

# 다공질 폴리우레탄 폼 매트릭스 축류 회전형 열교환기의 성능특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Performance of Axial Flow Rotary Heat Exchanger  
with the Porous Polyurethane Foam Matrix

태 춘 섭\*, 박 상 동\*, 조 성 환\*, 최 영 돈\*\*  
C. S. Tae, S. D. Park, S. H. Cho, Y. D. Choi

Key words : Rotary Heat Exchanger(회전형 열교환기), Polyurethane Foam Matrix(폴리우레탄 폼 매트릭스), Air Leakage Rate(공기누설율), Real Effectiveness(실제 효율)

## ABSTRACT

This is an experimental study to identify the performance of air-to-air rotary heat exchanger with polyurethane foam matrix. The experimental apparatus including heating AHU(Air Handling Unit), cooling AHU, sensor chamber, and heat exchanger testing unit was designed and manufactured in this study. The performance of heat exchanger with porous polyurethane foam matrix was tested with variations of the density and the thickness of matrix, regulating the wind velocity and the rotational speed of matrix. The actual heat recovery effectiveness, air leakage rate, and pressure drop of heat exchanger were measured and analyzed.

## 기 호 설 명

- $\epsilon$  : 저열회수효율
- $C_c$  : 저온공기의 열용량율,  $W/^\circ C$
- $C_{min}$  :  $C_c$ 와  $C_h$ 중의 최소치,  $W/^\circ C$
- $CO_{co}$  : 저온공기 출구측의  $CO_2$ 농도(PPM)
- $CO_{ci}$  : 저온공기 입구측의  $CO_2$ 농도(PPM)
- $CO_{hi}$  : 고온공기 입구측의  $CO_2$ 농도(PPM)
- $h_{co}$  : 저온공기 출구측의 엔탈피(kcal/kg)
- $h_{ci}$  : 저온공기 입구측의 엔탈피(kcal/kg)
- $h_{hi}$  : 고온공기 입구측의 엔탈피(kcal/kg)
- $L$  : 공기누설율

## 1. 서 론

건물에서는 거실, 사무실, 상업용 공간 등 어느 곳이나 인체에서 자연적 혹은 인위적으로 발생되는  $CO_2$ 가스, 냄새, 수분, 담배연기 등과 건물 자체로부터 발생되는 라돈 등의 실내공기오염원이 있으므로 환기가 필요하다.

최근에는 생활수준의 향상으로 보다 풍요롭고 쾌적한 생활 및 작업환경의 조성을 요구하게 되어 환기량이 증대되고 있는 추세이다. 그러나, 냉난방을 하고 있는 공간에서 오염된 공기를 실외로 배출하고 동량의 신선공기를 그대로 공

\* 한국에너지기술연구소

\*\* 고려대학교 기계공학과

조공간에 도입하면 그 공기로 인하여 냉난방효과는 현저히 감소하고 또한 막대한 열손실이 발생된다. 또한 온습도가 현저하게 다른 외기를 실내공기와 같은 상태로 처리하는데 필요한 에너지가 증대하게 되므로 그에 따른 설비비 및 소요동력의 증가를 초래하게 된다. 이러한 에너지소비를 감소시키며 효율적으로 환기를 수행하기 위하여 배열회수시스템을 채용한다. 이러한 배열회수시스템은 건물의 에너지절약계획에서 중요한 요소의 하나로써 에너지의 이용효율을 향상시킨다. 실제로 배열회수시스템을 적용할 경우 기중에 따라 환기로 버려지는 에너지의 40~80% 정도를 회수할 수 있다.

국내에서도 대형 사무소건물에서는 대부분 배열회수시스템을 비롯한 여러가지 에너지절약기법을 적용하고 있으나 중소규모 상업용 건물에서는 냉난방을 위하여 패키지형 냉난방기를 사용하고 있으면서도 배열회수를 고려하지 않고 있다. 그 주요 원인으로는 중소규모 전용 공조공간 사용자들은 배열회수시스템의 투자비, 투자비 회수기간등의 불만족으로 인하여 대형건물의 소유주에 비해 투자욕구가 낮아 설비개발의 절실함이 적은 것이라고 생각된다. 따라서 이러한 전용 공조공간을 대상으로 배열회수장치의 보급을 촉진하기 위해서는 가격이 저렴하고 소형인 기기의 개발이 필요하다.

## 2. 폴리우레탄 폼 매트릭스의 특성

회전형 열교환기는 전열매체인 다공질의 원통형 매트릭스, 고온유체와 저온유체의 분리를 위한 격판을 가진 매트릭스하우징, 구동장치 및 부속장치로 구성되며, 매트릭스하우징내에서 일정한 속도로 회전하는 매트릭스를 전열매체로 하여 고온유체가 흐르는 고온영역에서 열 및 물질을 흡수하였다가 이것을 저온유체가 흐르는 저온영역으로 방출하여 열 및 물질교환을 하게 된다.

본 연구에서 배열회수용 열교환기에 적용하는 매트릭스는 다공질 폴리우레탄 폼 재질로서 기존의 축류회전형 열교환기에서 사용하는 허니

콤형 매트릭스와는 재질 뿐만 아니라 유로형상도 다르므로 그 성능도 다를 것이다.

허니콤형 매트릭스는 공기흐름 방향으로 가늘고 긴 관형상의 유로가 형성되어 있지만 다공질 폴리우레탄 폼 매트릭스는 공기유로가 일정한 형상이 아니라 단위 cell이 대체적으로 12면체로 이루어져 이것이 상하좌우 방향으로 연결되어 있는 형상으로 되어 있다.

회전형 매트릭스는 일단 공기가 매트릭스에 유입되면 회전체에 의해서 회전하며 축방향으로 진행하다가 맞은편으로 나오게 되는데 미처 빠져나오지 못한 공기는 상대편 기류쪽으로 유입되어서 공기누설이 발생된다. 그런데 이 누설량은 회전체의 회전속도와 회전체의 길이에 비례한다. 공기유량에 대한 누설량의 비율인 누설율이 증가하면 열교환기의 실제 열회수효율이 감소하게 되어 그 성능이 저하된다. 그리고 허니콤형 매트릭스는 가격이 고가이고 잠열을 회수하기 위해서는 매트릭스의 표면에 특수코팅처리를 하여야 하므로 매트릭스의 가격은 상승되므로 축류 회전형 열교환기를 저가로 하는데 하나의 장애요인이다.

