

[논문] 한국태양에너지학회 논문집  
*Journal of the Korean Solar Energy Society*  
Vol. 22, No. 1, 2002

# 여름철 냉방/제습시스템 중 태양열 온수기를 적용할 수 있는 액체흡수제의 재생성능에 관한 연구

(실험계획법에 의한 요인효과 분석에 관하여)

최광환\* · 김보철\*\* · 김영진\*

\* 부경대학교 기계공학부

\*\* 한국건설기술연구원 건축연구부

**Study on the Regenerating Performance of Liquid  
Desiccant in the Cooling/Dehumidification System  
able to use a Solar Water Heater in Summer**  
(On the Analysis of Source Effect by the Design of Experiments)

K.H.Choi\*, B.C.Kim\*\*, B.J.Kim\*

\* *Dept. of Refrigeration & Air-conditioning Engineering, Pukyong National University*

\*\* *Korea Institute of Construction Technology, Building Research Division*

## Abstract

With the possibility of hot water being able to be used as a heating source in a liquid desiccant system, an experimental apparatus for regeneration of the liquid desiccant was set up and series of experiments were conducted in a climate-controlled chamber. This study was performed to ascertain the influences of experimental factors on regenerating performance and to suggest the optimal combination of factors affecting regeneration rate. Furthermore, in order to figure out the contribution ratio of the factors on regenerating performance, a multi-way factorial design among the design of experiments was adopted. According to experimental results, the most influential factor on regenerating performance was temperature of the liquid desiccant and its contribution ratio was about 79.4%. In addition, the optimal operating combination was as follows: 60°C of solution temperature, 14ℓ/min of solution flow rate, and 190m<sup>3</sup>/h of air volume.

■ 기호 설명 ■

f	: 자유도	[%]
F <sub>0</sub>	: 분산비	[-]
S	: 변동	[-]
V	: 분산	[-]
ρ	: 기여율	[%]

1. 서론

우리 나라와 같이 고온 다습한 지역에서는 외기 온도가 그다지 높지 않더라도 습도가 높으면 무덥게 느껴지며, 실제로 습도에 의한 잠열을 제거하는데 많은 에너지가 소요된다. 따라서, 엄밀한 습도조절이 요구되는 특수공간을 제외한 일반 공조시스템의 경우, 온도만을 조절 대상으로 하고 있는 실정이다. 그러므로 주택뿐 아니라, 사무실 및 복합상가 등과 같이 바닥면적이 큰 주거 공간에서는 공기 중의 습도만 약간 낮추어도 실내의 쾌적성 및 작업 효율을 향상시킬 수 있는데, 이러한 쾌적한 실내공간을 제공하기 위해서는 우선 잠열부하를 처리하여야 한다.

그러나, 기존의 공조장치를 사용하는 경우 장치의 기계적 한계 때문에 에너지 사용 효율이 떨어져 많은 개선의 여지를 남기고 있다. 따라서 이 방식 대신에 액체흡수제(liquid desiccant)를 이용하여 잠열부하를 처리하는 제습방식이 많이 사용되고 있다.

실제로 여름의 경우, 공기 중의 잠열을 제거하고 나면 소동력의 장치로도 공기온도를 쉽게 조절할 수 있다. 이 때 잠열부하를 처리함에 있어, 기존의 전기에너지를 사용하는 방법 대신에 가능한 자연에너지 및 재생가능에너지(renewable energy)를 사용하려는 방안이 강구되고 있다. 그 결과, 최근에는 이러한 자연에너지를 사용하여 잠열부하를 경감시키려는 새로운 제습/냉방시스템 개발

이 한창이다.

1.1 제안시스템의 개요

이러한 목적에서 본 연구자가 제안하고 개발한 '태양열 이용 냉난방 공조시스템'을 실험실 실험동으로 설치하여 3년간 시범 운전한 결과, 시스템에 적용 가능한 충분한 효율을 얻었다. 그러나 재생기의 초기투자비가 너무 높아서 실용화에 큰 어려움을 겪고 있기 때문에, 이 시스템에 현재 상용화되어 있는 태양열 온수기를 연계하여 잠열부하를 경감시킬 수 있는 새로운 시스템을 제안하였다. Fig. 1에 그 제안시스템이 나타나 있다.

