

배기열 회수용 종이 열교환기의 성능에 관한 연구

유성연* · 정민호** · 최재호*** · 권화길*** · 이춘우**** · 이기성****

A Study on the Performance of Paper Heat Exchanger for Exhaust Heat Recovery

Seong-Yeon Yoo*, Min-Ho Chung**, Jae-Ho Choi***, Hwa-Kil Kwon***,
Chun-Woo Lee****, Ki-Seong Lee****

Key Words : Paper heat exchanger(종이 열교환기), Exhaust heat recovery(배기열 회수), Ventilation system(환기장치), Sensible heat(현열), Latent heat(잠열), Total heat(전열)

ABSTRACT

In order to control indoor air quality and save energy, it is needed to install a suitable ventilation system equipped with heat exchanger for heat recovery. The purpose of this research is to find the performance of paper heat exchanger for exhaust heat recovery, which exchanges latent heat as well as sensible heat. Experimental apparatus comprises heat exchanger model, constant temperature and humidity chamber, fan and measurement systems for temperature, pressure and flow rate. Thermal performance and pressure loss of the paper heat exchanger are measured and compared at various air velocities and outdoor conditions. Experimental results show that paper heat exchanger can recover 50~70% of the enthalpy difference between supply and exhaust air.

1. 서론

최근에 실내 생활 공간이 고밀도화, 고단열화되고 냉난방기기의 보급 확대 및 성능향상으로 창을 닫고 지내는 시간이 길어짐에 따라 절대적인 환기량이 부족하게 되고, 건축자재와 생활용품 등으로부터 발생한 유해물질로 실내 공기질 악화 등의 문제점이 제기되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 외부로부터 신선한 공기를 유입해야만 한다. 그러나 겨울철 차가

운 외부공기의 실내유입은 고가의 난방 에너지소비가 불가피하며, 여름철 고온의 외부공기 유입 또한 냉방 부하를 증가시켜 막대한 에너지손실을 야기시키게 된다. 이를 해결하기 위한 방안으로 적절한 환기 시스템의 설치와 에너지 절약을 위한 급기공기(실외공기)와 배기공기(실내공기)간의 열교환을 적용시킨 배기열 회수 시스템의 개발이 필요하다.

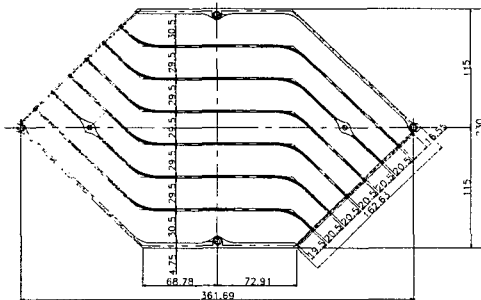
종이 열교환기는 공기 중의 열과 수분, 즉 현열(sensible heat)과 잠열(latent heat)을 모두 교환하는 열교환기로 급배기 엔탈피(enthalpy)차의 50~70%를 회수할 수 있어서, 냉·난방 에너지를 20~30% 이상 절약할 수 있으며, 기존에 설치되어 있는 공조기에 간단히 추가로 장치를 설치하여 냉난방 부하를 줄여 연간 운전경비를 절감할 수 있는 효과적인 에너지 절

* 충남대학교 기계설계공학과
** (주)에이스랩
*** 충남대학교 대학원
**** (주)이지음
E-mail : syyooh@cnu.ac.kr

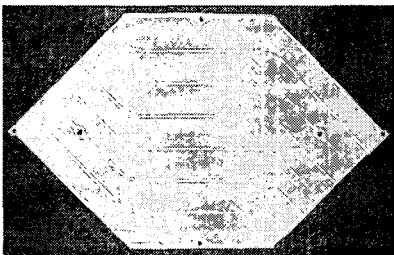
약기이다. 종이 열교환기는 사용과 유지관리가 용이하고, 가격도 저렴하며, 에너지 절약효과가 매우 크므로 우리나라와 같이 에너지의 대부분을 수입에 의존하고 있는 국가에서는 개발이 절실히 요구되고 있다. 또한 종이 열교환기는 실내 공기질 향상을 위해 필수적으로 사용되고 있는 환기장치, 공기정화기, 소형에어콘 등에 직접 적용 가능하며, 관련제품의 기능 복합화에 의한 경쟁력을 제고할 수 있다. 본 연구에서는 종이 열교환기의 성능시험장치를 설계·제작하여 공기유속과 외기조건을 변화시켜가면서 성능시험을 수행하였다.

