

전열교환기 성능향상 및 로타 국산화 개발에 관한 연구

A Study on Rotor Development for Air-to-Air Heat Exchanger

徐 石 淸*, 朴 盤 煜**
S. C. Seo, B. O. Park

요 약 문

전열교환기(全熱交換器)는 최근 대형건물 및 생산공장 등의 에너지 다소비 장소의 공기 조화 설비의 에너지 절감 기기로서 크게 각광 받고 있다. 그 중에서도 특히 알루미늄 박판에 실리카-겔 분말을 코팅한 허니컴형 로타는 현열 및 잠열 즉 전열(全熱)을 흡수할 수 있어 폐 에너지 회수용 전열교환기의 전열소자(傳熱素子)로서 점차 이용되고 있다.

그러나 국내에서는 현재까지 전열교환기의 핵심부품인 상기 로타를 전량 수입에 의존하여 왔다. 본 연구에서는 백련공업(株)와 공동출연으로 실리카-겔 분말 코팅된 알루미늄 소재 박판만 수입하여 성형공정 기술을 개선, 향상시켜 국산로타의 시제품을 제작하고 그 성능을 시험하여 수입로타와 비교, 평가하였다.

연구결과 국산개발 알루미늄 로타 시제품의 전열효율이 수입로타보다 급배기 조건에 따라 1~5%정도 향상되었다. 또한 알루미늄 로타의 최적운전조건(11~13 r. p. m) 및 급배기 공기량비에 대한 적정조건도 연구결과로 얻어졌다.

1. 서 론

1973년 세계적인 석유파동 이후 에너지 비용이 급증하여 대형건물, 에너지 다소비 생산공장 등에서 냉난방 및 환기시스템의 운전비용의 절감에 대한 노력을 기울이기 시작하였다. 이에 따라 에너지 다소비 공장 및 대형빌딩 등의 폐 에너지 이용방안의 하나로서 냉난방시스템 중에 회전식 공기전열교환기(Rotary Air to Air Heat Exchanger)를 설치하여 좋은 결과를 얻었으며,¹⁾ 선진 외국에서는 전열교환기

가 대형빌딩, 생산공장 외에 일반주택에까지 보급되어 에너지절감에 커다란 효과를 거두고 있는 실정이다.²⁾

우리나라에서도 에너지의 효율적 이용이라는 국가적 시책에 부응하여 에너지 다소비 공장의 공조설비에 고성능 전열교환기의 활용이 급격히 증가하기 시작하였다.

특히, 소형 건물의 개별식 냉난방에도 에너지 절약방안으로 활용되기 시작하여 서울특별시의 조례로 2,000㎡이상의 건물은 에너지 절약형 사용을 강제 규정하고 있는 실정이며, 일

* 정회원, 연구책임자, 책임연구원, KIMM

** 선임연구원/ KIMM

본에서는 집객업소 및 아파트 거실의 환기용(고정식)에도 많이 이용되고 있는 실정이다.

따라서 고성능 전열교환기의 개발은 세계적인 추세이며 우리의 시급한 과제로 등장하게 되었다.

본 연구에서는 고성능 전열교환기의 전열소자 즉, 현열과 잠열을 동시에 회수할 수 있는 핵심부품인 Rotor의 국산화개발을 위해 일차적으로 Rotor의 소재(실리카-겔 분말 코팅 알루미늄 박판)만을 수입하여 고성능의 Honey comb형 Rotor의 성형기술을 개발, 완성하였으며, 계속해서 완전국산화를 위한 실리카-겔 분말 코팅기술개발도 연구중에 있다.

