공학박사 학위논문

태양열 이용 제습/냉방 시스템의 최적화에 관한 연구

지도교수 최 광 환

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함

2004년 8월

부경대학교 대학원

냉동공조공학과

우 종 수

우종수의 공학박사 학위논문을 인준함

2004년 8월 31일

주 심 공학박사 오 후 규

위 원 공학박사 금 종 수

위 원 공학박사 윤 재 호

위 원 공학박사 김 영 진

위 원 공학박사 최 광 환

목 차

List of figures ····· iv

List of tables ····· vii

List of photographs ····· viii

Nomenclatures ····· ix

Abstract ····· xi

제 1 장 개 요

1.1 연구의 배경 ····· 1

1.2 종래의 연구 ····· 3

1.3 연구의 목적 ····· 7

1.4 제습장치의 종류 및 원리 ····· 9

1.4.1 고체흡착제를 이용한 제습방식 ····· 10

1.4.2 액체흡수제를 이용한 제습방식 ····· 12

1.5 제안 시스템의 개략도 ····· 16

1.6 논문의 개요 ····· 21

제 2 장 재생탑에 의한 재생실험

2.1 재생탑의 개요 ····· 24

2.2 재생탑 실험장치 제작 및 개요 ····· 25
2.2.1 충진재의 선정 ····· 27
2.2.2 분배기(distributor)의 구조 ····· 30
2.2.3 엘리미네이터(eliminator)의 구조 ····· 32
2.3 재생탑 성능 실험 방법 ····· 33
2.4 재생탑의 재생량 산출을 위한 이론 및 계산식 ····· 40
2.5 재생탑 성능 실험 결과 ····· 42
2.5.1 충진층 높이에 따른 재생량 변화 ····· 42
2.5.2 유량 변화에 따른 재생량 변화 ····· 46
2.5.3 풍량 변화에 따른 재생량 변화 ····· 52
2.5.4 흡수제 온도에 따른 재생량 변화 ····· 58
2.6 요약 ····· 63

제 3 장 제습탑에 의한 제습실험

3.1 제습탑의 개요 ····· 65
3.2 제습탑 실험장치 제작 및 개요 ····· 66
3.3 제습탑 성능 실험 ····· 70
3.4 제습탑 성능 실험 결과 ····· 72
3.5 제습탑 운전 인자 영향에 관한 실험 ····· 80

3.5.1 직교배열표를 이용한 최적운전 인자 선정 ····· 80

3.5.2 직교배열표를 이용한 실험 결과 ····· 83

3.6 요약 ····· 90

제 4 장 태양열 이용 제습/냉방 시스템의 최적화 및 해석

4.1 최적화 기법의 개요 ····· 92

4.2 반응표면분석법의 특징 및 적용 ····· 95

4.3 반응표면분석법에 의한 재생탑 성능 실험 ····· 97

4.4 재생 성능을 위한 최적운전 조건 도출 ····· 103

4.5 요약 ····· 107

제 5 장 물질전달의 무차원 해석

5.1 대향류형 제습탑에 있어서의 물질전달 기초 이론 ····· 108

5.2 절대습도차에 의한 총괄물질전달계수($k_x a$) 산출 ····· 111

5.3 무차원 수(Re, Sh)에 의한 실험식 제안 ····· 112

5.4 요약 ····· 115

제 6 장 결론 ····· 116

참고문헌 ····· 120

감사의 글 ····· 127

List of figures

Fig. 1.1 Schematic of Kathabar system proposed ····· 14

Fig. 1.2 Schematic of new system proposed ····· 16

Fig. 2.1 Operating state in the liquid desiccant ····· 25

Fig. 2.2 Experimental schematic for regenerator ····· 27

Fig. 2.3 Packed layer material (a), (b) raschig ring,
(c) plastic packing ····· 29

Fig. 2.4 Mass transfer model between air and
desiccant flows in the tower ····· 40

Fig. 2.5 Changes in regeneration rate against packed
layer height (in case of 40℃) ····· 42

Fig. 2.6 Changes in regeneration rate against packed
layer height (in case of 50℃) ····· 44

Fig. 2.7 Changes in regeneration rate against packed
layer height (in case of 60℃) ····· 46