2. 종이 열교환기 모델

Fig. 1은 열교환기에 사용되는 전열막의 개략도와 사진이다. 유동의 입·출구쪽 각 채널의 폭은 20.5 mm이고, 열교환기 유로 중앙의 폭은 29.5 mm이다. 프레임과 프레임 사이에는 두께 0.08 mm의 종이(특수 펄프)를 설치하여 종이 열교환기를 만들었다. 이 종이는 현열과 잠열의 교환이 가능하여 열교환 성능이 뛰어나고 수분에 대한 내구성이 강하고 제조와 사용이 간편한 소재이며, 투기성이 상당히 적은 반면에 투습성이 우수하면서 습강도가 높은 재질이다. 이 종이의 밀도는 930 kg/m^3 , 열전도계수는 $0.18 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ 인 재질이다.



(a) schematic



(b) photo

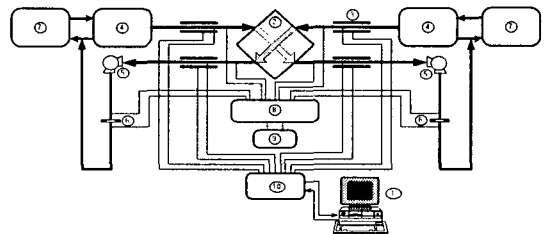
Fig. 1 Schematic and photo of paper heat exchanger model

종이와 종이 사이의 유로간격은 2.2 mm로 저온측과 고온측 모두 50층으로 제작하였다. 종이 열교환기의 프레임은 사출성형으로 제작을 하였으며, 성형과정 중 종이를 인서트하는 공정을 추가하여 종이에 프레임이 부착된 하나의 종이 열교환기 전열면을 얻을 수 있다. 대부분의 종이 열교환기는 어느 정도의 누설이 있어 급기와 배기의 공기흐름이 섞이게 된다. 이러한 누설은 배기 가스가 독성이 있을 경우에는 심각한 문제를 야기시키게 되므로 세심한 주의가 필요하다. 전열 열교환기에서 누설량은 시험장치 덕트 내부의 평균 탄산가스 농도를 측정하여 계산하게 되며, 본 연구에 사용된 종이 열교환기의 누설율은 5.53%이다.

3. 종이 열교환기 성능시험

3.1. 성능시험 장치 및 방법

종이 열교환기의 성능시험을 위해 본 연구에서 설계·제작한 시험장치는 일정한 온도와 습도의 공기를 공급하기 위한 항온항습기 및 항온항습챔버, 송풍기, 덕트, 열교환기 시험부, 측정 및 제어장치, 자료획득장치 등으로 구성되어 있다. 종이 열교환기 성능시험장치에서는 덕트내의 유동 및 온도를 균일하게 유지하도록 송풍기를 흡입방향으로 열교환기의 양 출구 부분에 부착하였다. 항온항습챔버에 연결된 단열된 주름관을 통해 열교환기 시험부 입구로 공기가 공급되고, 공급 공기의 온도 및 습도 제어는 항온항습챔버와 연결된 항온항습기를 이용하였다. 항온항습기와 항온항습챔버는 두 개로서 각각 가열용과 냉각용으로 제작하였으며, Fig. 2는 종이 열교환기 성능시험장치의 개략도이다.