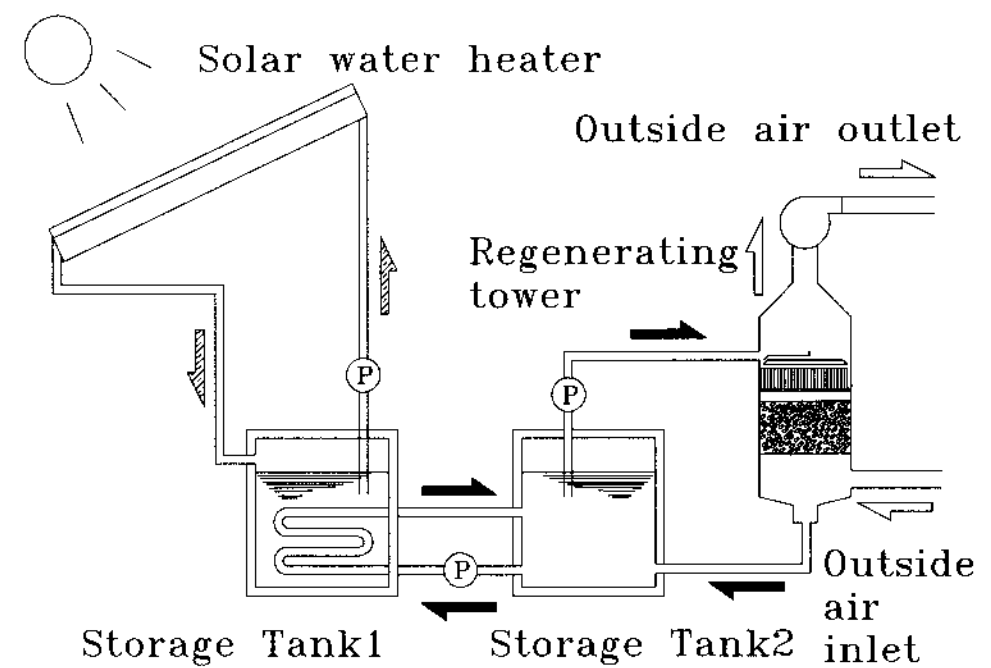


Fig. 1 The schematic of a proposed system

Fig. 1의 제안시스템을 간단히 설명하면, 태양열 온수기에서 생성되는 온수를 저장탱크1에 저장하여 액체흡수제인 염화리튬(lithium chloride) 수용액과 열교환시킨 후, 저장탱크 2로 보낸다. 저장탱크 2로 보내진 고온의 염화리튬용액을 다시 재생탑(regenerating tower)으로 보내어 충전층(packed layer)에서 외부로부터 도입된 공기와 접촉시켜 수분을 증발시킨다. 이 과정을 재생과정이라 하는데, 재생과정을 반복함으로써 액체흡수제에 포함되어 있는 수분이 공기 중으로 증발하여 액체흡수제는 저농도에서 고농도 용액으로 바뀐다.

한편, Fig. 1에 도시되지 않았지만 제습냉방을 위해서는 별도의 제습기(제습탑)가 필요하며, 이 제습기에서 재생과정에서 만들어진 고농도의 액체흡수제가 습한 공기와 접촉을 함으로써, 고습한 공기 중의 수분을 흡수하여 잠열을 제거하는 제습 작용을 하게 된다.

본 실험으로부터 태양열 온수기의 온수가 액체흡수제의 재생열원으로 적용 가능하다는 결과를 얻을 수 있다면, 주로 겨울에 한시적으로만 사용되고 있는 태양열 온수기를 여름에도 제습/냉방 시스템에 이용할 수 있게 되어 매우 효율적인 시스템 구성이 가능하게 된다.

