

건식회전형 제습기의 성능향상에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Improved Performance of Rotary Solid Dehumidifier

이 기 영*, 김 호 경**
Gi Young Lee Hyo Kyung Kim

ABSTRACT

Parametric study on the efficiency of Rotary Solid Dehumidifier are reported. Experiments have been performed by varying regeneration temperature, regeneration humidity, flow rate of regeneration air, angular velocity of dehumidifier rotor and regeneration angle.

To improve the energy efficiency, MODE 2, 3 where cooling zone is constructed and MODE 4, 5 where recirculating zone is constructed, were studied through experimental method

These results show that economical operating ranges exist in regeneration temperature, flow rate of regeneration air, angular velocity of dehumidifier rotor and regeneration angle.

MODE 2, 3 where cooling zone is constructed between regeneration zone and process zone, is far better than MODE 1 in view of energy efficiency, and optimum cooling angle and flow rate of cooling air exist. But MODE 4 and MODE 5, where recirculating zone is constructed, are similar to MODE 1.

기 호 설 명

A_C : 냉각부 각도

A_R : 재생부 각도

BA : 재순환 공기

CA : 냉각 공기

C_P : 공기의 정압비열

λ_X : 제습율

λ_{XG} : 단위 재생입력당 제습량

λ_{XT} : 단위 전입력당 제습량

λ_C : 냉각 부하

E_G : 재생 입력

E_T : 전 입력

PA : 처리공기

Q_B : 재순환 공기량

Q_C : 냉각 공기량

Q_P : 처리 공기량

Q_R : 재생 공기량

Q_X : 시간당 제습량

RA : 재생 공기

RH : 상대 습도

RPH : 제습 로터의 회전속도

* 정회원, 서울대학교 대학원, 현재 공군사관학교

** 전회장, 서울대학교 공과대학

- γ_B : 재순환 공기의 비중량
- γ_C : 냉각공기의 비중량
- γ_P : 처리 공기의 비중량
- γ_R : 재생 공기의 비중량
- T_o : 외기 온도
- T_r : 방안 온도
- T_{CE} : 냉각공기의 출구온도
- T_{PE} : 처리 공기의 출구온도
- T_{PI} : 처리 공기의 입구온도
- T_{RE} : 재생공기의 출구온도
- T_{RI} : 재생공기의 입구온도
- X : 절대습도
- X_{PE} : 처리공기의 출구 절대습도
- X_{PI} : 처리공기의 입구 절대습도
- X_{RE} : 재생공기의 출구 절대습도
- X_{RI} : 재생공기의 입구 절대습도

1. 서 론

제습이란 공기, 가스 혹은 다른 유체중에 포함된 수분을 감소시키는 것으로⁽¹⁾ 생산공정에 있어서 불량률 감소에 의한 원가절감과 작업환경의 안정에 의한 품질의 균일화 및 품질의 고급화와 적당한 습도유지에 의한 품질의 보존이 그 목적이다.⁽²⁾

제습의 방식에는 압축식과 냉각식 제습방식과 같이 기계적 동력에 의한 기계적 방법과 고체 흡수식, 건식, 습식 흡수식 제습방식과 같은 화학적 방식으로 대별된다.⁽³⁾

이러한 제습에 대한 연구는 주로 수치해석을 통하여 이루어져 왔는데 P. J. Banks⁽⁴⁾, D. J. Close⁽⁵⁾는 다공성 물질의 열 및 물질 전달에 관한 수치해석을 통하여 Silica-Gel 공기 건조기의 성능예측을, B. Mathiprakasham⁽⁶⁾은 선형해를 사용하여 건식제습기의 성능예측을 시도하였다. 또한 E. V. Denbulck^(7,8) 등은 유효 NTU 방법을 이용하여 건식제습기의 설계 이론을 제시한 바 있고, J. J. Jurinak⁽⁹⁾ 등은 회전형 제습기의 격자특성에 관하여 해석한 바 있다.

본 논문에서는 여러 산업분야에서 폭 넓게

사용되고 있는 건식회전형 제습기의 성능 향상에 관한 연구로 건식회전형 제습방식은 내열성 소재를 허니컴상으로 성형하여 원통상으로 만들어진 로터에 흡습제를 함침시켜 고화시킨 제습로터의 3/4부분은 공기중의 수분이 흡수되고 나머지 1/4부분은 가열공기가 통과하면서 흡수한 수분을 빼앗아 외기로 방출시키게 되어 제습과 재생이 연속적으로 이루어지고 저노점의 공기를 얻을 수 있는 등의 많은 장점을 가지고 있다.^(10,11,12)

김영일 등⁽¹³⁾은 건식회전형 제습기에 대한 수치해석을 통하여 재생부와 처리부 사이에 냉각부를 두어 일부의 공기를 통과시키면 제습 효율이 증대됨을 제시한 바 있다.

따라서 본 논문에서는 김영일의 연구와 연계하여 제습성능에 영향을 미치는 여러 인자들의 특성을 실험을 통하여 분석하여 최적의 운전조건을 구함과 아울러 건식회전형 제습기가 안고 있는 문제점인 높은 재생열원이 필요한 것과 처리공기의 출구온도 상승을 억제하는 에너지 절약형 제습방식을 찾아내고자 한다.

