

[논문] 태양에너지  
*Solar Energy*  
Vol. 19, No. 4, 1999

## 태양열 이용 냉난방 공조시스템 중 전열교환기의 최적운전조건에 관한 연구

김광호\*, 최광환\*\*, 금종수\*\*, 김보철, 김동규\*

\*\*\* 부경대학교 대학원

\*\*\* 부경대학교 냉동공조공학과

## Research on the Optimal Operating Condition of a Total Heat Exchanger in Solar Air-Conditioning System

K.H.Kim\*, K.H.Choi\*\*, J.S.Kum\*\*, B.C.Kim\*, D.G.Kim\*

\*\*\* Pukyong National University, Graduate School

\*\*\* Dep. of Refrigeration & Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University

### ABSTRACT

This study was performed to find out the influence of experimental factors on dehumidification performance and furthermore to suggest an optimal combination of factors of a total heat exchanger in a solar air conditioning system. The experimental apparatus was set up in a climate-controlled chamber where the temperature and humidity was maintained constant.

In order to find out the contribution ratio of factors on dehumidification performance, the table of orthogonal arrays  $L_8(2^7)$  was used. According to the results, the most influential factor on dehumidification performance was the concentration of LiCl(Lithium Chloride) solution. The next influential factors were the temperature of LiCl solution and the air flow rate.

The packed layer height, packed material, and flow rate of LiCl solution had no influence on the dehumidification performance under these experimental conditions.

Through the three level experiments of  $L_{27}(3^{13})$ , it was found that the optimal combination was  $A_2B_0G_2$ (concentration of solution 30 wt%, temperature of solution 15°C, air flow rate 253m<sup>3</sup>/h)

**Nomenclature**

- F<sub>0</sub> : 분 산 비
- S : 제 곱 합
- V : 평 균 제 곱

**그리스 문자**

- ∅ : 자 유 도
- ρ : 기 여 율

**1. 서 론**

우리 나라와 같이 여름철이 고온 다습한 지역에서는 습도가 재실자의 쾌적감을 결정하는 중요한 요소가 된다. 기존의 상용공조기로 거주공간의 온도 및 습도를 제어하고자 하는 경우, 동시에 조절이 불가능하므로 과정이 끝난 후 가습 혹은 제습이 별도로 요구된다. 이는 에너지를 이중으로 소비할 뿐 아니라, 나아가서는 온실효과를 초래하는 등 지구환경에 영향을 미친다.

이러한 문제의 해결 방안으로 자연에너지인 태양열을 구동열원으로 이용하며 액체흡수제(liquid desiccant)인 염화리튬(LiCl)용액을 사용하여 온도 조절 및 습도 조절이 가능한 태양열 이용 냉난방 공조시스템을 개발하였다. Fig. 1에 개발시스템의 개략도가 나타나 있다.

본 시스템의 개발은 여름철 에어컨 사용으로 인한 전력 부하 집중 현상을 없애기 위하여 태양열을 이용하여 제습/냉방 효과를 얻는데 그 목적이 있다. 이 중에서도 전열교환기는 여름철 고온