2. 연구개요

2.1 실리카-겔 분말의 특성

개발 로타에 사용된 실리카-겔은 SiO_2 가 주성분인 유리상의 다공성 물질로서 수용성, 부식성, 조해성은 없으며 고습도에 있어서 흡수력이 특히 우수하여 90%RH에서 약 75% 이상의 흡수력이 있다.^{12), 13), 19)}

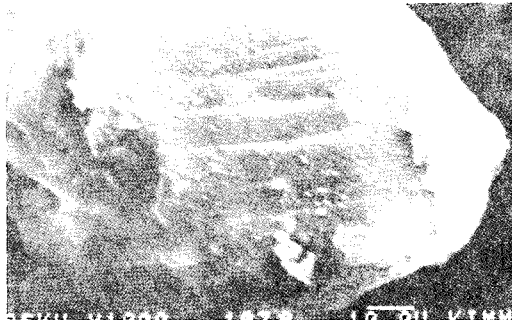


사진 1 실리카-겔 분말 확대 모습 (SEM, $\times 1000$ 확대사진)
(가운데 큰 구멍을 관찰할 수 있다)

또 사진 1 및 사진 2에서 볼 수 있듯이 미크론 단위의 큰 세공(細孔)용적을 갖고 있어 보다 큰 전열면적을 얻을 수 있으며 무미, 무취, 무해한 건조제로서 가열·재생에 따라 오랜기간 반복 사용이 가능하며, 화학적으로 아주 안정하고 강산, 강알칼리를 제외하고는 침해되지 않아 다변화하는 에너지 다소비 장소

의 공기조화설비의 전열교환기 로타(전열소자) 재질로서 그 가치가 뛰어나다.

그러나 사진 3에서 보는바와 같이 잘못 실리카-겔이 코팅된 것을 수입할 경우는 소기의 목적을 이룰 수가 없음을 유의해야 할 것이다.



사진 2 Al 판에 코팅한 실리카-겔 (SEM, $\times 1000$ 확대사진)
(코팅된 실리카-겔에 구멍이 뚫려 있다)

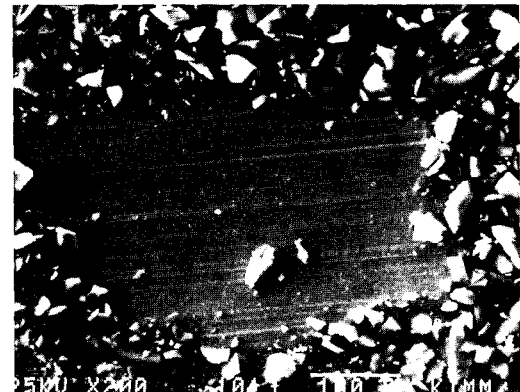


사진 3 Al 판에 불량으로 코팅된 실리카-겔 (SEM, $\times 200$ 확대사진)
(가운데는 실리카-겔이 코팅되어 있지 않음)

2.2 성형기술개발

알루미늄 로타의 성형은 실리카-겔 분말이 코팅되어 있는 수입된 알루미늄 박판을 원소재로 하여 그림 1 및 그림 2의 공정에 의하여 이루어졌다.