- 1: computer 2: heat exchanger model 3: insulated wall
- 4: constant temperature & humidity chamber 5: fan
- 6: nozzle 7: constant temperature & humidity control unit
- 8: scanning box 9: micro-manometer 10: data acquisition system
- ⋯: pressure measuring
- : dry temperature & relative humidity measuring

Fig. 2 Schematic of performance test apparatus

Table 1 Operating condition of cooling and heating for paper heat exchanger

	Indoor		Outdoor	
	Dry-bulb Temp. (°C)	Wet-bulb Temp. (°C)	Dry-bulb Temp. (°C)	Wet-bulb Temp. (°C)
Cooling	27 ± 1	20 ± 2	35 ± 1	29 ± 2
Heating	20 ± 1	14 ± 2	5 ± 1	2 ± 2

가열용 및 냉각용 항온항습기에서 공급된 일정한 온도와 습도의 공기는 항온항습챔버에 모이게 되고, 이 공기가 종이 열교환기 시험부에 공급이 된다. 시험부에서 종이 열교환기에 의해 열교환을 한 공기는 송풍기와 노즐을 거쳐 다시 항온항습기로 유입된다. 이때 입구 공기의 유량은 송풍기에 연결된 인버터를 이용하여 조절한다. 압력의 측정을 위해 열교환기 입·출구 덕트 위·아래 부분과 노즐에 압력측정 탭을 설치하고, 다채널 scanning이 가능한 selection box에 micro-manometer를 연결하여 차압과 유속을 동시에 측정할 수 있도록 하였다. 압력측정의 정확도를 높이기 위해 덕트에는 위·아래 및 양옆에 1개씩 4개, 노즐에도 4개의 압력 탭을 병렬로 설치하여 평균값을 측정하도록 하였다. 유량측정을 위해서 송풍기의 출구 측에 노즐을 설치하여 평균유량을 측정할 수 있도록 하였으며, 인버터를 이용하여 유량을 조절할 수 있도록 하였다. 노즐은 직접 제작하였으며 소닉 노즐을 이용한 교정을 통해 얻어진 유량계수 값을 이용하여 유량을 계산할 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 현열에 의한 열전달과 잠열에 의한 열전달을 동시에 측정하기 위해 종이 열교환기 전·후에서 온습도센서를 이용하여 건구온도 및 상대습도를 측정하였다. 습공기 프로그램을 작성하여 비습도와 엔탈피를 구하고 현열과 잠열에 의한 열전달량을 구하였으며, 실험은 Table 1과 같은 여름철 냉방조건과 겨울철 난방조건에 대하여 열교환기 유로에서의 면풍속을 0.2~2.5 m/s로 변화시켜 가면서 반복하여 측정하였다. 냉방조건 및 또한 공기의 온도와 비습도, 상대습도가 열교환 효율에 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위해 일정한 유량에서 온도, 비습도, 상대습도를 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다.

3.2. 성능시험 결과 및 고찰

종이 열교환기는 고온측과 저온측의 온도차에 의한

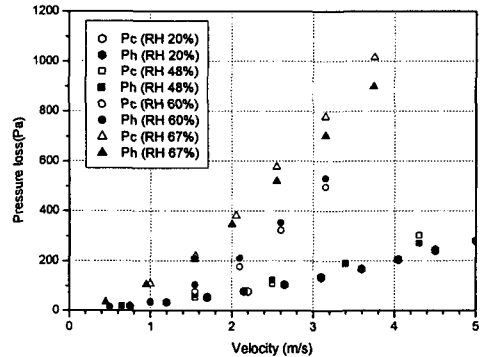


Fig. 3 Comparison of pressure loss at various air velocity

현열 열교환뿐만 아니라 습도차에 의한 잠열 열교환까지 고려해야 한다. 압력손실 측정 실험 또한 열교환기의 내부에서 습도에 의한 영향을 고려해야 하기 때문에 열교환기의 입구에서 상대습도를 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다. Fig. 3은 유속의 변화에 따른 종이 열교환기 내에서의 압력손실을 측정된 것으로 유속이 증가하면서 압력손실은 유속의 제곱에 비례하여 증가하는 경향을 보이고 있으며, 상대습도가 커지면 동일 유속에서 압력손실도 증가하고 있는 경향을 보이고 있다. 상대습도가 증가하여 공기가 습한 상태가 되면 전열 열교환기 전열면인 종이 공기 중의 수증기를 많이 포함하게 되며, 이에 따라 전열면에서의 표면마찰이 커져 압력손실이 증가하게 된다. 상대습도가 낮은 영역에서는 상대습도차에 의한 압력손실의 차가 적지만 상대습도가 커지면서 압력손실의 차도 커지고 있다.