기존의 제습방식을 MODE 1이라 칭하고그 제습로터의 단면은 Fig. 1과 같고 냉각부와 재순환부가 설정된 에너지 절약형 제습방식을 각

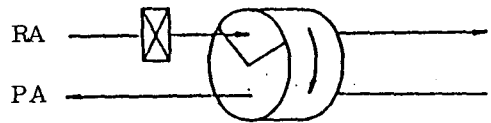


Fig. 1 Schematic Diagram of MODE 1

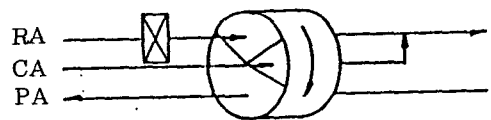


Fig. 2 Schematic Diagram of MODE 2

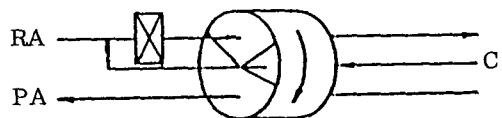


Fig. 3 Schematic Diagram of MODE 3

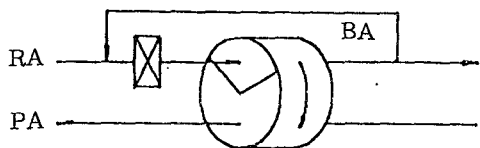


Fig.4 Schematic Diagram of MODE 4

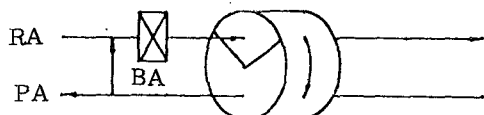


Fig.5 Schematic Diagram of MODE 5

각 MODE 2, 3, 4, 5 라 칭하고 이들에 대한 그림은 Fig.2~5와 같다.

2. 실험장치

본 논문에 사용된 실험장치는 항온 항습장치를 비롯하여 제습로터 및 챔버, 제습로터의 구동장치, 송풍 및 배관 설비, 온습도 측정장치와 풍속측정 장치로 구성되어 있다.

제습로터는 내열성 소재인 세라믹 박판에 흡습제인 염화라튬을 함침시킨 것으로 실험용 챔버로 고정시켜 시험부로 하였다. 각각의 MODE에 대한 단면도는 Fig. 6, 7과 같고 전체적인 실험장치의 개략도 및 그 사진은 Fig. 7, 8과 같다.

3. 실험방법

3.1 변수의 정의

본 실험에서 측정, 계산된 변수는 제습율, 단위 재생입력당 제습량, 단위 전입력당 제습량이며 그 정의는 다음과 같다.

(1) 제습율 : DX

$$DX = \frac{X_{PI} - X_{PE}}{X_{PI}} \times 100 (\%) \dots\dots\dots (1)$$

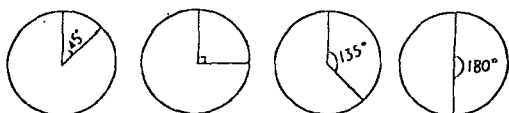


Fig.6 Schematic Diagram of Cross Section of MODE 1 Chambers

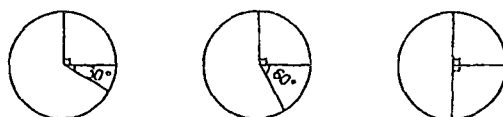
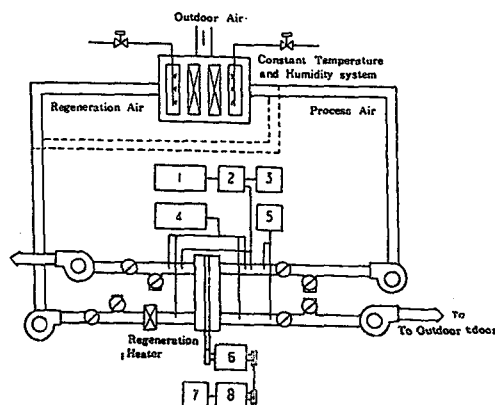


Fig.7 Schematic Diagram of Cross Section of MODE 2, 3 Chambers



NO	ITEM
1	Digital Hygrometer
2	Digital Hygrometer Sensor
3	Vacuum Pump
4	Multi-Channel Recorder
5	Anemometer
6	Geared Motor
7	Variable Speed Motor Controller
8	Variable Speed Motor

Fig.8 Schematic Diagram of Experimental System

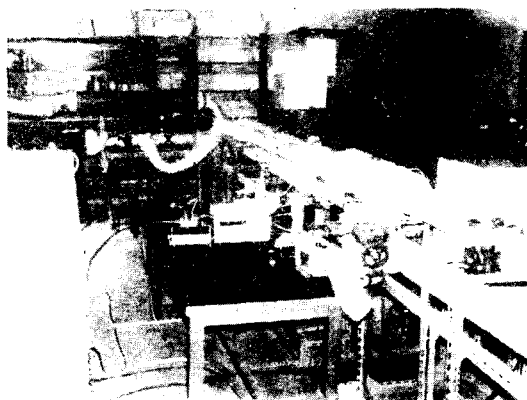


Fig.9 Photograph of Experimental System

(2) 단위 재생입력당 제습량 : DXG

$$DXG = \frac{QX}{E_G} \text{ (g/kwh)} \dots\dots\dots (2)$$

(3) 단위 전입력당 제습량 : DXT

$$DXT = \frac{QX}{E_T} = \frac{QX}{E_G + E_C} \text{ (g/kwh)} \dots\dots\dots (3)$$

여기서,

$$QX = Q_P \times \gamma_P \times (X_{PI} - X_{PE}) \dots\dots\dots (4)$$

$$E_G = ((Q_R - Q_C) \times (T_{RI} - T_o) \times \gamma_R + Q_C \times (T_{RI} - T_{CE}) \times \gamma_C) \times C_P / 3600 \dots\dots\dots (5)$$

$$E_C = Q_P \times \gamma_P \times C_P \times (T_{PE} - T_R) / 3600 \dots\dots\dots (6)$$

로 계산된다.