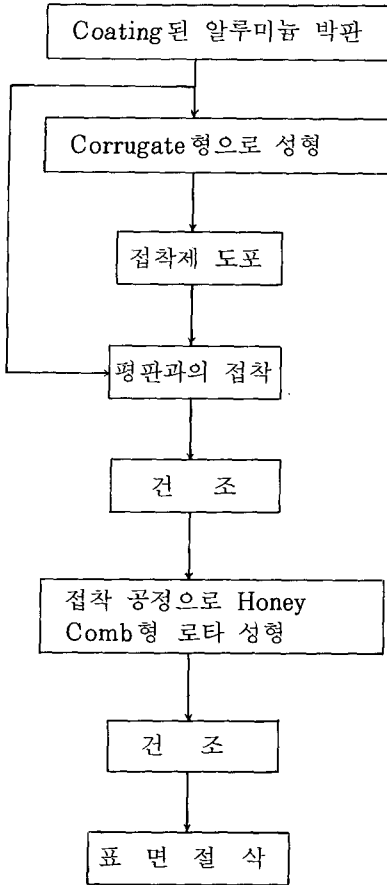


그림 1 Rotor 성형 공정 개략도

성형공정을 간단히 기술하면 실리카-겔 분말이 코팅된 두장의 알루미늄 박판이 각각 ① 및 ⑦ Roll에서 나와 한 장은 ④ 및 ⑤의 성형기어의 압착력에 의해 기어 치형과 유사한 파형으로 성형되고 파형의 꼭지점에 ⑥의 접착제 롤라에 의하여 접착제가 발라진다. 다른 한장은 평판상태로 위의 파형 박판과 ⑨롤라에서 접착되어 ⑬의 건조등과 ⑪의 열판을 거치는 동안 건조되어 저장된다. 위와 같이 성형된 파형판을 감으면서 접착시켜 건조 및 표면절삭 과정을 거쳐 완전한 로타를 제작한다. 사진 4에 완성된 로타의 모형(시제품은 1,100 mm φ임)을 볼 수 있다. 또한 금속현미경으로 확대해본 국산로타의 Honey comb 형상과 수입품과의 형상 비교표를 각각 그림 3, 표 1에서 살펴보면,

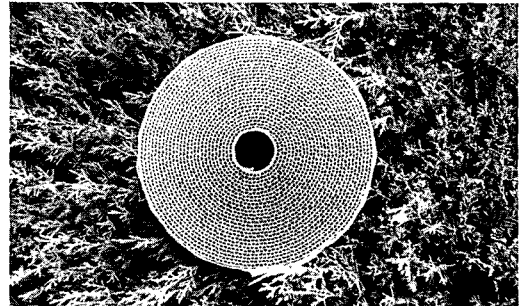
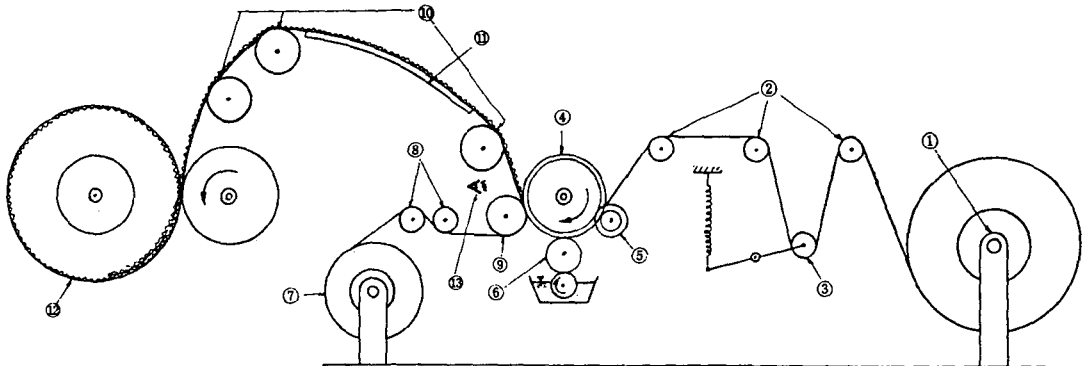


사진 4 Honey comb형 로타의 형상(모형)



- | | |
|--------------------|---------------|
| ① ⑦ ⑫ : 저장 롤 | ② ⑧ ⑩ : 안내 롤라 |
| ③ : tension roller | ④ ⑤ : 성형기어 |
| ⑥ : 접착제 롤라 | ⑨ : 접착 롤라 |
| ⑪ : 열 판 | ⑬ : 건조등 |

그림 2 로타 파형 성형공정의 개략도

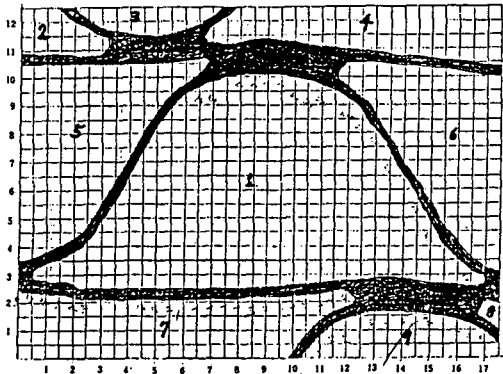
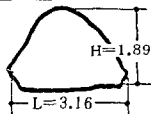
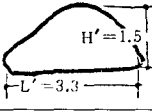


그림 3 국산로타의 Honey Comb 형상 (금속 현미경으로 X50 확대)

표 1 Honey Comb 형상 비교표

	형 상 (mm)	유효단면적 (mm ²)	단면적비 (%)	Perimeter 2) (mm)
국 산		3.67907	85.24104	8.16633
수 입제품		3.04254	84.23797	8.01847