그러나 매트릭스를 다공질 폴리우레탄 폼으로 할 경우는 매트릭스내에 유입된 공기는 매트릭스가 회전할 때 미끄럼이 생겨 매트릭스의 회전속도보다 천천히 회전하여 누설율이 감소되고 매트릭스와 공기 사이의 열전달계수도 크고, 또

Table 1. Properties of porous polyurethane foam

Item PPI	$D_h$ (m)	$\beta$ ( $m^2/m^3$ )	$p$	$\rho_m$ ( $kg/m^3$ )	$\rho_v$ ( $kg/m^3$ )
10	0.00622	15.94	0.9754	1155	28.47
25	0.00247	40.17	0.9750	1155	28.92
30	0.00203	48.77	0.9744	1155	29.52
38	0.00157	63.00	0.9734	1155	30.67

note)  $D_h$  : hydraulic diameter.

$\beta$  : heat transfer area per total volume of the matrix

$p$  : porosity

$\rho_m$  : mass density

$\rho_v$  : volume density

한 특수한 처리가 없이 잠열을 회수할 수 있으며 매트릭스의 재료비도 저렴하여 여러가지 면에서 축류 회전형 열교환기에 적합한 매트릭스이다.

본 연구에 적용된 다공질 폴리우레탄 폼 매트릭스는 10PPI, 25PPI, 30PPI, 38PPI의 4종이다. 여기에서 PPI 단위는 Particale Per Inch로서 재질의 조밀도를 나타내는 단위이다. 폴리우레탄 폼 매트릭스의 특성치는 Table 1.과 같다.

### 3. 열교환기의 성능시험장치

본 시험장치는 풍량, 온도, 습도의 조절이 가능하고 또한 열회수효율, 공기누설율, 압력강화 등과 같은 특성시험이 가능하도록 계획되었으며 이 장치는 공기냉각설비, 공기가열설비, 그리고 덕트설비로 크게 분류할 수 있다.

#### 3.1 공기냉각 및 가열설비

이 설비들은 외기온에 관계없이 언제라도 필요한 내외기의 조건을 형성하여 시험을 수행하기 위하여 설치한 것이다. 각 설비의 최대풍량은 1000CMH로서 공기냉각설비는 37℃의 공기를 +15℃로 강하시킬 수 있고, 공기가열설비는 -14℃의 공기를 37℃까지 상승시킬 수 있다. 각 설비의 구성 기기는 Table 2.와 같다.

Table 2. Components of the equipment

	Component	Remarks
Air Cooling Equipment	Cooling AHU	normal temp.type
	Pan type Humidifier	
	Condenser 10HP (5HP * 2대)	
	Condenser 15HP	
Air Heating Equipment	Heating AHU	control of flowrate, temp., and humidity
	Pan type Humidifier	
	Control Panel	control of flowrate, temp., and humidity

### 3.2 덕트설비

덕트설비는 덕트, 센서상자, 열교환기 성능시험장치, 트레이서 가스(CO<sub>2</sub>) 주입부위로 구성되어 있다. 풍량, 온도 및 습도는 공기냉각설비와 공기가열설비로 조절할 수 있으며 덕트설비는 열회수효율, 공기누설율, 공기마찰압력강하 등의 측정이 가능하도록 설계되었다.(Fig.1)

#### (1) 센서상자

센서상자는 Fig.1의 3으로서 냉풍 급기부 및 배기부, 온풍 급기부 및 배기부의 4개소에 설치되어 있는데 이 센서상자는 ASHRAE Standard 84-78(Method of Testing Air to Air Heat Exchangers), Canadian Standard C439 - M1985(Stan-

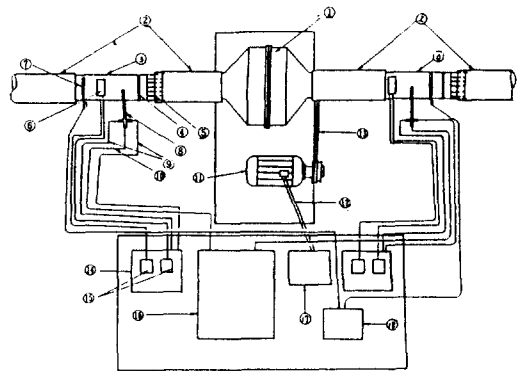


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

1. Heat Exchanger Performance Testing Equipment
2. Duct
3. Sensor Box
4. Settling Grid
5. Settling Lattice
6. Humidity Sensor
7. Tracer Gas Detection Tube
8. Pitot Tube
9. Connection Tube to Manometer
10. Thermocouple
11. D.C.Motor
12. D.C.Motor Controller Line
13. V Belt
14. Micromanometer with Scanning box
15. Humidity Indicator
16. Data Logger
17. D.C.Motor Controller
18. CO<sub>2</sub> Indicator

standard Method of Test for Rating the Performance of Heat Recovery Ventilators)를 참고하여 열교환기의 현열 및 잠열의 회수효율, 공기누설율, 압력강하 등 제반 성능의 측정이 가능하도록 설계하였으며, 이와 같은 열교환기의 성능측정에 필요한 센서들을 함께 설치하였으므로 센서상자로 명명하였다.

각 센서상자에는 풍량측정을 위하여 정류격자와 정류망을 설치하였고 정압, 동압, 공기의 온도측정을 위하여 열전대가 내장된 온도센서 겸용의 피토투브 5개, 습도측정을 위한 습도센서 1개, 트레이서가스(CO<sub>2</sub>) 농도측정을 위한 가스검출부 1개를 설치하였다.(Fig.2)

(2) 열교환기의 성능시험장치

열교환기의 성능시험장치는 Fig.1의 으로서 장치의 단면도는 Fig.3과 같다. 이 시험장치는 매트릭스의 두께와 회전수를 변화시킬 수 있는데 그 개요는 다음과 같다.