3-2 실험방법

각각의 MODE에 대해 제습성능에 영향을 미치는 재생부각도(A_R), 냉각부각도(A_C), 재생공기입구습도(X_{PI}), 제습로터의 회전속도(RPH), 재생공기입구온도(T_{RI}), 재생풍량비(Q_R/Q_P) 및 냉각풍량비(Q_C/Q_R) 등의 인자를 변화시켜가면서 처리측, 재생측 및 냉각측의 온·습도를 측정하여 이들로부터 (1)~(3)을 이용하여 제습율, 단위재생입력당 제습량 및 단위 전입력당 제습량을 계산하였다.

이와 같은 실험과정에 대한 흐름도는 Fig. 10과 같다.

4. 실험결과 및 검토

기존의 제습방식인 MODE 1에 있어서 제습성능에 영향을 미치는 각 인자들에 대해 분석하는 것은 새로운 MODE에 대한 해석에 있어서 중요한 역할을 하게 된다.

Fig.11은 $A_R=90^\circ$, $RPH=15\text{ rph}$, $Q_R/Q_P=0.3$, $T_{RI}=140^\circ\text{C}$, $X_{PI}=X_{RI}$ 의 조건에서 측정한 MPDE 1의 성능도표로 MODE 1 각 인자들의 영향을 해석하고 MODE 2, 3, 4, 5의 성능분석의 근거자료가 된다.

4-1 재생공기 온도에 대한 영향

염화리튬의 평형수증기 분압은 수분함유량과 온도에 의해 결정되는데 본 연구에서는 일

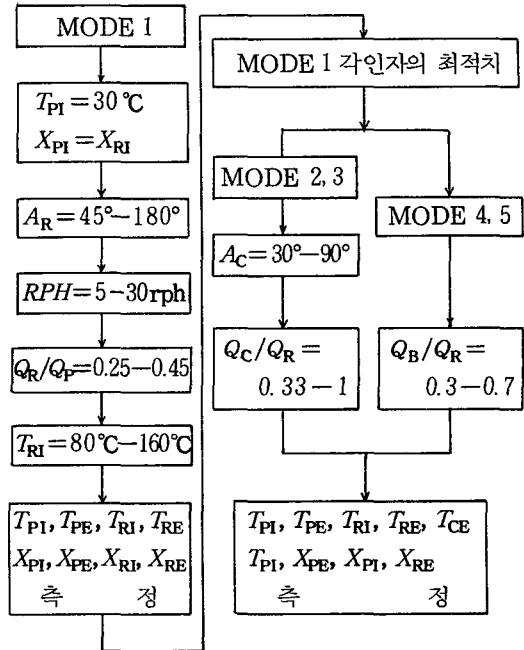


Fig.10 Flow Diagram of Experimental Process

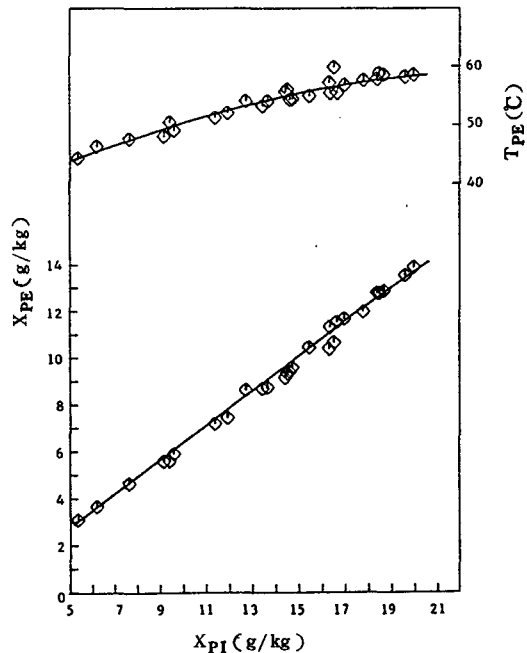


Fig.11 Dehumidification Ability of MODE 1

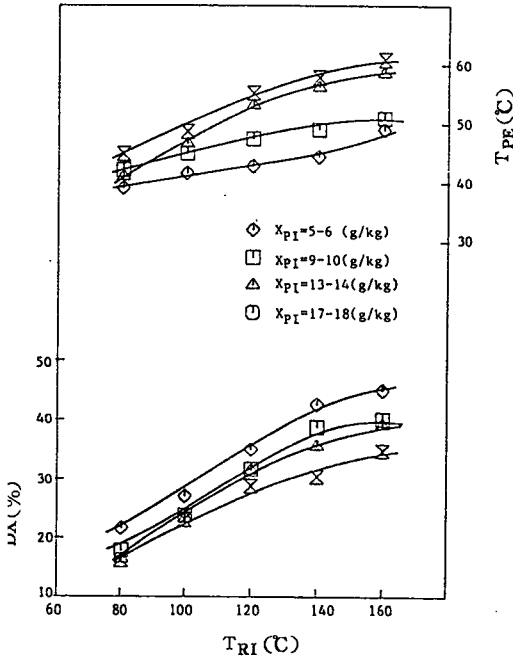


Fig. 12 Effect of Regeneration Air Temperature at $A_R=90^\circ$, $X_{PI}=X_{RI}$, $RPH=15$ rph and $Q_R/Q_P=0.3$