- 주) 1) 단면적비(%) = $\frac{\text{공기통과유효면적}}{\text{전체면적} [8.75 \text{ mm}^2 (3.5 \times 2.5)]} \times 100$
- 2) Perimeter : 유효면적에서 공기접촉이 가능한 외주길이

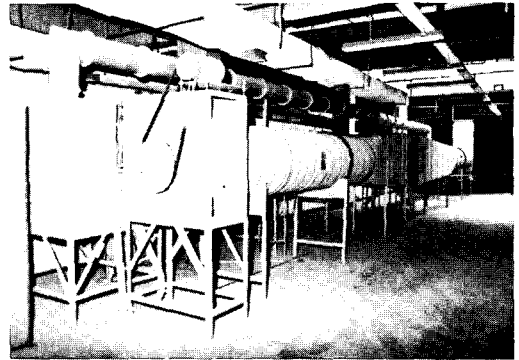


사진 5 성능시험장치 전경

2.3 로타 성능시험장치 개발

개발한 로타의 성능을 확인할 수 있도록 ASHRAE Standard 84-78 “Method of Testing Air to Air Heat Exchanger(1978)”에 준하여 성능시험장치⁸⁾를 사진 5 및 그림 4와 같이 제작하였다.

가) 로타에의 급배기장치

급기에는 가열 및 냉각코일과 가습장치를 배기에는 가열장치를 부착하여 요구되는 온습도 조건을 인위적으로 부여한다.¹⁵⁾

배기의 급기로의 누출을 줄이기 위하여 흡입 팬과 토출 팬은 각각 그림 4의 station 2와 4에 설치하였다.⁹⁾ 급배기 공기 중량비는 Station 3 직전에서 토출 팬으로 직접 나갈

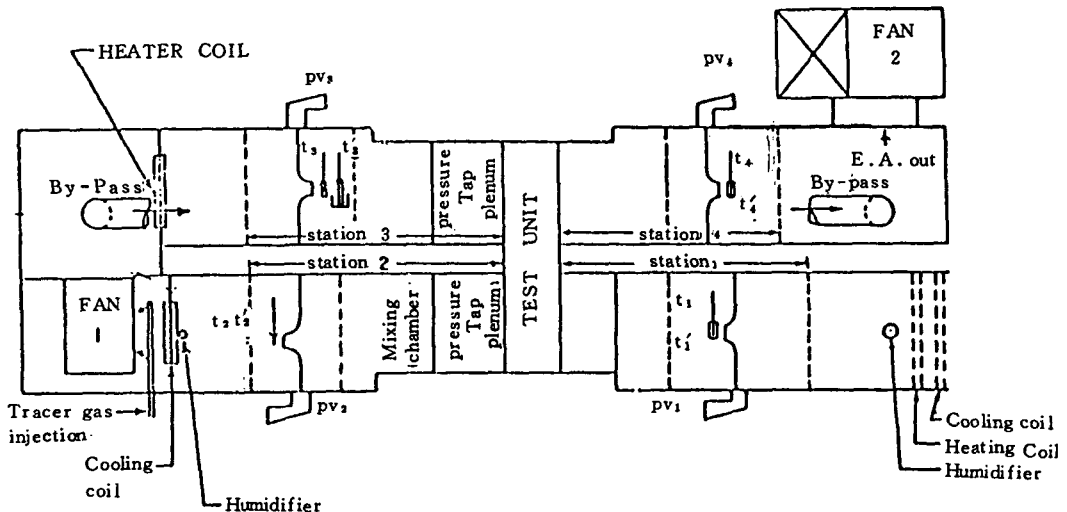


그림 4 전열교환기 성능시험장치 개략도

수 있는 바이패스덕트를 설치하여 댐퍼로서 조정한다.

급기의 유량도 인입단에 댐퍼를 설치하여 조정할 수 있게 하였다.

또한 인입 및 토출 덕트의 단면과 로타의 공기 입출단면의 크기와 모양이 다르므로 급격한 유로변화를 피하고 균일한 공기 흐름을 갖도록 적절한 경사를 주었다.¹⁴⁾

가열코일과 가습장치는 급배기 공기 중량비의 변화에 대응할 수 있도록 최대용량의 1/6 단계씩 가감할 수 있도록 하였다.