- ① 원통 케이스의 내경은 395mm, 소재고정판의 외경은 80mm로서 공기와 접촉이 되는

면은 급기, 배기 양측 공히 약 0.048m<sup>2</sup>이며 면풍속은 1~5m/sec의 범위에서 조절이 가능하다.

- ② 매트릭스의 두께는 10~180mm의 범위에서 변화가 가능하다.
- ③ 매트릭스의 회전은 0~900 RPM의 범위에서 조절할 수 있다.

(3) 트레이서 가스 주입부 및 검출부

열교환기에서의 공기누설율을 측정하기 위하여 덕트라인내에 일정량의 트레이서 가스를 주입하고 열교환기 통과하기 전후의 트레이서 가스 농도측정이 필요하다. Fig.1의 7이 트레이서 가스 검출부이다.

4. 열교환기 성능시험 및 분석

4.1 성능시험

열교환기의 성능은 열회수효율, 공기누설율, 압력강하 등을 측정하여 평가할 수 있다. 성능을 시험하기 위한 열교환기의 매트릭스는 다공질 폴리우레탄 폼 재질로서 10PPI, 25PPI, 30PPI, 38PPI의 조밀도가 다른 4가지 소재를 선정하였다.

각 매트릭스별로 두께에 따른 성능을 파악하기 위하여 매트릭스 두께를 변경시키며 성능시험을 수행하였는데 10PPI 매트릭스는 20~60mm를 10mm 간격으로 5종, 25PPI 매트릭스와 30PPI 매트릭스는 20~50mm를 10mm 간격으로 4종, 그리고 38PPI 매트릭스는 20mm와 30mm의 2종에 대하여 수행하였다. 38PPI 매트릭스는 매우 조밀하므로 40mm이상의 두께에 대하여 시험을 하면 압력강하가 매우 커서 배열회수 열교환기의 매트릭스로 적용하기가 어려울 것으로 판단하여 시험을 수행하지 않았다.

전면풍속에 따른 열교환기의 성능을 파악하기 위하여 매트릭스 조밀도별로 각 매트릭스 두께에 대하여 전면풍속을 1.5m/sec, 2.3m/sec, 3.4m/sec, 4.5m/sec의 4종으로 변경시면서 열교환기의 성능시험을 수행하였다.

열교환기의 전열(total heat)회수효율은 매트릭스의 회전수에 따라서 크게 달라지므로 회전

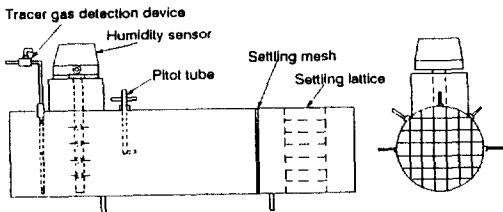


Fig.2 Schematic diagram of sensor box

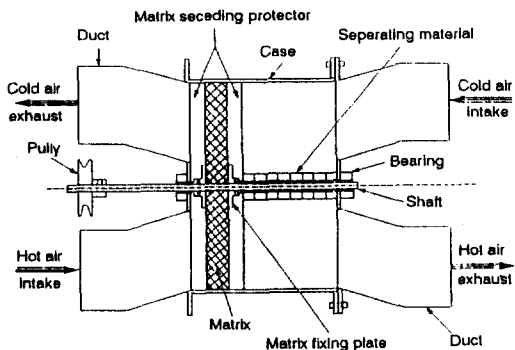


Fig.3 Schematic view of heat exchanger performance testing apparatus

수에 따른 성능을 파악하기 위하여 매트릭스 조밀도별, 각 매트릭스 두께별, 각 전면풍속에 대하여 회전수를 0~700RPM까지 100RPM 간격으로 8종에 대해 성능시험을 하였다. 급배기의 온도는 급기측 0°C내외, 배기측 30°C내외의 조건으로 성능시험을 수행하였다.

풍량, 온도, 습도, 누기율의 측정방법은 다음과 같다. 풍량은 측정센서상자에 센싱위치를 정하여 삽입한 5개의 피토투브로부터의 동압을 마이크로 마노미터를 이용하여 측정된 5개의 값의 평균치를 이용하였다.

온도는 열전대가 냉장된 피토투브로부터의 출력을 Data Logger를 이용하여 측정된 5개 값의 평균치를 사용하였으며 습도는 각 측정센서상자에 1개씩 설치된 습도센서로부터의 신호를 인디케이터로 받아서 측정하였다.

누기율은 CO<sub>2</sub>가스를 레귤레이터를 이용하여 일정압력으로 조정하여 주입한 후 급기의 입구측 농도 및 출구측 농도, 배기의 입구측 농도를 측정하여 비교함으로써 누기율을 계산할 수 있다.

압력강하는 4개의 경사압력계와 피토투브를 사용하여 측정하였는데 각각의 압력계는 저온공기입구와 출구간의 압력차, 고온공기 입구와 출구간의 압력차, 저온공기 입구와 고온공기 출구간의 압력차, 고온공기 입구와 저온공기 출구간의 압력차를 측정하였다.

4.2 시험결과 및 분석

열회수효율은 겉보기효율과 실제효율로 나타낼 수 있다. 겉보기효율은 측정된 온습도자료를 직접 이용하여 계산한 값이고 실제효율은 급배기덕트간의 누설율을 고려하여 계산한 값으로서 후자가 열교환기 개발에 실제로 적용되는 중요한 값이다.

