

종이 물성이 전열교환 엘리먼트 성능에 미치는 영향

김 내 현[†], 조 진 표*, 송 길 섭**, 김 동 훈***

[†] 인천대학교 기계공학과, *인천대학교 TIC, **인천대학교 클린에어나노테크, ***(주)국일제지

Effect of Paper Properties on the Performance of a Enthalpy Exchanger

Nae-Hyun Kim[†], Jin-Pyo-Cho*, Gil-Sup Song**, Dong-Hoon Kim***

[†] Department of Mechanical Engineering, University of Incheon

*TIC, University of Incheon

**CleanAirNanoTech, University of Incheon

***Kuk-Il Paper

ABSTRACT: The effects of paper properties such as density, air permeability, water vapor transmission rate on the thermal performance of plate-type enthalpy exchanger were experimentally investigated. Three enthalpy exchanger samples having different properties were made, and were tested according to the standard test procedure (KS B 6879). Effective efficiencies were defined, which accounted for the air leakage between supply and exhaust streams. Results showed that paper density affected the sensible heat transfer of the samples. Sensible heat transfer increased with density of the paper. It was also shown that water vapor transmission rate alone was not a proper indicator for the efficiency of latent heat transfer. Air permeability should also be considered for adequate evaluation of the latent heat transfer. Best performance was obtained for the sample having highest paper density and moderate water vapor transmission ratio.

Key words: Enthalpy exchanger(전열교환기), Leakage (누설), Air permeability (투기도), Water vapor transmission rate (투습도), Effective efficiency(유효 효율)

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 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 사

용함으로써 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 열교환기 재료로는 알루미늄, 폴리프로필렌, 기능성 종이, 고분자 멤브레인 등이 사용된다^[1-6]. 그 중 기능성 종이와 고분자 멤브레인은 급기와 배기사이에서 현열교환은 물론 수분교환도 가능하여(전열교환) 우리나라와 같은 여름철이 고온다습한 지역에서 적합한 재료로 평가되고 있다^[1,2]. 특히 종이 재질 전열교환기는 가격도 저렴하여 가장 널리

[†] Corresponding author

Tel.: +82-32-770-8420; fax: +82-32-770-8410

E-mail address: knh0001@incheon.ac.kr

적용되고 있다.

전열교환기는 전열막과 스페이서가 교대로 적층되도록 제작된다. 스페이서는 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 재료의 전열막을 통과하는 메카니즘에 대해서는 아직 명확하게 알려져 있지 않다. 고분자 멤브레인의 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 재료의 경우도 유사하리라 예측된다. 종이 재료의 전열막의 경우는 수분 흡착을 강화하기 위하여 표면에 염화 칼슘, 염화리튬 등 흡습제를 코팅하기도 한다. 전열막의 흡습성능은 중량법^[7]으로 측정한다.

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 칼렌더링을 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 투기도로 정의한다. 따라서 투기도가 크면 기체 차폐성이 크다는 것을 의미한다. 참고로 일반 복사지는 4초 정도이고 전열교환기로 사용되기 위해서는 1000초 이상이 되는 것이 바람직하다. 종이 재료에서는 투기도가 크면 투습도가 감소하는 경향을 보이므로^[1] 최적의 전열 성능을 위해서는 둘 사이의 적절한 조화가 필요하다.

문헌 조사 결과 재료의 물성이 전열교환기의 전열 성능에 미치는 영향에 대해서는 고분자 재료의 경우 일부 검토되었을 뿐^[5,6] 종이 재료의 경

우는 전무한 실정이다. 본 연구에서는 밀도, 투기도, 투습도등이 다른 세 종류의 종이로 제작된 전열교환기 시료에 대한 성능시험을 통하여 종이 물성이 전열 성능에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 전열교환기 성능시험