종이 열교환기의 열전달 성능 시험에서는 현열과 잠열을 고려하여야 하므로, 종이 열교환기에서 열교환하기 전과 후에 대하여 건구 온도와 상대 습도를 측정하였으며, 습공기 선도(psychro-metric chart) 프로그램을 이용하여 각각의 엔탈피와 비습도 등의 상태를 얻었다. 각 상태에서의 엔탈피를 이용하여 현열과 잠열, 전열 열전달량을 구하였으며, 열교환기에서 가능한 최대 열전달량 또한 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{c, sen} = \dot{m}_c \times [h(T_{c,o,d}, W_{c,i}) - h(T_{c,i,d}, T_{c,i,w})]$$

$$Q_{c, lat} = \dot{m}_c \times [h(T_{c,o,d}, T_{c,o,w}) - h(T_{c,o,d}, W_{c,i})]$$

$$Q_{c, tot} = \dot{m}_c \times [h(T_{c,o,d}, T_{c,o,w}) - h(T_{c,i,d}, T_{c,i,w})]$$

$$Q_{h, sen} = \dot{m}_h \times [h(T_{h,i,d}, W_{h,o}) - h(T_{h,o,d}, T_{h,o,w})]$$

$$Q_{h, lat} = \bar{m}_h \times [h(T_{h,i,d}, T_{h,i,w}) - h(T_{h,i,d}, W_{h,o})] \quad (1)$$

$$Q_{h, tot} = \bar{m}_h \times [h(T_{h,i,d}, T_{h,i,w}) - h(T_{h,o,d}, T_{h,o,w})]$$

$$Q_{sen, max} = \bar{m}_{ave} \times [h(T_{h,i,d}, W_{c,i}) - h(T_{c,i,d}, T_{c,i,w})]$$

$$Q_{lat, max} = \bar{m}_{ave} \times [h(T_{h,i,d}, T_{h,i,w}) - h(T_{h,i,d}, W_{c,i})]$$

$$Q_{tot, max} = \bar{m}_{ave} \times [h(T_{h,i,d}, T_{h,i,w}) - h(T_{c,i,d}, T_{c,i,w})]$$

여기에서, Q 는 열전달량이고, \dot{m} 은 질량 유량, h 는 엔탈피, T 는 온도, W 는 비습도이다. 하첨자의 경우, c 는 저온측 공기를 말하며, h 는 고온측 공기, sen 은 현열, lat 는 잠열, tot 는 전열, max 는 가능한 최대 열전달량, i 는 입구, o 는 출구, d 는 건구, w 는 습구를 나타낸다.

종이 열교환기에서 현열과 잠열, 전열에 대한 유효

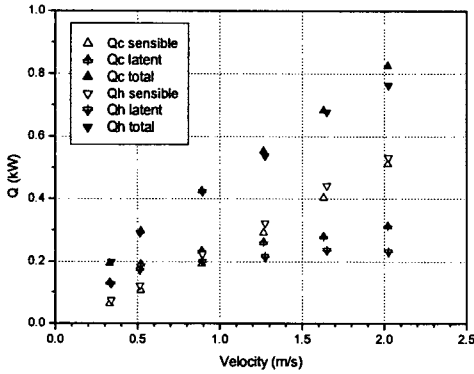


Fig. 4 Variation of heat transfer rate with air velocity at cooling condition

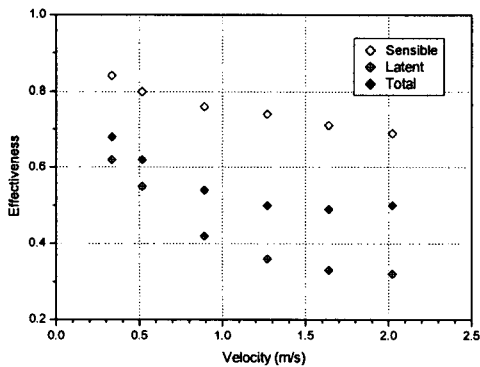


Fig. 5 Variation of effectiveness with air velocity at cooling condition

성은 실제 열전달량에 대한 가능한 최대 열전달량의 비로써 다음과 같이 계산하였다.