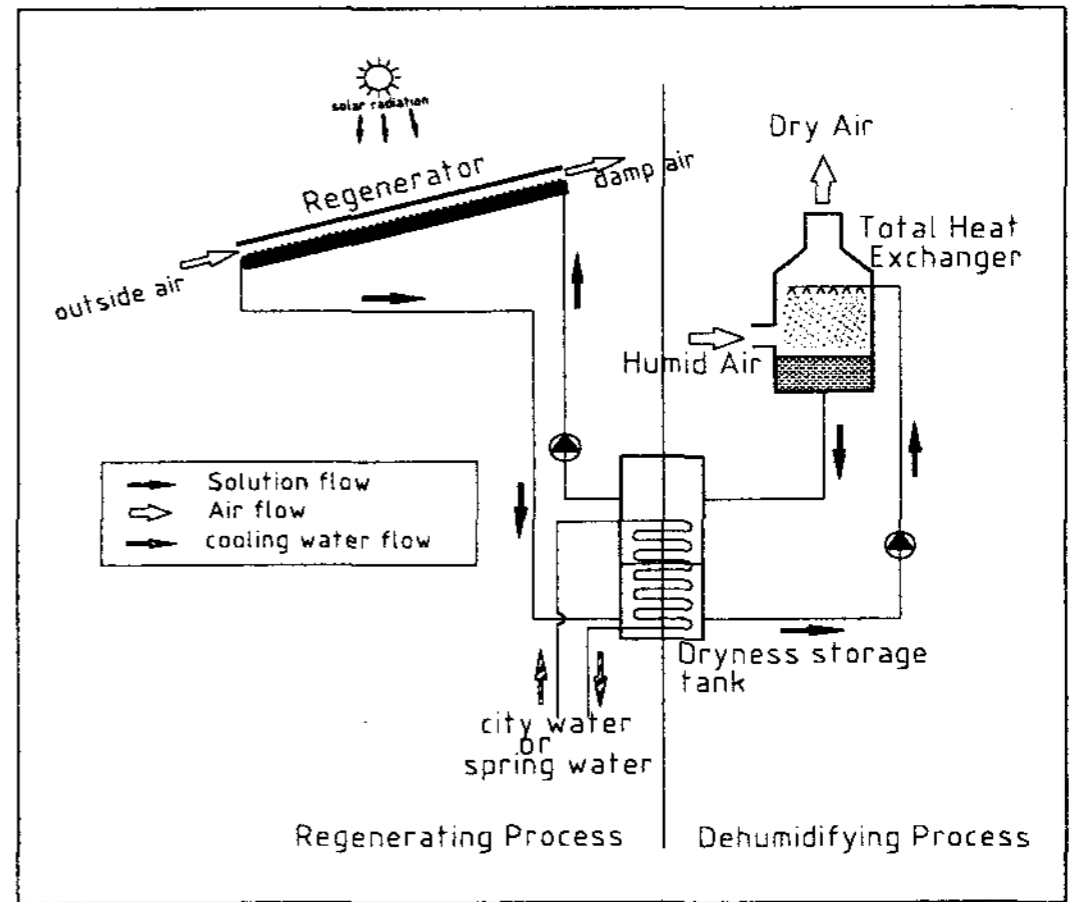


Fig. 1. Schematic of a solar air-conditioning system

다습한 공기와 LiCl용액을 대향류로 직접 접촉시켜 저온저습한 공기로 제습/냉방시킨다.

일반적으로 여름철 제습 및 냉방 능력은 전열교환기의 제습 능력에 크게 좌우된다. 따라서 제습량에 영향을 미치는 많은 인자들의 원인을 규명할 필요가 있다. 즉, 어떠한 요인이 제습량에 유의한 영향을 주고 있는가 혹은 그렇지 않음을 파악하고, 그 영향이 양적으로 어느 정도 크고 작은가, 또는 이러한 요인들이 전체적으로 어느 정도의 영향을 주고 있으며, 측정오차는 어느 정도인가 그리고 유의한 영향을 미치는 원인들이 어떠한 조건을 가질 때 가장 바람직한 결과를 얻을 수 있는가를 조사할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 실험계획법(design of experiments)에 의해 제습량에 영향을 미친다고 본 6인자를 2수준으로 두어 L8(27)형 직교배열표(table of orthogonal arrays)를 만들어 실험을 행한 뒤 분산분석으로 데이터를 해석하였다. 이러한 실험결과에 의해서 특성치에 영향을 크게 주

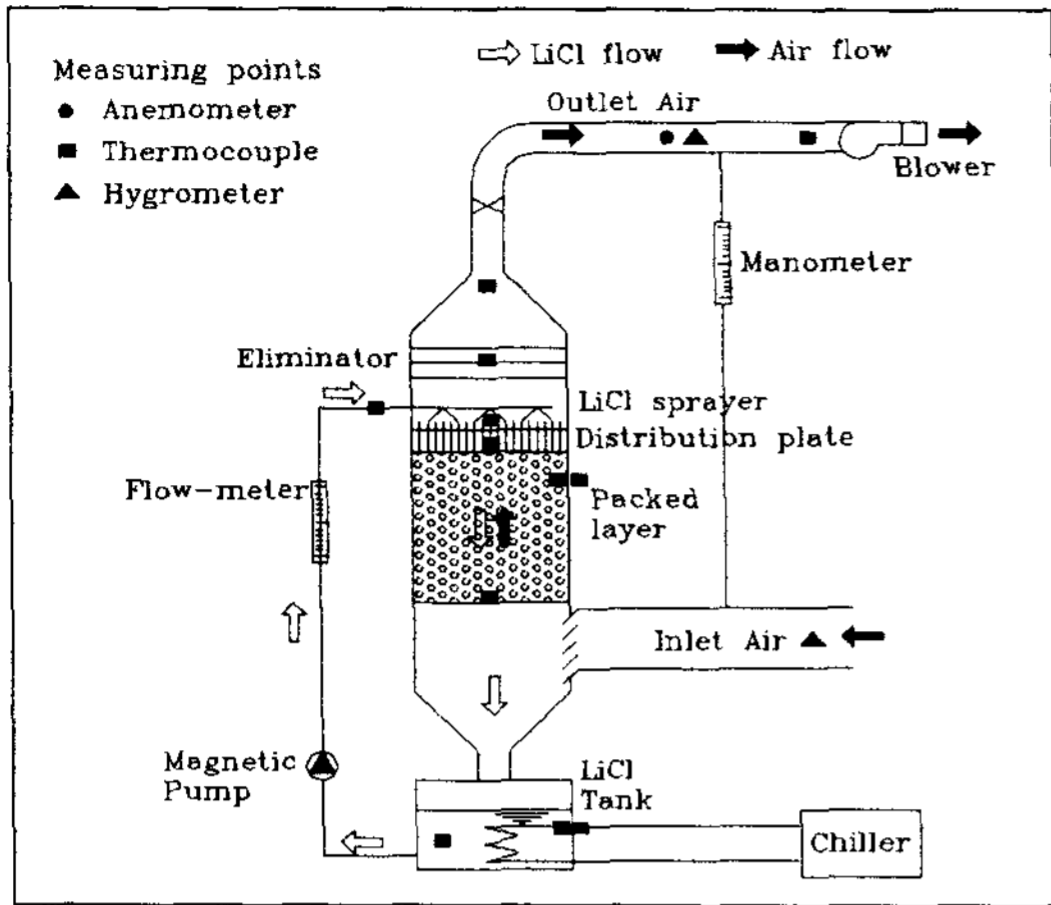


Fig. 2. Schematic of a total heat exchanger

는 인자를 선별하여 내어 제습량에 있어서 그 기여율을 파악함으로써 전열교환기 운전 시 최대의 제습 능력을 발휘하는 최적운전 조건을 제시하는데 본 연구의 목적이 있다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험장치

전열교환기는 전체 높이가 약 1.0m이며, 실제로 제습이 일어나는 충전층의 크기는 가로 0.5m × 세로 0.5m로 충전층의 높이가 변동 가능하도록 제작되었다. Fig. 2는 실험에 사용된 전열교환기의 개략도를 나타내고 있다.