Fig. 2.8 Changes in regeneration rate against flow rate
(in case of 40℃) ····· 47

Fig. 2.9 Changes in regeneration rate against flow rate
(in case of 50℃) ····· 49

Fig. 2.10 Changes in regeneration rate against flow rate
(in case of 60℃) ····· 51

Fig. 2.11 Changes in regeneration rate against air flow (in case of 40℃) ····· 53

Fig. 2.12 Changes in regeneration rate against air flow (in case of 50℃) ····· 54

Fig. 2.13 Changes in regeneration rate against air flow (in case of 60℃) ····· 56

Fig. 2.14 Changes in regeneration rate against desiccant temperature (in case of 6 ℓ/min) ····· 58

Fig. 2.15 Changes in regeneration rate against desiccant temperature (in case of 10 ℓ/min) ····· 60

Fig. 2.16 Changes in regeneration rate against desiccant temperature (in case of 14 ℓ/min) ····· 62

Fig. 3.1 Experimental schematic for dehumidifier ····· 67

Fig. 3.2 Changes in dehumidification rate ($L_8(2^7)$ type) ····· 75

Fig. 3.3 Main effect of factor A (concentration of desiccant) ····· 77

Fig. 3.4 Main effect of factor B (temperature of desiccant) ····· 78

Fig. 3.5 Main effect of factor D (air volume) ····· 79

Fig. 3.6 Changes in dehumidification rate ($L_{27}(3^{13})$ type) ····· 83

Fig. 3.7 Main effect of factor A (concentration of desiccant) ····· 85

Fig. 3.8 Main effect of factor B (temperature of desiccant) ····· 86

Fig. 3.9 Main effect of factor C (temperature of inlet air) ····· 87

Fig. 3.10 Main effect of factor D (humidity of inlet air) ····· 88

Fig. 3.11 Main effect of factor G (air volume) ····· 89

Fig. 4.1 Function relation of regeneration and desiccant rate (inlet air temp. of 60℃, air volume of 190m^3/h) ····· 100