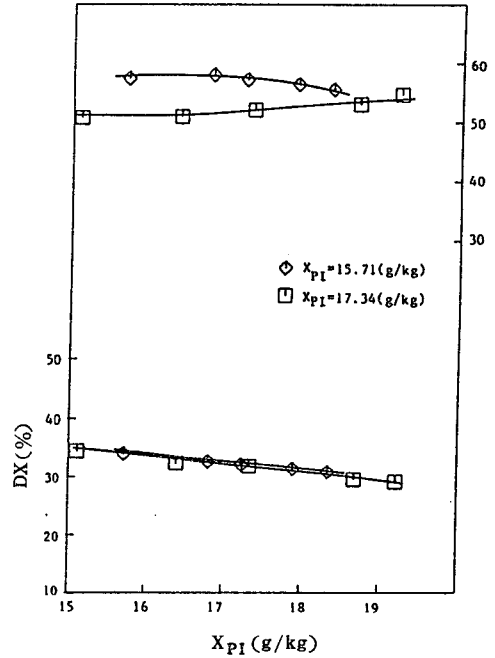


Fig. 14 Effect of Regeneration Air Humidity at $A_R=90^\circ$, $T_{RI}=140^\circ\text{C}$, $RPH=15$ rph and $Q_R/Q_P=0.3$

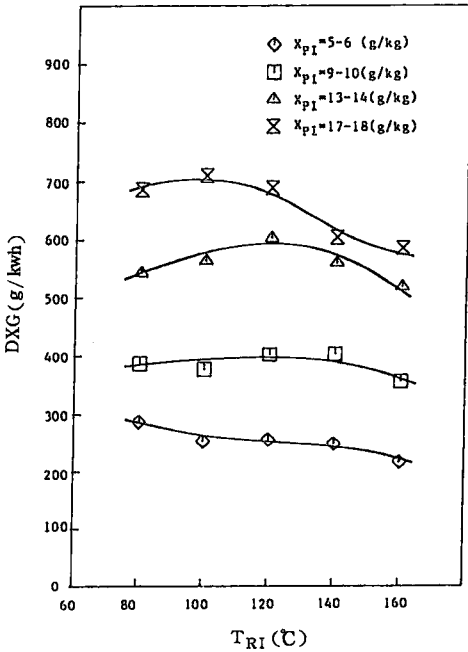


Fig. 13 Effect of Regeneration Air Temperature on Regeneration Input at $A_R=90^\circ$, $X_{PI}=X_{RI}$, $RPH=15$ rph and $Q_R/Q_P=0.3$

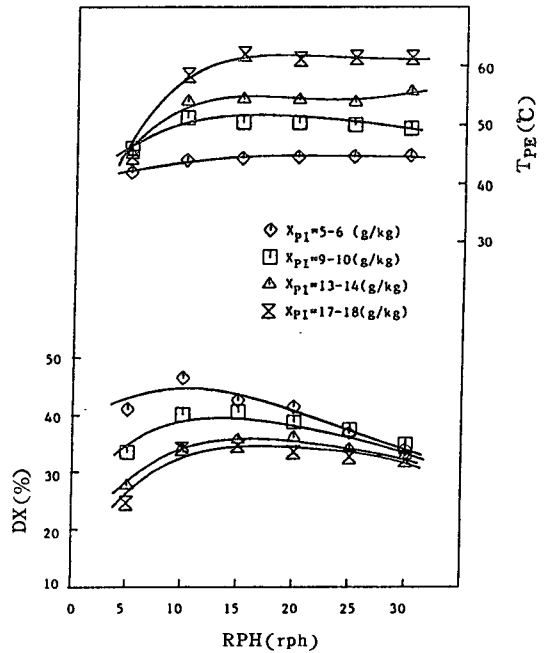


Fig. 15 Effect of Rotor Angular Velocity at $A_R=90^\circ$, $T_{RI}=140^\circ\text{C}$ and $Q_R/Q_P=0.3$

정한 함침량의 제습로터를 사용했으므로 온도에 의한 영향이 주가 된다. Fig.12에서 보는 바와 재생공기 온도를 증가시키면 제습율은 증가되나 재생온도 상승에 따른 재생입력도 아울러 증가되므로 적절한 온도 범위가 있음을 Fig.13에서 알 수 있다. 즉, 120°C-140°C가 경제적인 온도 범위라 할 수 있다.

4-2 재생습도의 영향

처리공기 습도와와의 차가 크지 않으면 제습 성능에 크게 영향이 없음을 Fig.14에서 알 수 있다. 즉, 증기나 폐가스 등의 재생열원을 고려할 수 있다.

4-3 제습로터의 회전속도

제습로터의 회전속도는 제습로터의 염화리튬 함침량에 따라서 많은 영향을 미친다. 즉, 최적 회전속도는 함침량의 증가에 따라 늦어지지만 동일 재생열량에 대해서는 염화리튬의 함침량의 증가에 따라 제습율이 증가하게 된다. 여기서는 Fig.15와 같이 동일 함침량에 대해 처리공기의 습도가 높아짐에 따라 최적회전속도가 약간씩 증가하는 경향을 보여준다.