전열교환기의 성능은 충전층 내부에서의 기액 접촉면적에 크게 좌우된다. 따라서 충전층의 상부에는 LiCl용액을 균일하게 분무하는 살수장치와 LiCl용액과 공기의 흐름이 서로 간섭되지 않도록 기액분리판, 그리고 LiCl용액의 비말(飛沫)현상을 방지하는 엘리미네이터(eliminator)가 공기 취출부에 설치되어 있다. 한편, 전열교환기에서는 공기를 실내로 취출하는 송풍기와 용액 순환을 위한 마그네틱(magnetic) 펌프가 동력원으로 작동하고 있다.

### 2.2. 실험방법

전열교환기의 제습 성능에 영향을 미치는 인자는 충전층 높이와 충전재 종류와 같은 계수인자(형상인자)와 LiCl용액의 유량, 온도 및 농도 그리고 도입공기의 풍량, 온도 및 습도와 같은 계량인자(운전인자)로 구분된다.

한편, 제습 성능에 미치는 인자들의 영향을 조사하는데 있어서 계량인자 실험처럼 인자(factor) 수나 인자 수준(level)이 계수인자 때보다도 훨씬 많은 경우, 실험 횟수는 비약적으로 증가하게 되며, 실험을 전부 행한다는 것은 현실적으로 불가능하다. 게다가, 비록 모든 실험을 수행하더라도 그 결과를 과학적, 통계적으로 분석하기란 결코 쉬운 일이 아니다.

따라서, 본 실험에서는 농업분야에서 공학에 이르기까지 광범위한 범위에서 실시되고 있는 실험 계획법 중 최소의 실험 횟수로 최대의 정보를 얻을 수 있는 직교배열표를 사용하여 실험과 통계 처리로써 제습 성능에 미치는 인자들의 영향을 분석하였다. 실험 순서는 선정된 인자 외의 다른 원인들이 실험 결과에 영향을 미치는 것을 방지하기 위해서 난수표를 이용하여 무작위(random)로 결정하였다.

실험은 부경대학교 냉동공조공학과 건축환경설비연구실의 항온항습실에서 행하였다. 데이터 측정에 있어서 전열교환기의 입구와 출구 거동을 관찰하기 위하여 Beam습도계와 열전대를 이용하여 습도와 온도를 동시에 측정하였으며, 데이터 집록장치(NetDAQ, Fluke사)로써 데이터를 저장한 다음, 해석에 이용하였다.

#### 2.2.1. 2수준 실험

먼저, 각각의 인자들이 제습 성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여  $L_8(2^7)$  직교배열표를 사용한 2수준 실험을 행하였다.

본 실험에서는 이전의 기초실험으로부터 제습량에 영향을 미친다고 간주할 수 있는 충전층 높

이와 충전재 종류의 2인자와 LiCl용액의 유량, 농도, 온도 그리고 유입공기의 풍량 등 4인자를 합하여 6인자로 하였다. 수준 수는 Table 1에 나타나 있는 것과 같이 2수준으로 하였으며, 서로의 교호작용은 없다고 가정하였다.

한편, 이들 6인자를 각각 A, B, C, D, F, G로 표시하고, 각 열 번호 1, 2, 3, 4, 5, 6에 차례로 배치하면 Table 2처럼 실험할 인자의 실험조건이 정해진다. 열 번호 7에는 오차(e)를 사용하였으므로 분산분석 시에 오차항의 자유도는 1이 된다. 인자의 수준은 Table 2처럼 숫자 0에는 수준 0을, 그리고 숫자 1에는 수준 1을 배치하도록 하였다.

Table 1. Level of factors

Factor \ Level	Symbol	Level 0	Level 1
Packed layer height (cm)	A	20	40
Packed material	B	Plastic packing	Raschig ring
Solution concentration(wt%)	C	30	35
Solution temperature(°C)	D	20	25
Solution flow rate(ℓ/min)	F	10	20
Air flow rate (m <sup>3</sup> /h)	G	80	100

Table 2. Table of Orthogonal Arrays L8(2<sup>7</sup>)