나) 풍량측정장치

급배기 공기 유량은 노즐을 이용한 측정법을 사용하였다.^{8), 15)} 노즐은 공기 접촉면에 저항이 가장 적고 적절한 유로를 형성할 수 있도록 제작하였다.¹⁷⁾ 풍량 계산에 필요한 노즐 전후의 정압차는 노즐 전후에 정압공을 설치, 경사 마노메타(Inclined Manometer)로서 측정할 수 있도록 PVC 튜브로 연결하였다.

또한 덕트내의 평균 정압이 측정될 수 있도록 90° 간격으로 4개의 탭을 설치하여 함께 연결하였다.⁸⁾ 또 노즐 전후에는 screen diffuser를 설치¹⁶⁾ 공기의 흐름을 고르게 하였다.

다) 건습구온도 측정장치

각 station의 건습구온도의 측정은 CC열전대를 연결하고 Data Logger (사진 6 참조)에 의하여 일정시간 간격마다 자동적으로 기록하였다.¹⁸⁾

2.4 로타의 성능해석^{8), 9)}

단일 노즐에 의한 공기 유량은 다음 식과 같이 계산된다.

$$Q_n = 1.5623 CA(P_0 \cdot V_n')^{0.5} \dots\dots\dots (1)$$

$$V_n' = \frac{V_n}{1+W_n} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, Q_n = 노즐에서 측정된 유량(m^3/s)

C = 노즐방출계수(노즐 목 직경이 120mm 이상이면 0.99)

A = 노즐 목 단면적(여기서는 $0.0471 m^2$)

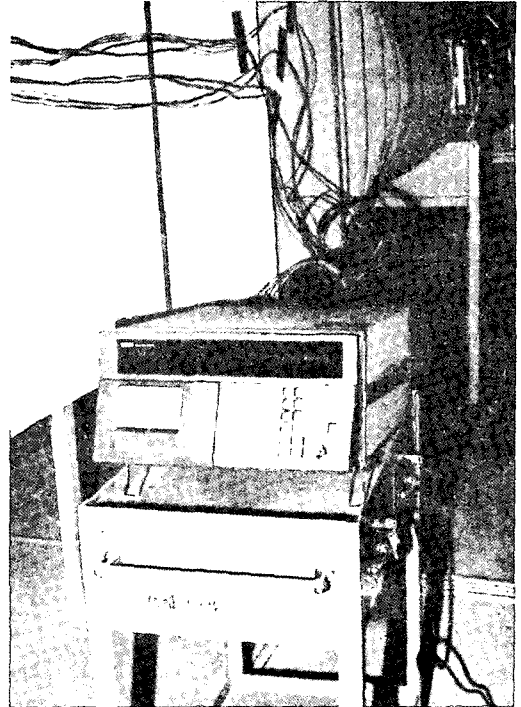


사진 6 Data Logger에 의한 건습구 온도 기록 모습

P_0 = 노즐 목에서의 동압 또는 노즐 양단의 정압차(P_a)

V_n' = 노즐에서의 공기 비체적(m^3/kg , 공기, 수증기의 혼합)

V_n = 노즐에서의 건공기 비체적(m^3/kg , 건조공기)

W_n = 노즐에서의 공기의 습도비(kg 물/ kg 건조공기)

위에서 구한 Q_n 으로부터 표준공기유량을 계산한다.

$$Q_s = \frac{Q_n}{1.21 V_n'} (m^3/s) \dots\dots\dots (3)$$

여기서 표준공기는 온도 21.1°C, 기압이 101 kpa 인때 공기밀도가 $1.201 kg/m^3$ 인 상태의 공기를 말한다.