이것은 처리공기의 습도가 증가함에 따라 처리해야 될 수분의 양이 증가하기 때문이라 생각된다.

4-4 재생 풍량비

재생 풍량이 증가하면 제습율도 증가되나 Fig.16과 같이 0.4 이상에서는 그 증가폭이 둔화되고 재생입력과 출구온도도 함께 증가되므로 Fig.17에서 보는 바와 같이 0.3~0.4 범위에서 에너지 효율이 가장 좋음을 알 수 있다.

4-5 재생부 각도

재생부 각도의 증가는 곧 처리부의 감소를 의미하게 되며 이는 처리면적이 줄어들어 저하되고 재생부의 감소 역시 재생면적의 감소로 인해 제습율이 저하되므로 최적의 재생부 각도가 존재함을 알 수 있으나 Fig.18에서 보

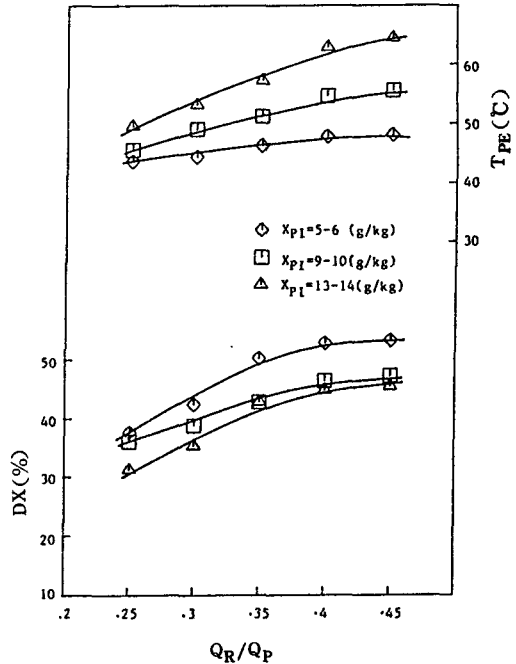


Fig.16 Effect of Regeneration Air Quantity at $A_R=90^\circ$, $X_{PI}=X_{RI}$ and $T_{RI}=140^\circ\text{C}$

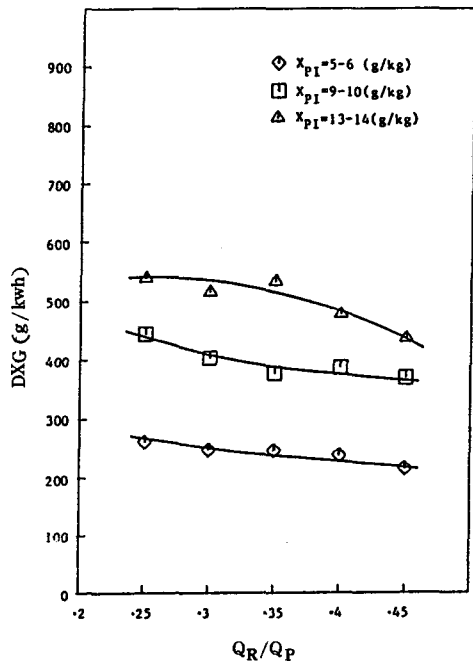


Fig.17 Effect of Regeneration Air Quantity on Regeneration Input at $A_R=90^\circ$, $X_{PI}=X_{RI}$, $T_{RI}=140^\circ\text{C}$ and $RPH=15$ rph

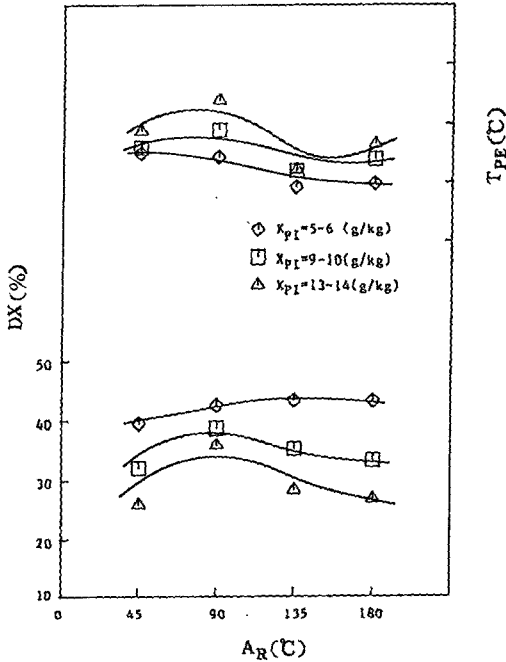


Fig. 18 Effect of Regeneration Angle at $X_{PI} = X_{RI}$, $T_{RI} = 140^\circ\text{C}$ and $RPH = 15\text{rph}$ and $Q_R/Q_P = 0.3$