전열회수효율의 계산에 필요한 요소는 식 (1)에 나타난 바와 같이 3개 측정부위의 온습도(엔탈피) 및 풍량이 필요하다.

$$\epsilon = \frac{C_c(h_{co} - h_{ci})}{C_{min}(h_{hi} - h_{ci})} \dots\dots\dots (1)$$

식 (1)은 급기와 배기간의 혼합(누설)이 전혀 없는 경우에 적용할 수 있는 식이고, 누설이 발생하는 경우에는 누설율을 측정하여 실제 전열회수효율의 계산이 적용하여야 한다. 본 성능시험에서 측정된 온습도는 누설공기가 영향을 미쳐서 형성한 값이므로 실제 전열회수효율을 계산하기 위해서는 식 (2)에 따라 누설율을 계산하여 누설공기가 미친 영향을 제거한 후 수행하여야 한다. 누설율은 seal의 틈새를 통한 누기와 매트릭스의 회전에 의해 발생하는 이행(carry-over)을 합한 값이다.

$$L = \frac{CO_{co} - CO_{ci}}{CO_{hi} - CO_{ci}} \dots\dots\dots (2)$$

저온공기 출구 측의 엔탈피인 h<sub>co</sub>는 식 (3)과 같이 형성된 것이므로 실제 전열회수효율은 식 (4)와 같다.

$$h_{co} = (1 - L)h'_{co} + L \cdot h_{hi} \dots\dots\dots (3)$$

여기에서 h'<sub>co</sub>는 h<sub>co</sub>에서 누설공기의 영향을 제한 값이다.

$$\epsilon = \frac{C_c \left( \frac{h_{co} - L \cdot h_{hi}}{1 - L} - h_{ci} \right)}{C_{min}(h_{hi} - h_{ci})} \dots\dots\dots (4)$$

(1) 겉보기효율

열교환기의 효율은 매트릭스의 두께 및 조밀도, 전면풍속, 로터회전수 등이 변경됨에 따라 달라진다.

우선 매트릭스 두께가 변경됨에 따른 겉보기효율의 변화를 알아보기 위하여 매트릭스 조밀도 25PPI, 전면풍속 2.3m/sec로 하여 두께변경에 따른 겉보기효율을 나타내면 Fig.4와 같다. 이 그림을 보면 매트릭스 회전수가 0RPM에서 100 RPM으로 바뀔 때 따라 겉보기효율이 급속히 증가하고 100RPM 이후에는 서서히 증가하고 있으며 매트릭스가 두꺼워질수록 겉보기효율이 더 증가한다는 것을 볼 수 있다.

전면풍속이 변경됨에 따른 걸보기효율의 변화를 알아보기 위하여 매트릭스의 조밀도 25PPI, 매트릭스 두께 50mm로 하여 전면풍속의 변경에 따른 걸보기효율을 나타내면 Fig.5와 같다. 이 그림에서도 매트릭스 회전수 100RPM까지는 걸보기효율이 급속히 증가하고 100RPM 이후에는 서서히 증가함을 볼 수 있으며, 또한 전면풍속이 느릴수록 걸보기효율이 더 증가한다는 것을 알 수 있다.

매트릭스 조밀도에 따른 걸보기효율의 변화를 알아보기 위하여 매트릭스 두께 50mm, 전면풍속

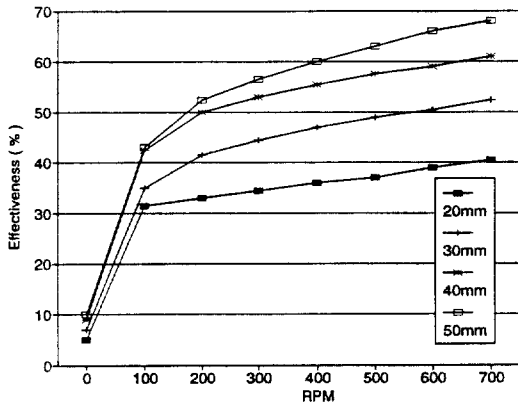


Fig.4 Variation of virtual effectiveness with respect to the thickness of matrix(25 PPI, frontal air velocity 2.3m/sec)

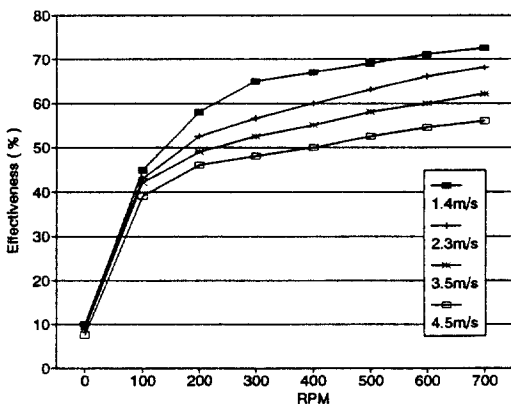


Fig.5 Variation of virtual effectiveness with respect to frontal air velocity(25PPI, matrix thickness 50mm)

2.3m/sec로 하고 매트릭스의 조밀도 변경에 따른 걸보기효율을 나타내면 Fig.6과 같다. 이 그림을 보면 매트릭스 조밀도가 높을수록 걸보기효율이 증가한다는 것을 알 수 있다.

이상에서 검토한 바와같이 다공질 폴리우레탄 폼 매트릭스의 걸보기효율은 매트릭스가 두꺼울수록, 전면풍속이 느릴수록, 그리고 매트릭스 조밀도가 높을수록 증가한다는 것을 알 수 있다.

## (2) 누설율

여기에서 누설율은 급배기간의 압력차이로 인하여 로터의 틈새로 빠져나간 공기(leakage air)와 로터가 회전하면서 미처 빠져나가지 못한 공기가 상대편 유로로 들어오는 이행(carry-over) 공기량을 함께 측정된 값이다. 누설율도 매트릭스의 두께 및 조밀도, 회전수, 전면풍속이 변경되면 달라지게 된다.

우선, 전면풍속에 따른 누설율의 변화를 알아보기 위하여 매트릭스의 조밀도를 25PPI로 고정하고 매트릭스 두께별로 전면풍속에 따른 누설율의 변화를 나타내면 Fig.7과 같다. 이 그림을 보면 매트릭스 회전수가 증가함에 따라 누설율도 증가하고 있으며 전면풍속이 낮은 경우가 높은 경우보다 누설율이 큰 것을 알 수 있다. 이 그림은 매트릭스 두께 50mm의 경우를 나타낸 것인데 최대치는 전면풍속 1.4m/sec, 로터회전수 700RPM에서 약 73%를 나타내고 있다.