Table 1에 세 종류 종이의 물성을 나타내었다. 시료 A는 평량 41.8 g/m², 두께 45 μm로 밀도(평량/두께)가 0.91 g/m³으로 셋 중 가장 크고 다음으로 C가 평량 38.6 g/m², 두께 45 μm로 밀도는 0.86 g/m³ 이다. B는 평량 38.4 g/m², 두께 48.5 μm로 밀도가 0.79g/m³으로 셋 중 가장 작다. 투기도는 Gurley 법^[8]으로 측정하였다. 투기도는 C가 1850초로 가장 크고 다음으로는 A가 910초 B는 185초로 가장 작다. C의 경우 투기도를 높이기 위하여 종이 섬유의 고해도를 높였다. 고해도는 펄프의 과쇄 정도를 의미하는데 장시간 과쇄하여 섬유 길이를 짧게 하면 고해도가 높아진다. 투습도는 중량법^[7]으로 측정하였다. 건조제로는 무수 염화칼슘을 사용하였고 시험은 건구온도 40도, 상대습도 90%에서 수행되었다. 투습도는 시료 B가 3992 g/m²day로 가장 크고 A가 3264 g/m²day, C가 3132 g/m²day 로 가장 작다. 본 시료들은 펄프로만 제조되었고 별도로 흡습 처리되지 않는 않았다. 시료 B의 투습도가 큰 이유는 낮은 투기도 (낮은 조직 치밀도)가 주된 영향을 미친 것으로 판단된다. 즉, 수분도 공기와 같이 bulk로 전열막 사이를 이동한 것으로 판단된다. C의 경우는 투기도가 가장 크고 (조직이

Table 1 Specification of the papers

	specification		
	A	B	C
weight (g/m ²)	41.8	38.4	38.6
thickness (μm)	46.0	48.5	45.0
density (g/m ³)	0.91	0.79	0.86
water vapor transmission rate (g/m ² day)	3264	3992	3132
air permeability (sec)	910	185	1850

가장 치밀하고) 투습도는 가장 작게 나타났다.

전열교환기의 제원은 가로, 세로, 높이가 각각 340mm, 340mm, 327mm이고 스페이서의 골 높이는 2.0 mm, 골 핏치는 4.47 mm이다. 골 형상은 이등변 삼각형에 가깝고 스페이서와 전열막은 접착제를 사용하여 부착되었다. 전열교환기는 실제 운전 조건을 모사하기 위하여 열 회수 환기장치 내에 장착되어 시험되었다. 환기장치에는 전열교환기 외에 두 개의 250 CMH급 BLDC 모터가 장착된 아우터로터 방식의 송풍기가 장착되어 있다.

3. 실험결과 및 고찰

실험은 동일한 환기 장치에 전열교환기만을 교체해 가면서 수행하였다. Table 2 과 3에 실험결과가 나타나 있다. 우선 풍량을 비교해 보면 난방과 냉방 조건 모두에서 1% 이내로 일치함을 보인다. 또한 송풍기 가동에 소비되는 전력도 거의 같음을 보인다. Table 1에 나타나 있듯이 세 종류 시료의 전열막의 두께도 거의 같고 따라서 동일한 송풍기를 사용하였을 때 시료별 풍량의 차이가 거의 나타나지 않는 것으로 판단된다. Table 2과 3의 풍량과 소비전력을 비교해 보면 냉방조건에서 풍량은 다소 적고 소비전력은 다소 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 냉방조건의 공기 온도가 낮고 따라서 밀도가 크기 때문에 반송에 소비되는 동력이 커지고 반송량은 줄어드는 것으로 판단된다.

Table 2과 3에 나타난 누설율을 비교해 보면 시료 B에서 가장 크고, C에서 가장 작게 나타남을 알 수 있다. 이는 Table 1에 보여지듯이 시료 B의 투기도가 가장 작고 C의 투기도가 가장 크기 때문이다. Fig. 1에 투기도에 따른 누설율을 나타내었다. 투기도가 증가함에 따라 누설율이 거의 선형적으로 감소함을 보인다. Table 2 과 3의 효율값과 유효 효율값을 비교해 보면 누설에 의하여 효율이 감소하고 누설율이 클수록 효율이 크게 감소함을 알 수 있다. 또한 효율 감소량은 난방보다는 냉방조건에서 더욱 크게 나타나는데 이는 식 (4) ~ (6)으로 부터 미루어 알 수 있듯이 효율이 작으면 효율감소량이 더욱 크게 나타나기 때문이다.