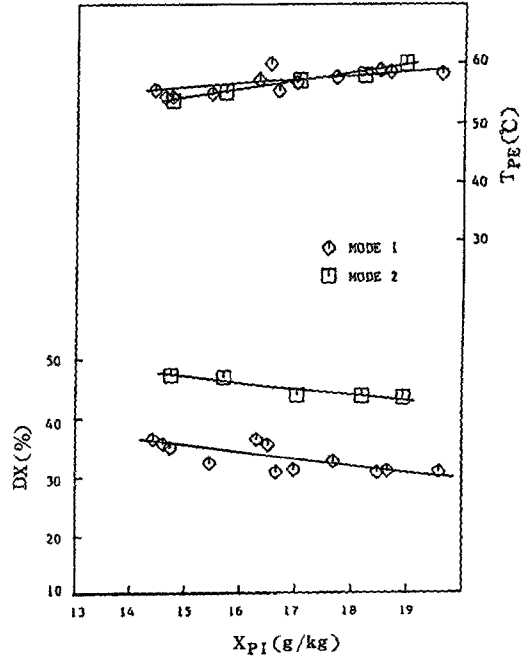


Fig. 20 Comparison of MODE 1 and MODE 2 with $Q_C/Q_R = 0.67$ and $A_C = 60^\circ$

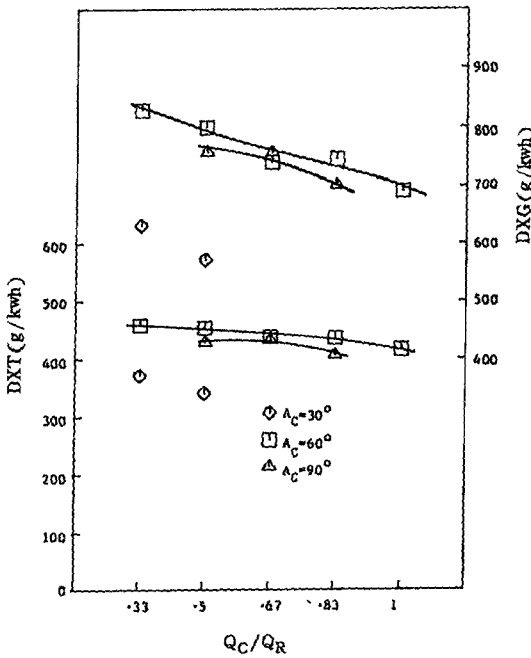


Fig. 19 MODE 2: Effect of Cooling Air Quantity on Regeneration Input and Total Input at $X_{PI} = X_{RI}$, $T_{RI} = 140^\circ\text{C}$, $RPH = 15\text{rph}$ and $Q_R/Q_P = 0.3$

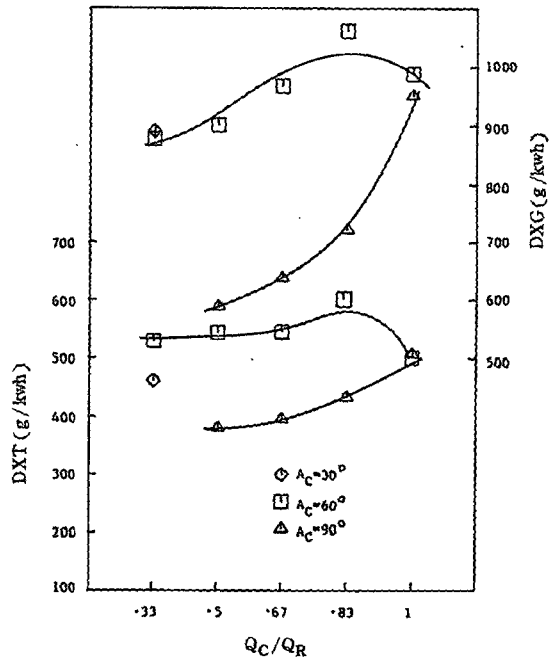


Fig. 21 MODE 3: Effect of Cooling Air Quantity on Regeneration Input and Total Input at $X_{PI} = X_{RI}$, $T_{RI} = 140^\circ\text{C}$, $RPH = 15\text{rph}$ and $Q_R/Q_P = 0.3$

는 바와 같이 그 효과는 크지 않아 MODE 2, 3의 가능성을 시사해 준다.

4-6 MODE 2

재생부를 통과하여 처리부로 시작되는 부분은 고온이므로 흡수제의 평형 수분 분압이 높아 제습을 하기보다는 출구온도를 상승시키는 원인이 되므로 이곳에 냉각부를 두어 냉각공기를 통과시킨 것이 MODE 2이다. MODE 2에 있어서 냉각부 각도 및 냉각풍량비의 영향은 Fig. 19에 보인 바와 같고 Fig. 20에서 보는 바와 같이 MODE 1에 비해 제습성능이 월등하게 향상됨을 알 수 있다.

4-7 MODE 3

MODE 2에서 냉각부를 통과한 공기는 고온이 되므로 이를 그대로 방출할 것이 아니라 재생입력으로 재순환시켜 에너지 효율을 높이고자 한 것이 MODE 3로 Fig. 21과 같이 냉각풍량비 0.83, $A_c=60^\circ$ 에서 비교적 좋은 성능을 보여주며 Fig. 22에 보인 바와 같이 제습을 및 처리공기 온도 강하 효과도 비교적 양호하게 나타난다.

4-8 MODE 4, 5

재생공기 혹은 처리공기의 출구 온도는 비교적 높게 상승되므로 이의 일부를 재생입력으로 재순환시켜 에너지 효율을 상승시키고자 했는데 이의 효과는 미미함을 Fig. 23, 24에서 알 수 있다.