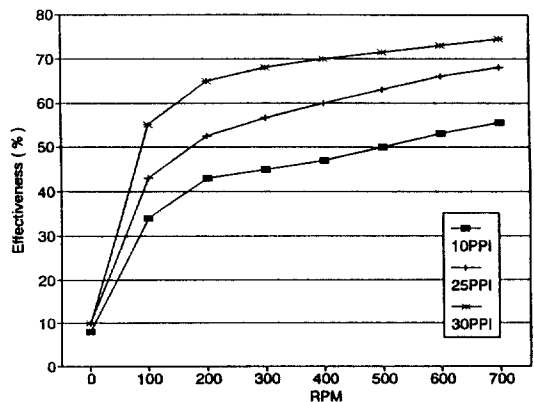


Fig.6 Variation of virtual effectiveness with respect to matrix density(matrix thickness 50mm, frontal air velocity 2.3m/sec)

매트릭스 두께에 따른 누설율의 변화를 알아보기 위하여 전면풍속을 2.3m/sec로 고정하고 매트릭스 두께에 따른 누설율의 변화를 나타내면 Fig.8과 같다. 이 그림은 매트릭스 회전수 1000 RPM 이하에서는 모든 매트릭스 두께에서 10% 이하의 낮은 누설율을 보이고 있으며 매트릭스 회전수가 증가할수록 누설율이 크게 증가한다. 그리고 매트릭스 두께가 증가할수록 누설율은 높은 값을 보이고 있는데 최고치는 매트릭스 두께 50mm, 회전수 700RPM에서 약 52%를 보이고 있다.

매트릭스 조밀도에 따른 누설율의 변화를 알아보기 위하여 매트릭스 두께를 고정하고 전면 풍속 2.3m/sec인 경우를 나타내면 Fig.9와 같다. 이 그림을 보면 매트릭스 회전수가 낮은 경우 (0~200RPM)에서는 누설율이 크게 변하지 않지만 그이상의 회전수에서는 급격히 증가함을 알 수 있다. 그러나 매트릭스 조밀도에 따른 누설율의 대소는 거의 구별하기 어려울 정도로 유사한 값을 보이고 있다. 그 이유는 누설율이 급배기간의 압력차와 매트릭스의 유공율(porosity)에 따라 달라지는데, 급배기간의 압력차는 매트릭스의 조밀도에 따라 차이가 거의 없으며 유공율도 Table 1에서 보는 바와 같이 조밀도에 따른 차이가 거의 없기 때문인 것으로 판단된다. 이상으로 누설율에 대해 분석한 결과 매트릭

스 회전수가 높을수록, 매트릭스가 두꺼울수록 누설율은 증가되지만 매트릭스 조밀도와 누설율은 상관이 없다는 것을 알 수 있다.

(3) 실제 열회수효율

겉보기효율로부터 누설공기의 영향을 제거한 것이 실제 열회수효율이다. 매트릭스 회전수에 따른 실제 열회수효율은 어떠한 RPM에서 최대치를 나타낸 후 다시 감소하는 경향을 나타내고 있다.

실제 열회수효율을 매트릭스 회전수에 따라 나타내면 몇가지 공통점이 있는데 그중의 하나

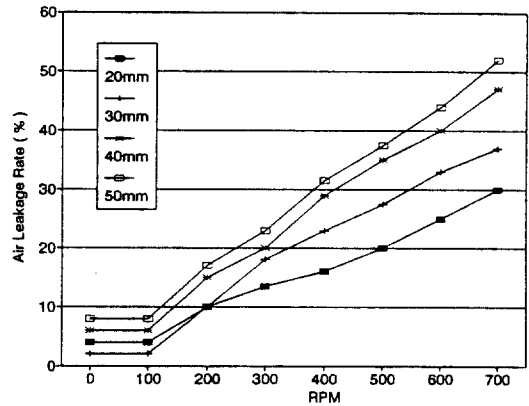


Fig.8 Variation of air leakage rate with respect to matrix thickness(25PPI, frontal air velocity 2.3m/sec)

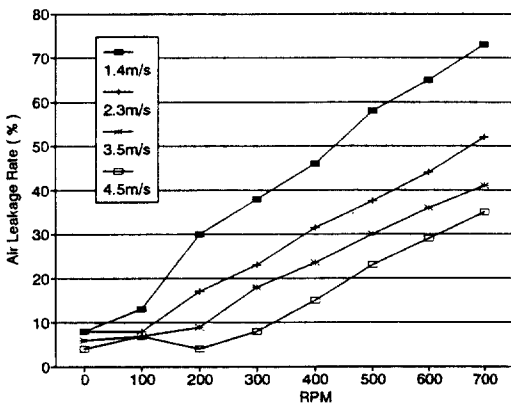


Fig.7 Variation of air leakage rate with respect to frontal air velocity(25PPI, matrix thickness 50mm)

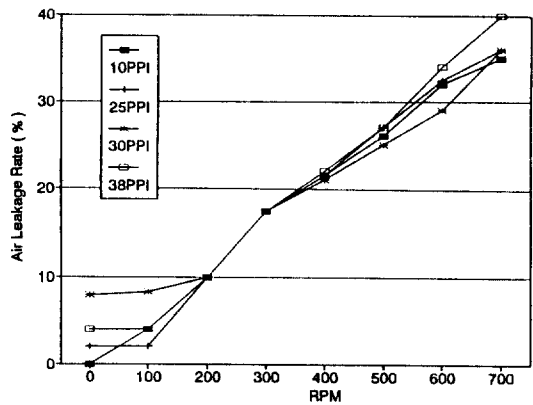


Fig.9 Variation of air leakage rate with respect to matrix density(matrix thickness 30 mm, frontal air velocity 2.3m/sec)

가 ORPM으로부터 1000RPM까지는 효율이 급격히 증가하고 그 이후에는 서서히 증가하여 최고치를 나타내고 그보다 더 큰 회전수에서는 효율이 하강하는데 매트릭스 두께가 두꺼운 것일수록 더 급격히 하강하고 있다. 그 이유는 실제 열회수효율의 최고치를 나타낼 때의 회전수까지는 겉보기효율의 증가폭은 큰 반면에 누설율은 작은 편이지만, 그보다 큰 회전수에서는 겉보기효율은 서서히 증가하는 반면에 누설율은 크게 증가하는데 누설율의 증가폭이 매트릭스가 두꺼울수록 더 크게 증가하기 때문이다.