## 1.2 연구목적

제안시스템은 상술한 액체흡수제의 특성을 이용하여 잠열부하를 연속적으로 경감시키는데, 제습기에서 수분을 다량 흡수한 액체흡수제는 더 이상 공기 중의 수분을 흡수할 수 없게 되며, 이 액체흡수제가 다시 흡습력을 갖게 하기 위해서는 반대로 액체흡수제 중에 포함되어 있는 수분을 방출해야 한다. 이 때 재생열원이 필요하며, 본 연구에서는 태양열 온수기에서 얻어진 온수를 재생열원으로 사용하고자 한다.

그러므로 현재 국내에 많이 보급, 상용화되어 있는 태양열 온수기를 여름철 가동시켜 생성된 온수를 '태양열 이용 냉난방 공조시스템'에서 가장 중요한 액체흡수제 재생을 담당하는 재생열원으로 대체할 수 있는 새로운 재생탑을 제안, 개발할 필요가 있으며, 또한 그 적용 가능성을 검토할 필요가 있다.

따라서 시스템을 실제로 적용하였을 경우, 먼저 재생탑 내에서 재생량에 영향을 미치는 많은 인자들의 원인을 규명할 필요가 있다. 즉, 어떠한 요인이 제습량에 유의한 영향을 주고 있는가 혹은 그렇지 않은가를 파악하고, 그 영향이 양적으로 어느 정도이며, 또한 측정오차가 어느 정도이며, 유의(有意)한 영향을 미치는 인자들이 어떠한 조

합에서 가장 바람직한 결과를 가져다 줄 것인가를 조사할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 재생탑 운전에 관련된 인자들에 관해서 실험계획법(design of experiments) 중 다원배치법(multi-way factorial design)의 삼원배치법(three-way factorial design)을 사용하여 실험을 계획, 실시하여 요인들의 영향을 분석하기로 하였다. 이러한 실험 결과로부터 특성치인 재생량에 영향을 크게 미치는 인자를 선별하여 재생량에 미치는 기여율을 파악함으로써 재생탑 운전 시, 최대의 재생량을 발휘하는 최적 운전조건을 제시하는데 본 연구의 목적이 있다.

## 1.3 연구동향

본 연구와 관련하여 1955년 미국 Pennington이 회전식 건조장치와 열교환 장치, 그리고 흡수열뿐만 아니라 잠열도 제거하는 이중재생 증발냉각기를 부착한 냉각시스템으로 특허를 얻었으며, 같은 연도에 Löf는 액체흡수제로 트리에틸렌 글리콜을 사용하는 태양열 이용 냉각시스템을 제안하였다.

1965년 호주의 Dunkle은 열원으로 태양열을 이용하는 개방형 사이클 공조방식을 제안하였다. 이 방식은 크게 태양열 집열판과 쇠석형 타입인 에너지 저장장치로 시스템이 구성되어 있으며, 적용할 수 있는 지역도 아열대로 국한되었다.

그러나 Löf와 Dunkle이 제안한 두 시스템 모두 실용화에 이르지 못하는 못하였다.

반면에 Baum이 제안한 액체흡수제 이용 자연형 냉각시스템은 1960년대 러시아의 투케메니아에 있는 아파트 단지내의 한 소규모 가정에 실제로 적용되었다. 이 시스템은 최적 운전 조건을 위해서 불포화 공기가 반드시 필요하므로 저온 저습한 지역에서는 비교적 작동이 잘 되나, 우리나라와 같이 고온 다습한 지역에서는 적용이 매우 어렵다.

1970년대 초 에너지 소비가 급증한 이후, 미국의 Rush는 태양열을 이용하는 건조제 공조기를 다시 설계하여 개발하기에 이르렀다. 이 시스템은 태양열에 의해 재생된 농축액을 습공기와 직접 접촉시켜 제공하는 방식을 채택하고 있으나, 제습효율이 너무 낮고 또 건조된 공기의 온도가 너무 높기 때문에 실내로 직접 유입하여 사용하기가 어려웠다.