4-9 각 방식의 비교

이상의 각 방식을 종합하여 에너지 효율면에서 비교 분석한 것이 Fig. 25, 26 으로서 MODE 2, 3은 기존의 방식인 MODE 1에 비해 탁월한 에너지 효율 증대를 꾀할 수 있으며 이는 곧 건식회전형 제습기가 보다 넓은 범위에서 경제적으로 운용될 수 있음을 시사한다고 볼 수 있다.

5. 결 론

실험을 통하여 건식회전형 제습기의 제습성

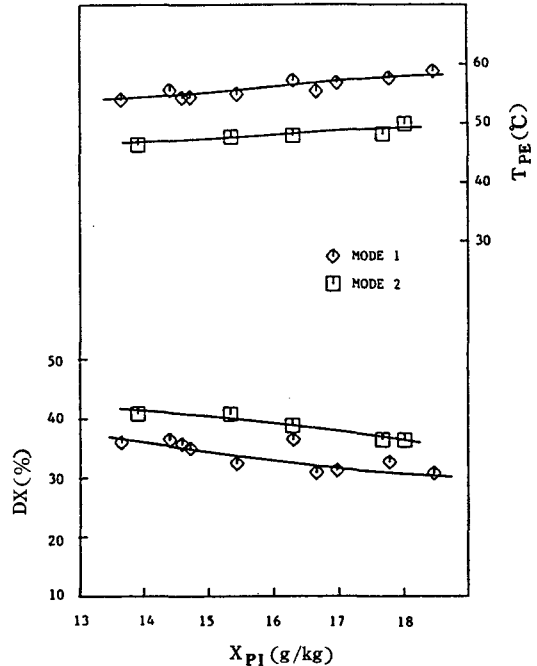


Fig. 22 Comparison of MODE 1 and MODE 3 with $Q_C/Q_R=0.83$ and $A_c=60^\circ$

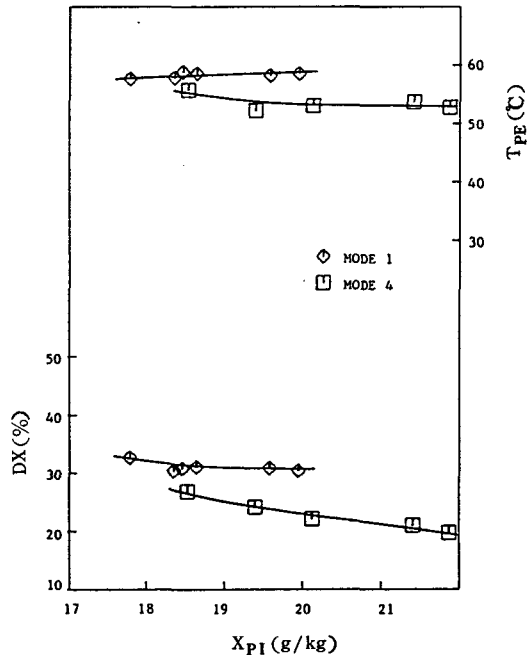


Fig. 23 Comparison of MODE 1 and MODE 4 with $Q_B/Q_R=0.67$

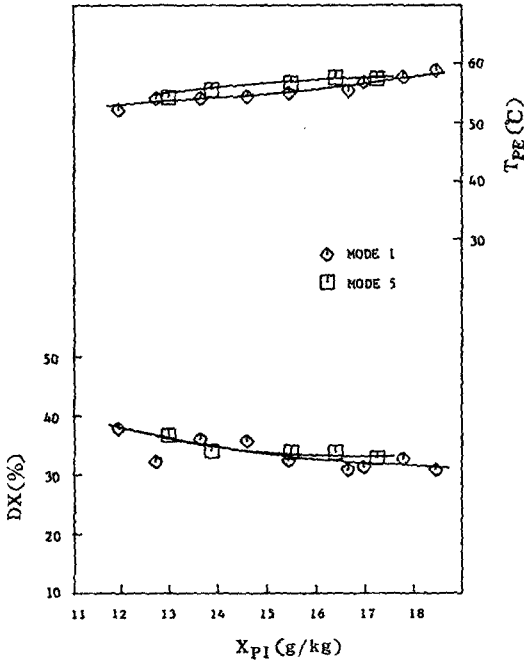


Fig. 24 Comparison of MODE 1 and MODE 5 with $Q_B/Q_R=0.67$

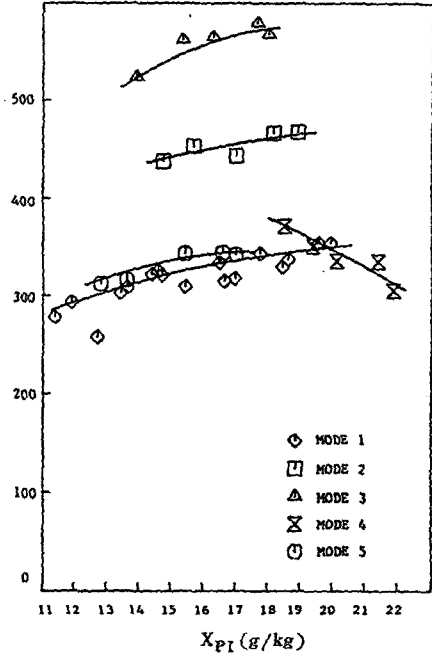


Fig. 26 Comparison of MODE 1, 2, 3, 4 and 5 on the Dehumidified Quantity per Unit Total Input