매트릭스 두께가 변경됨에 따른 실제 열회수효율의 변화를 알아보기 위하여 매트릭스 조밀도를 25PPI로 하고 전면풍속 2.3m/sec에서의 실제 열회수효율의 변화를 나타내면 Fig.10과 같다. 이 그림을 보면 매트릭스가 두꺼울수록 실제 열회수효율의 최고치가 더 높게 나타나고 있으며 또한 효율의 최고치를 가리키는 매트릭스 회전수는 더 큰 것으로 나타났다. 실제로 최고치를 나타내는 매트릭스 회전수는 50mm의 경우 300RPM, 40mm의 경우 300RPM, 30mm의 경우 200RPM, 20mm의 경우 100RPM으로 나타났다.

전면풍속이 달라짐에 따른 실제 열회수율의 변화를 알아보기 위하여 매트릭스 두께를 50mm로 하고 25PPI와 30PPI의 매트릭스에 대해 나타내면 각각 Fig.11, Fig.12와 같다. Fig.11을 보면 최고효율은 모든 전면풍속에 대해서 300RPM의 회전수에서 나타나고 있으며 또한 전면풍속에 관계없이 유사한 값을 보이고 있다. Fig.12를 보면 최고효율은 측정된 전면풍속 중에서 가장 낮은 2.3m/sec, 로터 회전수 300RPM에서 약 57%를 가리키고 있으며 로터 회전수가 증가됨에 따라 효율이 급격히 저하되고 있다. 상기의 두 그림을 보면 매트릭스가 조밀하지 않은 경우는 전면풍속별 최고효율이 유사하지만 매트릭스가 조밀한 경우는 낮은 전면풍속에서 최고효율을 나타내는 것을 알 수 있다.

매트릭스 조밀도에 따른 실제 열회수효율의 변화를 알아보기 위하여 전면풍속을 2.3m/sec로 하고 매트릭스 두께 30mm, 40mm, 50mm의 실제

열회수효율을 나타내면 각각 Fig.13, Fig.14, Fig.15와 같다. 이 그림들을 보면 매트릭스가 조밀할수록 실제 열회수효율의 최고치가 더 높게 나타나고 있으며 또한 효율의 최고치를 가리키는 매트릭스 회전수는 더 큰 것으로 나타났다. 실제로 최고치를 나타내는 매트릭스 회전수는 매트릭스 두께 30mm인 경우인 Fig.13을 보면 최고효율은 38PPI 매트릭스, 회전수 300RPM에서 약 57%를 나타내고 있으며, 다음에는 30PPI 매트릭스로서 300RPM에서 48%, 25PPI 매트릭스는 200RPM에서 34%, 10PPI 매트릭스는 200RPM에서 24%의 순으로 나타났다. Fig.14와 Fig.15에서 38PPI 매트릭스의 효율선이 빠진 이유는 38PPI 매트릭스는 너무 조밀하여 전면풍속이 빠른 경우에는 풍압에 의해서 매트릭스가 뒤로 밀려서 성능시험에 제대로 수행되지 못하였기 때문이다. Fig.14에서의 최고효율은 30PPI 매트릭스, 회전수 300RPM에서 약 54%를 나타내고 있으며 Fig.15에서의 최고효율은 30PPI 매트릭스, 회전수 300RPM에서 약 58%를 나타내고 있다.

이상으로 매트릭스 두께, 전면풍속, 그리고 조밀도가 변경됨에 따른 실제 열회수효율의 변화에 대해 검토하였는데 그 결과는 다음과 같다.

- ① 로터회전수가 0RPM에서 100RPM까지는 효율이 급격히 증가하고 100RPM 이후에는 서서히 증가하여 최고치를 나타내며 그 이후에는 다시 하강하는데 매트릭스가 두꺼울수록 더 급격히 하강한다.
  - ② 매트릭스가 두꺼울수록, 조밀도가 높을수록, 그리고 전면풍속이 높을수록 최고효율을 나타내는 회전수는 더 크다.
  - ③ 매트릭스가 두꺼울수록 최고효율이 더 높다.
  - ④ 전면풍속에 따른 효율은 매트릭스 조밀도가 높은 경우는 낮은 전면풍속에서 최고효율을 나타내지만 조밀도가 낮은 경우는 전면풍속별 최고효율이 유사한 값이다.
  - ⑤ 매트릭스 조밀도가 높을수록 최고효율이 더 높다.
- (4) 압력강하



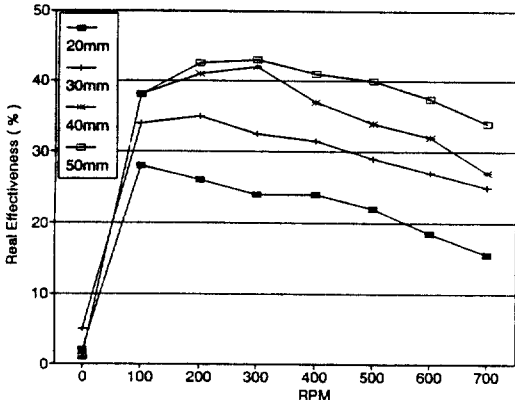


Fig.10 Variation of real effectiveness with respect to matrix thickness(25PPI, frontal air velocity 2.3m/sec)