각 station에서의 풍량이 측정, 계산되면 전 열교환기의 효율은 다음과 같이 계산된다.

$$\text{즉, } \epsilon = \frac{\text{총 전열된 열량}}{\text{전열 가능한 총열량}} \times 100(\%)$$

$$= \frac{W_s}{W_{min}} \cdot \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_1} \times 100 \dots\dots (4)$$

$$= \frac{W_e}{W_{min}} \cdot \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_1} \times 100 \dots\dots (5)$$

여기서, ϵ = 전열교환 효율(%)
 h = 각 station 에서의 전엔탈피 (J/kg)

W_s = 급기공기의 질량유량(kg/h, station 2에서의 질량유량)

W_e = 배기공기의 질량유량(kg/h, station 3에서의 질량유량)

W_{min} = W_s 또는 W_e 중 최소치

전엔탈피는 다음과 같이 계산한다.

$$h = 3.388 + 0.186t + 0.43W_n \cdot hg \dots\dots (6)$$

여기서 $hg = 1075.4 + 0.81t$

t = 건구온도(°C)

모든 온도에 대해서 hg 는 Psychrometric chart에서 얻어질 수 있다.¹⁰⁾

2.5 시제품의 성능실험

본 실험에서 가장 주안점을 둔 것은 국산개회로타의 전열교환효율이다. 전열교환효율 시험은 최대정격유량 및 75%유량에서 급배기 중량비를 1.0에서 2.0까지 0.25씩 증가시키면서 시행하였다.⁹⁾

급배기 중량비는 바이패스 탭퍼를 이용하여 정하였다. 시험시 설정유량 및 측정유량을 2와 같다.

로타의 전열교환효율은 로타의 회전수에 따라서도 변하므로 상기 시험에 앞서 일정한 급기 조건에서 로타의 회전수만 변화시키면서 열교환효율을 측정하였다.

그런데 급배기 공기 중량비가 1.0이 아닌 경우에는 정압차에 의하여 로타의 purge seal를 통한 leakage가 일어난다.⁹⁾ 그림 5는 기측의 정압이 배기측보다 낮은 상태의 전역인 leakage 현상을 나타낸 것이다. 이러 배기의 급기쪽으로의 leakage는 효율계산 직접 영향을 미치므로 그 량을 고려하여야 한다. Fisher¹¹⁾ 등의 실험에 의하면 Rand-

only packed rotor의 정압차에 따른 leakage 변화는 그림 6과 같다.

그림 7과 그림 8에 상기 성능실험의 결과와 기존 사용되었던 아스베스토스 로타 및 일본에서 수입한 완제품 알루미늄 로타⁶⁾에 대한 시험결과를 함께 나타내 쉽게 비교할 수 있게 하였다.

표 2 급배기 공기 중량비

Item 유 량	급기공기 유 량 kg/hr	배기공기 유 량 kg/hr	Setting W_{max}/W_{min}	Actual W_{max}/W_{min}
	정격 유량 (6,000 kg/hr)	4970	5030	1.0
5190		4640	1.25	1.12
5650		3790	1.50	1.49
5790		3470	1.75	1.67
5860		3150	2.0	1.86
75% 유량 (4,500 kg/hr)	4710	4770	1.0	0.99
	4990	3910	1.25	1.28
	5270	3440	1.50	1.53
	5270	2970	1.75	1.77
	5270	2700	2.0	1.95

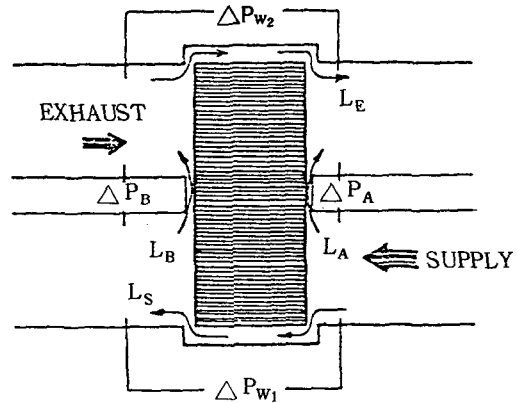


그림 5 회전형 열교환기에서의 leakage (배기덕트쪽이 낮은 정압일 때)