일본에서는 1980년대에 Matsuki가 Rush의 방법과 원리가 비슷한 proto-type 고체식 건조장치를 개발하였으며, 같은 연도에 Tanaka는 개방형 사이클인 태양열 이용 냉각시스템을 제안하였다. 또한 Saito는 이중층을 가진 실리카겔을 사용하는 passive 가열/냉각시스템을 제안하였으며, 개방형 사이클의 일종으로 실리카겔을 사용하는 태양열 흡수 passive 냉각시스템에 관한 일련의 실험이 Kimura에 의해 수행되었다. 그러나 위의 모든 시스템에 있어서 건조제인 실리카겔을 재생하기 위해서 태양열로부터 얻을 수 있는 온도 레벨보다 더 높은 고온이 필요하기 때문에 실용화에 이르지 못하였다.

이러한 차원에서 볼 때, 현열을 제거하는 밀폐형 사이클과 잠열을 제거하는 개방형 사이클을 모두 갖는 하이브리드(hybrid) 방식이 가장 이상적인 공조시스템으로 받아들여진다. 그러나 개방형 사이클 건조장치는 태양열에 의해 가열된 공기온도가 최소한 60~80°C가 되어야만 효과가 있는 것으로 알려져 있기 때문에, 기존의 열원 대신에 태양열을 이용하여 냉방장치를 가동하는 자연에너지 이용 하이브리드 공조시스템의 개발은 아직까지도 성공적이지 못한 상태이다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

본 연구를 위하여 사용된 실험장치의 개략도를

Fig. 2에 나타낸다.