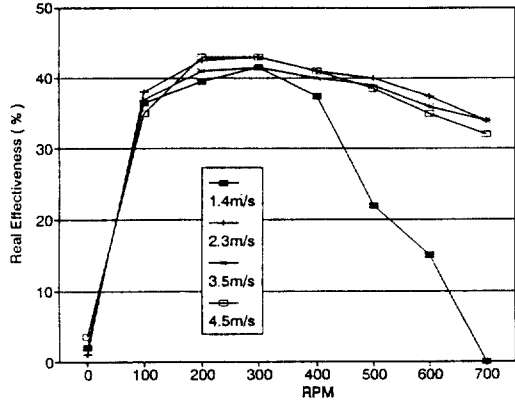


Fig.11 Variation of real effectiveness with respect to frontal air velocity(25PPI, matrix thickness 50mm)

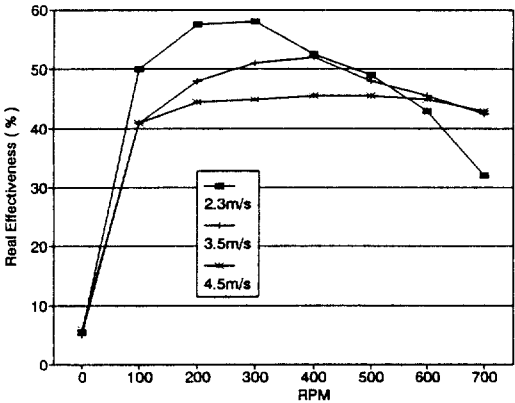


Fig.12 Variation of real effectiveness with respect to frontal air velocity(30PPI, matrix thickness 50mm)

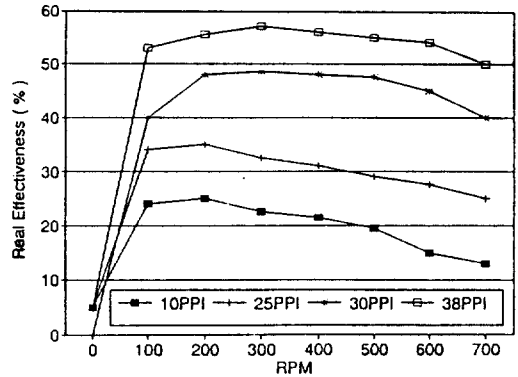


Fig.13 Variation of real effectiveness with respect to matrix density (frontal air velocity 2.3m/sec, matrix thickness 30 mm)

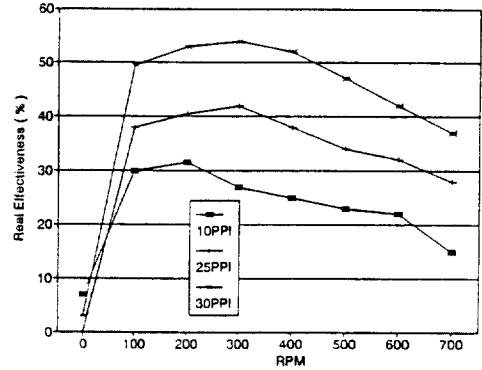


Fig.14 Variation of real effectiveness with respect to matrix density (frontal air velocity 2.3m/sec, matrix thickness 40 mm)

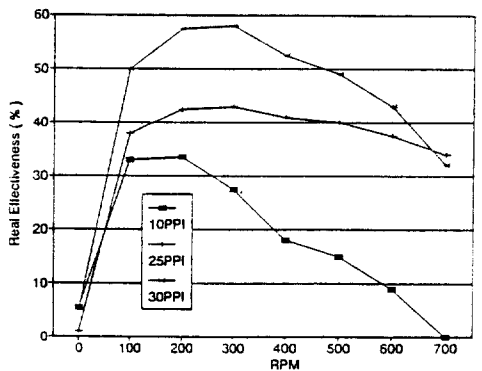


Fig.15 Variation of real effectiveness with respect to matrix density (frontal air velocity 2.3m/sec, matrix thickness 50 mm)

열교환기에서의 압력강하는 송풍기의 소비동력과 밀접한 관계가 있으므로 세심히 관찰하여야 할 항목이다.

전면풍속에 따른 압력강하의 변화를 알아보기 위하여 매트릭스를 25PPI로 고정하고 매트릭스 두께 50mm 경위의 전면풍속에 따른 압력강하의 변화를 나타내면 Fig.16과 같다. 이 그림을 보면 매트릭스 회전수가 증가하면 압력강하는 서서히 증가하지만 전면풍속이 증가하면 압력강하가 큰 폭으로 증가하는 것으로 나타내고 있다. 즉 전면풍속 1m/sec의 증가에 따라 약 20mmAq의 압력손실이 증가한다.

매트릭스 두께에 따른 압력강하의 변화를 알아보기 위하여 전면풍속을 2.3m/sec로 고정하고 25PPI와 30PPI 매트릭스에 대해 매트릭스 두께에 따른 압력강하의 변화를 나타내면 각각 Fig. 17, Fig.18과 같다. 이 그림들을 보면 매트릭스 회전수가 증가함에 따라 그리고 매트릭스가 두꺼울수록 압력강하가 증가하는 것을 나타내고 있다. 그러나 매트릭스 두께 10mm당의 압력강하 차이는 25PPI 매트릭스는 약 3mmAq 정도이고 30PPI 매트릭스는 약 3.5mmAq 정도를 나타내고 있으므로 Fig.16의 전면풍속 변화에 의한 압력강하 차이보다는 그 값이 매우 작음을 알 수 있다. 그리고 30PPI 매트릭스는 25PPI 매트릭스에 비하여 각 두께별로 약 2~3mmAq 정도의 압력강하가 증가하는 것을 나타내고 있다.

매트릭스 조밀도에 따른 압력강하의 변화를 알아보기 위하여 매트릭스 두께를 30mm로 고정하고 전면풍속 2.3m/sec인 경우의 매트릭스 조밀도에 따른 압력강하의 변화를 나타내면 Fig. 19와 같다. 매트릭스 회전수가 증가함에 따라 그리고 매트릭스 조밀도가 증가함에 따라 압력강하가 증가하는데 조밀도가 한단계씩 높아지면 압력강하가 3.5mmAq 정도 증가함을 알 수 있다.

