7020, 2001, Paper and board-Determination of air permeability(medium range)-Part 5 : Gurley method.
9. Kim, N. H., Cho, J. P., Song, K. S., and Kim, D. H., 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.
10. KS B 6879, 2007, Heat-recovery ventilators.
11. ASHRAE Standard 41.2, 1986, Standard method for laboratory air-flow measurement, ASHRAE.
12. ASHRAE Standard 41.1, 1986, Standard method for temperature measurement, ASHRAE.
13. ASHRAE Standard 41.5, 1986, Standard measurement guide, engineering analysis of experimental data, ASHRAE.
14. Korea Lab, Accreditation Scheme, Korea Agency for Technology and Standards, Ministry of Knowledge and Economy.