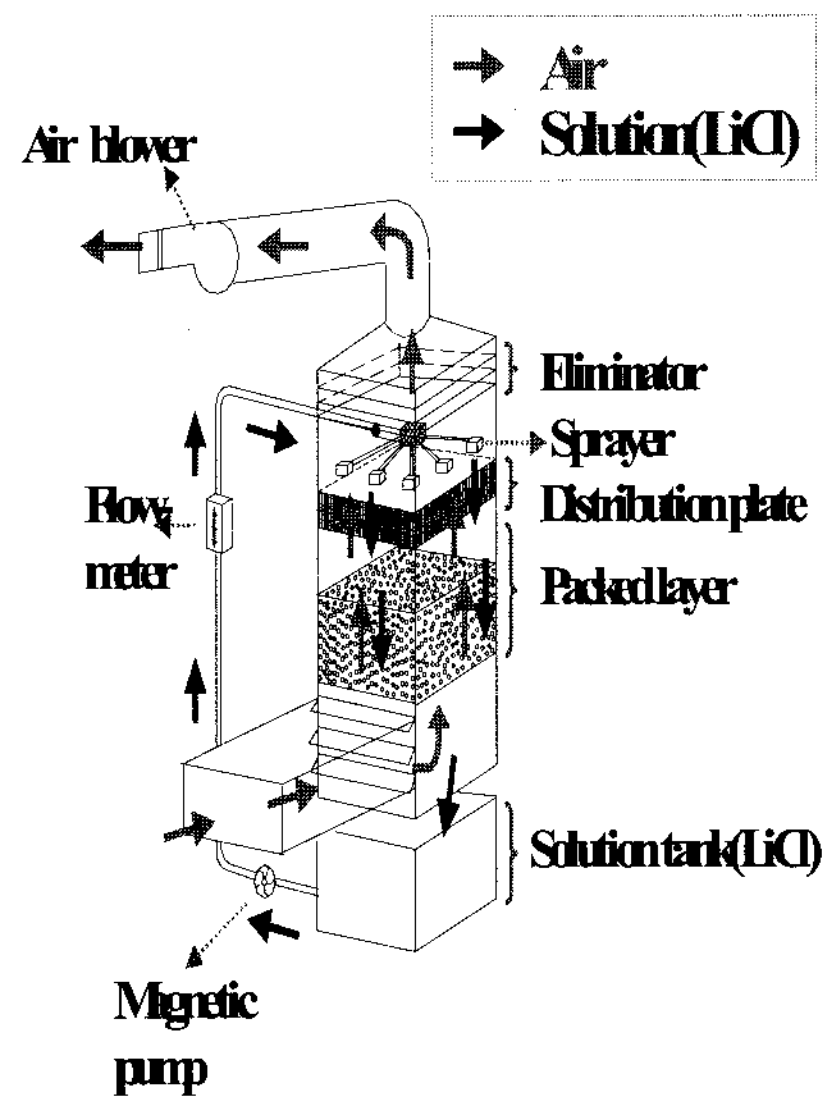


Fig. 2 The schematic of an experimental apparatus

실험에 앞서 재생탑에서 재생량에 영향을 미치는 요소로 액체흡수제의 온도, 유량, 그리고 도입 공기의 온도, 습도 및 풍량을 규정하였다. 그리고 부경대학교 건축환경설비연구실내의 항온항습실에서 이러한 요소들을 인위적으로 조절, 실험조건을 바꾸어 가면서 실험을 수행하였다.

실험장치는 공기와 액체흡수제 사이에서 전열교환이 일어나는 충전층, 용액과 공기의 흐름을 분리시켜 액적발생을 억제시키는 기액분리판, 용액을 충전층 상부에 균일하게 분사시키는 분배기(distributor), 용액의 비말현상을 방지하기 위한 엘리미네이터(eliminator), 순환용 용액탱크, 배기용 휠(fan), 용액공급용 마그네틱 펌프(magnetic pump), 유량 및 풍량 제어를 위하여 펌프의 회전수를 조절하는 인버터(inverter)와 유량계, 액체흡수제의 농도 변화를 측정하는 초음파 농도측정기, 그리고 데이터를 측정하고 처리하기 위한 데이터 집록장치와 컴퓨터로 구성되어 있다.

재생탑의 크기는 실제로 현장에 적용될 것을

고려하여 총 높이가 약 1.0m, 폭 0.5m, 너비 0.5m 정도로 compact하게 제작하였다. Table 1은 본 실험에 사용된 측정기기의 목록을 나타내고 있다.

**Table 1.** Measuring equipments

Measuring Equipments	Measuring Items
Thermo-couple (Ψ0.2)	Temperature
Beam 1000 (Japan)	Temperature Relative humidity
ClimoMaster, KANOMAX (Japan)	Air velocity
FUD-1, FuJi Ultrasonic Eng. (Japan)	L i q u i d concentration
NetDAQ, FLUKE (U.S.A)	Data acquisition
Flex-tube, Dwyer (U.S.A)	Air pressure

### 3.2 실험방법

본 연구는 재생탑 운전과 관련된 인자들에 관해서 실험계획법 중 다원배치법의 삼원배치법을 사용하여 실험을 계획, 실시하여 요인들의 영향을 분석하였다.

다원배치법의 경우, 인자의 수가 늘어나면 실험의 회수가 급격히 증가하게 된다. 또한, 실험회수가 많아지면 실험의 랜덤화(randomization)가 어려워지고 비용도 많이 들며, 실험 전체를 관리 상태 하에서 수행하는데 여러 가지 어려움이 따른다. 따라서, 실험에 취급된 인자의 수가 많아지면 많아질수록 인자에 대한 충분한 기술적 검토가 필요하며, 불필요한 인자라고 판단되면 과감히 인자의 수를 줄여 실험을 효과적으로 수행해 나가려는 노력이 필요하다.

통상 인자수가 많은 실험의 경우, 직교배열표(Table of Orthogonal Arrays)를 사용하여 실험을 행하는 것이 일반적이다. 하지만, 인자의 수준수가 적거나 비교적 간단하게 많은 실험을 할

수 있는 경우에는 모든 조건의 조합에서 실험을 행하여 그 결과를 파악하는 다원배치실험을 통해서 모든 인자간의 상호작용도 파악 가능하고 오차의 자유도를 크게 할 수 있어 정도(精度)가 높은 실험 결과를 기대할 수 있다.