Factor Number	A	B	C	D	F	G	e	Experiment Combination
1	0	0	0	0	0	0	0	A <sub>0</sub> B <sub>0</sub> C <sub>0</sub> D <sub>0</sub> F <sub>0</sub> G <sub>0</sub>
2	0	0	0	1	1	1	1	A <sub>0</sub> B <sub>0</sub> C <sub>0</sub> D <sub>1</sub> F <sub>1</sub> G <sub>1</sub>
3	0	1	1	0	0	1	1	A <sub>0</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>0</sub> F <sub>0</sub> G <sub>1</sub>
4	0	1	1	1	1	0	0	A <sub>0</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub> F <sub>1</sub> G <sub>0</sub>
5	1	0	1	0	1	0	1	A <sub>1</sub> B <sub>0</sub> C <sub>1</sub> D <sub>0</sub> F <sub>1</sub> G <sub>0</sub>
6	1	0	1	1	0	1	0	A <sub>1</sub> B <sub>0</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub> F <sub>0</sub> G <sub>1</sub>
7	1	1	0	0	1	1	0	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>0</sub> D <sub>0</sub> F <sub>1</sub> G <sub>1</sub>
8	1	1	0	1	0	0	1	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>0</sub> D <sub>1</sub> F <sub>0</sub> G <sub>0</sub>

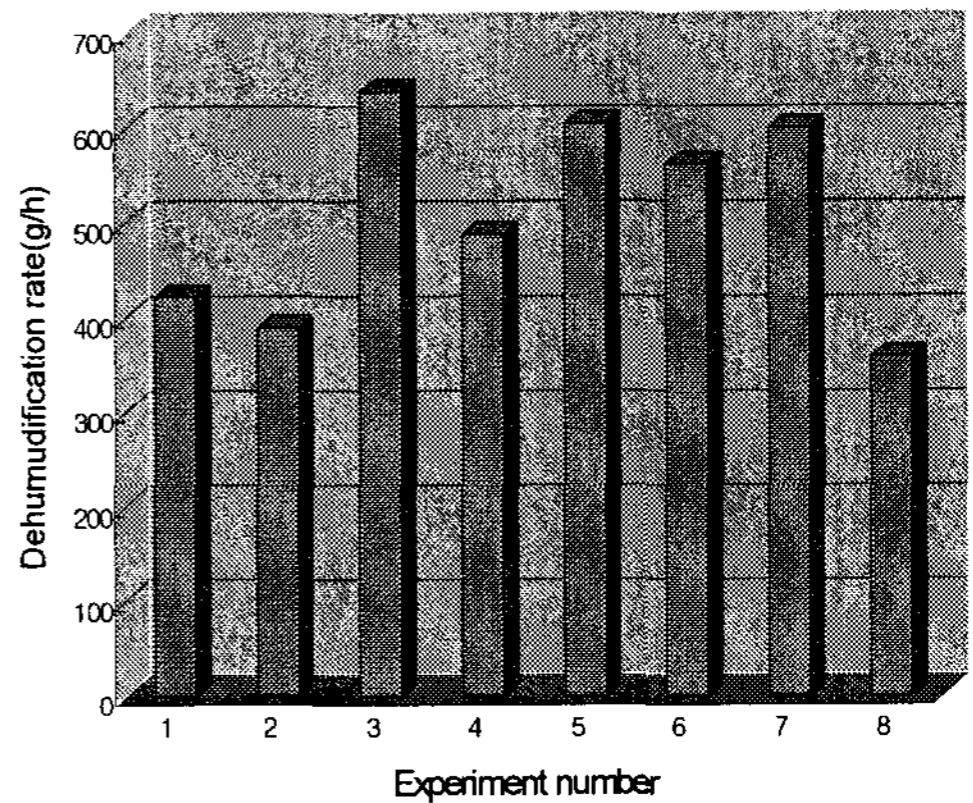


Fig. 3. Dehumidification rate on each condition

2.2.2. 2수준 실험 결과 및 고찰

본 실험은 실험계획법에 입각하여 실험조건 및 순서, 인자의 수준을 선정 후 실시하였다. 그리고 분산분석법을 이용하여 유의(有意)하다고 판단되는 인자의 주효과와 제습량에 미치는 기여율을 조사하기 위하여 각 조건의 실험으로부터 구한 제습량을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3은 각 수준의 합과 각 조건별의 실험 결과이며, 각 제습량으로부터 모든 인자에 대한 주효과나 변동을 구할 수가 있다.

인자 A의 변동은 식(1)을 이용하면 쉽게 구할 수 있고, 나머지 변동도 같은 방법으로 구할 수가 있다.

$$S_A = \frac{(\text{수준 1의 data합} - \text{수준 0의 data합})^2}{8} \quad (1)$$

한편, Fig. 3에서 제습량을 기준으로 1차적으로 분산 분석하면 인자 A, B, F 분산이 오차 분산보다 적게 나타나므로, 이들을 오차 항에 풀링(pooling)시킬 수 있다. 따라서 이렇게 풀링하면 Table 3과 같은 분산분석표를 얻을 수 있다.

Table 3에서 인자 C, D가 제습량에 유의하고, 인자 G는 유의하지 않으나 무시할 수 있는 인자로 간주할 수 없다.

Table 3. Analysis of variance table by orthogonal arrays L8(27)

Factor	S	$\phi$	V	F <sub>0</sub>	F (0.05)	$\rho$ (%)
C	34063	1	34063	17.332*	7.71	39.2
D	27319	1	27319	13.901*	7.71	30.9
G	12417	1	12417	6.318	7.71	12.8
e	7861	4	1965.3	-		17.1
Sum	81660	7	-	-		100.0

\* Significant at 5 percentage

일반적으로 유의하다고 판단되는 인자에 대한 기여율( $\rho$ )은 식(2)로써 구할 수가 있다.

$$\rho_{\text{인자}} = \frac{S_{\text{인자}} - \phi_{\text{인자}} \cdot V_e}{S_T} \times 100[\%] \quad (2)$$

여기서,  $V_e$ 는 오차의 분산이며  $S_T$ 는 변동의 총합이다.