Table 2과 3의 유효온도효율을 보면 시료 A가

Table 2 Test results of the Enthalpy Recovery Ventilator for heating condition

	enthalpy exchanger		
	A	B	C
flow rate (CMH)	251.5	252.5	254.5
power consumption (W)	114.1	114.0	114.0
leakage ratio (%)	10.3	15.8	6.46
sensible heat exchange efficiency η_{Te}	88.4	87.2	86.4
latent heat exchange efficiency η_{We}	57.6	60.4	56.0
enthalpy exchange efficiency η_{ie}	77.0	76.0	76.5

Table 3 Test results of the Enthalpy Recovery Ventilator for cooling condition

	enthalpy exchanger		
	A	B	C
flow rate (CMH)	246.8	244.7	246.2
power consumption (W)	121.7	121.6	121.9
leakage ratio (%)	10.3	15.8	6.46
sensible heat exchange efficiency η_{Te}	78.9	77.8	77.9
latent heat exchange efficiency η_{We}	42.1	43.9	39.0
enthalpy exchange efficiency η_{ie}	54.3	52.1	54.2

가장 크고 B가 가장 작음을 알 수 있다. 모든 시료들은 동일한 형상을 하고 있고 풍량도 거의 같기 때문에 대류열전달계수는 동일할 것이다. 그렇다면 온도효율의 차이는 전열막의 열전도도 차이에 기인한다고 판단할 수 있다. 종이의 열전도

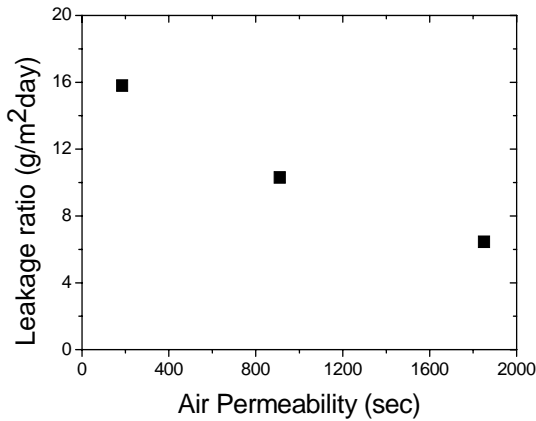


Fig. 1 Change of leakage ratio as a function of air permeability

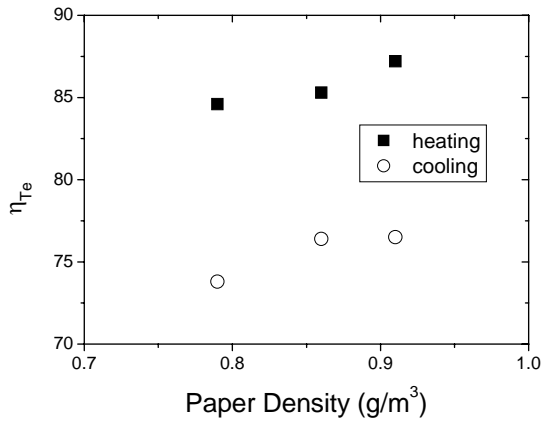


Fig. 2 Change of effective sensible heat efficiency as a function of paper density

도는 종이의 밀도와 관련이 있으리라 예상된다. Table 1에 세 전열막의 밀도가 나타나 있는데 시료 A가 가장 크고 B가 가장 작음을 보여준다. Fig. 2에는 전열막의 밀도와 유효온도효율을 나타내었다. 냉방과 난방 모두에서 밀도가 증가할수록 효율이 증가함을 보여준다.

Table 2과 3의 유효온도효율을 비교해 보면 난방 조건에서 대략 10% (A의 경우 10.7%, B의 경우 10.8%, C의 경우 8.9%) 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 환기장치 내의 송풍기 발열이 급기에 포함되어 계측되었기 때문인데 이 발열은 난방의 경우는 효율을 높이고 냉방의 경우는 효율을 낮추는 방향으로 작용한다. 일반적으로 열교환기에 있어서 유용도 (여기서는 효율)는 전달 단위수 (Number of Transfer Unit)에만 관계있을 뿐 온도 조건과는 관계가 없다. 따라서 본 전