3. 결 론

본 연구에서는 실리카-겔 분말이 코팅된 알루미늄 박판을 수입하여 Honey comb형 로타

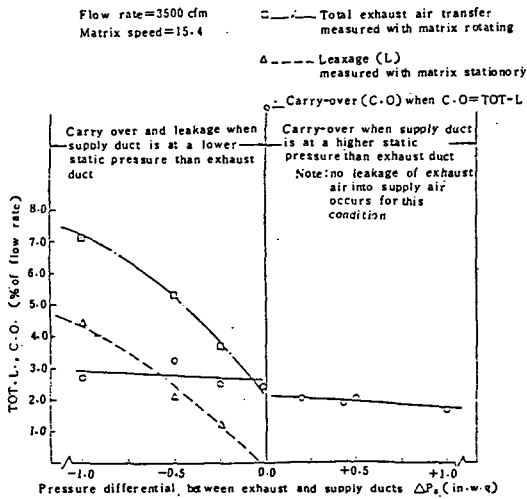


그림 6 Randomly packed rotor에서 정압차에 따른 Leakage 정도의 변화¹¹⁾

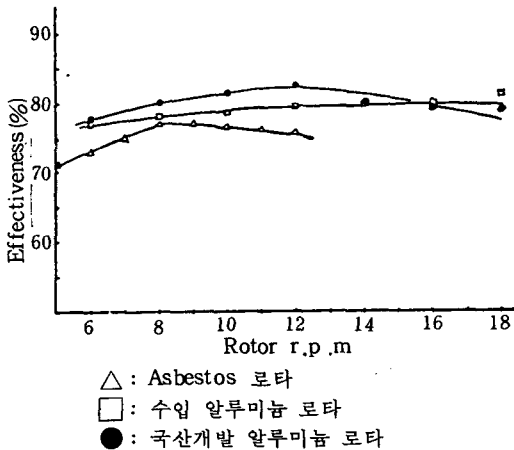


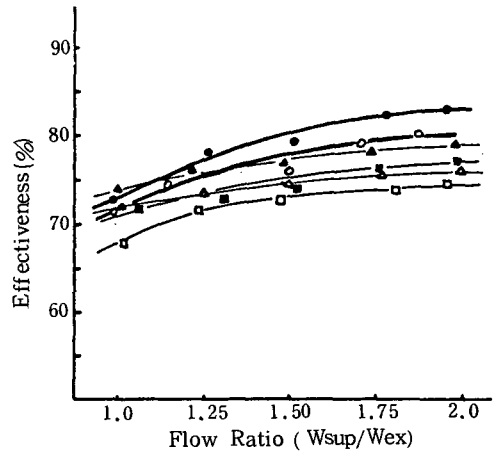
그림 7 로타회전수에 따른 효율 변화

의 성형기술을 개발하고 시제품을 제작하여 전열교환 효율에 대한 성능시험을 수행하였다.

그 결과를 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 전열교환기 로타의 최적운전 조건은 아스베스토스의 경우 8~10 rpm, 실리카-겔 분말이 코팅된 알루미늄 로타의 경우는 11~13 rpm이다.

둘째, 급기/배기 공기 중량비가 올라갈수록 전열교환 효율이 상승하므로 로타의 재질에 관계없이 전열교환기를 설계할 때에는 실내 오염도 등이 허용되는 한 배기 공기량이



- ■ : 완제품 수입 알루미늄 로타의 최대정적 및 75% 유량
- △ ▲ : 아스베스토스 로타의 최대정적 및 75% 유량
- ● : 국산개발 알루미늄 로타의 최대정적 및 75% 유량

그림 8 급배기 공기중량비에 따른 효율 변화

급기 공기량보다 적게하는 것이 에너지 절감 효과가 크다.

세째, 국산개발한 알루미늄 로타는 그 전열효율이 최대부하에서 72~80%, 75% 유량에서 73~83%로서 종래의 석면지 로타 또는 수입 알루미늄 로타보다 1~5%정도 효율이 향상되었다. 따라서 앞으로 계속적인 성형공정 개선을 통하여 더욱 우수한 성능의 국산 로타가 개발될 수 있음을 확인하였다.

네째, 사용중에 실리카-겔 분말의 이탈에 따른 전열교환효율의 저하를 막을 수 있도록 성형후의 내구성 향상을 위한 후처리법에 대한 연구도 계속적으로 뒤따라야 할 것이다.