따라서 식(2)를 이용하여 기여율을 계산한 결과, 전열교환기의 성능에 유의한 영향을 미치는 인자들 중 인자 C(LiCl용액의 농도)의 기여율이 39.2%로 가장 높았으며, 인자 G(LiCl용액 온도)가 30.9%, 그리고 인자 D(도입공기의 풍량)가 12.8%의 순으로 기여율을 나타내었다.

그러나, 인자 A(충진층의 높이) 및 인자 B(충진재의 종류), 그리고 인자 F(LiCl용액의 유량)는 전열교환기의 성능에 유의한 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 특히, 인자 A가 유의하지 않는 것은 과거의 연구에 의해서 전열교환기의 크기가 콤팩트하여 충진층의 높이 변화가 그다지 크지 않았기 때문으로 사료된다. 또한 이번 실험에 사용된 두 충진재는 직경 크기에서 그다지 차이가 나지 않아서 제습 성능에 미치는 영향이 비슷하였기 때문에 인자 B가 유의하지 않았다고 사료된다.

한편, 유의하다고 판단되는 인자의 요인효과 추정을 Fig. 4~6에 나타내었다.

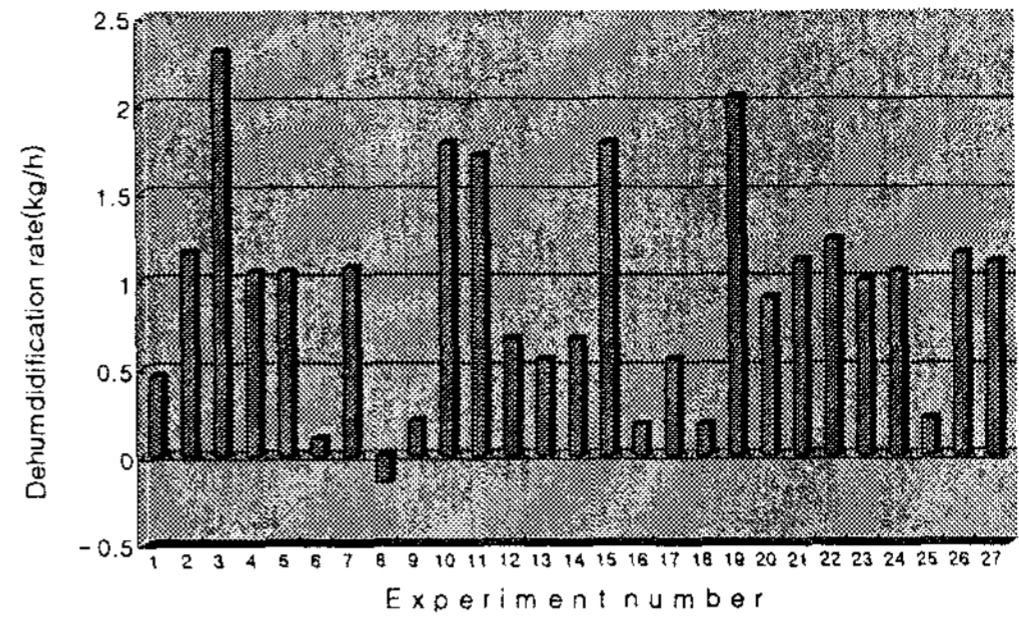


Fig. 4. Dehumidification rate on each condition

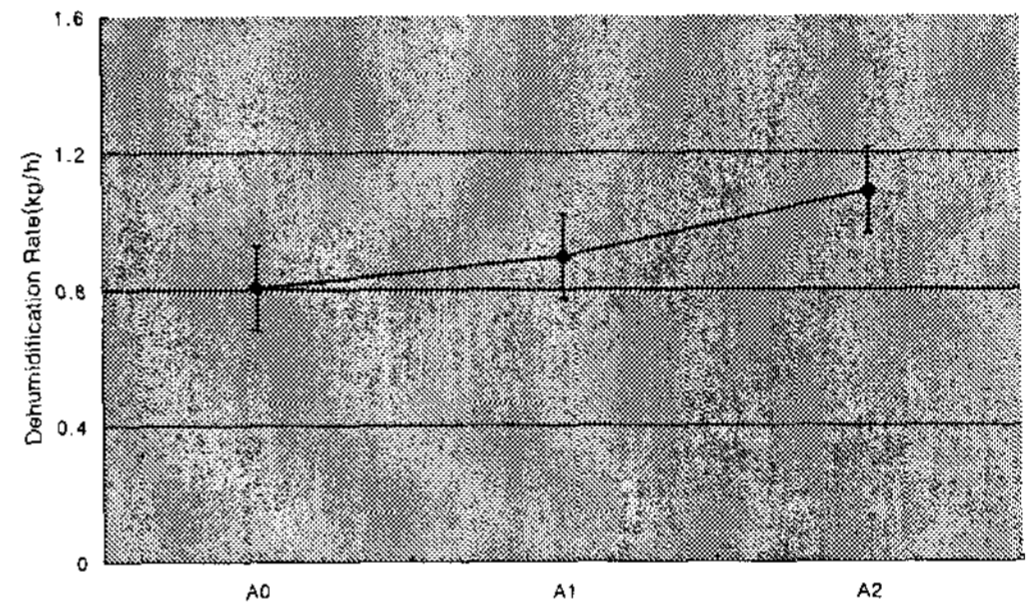


Fig. 5. Source effect of factor A

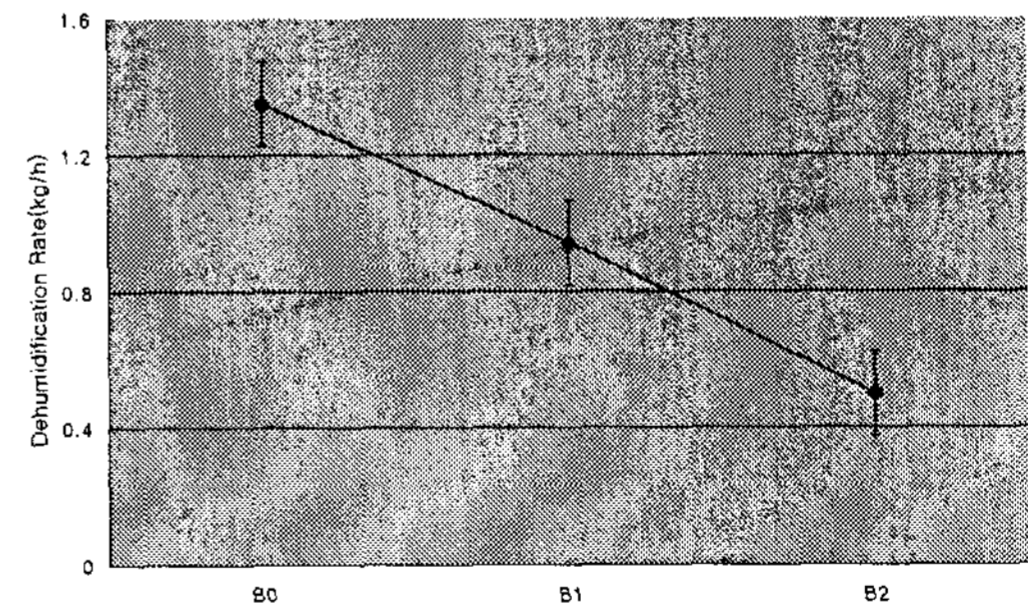


Fig. 6. Source effect of factor B

이러한 결과로부터 향후 인자를 더 넓은 범위의 3인자 혹은 4인자 실험으로부터 제습량을 가장 많이 얻을 수 있는 최적조건의 범위를 구할 수 있다고 사료된다.

(3수준의 이야기를 전개하여야 한다.)

또한 전열교환기 운전 시 최대의 제습 성능을 발휘하는 인자들의 최적 조합을 선정하기 위하여

Table 4. Level of factors

Factor \ Level	Symbol	Level 0	Level 1	Level 2
LiCl concentration(wt%)	A	25	27.5	30