Fig. 4.2 Sensitivity analysis with respect to *W*max ····· 105

Fig. 4.3 Optimum solution when *W*max is 120 Watt ····· 106

Fig. 5.1 Model of gas-liquid boundary based on a single film theory ····· 108

Fig. 5.2 Interrelation of Re and Sh Numbers ····· 114

List of tables

Table 2.1 Measuring instrument ····· 36

Table 2.2 Experimental conditions ····· 38

Table 3.1 Levels of factor $L_8(2^7)$ ····· 72

Table 3.2 $L_8(2^7)$ Factor arrangement ····· 73

Table 3.3 Analysis table of variance $L_8(2^7)$ ····· 75

Table 3.4 Levels of factor $L_{27}(3^{13})$ ····· 80

Table 3.5 $L_{27}(3^{13})$ Factor arrangement ····· 82

Table 3.6 Analysis table of variance $L_{27}(3^{13})$ ····· 84

Table 4.1 Regeneration rate in process levels ····· 98

Table 4.2 Electricity consumption in process levels ····· 98

Table 4.3 ANOVA Table (R^2=0.988) ····· 102

Table 4.4 ANOVA Table (R^2=1.000) ····· 102

Table 4.5 Table of sensitivity analysis with respect to W_{max} ····· 104

List of photographs

Photo. 2.1 View of plastic packing material packed ····· 30

Photo. 2.2 View of distributor ····· 31

Photo. 2.3 View of eliminator ····· 32

Photo. 2.4 Data acquisition system ····· 36

Photo. 2.5 Ultra concentration meter ····· 37

Photo. 2.6 View of experimental apparatus ····· 39

Nomenclatures

Symbols

A	:	Section area of packed layer	[m^2]
a	:	Air-liquid contact area to volume of packed material	[m^2/m^3]
G	:	Air flow rate	[kg/h]
ka	:	Total heat transfer coefficient based on enthalpy	[kcal/m^2h]
k$_x$	:	Mass transfer rate	[kg/m^2]
k_xa	:	Total mass transfer coefficient based on humidity ratio	[kg/m^2h]
Lti	:	Temperature of inlet liquid	[℃]
Lto	:	Temperature of outlet liquid	[℃]
Lvi	:	Volume of inlet liquid	[m^3]
Lvo	:	Volume of outlet liquid	[m^3]
Lci	:	Concentration of inlet liquid	[w.t.%]
Lco	:	Concentration of outlet liquid	[w.t.%]
Na	:	Water absorption rate	[kg/h]
q_i	:	Inlet air volume	[kg/h]
q_o	:	Outlet air volume	[kg/h]
t_i	:	Inlet air temperature	[℃]
t_o	:	Outlet air temperature	[℃]
x_i	:	Inlet humidity ratio	[kg/kg′]
x_o	:	Outlet humidity ratio	[kg/kg′]
z		Height of packed layer	[m]
γ	:	Specific gravity	[N/m^3]

Subscripts

g : of vapor

i : of inlet

l : of liquid

o : of outlet

Dimensionless numbers

Sh : Sherwood number

Sc : Schmidt number

Re : Reynolds number

Research on the Optimization of Dehumidification/Air Conditioning System Using Solar Energy

Jong Soo Woo

Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering,
The Graduate School, Pukyong National University

Abstract

The installation of air-conditioning systems for providing a better living environment has become a common practice. As the demand for air-conditioning is greater, however, the energy consumption has also surged up, which in turn may cause an imbalance in demand and supply of electricity especially during hot summer. The development of air-conditioning systems using substitute energy sources such as wind and solar heat has drawn a particular attention in an effort to balance the demand and supply of electricity. Along this line, this study is aimed at proposing an energy-efficient air conditioning system using liquid desiccant by first investigating a variety of element

techniques required for achieving the main goal of maximizing systems performance.

The primary experimental apparatus has been set up, and then experimental data have been collected to examine the performance of individual components. The main focus of this study is laid on the regenerator and dehumidifier, which are confirmed to be among the most important components of the system. The organization of this thesis is as follows:

First, the overall introduction to this study, including research background, motivation, and objectives, is presented in Chapter 1. The experiments on the regenerator are outlined in Chapter 2, where the effects of height of packed layer materials, flow rate of liquid desiccant, and airflow on the regeneration rate are investigated. The dehumidification process is scrutinized in Chapter 3, where the solid and liquid desiccants are first compared and the optimum operating conditions of dehumidifier are examined. Based on the experimental data obtained in the

previous chapters, Chapter 4 proposes a unique approach to systems optimization, so-called response surface methodology (RSM), which has widely been recognized as an efficient means of optimization by combining the experimental design and a variety of optimization techniques. Chapter 5 provides a non-dimensional analysis of the proposed air-conditioning system using solar energy. Suggestions for improving the performances of regenerator and dehumidifier in practical situations are presented, and conclusions are drawn in the last chapter. The experimental and analytical results outlined in this thesis may be helpful when developing energy-efficient air-conditioning systems with the objective of systems optimization.

제 1 장 개 요

1.1 연구의 배경

21세기에 접어들면서 세계 각 나라는 에너지를 어떻게 안정적으로 확보하느냐하는 문제가 자국의 미래가 달려 있다고 판단하여 에너지 확보를 위해 온 힘을 다하고 있다. 이에 우리나라도 여러 가지 방법으로 에너지 확보를 위해 노력하고 있으나, 현재 우리나라의 에너지원은 대부분 석유를 비롯한 화석연료와 원자력에 의존하고 있다. 화석연료는 최근 통계자료에 의하면, 2004년 기준으로 석유의 가채년수를 38년, 천연가스는 60년 정도로 과학자들은 추정하고 있으며, 화석연료의 과다 사용으로 인한 지구 온난화 및 환경오염과 같은 심각한 환경문제가 야기되고 있다. 한편, 원자력 발전소는 많은 에너지를 생산하고 있으나, 방사선 누출과 핵폐기물 처리 등의 위험한 문제점을 안고 있어 안전적 에너지 공급원으로 의존하기에는 그 한계가 있다.

따라서 앞으로는 에너지 기술력이 국가 경쟁력을 좌우하고, 환경 친화적인 깨끗한 에너지만이 에너지로서의 가치를 인정받게 될 것임을 짐작할 수 있다. 이러한 에너지 수급의 문제점을 해결하기 위한 한 방법으로 태양 에너지, 풍력, 수력, 지열등과 같은 영구적이며 환경 친화적인 신재생에너지 이용을 생각할 수 있다.