**Table 2.** Experimental Conditions

Items	Experimental conditions
Inlet air temperature, relative humidity	30 °C, 50%
Inlet air flow rate	100, 145, 190m <sup>3</sup> /h
supply liquid temperature	40, 50, 60°C
liquid flow rate	6, 10, 14 l/min
packed layer height	0.3m

실험은 작동유체로 사용되는 염화리튬용액 농도를 25w.t%, 도입공기의 온도 및 습도는 각각 30°C, 50%상태로 유지시킨 상태에서, 용액의 온도를 40°C, 50°C, 60°C, 유량을 6 l/min, 10 l/min, 14 l/min, 그리고 풍량을 100m<sup>3</sup>/h, 145m<sup>3</sup>/h, 190m<sup>3</sup>/h로 변화시켜가면서 각각의 인자들이 재생량에 미치는 영향력을 통계적으로 파악하기 위하여, 실험계획법에 따라 실험조건, 실험순서, 실험의 수준 등을 먼저 결정하였다.

Table 2에 이상의 실험조건들을 정리하여 나타내었다.

### 4. 실험결과 및 고찰

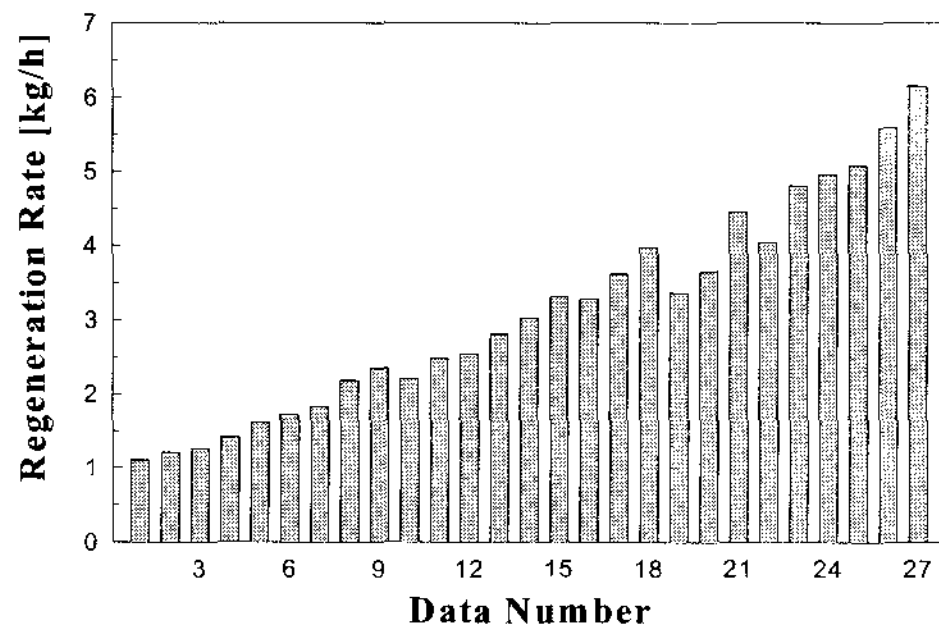
본 실험은 실험계획법에 따라 실험조건, 실험순서, 실험의 수준 등을 미리 선정한 후, 실험조건을 무작위로 추출하여 수행하였다.

Table 3은 실험결과값인 재생량을 삼원배치법에 따라 정리한 결과로, 편의상 각 결과값에 임의로 번호를 부여하였다.

**Table 3.** Experimental results based on the 3-way factorial design

		Solution temperature(°C)			
		A <sub>1</sub> (40)	A <sub>2</sub> (50)	A <sub>3</sub> (60)	
Solution flow rate (LPM)	B <sub>1</sub> (6)	C <sub>1</sub> (100)	1.1(1)	2.2(2)	3.4(3)
		C <sub>2</sub> (145)	1.4(4)	2.8(5)	4.0(6)
		C <sub>3</sub> (190)	1.5(7)	2.8(8)	5.1(9)
	B <sub>2</sub> (10)	C <sub>1</sub> (100)	1.2(10)	2.5(11)	4.0(12)
		C <sub>2</sub> (145)	1.6(13)	3.0(14)	4.8(15)
		C <sub>3</sub> (190)	2.2(16)	3.6(17)	5.6(18)
	B <sub>3</sub> (14)	C <sub>1</sub> (100)	1.3(19)	2.5(20)	4.4(21)
		C <sub>2</sub> (145)	1.7(22)	3.3(23)	5.0(24)
		C <sub>3</sub> (190)	2.4(25)	4.0(26)	6.2(27)

Fig. 3은 각 조건의 실험으로부터 얻어진 재생량 결과를 그래프로 나타낸 것이다.