이상으로 압력강하에 대해 검토한 결과 매트릭스 회전수가 증가할수록, 매트릭스가 두꺼울수록, 매트릭스 조밀도가 높을수록, 그리고 전면풍속이 높을수록 압력강하가 증가된다. 그중에서도 전면풍속의 변경에 다른 압력강하 차이가 가장 큰 것으로 나타났다.

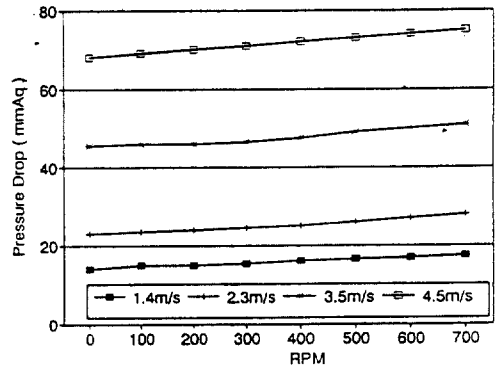


Fig.16 Variation of pressure drop with respect to frontal air velocity(25PPI, matrix thickness 50mm)

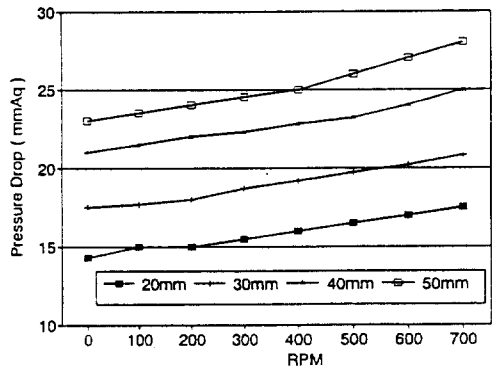


Fig.17 Variation of pressure drop with respect to matrix thickness(25PPI, frontal air velocity 2.3m/sec)

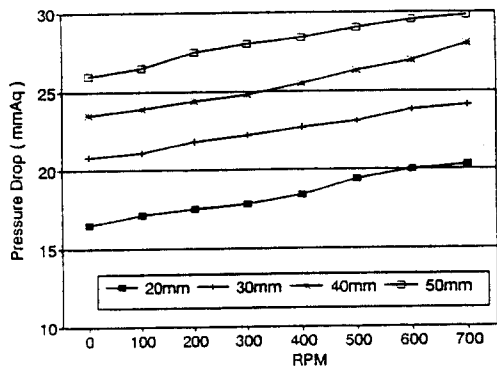


Fig.18 Variation of pressure drop with respect to matrix thickness(30PPI, frontal air velocity 2.3m/sec)

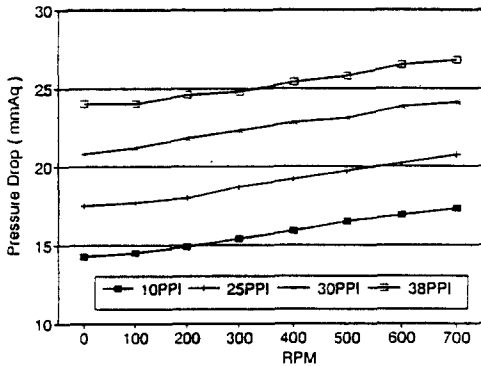


Fig. 19 Variation of pressure drop with respect to frontal air velocity(matrix thickness 30mm, frontal air velocity 2.3m/sec)

## 5. 결 론

이상에서 다공질 폴리우레탄 폼 매트릭스에 대한 걸보기효율, 누설율, 실제 열회수효율, 압력강하를 측정하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 걸보기효율은 매트릭스가 두꺼울수록, 전면풍속이 낮을수록, 매트릭스 조밀도가 높을수록, 그리고 매트릭스 회전수가 높을수록 증가한다.
- (2) 누설율은 매트릭스가 두꺼울수록, 전면풍속이 낮을수록, 매트릭스 회전수가 높을수록 증가하며 매트릭스 조밀도와는 관련이 없다.
- (3) 실제 열회수효율은 로터회전수 0RPM에서 100RPM까지는 급격히 증가하고 100RPM 이후에는 서서히 증가하여 최고치를 나타낸 후 다시 감소하는데 최고치는 대부분 회전수 200~300RPM에서 나타난다.
- (4) 실제 열회수효율의 최고치는 매트릭스가 두꺼울수록, 그리고 매트릭스 조밀도가

높을수록, 그리고 전면풍속이 낮을수록 증가한다.

- (5) 매트릭스가 두꺼울수록, 매트릭스 조밀도가 높을수록, 전면풍속이 높을수록 실제 열회수효율의 최고치를 나타내는 매트릭스 회전수가 더 높다.
- (6) 압력강하는 매트릭스가 두꺼울수록, 전면풍속이 높을수록, 매트릭스 조밀도가 높을수록, 그리고 로터회전수가 높을수록 더 크다. 그중에서도 전면풍속의 변경에 따른 압력강하 차이가 가장 크다.

그리고 실제 열회수효율과 압력강하의 관계를 비교해 보면 매트릭스 조밀도가 증가됨에 따라서 실제 열회수효율은 크게 증가하지만 압력강하는 약간씩 증가하는 경향을 보이고 있으므로 폴리우레탄 폼 매트릭스를 열교환기에 실제로 적용할 경우는 가능하다면 조밀도가 높은 매트릭스를 선정하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 박상동 외, 1989, "에너지절약형 공조설비시스템 개발연구(III)", 한국동력자원연구소
2. 박상동 외, 1990, "에너지절약형 공조설비시스템 개발연구(IV)", 한국동력자원연구소
3. 이대우, 1990, "흡기조건에 따른 공기조화용 회전열교환기의 성능에 관한 연구", 박사학위논문
4. W.M.Kays etc, 1984, Compact Heat Exchangers, McGraw-Hill, New York
5. ASHRAE Standard 84-78, "Method of Testing Air-to-Air Heat Exchangers".
6. Canadian Standard C439-M1985, "Standard Method of Rating the Performance of Heat Recovery Ventilators".