$$\epsilon_{sen} = [(Q_{c, sen} + Q_{h, sen})/2]/Q_{sen, max}$$

$$\epsilon_{lat} = [(Q_{c, lat} + Q_{h, lat})/2]/Q_{lat, max} \quad (2)$$

$$\epsilon_{total} = [(Q_{c, total} + Q_{h, total})/2]/Q_{total, max}$$

Fig. 4는 여름철 냉방조건에서 종이 열교환기의 유속 변화에 따른 실외공기와 실내공기 사이의 열전달량을 나타낸 것이다. 공기의 유량이 증가하면서 현열과 잠열, 전열 열전달량 모두 증가하는 경향을 보이고 있으며, 잠열 열전달이 현열 열전달보다 공기의 유속 증가에 따른 열전달량 증가가 작기 때문에 면풍속 1 m/s 이하에서는 잠열 열전달량이 현열 열전달량보다 높지만 면풍속이 1 m/s 이상이 되면서 현열 열전달량이 잠열 열전달량보다 높게 나타나고 있다. 여름철 냉방조건에서 식 (2)와 같이 정의된 현열과 잠열, 전열에 대한 유효성을 Fig. 5에 나타내었다. 공기의 유속이 증가하면서 가능한 최대 열전달량의 증가보다 실제 열전달량의 증가가 작아지기 때문에 유효성은 감소하는 경향을 보이고 있으며, 일반적인 종이 열교환기 사용조건 면풍속 0.75 m/s에서 잠열, 현열, 전열의 유효성은 각각 47%, 77%, 57%이다.

Fig. 6은 겨울철 난방조건에서 전열 열교환기 유속 변화에 따른 실외공기와 실내공기 사이의 열전달량을 나타낸 것이다. 냉방조건에서와 마찬가지로 공기의 유속이 증가하면서 열전달량이 증가하고 있으며, 난방조건에서는 실내공기와 실외공기의 온도차가 냉방조건보다 크기 때문에 현열 열전달량이 잠열 열전달량보다 항상 큰 값을 보이고 있다. 면풍속이 1.8 m/s 이상에서 현열 열전달량이 증가하지 않는 경향을 보이고 있으며, 이것은 향온향습기 및 향온향습챔버 용량의 한계로 유량이 증가를 하면서 실외측 저온의 공기 온도가 상승했기 때문이다.

Fig. 7은 유속의 변화에 따른 유효성을 나타낸 것으로 현열에 대한 유효성은 여름철 냉방조건에서와 비슷한 경향을 보이고 있지만, 잠열에 의한 유효성과 전열에 대한 유효성은 상당히 높게 나타나고 있다. 이것은 겨울철 난방조건인 경우 실내공기와 실외공기의 절대습도의 차가 작기 때문에 식 (2)의 분모인 가능한 최대 열전달량이 작아지기 때문이다. 난방조건에서 일반적인 종이 열교환기 사용조건 면풍속 0.75 m/s에서 잠