**Fig. 3** Regeneration rate of each condition

그리고 Table 4에 인자 A인 용액온도와 인자 B인 용액유량의 이원표를 나타내었다.

**Table 4.** Table of factor A(solution temperature) and B(flow rate)

TAiBj	B1	B2	B3	TAi
A1	4.0	5.0	5.4	14.4
A2	7.8	9.1	9.8	26.7
A3	12.5	14.4	15.6	42.5
TBj	24.3	28.5	30.8	83.6

또한, 인자 B인 용액유량과 인자 C인 공기 풍량의 이원표가 Table 5에 나타나 있다.

**Table 5.** Table of factor B (flow rate) and C (air volume)

T <sub>Bjck</sub>	C1	C2	C3	T <sub>Bj</sub>
B1	6.7	8.2	9.4	24.3
B2	7.7	9.4	11.4	28.5
B3	8.2	10.0	12.6	30.8
T <sub>ck</sub>	22.6	27.6	33.4	83.6

Table 6은 인자 C인 공기풍량과 인자 A인 용액온도의 이원표를 나타내고 있다.

**Table 6.** Table of factor C (air volume) and A (solution temperature)

TCkAi	A1	A2	A3	T <sub>ck</sub>
C <sub>1</sub>	3.6	7.2	11.8	22.6
C <sub>2</sub>	4.7	9.1	13.8	27.6
C <sub>3</sub>	6.1	10.4	16.9	33.4
T <sub>ai</sub>	14.4	26.7	42.5	83.6

본 실험은 실험계획법에 따라 실험조건, 실험순서, 실험의 수준 등을 미리 선정하여 행해졌다. 그리고, 해석에는 분산분석법(analysis of variance)을 이용하여 유의(有意)하다고 판단되는 인자의 주효과와 재생량에 미치는 기여율을 실험결과로부터 얻었다.

본 실험에서 유의한 인자인 용액온도 A의 요인효과도를 Fig. 4에 나타내고 있다.

또한, 유의한 인자가 용액온도 A 하나이므로 최적조건은 A<sub>3</sub>이 되며, 최적조건에서의 모평균은 식(1)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.



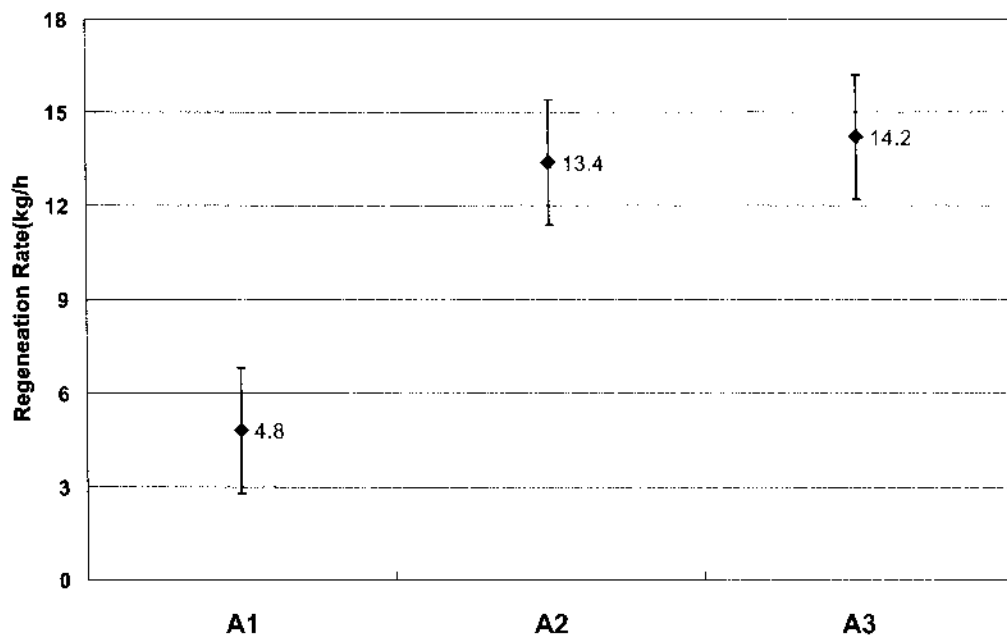


Fig. 4 Source effect of factor A

$$\mu(A_i) = (\text{각 수준의 평균치}) \pm t(f_e, 0.05) \sqrt{\frac{V_e}{bc}} \quad (1)$$

여기서,  $t(f_e, 0.05)$ 는 t-분포표에서 신뢰구간 95%일 때의 해당 값이다.