LiCl temperature(°C)	B	15	20	25
Inlet air temperature(°C)	C	26	28	30
Inlet air humidity(R.H%)	D	50	60	70
Solution flow rate(ℓ/min)	F	10	15	20
Air volume (m <sup>3</sup> /h)	G	100	175	250

L<sub>27</sub>(3<sup>13</sup>) 직교배열표를 사용한 3수준 실험을 행하였다. Table 4은 3수준 실험의 인자 수준을 나타내고 있다.

### 3.2. 3수준 실험 결과

2수준 실험을 토대로 유의하지 않는 장치의 외적인 인자 즉, 충전층 높이와 충전재 종류는 3수준 실험에서 제외하고, 대신에 도입공기의 온도 및 습도, 두 가지 인자를 추가하여 전열교환기의 운전 시 최적 성능을 발휘하는 인자의 조합을 파악하였다.

3수준 실험에 의한 각 조건별 제습량을 Fig. 4에 나타내었다.

Table 5는 3수준 실험에 대한 분산분석 결과를 나타내고 있다.

Table 5. Analysis of variance table

Factor	S	Φ	V	F <sub>0</sub>	F(0.05)
A	0.38	2	0.19	6.08*	3.63
B	3.25	2	1.63	52*	3.63
C	2	2	1.00	32*	3.63
D	2.42	2	1.21	32*	3.63
G	1.61	2	0.81	32*	3.63
e	0.5	16	0.03	-	-
Sum	10.16	26	-	-	-

Table 5의 결과에서와 같이, 2수준 실험과 동일하게 LiCl유량은 전열교환기의 성능에 크게 영향을 주지 못하였다. 따라서 LiCl유량을 증대시켜 제습량을 많게 하려는 것은 그다지 효과를 거두지 못한다는 사실을 알 수 있다.

한편, 전열교환기의 성능에 유의한 인자 A(LiCl용액 농도), B(LiCl용액 온도), C(도입공기 온도), D(도입공기 습도), G(도입공기 풍량)의 요인효과도(Degree of source effect)를 Fig. 5~ Fig. 9에 나타내었다.