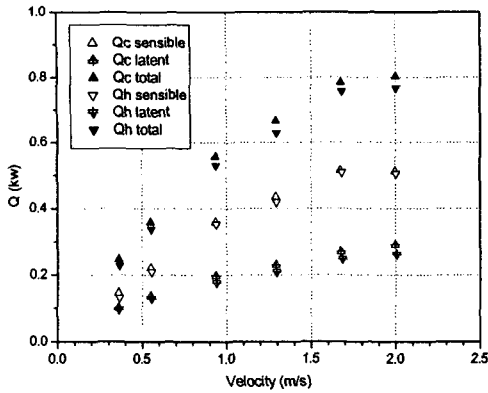


Fig. 6 Variation of heat transfer rate with air velocity at heating condition

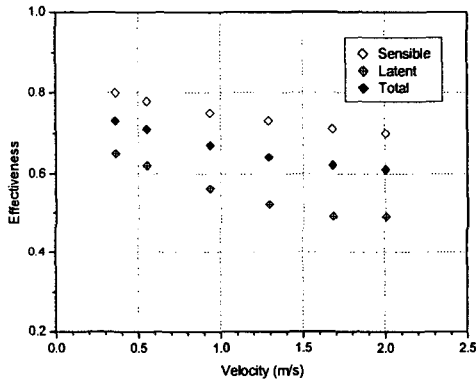


Fig. 7 Variation of effectiveness with air velocity at heating condition

전열에 대한 유효성은 일정한 경향을 나타내고 있다. 잠열에 대한 유효성이 일정한 것은 실외공기의 비습도 변화량이 매우 작아 잠열 열전달의 변화가 작았기 때문이다.

다음으로 건구온도의 영향을 알아보기 위해 실외측 공기의 절대습도를 일정하게 유지시키고 건구온도를 변화시켜가면서 성능해석을 하였다. Fig. 9는 유효성의 분포를 나타낸 것으로 온도차가 증가하면서 현열 열전달량은 증가하지만 현열에 의한 유효성은 일정한 값을 보이고 있다. 반면에 절대습도의 차를 일정하게 유지시키면 잠열 열전달량은 일정하게 유지되어야하나 본 실험에서 절대습도차가 일정하게 유지되어 주지 못하고, 온도차가 증가하면서 절대습도차도 조금씩 증가하였기 때문에 잠열 열전달량도 약간 증가하였기 때문에 잠열에 대한 유효성은 증가하는 경향을 보이며, 전열

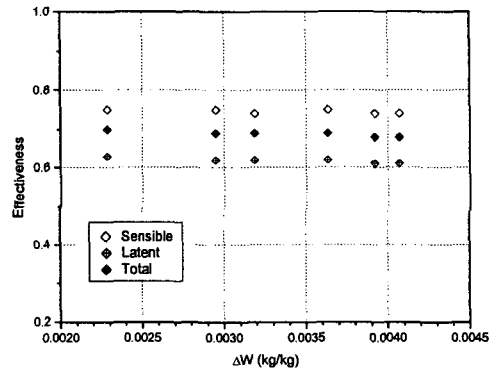


Fig. 8 Variation of effectiveness with various outdoor humidity ratio at constant dry-bulb temperature

열, 현열, 전열의 유효성은 각각 59%, 77%, 69%로 난방조건보다 전열에서 약 12% 증가하였다.

건구온도, 절대습도, 상대습도가 종이 열교환기의 현열 및 전열 열전달에 어떠한 영향을 미치는가를 알아보기 위해 겨울철 난방조건에서 실외공기의 한 조건을 일정하게 유지시키고 다른 두 가지 조건을 변화시켜가면서 성능해석을 수행하였다. 겨울철 난방조건에서 실외공기의 건구온도를 일정하게 유지시키고, 절대습도를 변화시켜 가면서 성능해석을 수행한 결과, 실외공기의 절대습도가 감소하면 즉 실내공기와 실외공기의 절대습도차가 증가하면 습도차에 의한 잠열 열전달은 증가한다. Fig. 8은 절대습도차에 의한 유효성의 관계를 나타낸 것으로 습도차가 증가하면서 현열, 잠열,

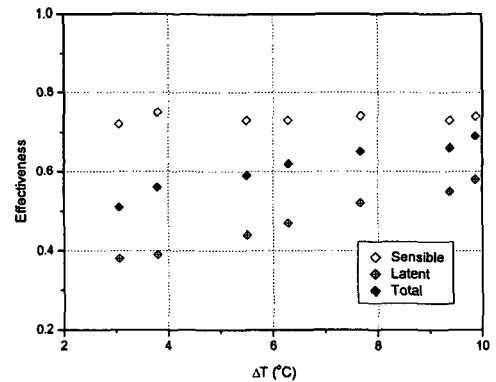


Fig. 9 Variation of effectiveness with various outdoor dry-bulb temperature at constant humidity ratio