상기의 실험 및 분석결과를 통하여 본 연구에서 수행한 실험조건 내에서의 최적조건은 Table 3의 A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>(용액온도 60°C, 용액유량이 14 l/min, 풍량 190m<sup>3</sup>/h)임을 알 수 있다.

분산분석을 통하여, 유의하지 않은 인자들은 오차항으로 풀링(pooling)하여 Table 7과 같은 분산분석표를 작성하였다.

Table 7. Analysis of variance

Factor	S	f	V	F0	ρ(%)
A	44	2	22	1760→51.2*	79.4%
B	2.4	2	1.2	-	
C	6.4	2	3.2	-	
A×B	0.3	4	0.075	-	
A×C	0.8	4	0.2	-	
B×C	0.3	4	0.075	-	
e	0.1	8	0.0125	-	
e'	10.3	24	0.43	-	20.6
T	54.3	26	2.1		100

여기서, 각 인자가 재생량에 미치는 기여율은 식(2)를 사용하여 구하였다.

$$\rho = \frac{S - f \cdot V_e}{S_T} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

본 실험조건에 있어서 재생성능에 가장 영향을 미치는 인자는 용액온도로, 식(2)를 이용하여 그 기여율을 구한 결과, 약 79.4%였다. 또한 본 실험조건에서는 인자들의 상호작용에 의한 영향은 없었으며, 주인자 중에서도 유량 B와 풍량 C는 유의수준 5%에서 결과치인 재생량에 유의한 영향을 미치지 못한다는 사실을 알 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구는 재생탑의 운전에 관련된 인자들 중, 액체흡수제의 용액온도, 유량, 그리고 풍량 인자에 관해서 실험계획법 중, 다원배치법의 삼원배치법을 사용하여 실험을 계획, 실시하여 요인들의 영향을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 인자 중 결과치인 재생성능에 미치는 기여율은 용액온도가 가장 크며, 그 값은 약 79.4%였다.
2. 본 실험에서는 각 인자간의 상호작용에 의한 영향은 없는 것으로 나타났다.
3. 용액의 유량과 공기의 풍량은 유의수준 5% 범위에서는 재생량에 영향을 미치지 못하였다.
4. 본 실험에서 얻어진 결과를 분석한 결과, A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub> 즉, 용액온도 60°C, 용액유량 14 l/min, 그리고 풍량이 190m<sup>3</sup>/h일 때의 운전조건이 가장 최적인 것으로 나타났다.

## 후 기

본 논문을 위해 장치 제작에서 본 실험 그리고 논문의 마무리까지 많은 노력과 수고를 아끼지 않은 부경대학교 냉동공조공학과 김종율군과 학부생 김동은, 이동우군에게 지면을 빌어 심심한 감사의 뜻을 전한다.

## 참 고 문 헌

1. 최광환, 1999, "태양열 이용 냉난방 공조 시스템 개발에 관한 최종보고서", 산업자원부
2. Bo-cheol Kim, 1999, "Study on the performance of regenerator in solar air conditioning systems", Ph.D. thesis, Pukyong National University
3. 박성현, 1998, "현대 실험계획법", 민영사, pp.177~209
4. 鷺尾泰俊, 1995, "實驗計画法入門", 日本規格協會, pp.102~106
5. 谷津 進, 1991, "すぐに役立つ實驗の計劃と解析", 日本規格協會, pp.9~14
6. 早川, 1992, "現代人の統計-實驗計画法の基礎", 朝倉書庫, pp.192~205