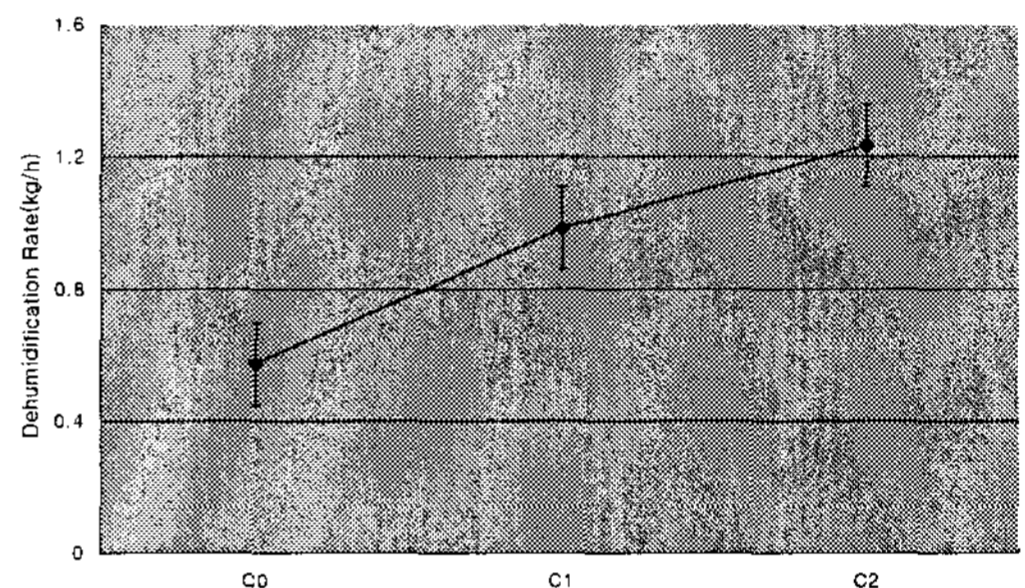


Fig. 7. Source effect of factor C

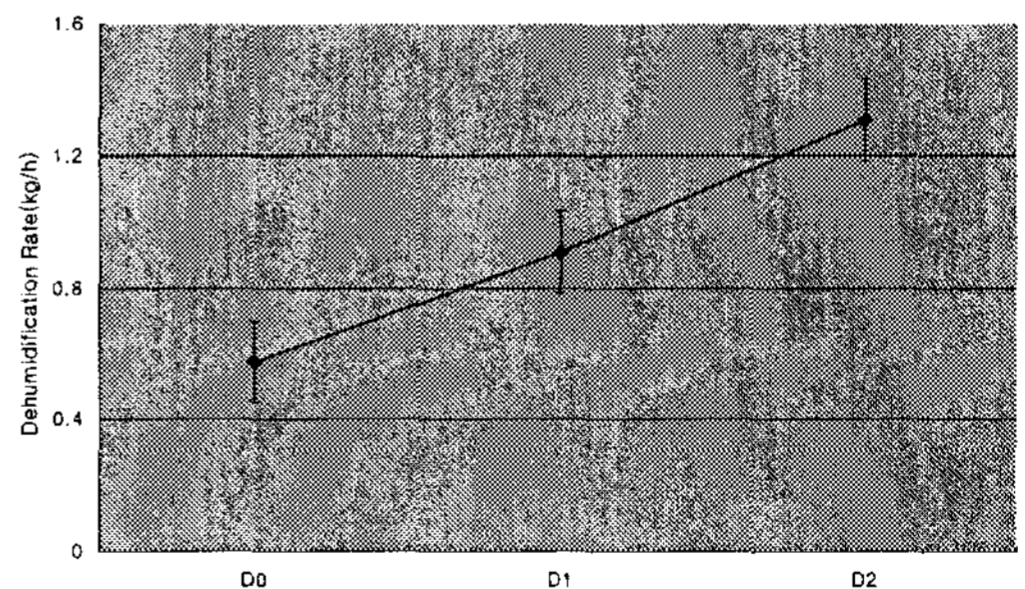


Fig. 8. Source effect of factor D

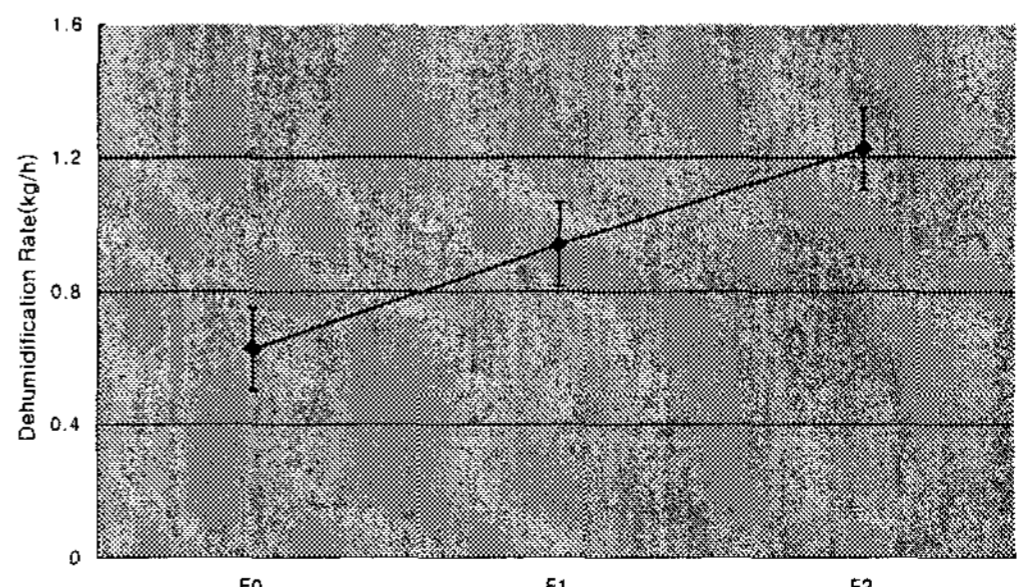


Fig. 9. Source effect of factor G

각 인자들의 요인효과도를 보아서 알 수 있듯이 LiCl용액 농도(인자 A)가 높을수록 제습량이 많았으며, 이와 반대로 LiCl의 온도(인자 B)는 낮을수록 제습량이 많았다. 또한 도입공기 온도(인자 C)와 도입공기 상대습도(인자 D)는 그 값이 클수록 도입공기의 절대습도가 LiCl용액의 절대습도에 비해 상대적으로 높아 제습량이 많이 발생함을 알 수 있었다. 또한 도입공기의 풍량(인자 G)는 캐리오버(carry-over)를 발생하지 않는 한도 내에서는 당연히 풍량이 증가할수록 제습량은 증가함을 알 수 있었다.

그러나, 최대의 성능을 발휘하는 최적 인자 조합 선정시, 인자 C(도입공기 온도), 인자 D(도입공기 습도)는 임의로 설정할 수 있는 조건이 아니므로 인자 A, B, G로 한정하여 설정하였다.

따라서 본 전열교환기의 최적 운전 조건은  $A_2B_0G_2$ 로 용액 농도 30%(인자 A), 용액 온도  $15^\circ\text{C}$ (인자 B), 풍량  $250\text{m}^3/\text{h}$ (인자 D)의 조합이며, 최적 인자 조합시의 모평균을 추정한 결과, 제습량이  $2.73 \pm 0.19\text{kg/h}$ 임을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

태양열 이용 냉난방공조시스템 중 전열교환기의 제습 성능에 영향을 미치는 인자들 중, 전열교환기의 형태요소인 계수인자와 운전인자인 계량인자에 대하여 실험계획법 중 최소의 실험 회수로 최대의 정보를 획득할 수 있는 직교배열표를 사용하여 실험하고 이를 분산분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 실험장치의 실험조건에서 교호작용이 없다고 가정한 6인자 2수준의 실험에서 주효과를 검토하였을 때 제습성능에 가장 크게 영향을 미치는 인자는 용액농도이고 기여율은 39.2%였다.