다섯째, 현재 수행중인 알루미늄 박판에 실리카-겔 분말 코팅기술의 국내개발 연구가 완료되면 고성능 전열교환기의 완전 국산화가 이루어질 것이다.

여섯째, 전열교환을 이용한 에너지 다소비 장소의 에너지 절감기술은 세계적으로 기술발전의 초기단계에 있어, 본 연구의 결과와 계속적인 공정개선 및 앞으로 완결될 코팅기술의 정착화로 수입대체에 따른 외화절감은 물론

세계시장에서의 국제경쟁력 향상으로 수출전망도 밝아지고 있다.

참 고 문 헌

1. Dr. Harry. J. Sauer, Pr., P.E. Dr. R.H. Howell; "Promise and Potential of air to air energy recovery system," ASHRAE Trans. Vol. 87, Pt. I, 1981, pp. 167-182.
2. Shoukri M.: "The use of a regenerative air to air rotary heat exchanger for heat recovery in residential ventilation system," ASME Paper 79-WA/HT-32, ASME Winter Annual Meeting December, 1979.
3. ASHRAE Handbook, Equipment Volume, Chapter 35: "Air to air energy recovery equipment", 1983.
4. 서석청, 김송학 : 전열교환기 성능평가에 관한 조사연구, 한국기계연구소 연구보고서, BSI 18-144. C, 1981. 4.
5. Kennard L. Bowlen: "Energy recovery from exhaust air" ASHRAE Journal Vol. 16, No. 4, 1974, pp. 49-56.
6. 서석청, 김정우 : "전열교환기 성능평가에 관한 조사연구" 한국기계연구소 연구보고서, BST 1-252. C, 1982. 11.
7. SMACNA (Sheet Metal and Air Conditioning Contractors National Association, Inc.) Manual: "Energy recovery equipment and systems Air to Air", 1978.
8. ASHRAE Standard 84-78: "Method of testing air to air heat exchanger", 1978.
9. D.R. Fisher, H.N. Gawley, R.E. Chant: "Performance testing of rotary air to air heat exchanger", ASHRAE Trans. Vol. 80, Pt. 1, 1974, pp. 322-332.
10. ASHRAE Handbook, Fundamental Volume, Chapter 6: "Psychrometric Tables", 1981.
1. D.R. Fisher, N. Gawley, P.E., R.E. Chant P.E.: "Leakage and carry-over in rotary

air to air heat exchangers as determined by microbiological and tracer gas procedures" ASHRAE Trans. Vol. 81, Pt. II, 1975, pp. 389-400.

12. JIS Z 0701-1977, 실리카겔 건조제
13. 후지 Davision 화학(주), Fuji-gel B형 실리카겔
14. ASHRAE Handbook, Fundamental Volume, Chapter 33: "Duct Design", 1981.
15. Dr. Ronald, H. Howell, Dr. Harry J. Sauer: "Development of a standard test facility for evaluation of all types of air to air energy recovery systems" ASHRAE Trans. Vol. 87, Pt. I, 1981, pp. 183-198.
16. AMCA Standard 210-67: "Test code for air moving devices", 1967.
17. ASHRAE Handbook, Fundamentals Volume, Chapter 13: "Measurement and Instruments", 1981.
18. ASHRAE Stanard 41.1-74: "Section on temperature measurements". 1974.
19. G.D. Parfitt, K.S. Sing: "Characterization of powder surfaces", Academic Press, 1976, pp. 353-354.
20. Brian N. Chapman, J.C. Anderson: "Science and technology of surface coating", Academic Press, 1974, pp. 248.
21. 서석청, 박반옥 : "전열교환기 성능향상 및 로타 국산화에 관한 연구", 한국기계연구소 연구보고서 CRL 192-514. C, 1985. 1.
22. 서석청, 박반옥 "A Study on Rotor Development for Air-to-Air Heat Exchanger," 한국기계연구소 연구보고서 BSM 046-752C, 1986. 7

이 보고서는 과학기술처에서 시행한 특정연구개발사업의 연구보고서로서 한국기계연구소와 백련공업주식회사가 공동으로 수행(1985. 1.)한 연구결과임을 밝힙니다.