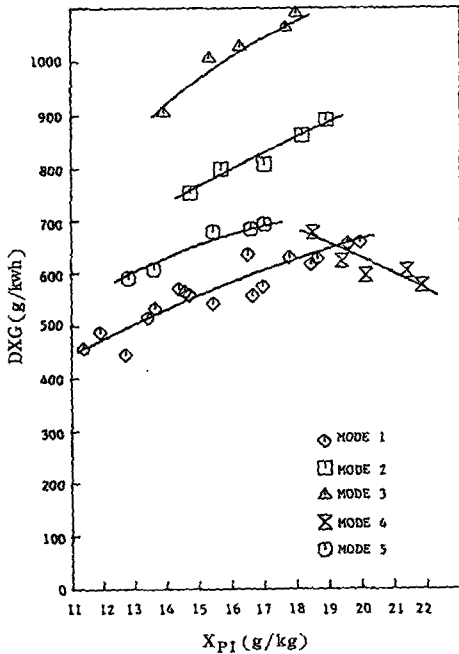


Fig. 25 Comparison of MODE 1, 2, 3, 4 and 5 on the Dehumidified Quantity per Unit Regeneration Input

능에 영향을 미치는 각 인자들의 영향을 분석하고 처리부와 재생부 사이에 냉각부를 둔 MODE 2, 3과 재생공기 혹은 처리공기 일부를 재순환시킨 MODE 4, 5에 대해 기존의 방식인 MODE 1과의 성능을 비교 분석하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) 재생공기 온도는 높을수록 제습율은 증가하나 경제적인 온도 범위는 $120^{\circ}\text{C}\sim 140^{\circ}\text{C}$ 이고 재생공기 습도의 제습성능에의 영향은 비교적 적다.

(2) 제습로터의 회전속도는 처리공기의 습도 증가에 따라 약간씩 증가하는 경향이 있으며 대략 $10\sim 15\text{rph}$ 에서 최적치를 보여준다.

(3) 재생풍량비가 증가함에 따라 제습율은 증가하나 에너지 효율면에서의 최적범위는 $0.3\sim 0.4$ 이고 재생부 각도는 90° 에서 가장 좋은 제습성능을 보여준다.

(4) 냉각부가 설정된 MODE 2, 3이 타방식에 비해 제습율 및 에너지 효율에 있어서 현저히 향상된 성능을 보여주고 최적의 냉각부 각도

와 냉각풍량비가 존재하나, 재생공기 혹은 처리공기의 일부를 재순환시킨 MODE 4, 5의 효과는 미미하다.

참 고 문 헌

1. ASHRAE Handbook Equipments, Chap. 7, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, New York, 1977.
2. 鈴木謙一郎, 大矢信男, “空調技術者のための除濕の實用設計”, 共立出版株式會社, 1980.
3. 比村昭二, “除濕の必要性と除濕方式の種類”, 日本空氣調和・衛生工學會誌, Vol. 57, No. 7, pp.675~685, 1983.
4. P.J. Banks, “Coupled Equilibrium Heat and Single Absorbate Transfer in Fluid Flow through a Porous Medium-I. Characteristic Potentials and Specific Capacity Ratio”, *Chemical Engineering Science*, Vol. 27, pp. 1143-1155, 1972.
5. D.J. Close and P.J. Banks, “Coupled Equilibrium Heat and Single Absorbate Transfer in Fluid Flow through a Porous Medium-II. Predictions for a Silica-Gel Air-Drier Using Characteristic Charts”, *Chemical Engineering Science*, Vol. 27, pp. 1157-1169, 1972.
6. B. Mathiprakasham and Z. Lavan, “Performance Predictions for Adiabatic Desiccant Dehumifiers Using Linear Solutions”, *J. Solar Energy Engineering*, Vol. 102, pp. 73-79, 1980.
7. E.V. Denbulck, J.W. Mitchell and S.A. Klein, “Design Theory for Rotary Heat and Mass Exchangers – I. Wave Analysis of Rotary Heat and Mass Exchangers with Infinite Transfer Coefficients”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 28, No. 8, pp. 1577-1586, 1985.
8. E.V. Denbulck, J.W. Mitchell and S.A. Klein, “Design Theory for Rotary Heat and Mass Exchangers-II. Effectiveness-Number-of Transfer-Units Methods for Rotary Heat and Mass Exchangers”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 28, No. 8, pp. 1187-1595, 1985.
9. J.J. Jurinak and J.W. Mitchell, “Effect of Matrix Properties on the Performance of Counterflow Rotary Dehumidifier,” *J. Heat Transfer*, Vol. 106, pp. 638-645, 1984.
10. 横大路憲彦, 林俊夫, “吸收式除濕装置とその應用”, 日本空氣調和・衛生工學會誌, Vol. 57, No.10, pp.1005~1012, 1983.
11. 出雲正矩, “乾式除濕機の性能と使用例”, 日本空氣調和と冷凍, Vol.21, No.4, pp.99~105, 1981.
12. 出路正矩, “ロータリー式除濕装置と適用例”, 日本建築設備と配管工事, Vol.23, No.10, pp.63~70, 1985.
13. 김영일, 김효경, “회전형 흡수식 제습기에 관한 연구”, 공기조화, 냉동공학회지, Vol. 15, No.2, pp.169~181, 1986.