- (2) 용액농도외에 제습성능에 영향을 미치는 인

자는 용액온도, 풍량의 순이었다.

- (3) 본 실험조건에 있어서 전열교환기 외적요소인 충전층의 높이와 충전재의 종류의 영향은 거의 없었고, 운전요소중 용액 유량의 영향도 거의 없음을 알 수 있었다.
- (1)  $L_8(2^7)$ 직교배열표를 사용한 2수준 실험 결과, 전열교환기의 제습성능에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 LiCl용액 농도였으며 그 기여율은 39.2%였다.
- (2) 전열교환기의 외적 요소인 충전층 높이와 충전재 종류가 제습성능에 미치는 영향은 없었으며 또한 운전 요소인 LiCl용액 유량의 영향도 없었다.
- (3)  $L_{27}(3^{13})$ 직교배열표를 사용한 3수준 실험을 통하여 전열교환기의 최적 인자 조합은  $A_2B_0G_2$ 로 용액 농도 30%(인자 A), 용액 온도  $15^\circ\text{C}$ (인자 B), 풍량  $250\text{m}^3/\text{h}$ (인자 D)일 때였다.
- (4) 최적 인자 조합시의 모평균을 추정한 결과 제습량은  $2.73 \pm 0.19\text{kg/h}$ 임을 알 수 있었다.

#### 5. 향후 연구방향

본 실험을 토대로 3수준 혹은 4수준의 수준수를 증가시켜 전열교환기의 운전에 있어서 최적의 제습성능을 발휘할 수 있는 인자의 조합 즉 최적 수준의 조합을 파악하고자 한다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 산하 에너지 자원 기술 지원 센터의 연구비 지원(연구과제 고유번호: 961A201316AG1)에 의해 이루어졌으며 이에 감사사를 드린다. 또한 참여해 주신 (주)삼성물산과

(주)신성이엔지의 협조에도 감사를 드린다.

### 참 고 문 헌

1. K.H.Choi, 1993, "Research on open cycle solar absorption system for low temperature dehumidifying and drying", Doctor paper.
2. 驚尾泰候, 1995, "實驗計画法 入門", 日本規格協會
3. 谷津 進, 1997, "實驗の計劃と解析 基礎編", 日本規格協會
4. 早川 , 1992, "現代人の統計 實驗計画法の基礎", 朝倉書店]
5. 박성현, 1996, 현대실험계획법, 민영사