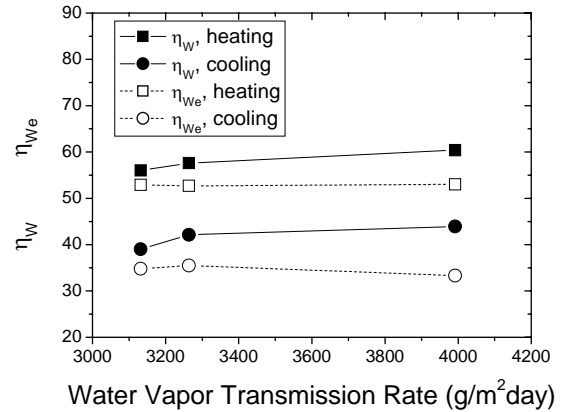


Fig. 3 Latent heat efficiency as a function of water vapor transmission rate

열교환기의 온도효율은 송풍기 발열이 없다면 온도 조건에 관계없이 (냉방과 난방시 동일하게) 같아야 한다. 따라서 하기 식으로 전열교환기만의 유효온도효율을 구할 수 있다.

$$\left[\eta_{Te} - \frac{Q_m / (m \dot{c}_p)}{T_{SA} - T_{RA}} \right]_h = \left[\eta_{Te} + \frac{Q_m / (m \dot{c}_p)}{T_{SA} - T_{RA}} \right]_c \quad (1)$$

상기 식의 좌변은 난방시 전열교환기만의 유효온도교환효율이고 우변은 냉방시 전열교환기만의 유효온도교환효율이다. 또한 Q_m 은 송풍기 발열량이다. 식 (10)을 사용하여 전열교환기만의 유효온도효율을 구하면 시료 A의 경우 83.6%, B의 경우 81.0%, C의 경우 82.3%가 된다. 또한 상기 식에서 송풍기 발열량 Q_m 을 구해보면 A의 경우 59.4 W, B의 경우 60.0 W, C의 경우 49.4 W로 Table 2과 3에 나타난 소비전력의 41~50%수준임을 보여준다.

Table 2과 3의 습도효율을 비교하여 보면 난방시 효율이 현저히 크음을 알 수 있다. 일반적으로 고분자재료의 흡습능력은 상대습도의 증가에 따라 증가한다^[5]. 본 실험의 난방시 상대습도는 실내 40%, 실외 76%이고 냉방시는 실내 50%, 실외 40%로 난방시 상대습도가 높아 흡습능력이 증가하는 것으로 판단된다. 습도효율 (유효습도효율이 아님)은 시료 B에서 가장 크고 C에서 가장 작다. Fig. 3에 투습도와 습도효율(η_{We})을 나타내었다. 냉난방시 모두 투습도가 증가하면 습도효율이 증가함을 보여준다. 하지만 유효습도효율(η_{We})은 투습도와 거의 무관하게 일정함을 보인

다. 이로부터 본 연구에 사용된 전열막의 경우 누설에 의한 습도 증가가 투습도 증가의 주된 요인이었음을 유추할 수 있다. 따라서 전열막 평가 시 투습 성능은 투습도와 투기도를 동시에 고려하여야 한다고 판단된다.

상기 온도와 습도 교환을 통합한 전열교환효율이 Table 2 과 3에 수록되어 있다. 유효전열교환효율은 시료 A가 가장 높고 시료 B에서 가장 낮게 나타났다. 시료 A는 전열막의 밀도가 높아 현열전달에 유리하고 투기도도 상대적으로 높기 때문에 전열효율이 가장 높게 나타난 것으로 판단된다. 시료 B는 투기도가 낮고 전열막의 밀도가 가장 작아 전열효율이 가장 작게 나타났다.

4. 결 론

- (1) 전열막의 밀도가 증가할수록 유효온도교환효율이 증가하였다. 이는 밀도가 증가할수록 열전도도도 증가하기 때문으로 판단된다.
- (2) 습도교환효율은 투습도가 증가할수록 증가하였다. 하지만 유효습도교환효율은 투습도에 무관하게 일정하게 나타났다. 이로부터 본 연구에 사용된 전열막의 경우 누설에 의한 습도 증가가 투습도 증가의 주된 요인이었음을 알 수 있다.
- (3) 최적의 성능은 전열막의 밀도가 크고 투기도도 상대적으로 높은 시료에서 얻어졌다. 투기도가 너무 작으면 누설이 심하여 성능이 감소한다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 2006년도 중대형과제 (고효율 건물공조소재 개발) 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

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, Transactions of IChemE, Vol. 80, Part 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.