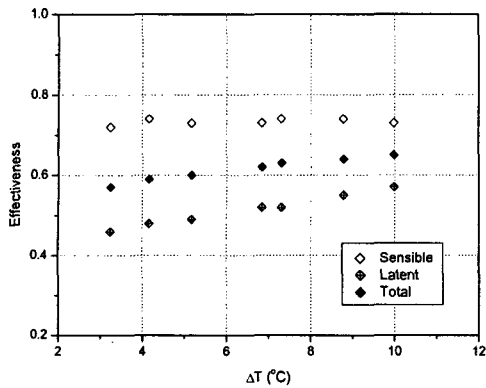


Fig. 10 Variation of effectiveness with various outdoor dry-bulb temperature at constant relative humidity

에 대한 유효성도 온도차가 증가하면서 증가를 한다.

종이 열교환기의 성능에서 상대습도의 영향을 알아보기 위해 실외측 공기를 일정한 상대습도로 유지시키고, 건구온도를 변화시켜 가면서 실험을 하였다. 온도차가 커지는 것은 실외측 공기의 온도가 감소하는 것으로 일정 상대습도 상태에서는 실외측의 절대습도 또한 감소하게 된다. Fig. 10은 온도차에 의한 유효성의 관계를 나타낸 것으로 이 그래프에서도 역시 현열에 의한 유효성은 온도차에 관계없이 항상 일정한 값을 보이고 있다. 잠열에 의한 유효성을 보면 이 경우에도 일정 절대습도의 경우와 같이 온도차가 증가하면서 절대습도 차가 증가하여 잠열 열전달량이 증가하였기 때문에 잠열에 대한 유효성은 증가하는 경향을 보이며, 전열에 대한 유효성도 증가한다.

종이 열교환기에서 현열에 대한 유효성은 온도차가 증가하여 열전달량이 증가하거나 온도차가 감소하여 열전달량이 감소하여도 일정한 분포를 보이지만 잠열에 대한 유효성은 습도차가 증가하여 잠열에 대한 열전달량이 증가하면 증가하는 경향을 보이며, 습도차가 감소하여 잠열에 대한 열전달량이 감소하면 감소하는 경향을 보이고 있다.

6. 결론

배기열 회수용 종이 열교환기 모델에 대해 공기유속과 외기조건을 변화시켜가면서 성능시험을 수행하여

다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 배기열 회수용 종이 열교환기 성능시험에서 압력손실은 속도가 증가하면 증가하고, 또한 유입공기의 습도가 증가하여도 증가하는 경향을 보인다.
- 2) 여름철 냉방조건과 겨울철 난방조건 성능시험에서 모두 속도가 증가하면 현열, 잠열, 전열에 대한 유효성은 감소한다. 면풍속 0.75 m/s에서 냉방조건의 현열, 잠열, 전열에 대한 유효성은 77%, 47%, 57%이고, 난방조건의 현열, 잠열, 전열에 대한 유효성은 77%, 59%, 69%이다.
- 3) 현열에 대한 유효성은 실내와 실외의 온도차나 습도차가 증가하여도 거의 변하지 않는다.
- 4) 잠열에 대한 유효성은 동일 비습도와 상대습도에서 실내와 실외의 온도차가 증가하면 증가하는 경향을 보이고 있다.

후기

본 연구는 한국과학재단 지정 선문대학교 공조기술 연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- (1) Spalding, D.B., et al., 1998, Heat Exchanger Design Handbook, Vol. 1-Vol. 5, Hemisphere Publishing Co.
- (2) Kays, W.M. and London, A.L., 1964, Compact Heat Exchangers, McGraw-Hill.
- (3) Singh, K.P. and Soler, A.I., 1984, Mechanical Design of Heat Exchanger, Arcturus Publishers.
- (4) Grimm, N.R. and Rosaler, R.C., 1990, Handbook of HVAC Design, McGraw-Hill.
- (5) Kilicashan, I. and Sarac, H.I., 1998, Enhancement of heat transfer in compact heat exchanger by different type of rib with holographic interferometry, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 17, pp. 339~346.
- (6) 유성연, 정민호, 이용문, 2002, 공기조화 배기열 회수용 전열 열교환기의 성능에 관한 연구, 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, pp. 184~189.