한편, 에너지 확보 못지않게 에너지 수급의 균형을 맞추는 것이 중요

하나, 우리나라와 같이 여름철 냉방을 위한 많은 에어컨이 일시에 가동됨으로써 순간 전력 사용량이 급증하는 이른바 첨두현상(peak time)이 발생하면 전력 수급에 큰 혼란을 야기할 수 있기 때문에 전력 예비율 확보가 큰 문제점으로 나타나고 있다.

이는 냉방기기의 동력원으로 전기 에너지에 전적으로 의존하기 때문에 일어나는 현상으로 신재생에너지 중 잠재량이 가장 많은 태양에너지를 하절기에 냉방열원으로 이용함으로써 에어컨에 사용되는 소비전력량을 절감시키는 것이 이러한 문제를 해결하는 좋은 해법이 될 것이다.

최근에 우리나라의 냉방용 기기의 사용실태를 알아보면, 주택뿐만 아니라 사무실 및 복합 상가 등과 같이 면적이 큰 주거 공간에서 제습 및 냉각 등을 통하여 실내의 쾌적성 및 작업 효율을 향상시키려고 한다. 우리나라의 여름은 고온 다습하여 수분이 갖는 잠열부하가 현열부하 만큼 크기 때문에 실내 공간의 적절한 온습도 환경을 구현하기 위해서는 우선 잠열부하를 처리하여야 한다. 그럼에도 불구하고 이를 위해서 종래의 공조장치로써 수분이 갖는 잠열부하를 제거하려면 장치의 기계적 한계성뿐만 아니라 효율 면에서 바람직하지 않다.

여름의 경우 실제로 공기 중의 잠열부하를 제거하고 나면, 현열부하는 소동력 장치로써 쉽게 처리할 수 있을 뿐만 아니라, 온도 조절 또한 간단히 제어할 수 있다. 그러므로 여름의 잠열부하를 어떠한 방법을 사

용해서라도 경감시킬 필요가 있는데, 기존의 전기에너지를 사용하는 방법 대신에 신재생에너지 및 미활용 에너지를 사용하는 방법이 에너지 절약 면에서 바람직하다. 에너지이용 공학 및 냉동공조 분야에서는 기존의 전기에너지를 대신하는 신재생에너지를 사용하여 제습장치를 구동해서 잠열부하를 경감시키는 새로운 제습시스템 개발에 박차를 가하고 있다.

한편, 잠열부하를 제거하는데 가장 일반적이면서 유효한 방법은 흡습제(desiccant)를 이용하여 습기를 제거하는 제습방식이다. 제습방식 에는 일반적으로 실리카겔과 같은 고체흡착제를 이용하는 흡착식과 염화칼슘이나 염화리튬과 같은 액체흡수제를 이용하는 흡수식이 있으며, 각각 장단점이 다르기 때문에 사용 용도가 다르다. 이 두 방식 중 제습능력만 비교하면 흡착식 보다 흡수식이 뛰어나다고 알려져 있으나, 흡수식은 흡착식에 비해 조작이 매우 복잡하기 때문에 그 특성이 완전히 파악되어 있지 않다. 따라서 제습 시스템의 설계에 있어서는 여전히 종래의 경험에 의존하는 경향이 많다.

1.2 종래의 연구

최근에 생활수준의 향상과 더불어 실내공기의 온도 조절뿐만 아니라 엄격한 습도 조절도 요구하고 있다. 또한 생산현장에서는 제품의 제조

공정 중, 혹은 보관 과정에 있어서 정확한 습도 유지의 필요성이 크게 대두됨에 따라 많은 사람들이 제습에 높은 관심을 갖게 되었다. 제습에는 기계적 방식과 화학적 방식이 있으나, 최근에는 화학적 방식이 크게 각광을 받고 있다. 화학적 방식에는 흡수제(desiccant)의 화학적 성질을 이용하는데 염화리튬(lithium chloride)과 트리에틸렌 글리콜(triethylene glycol)과 같은 액체수용액을 이용하는 흡수식 제습과 실리카겔과 같은 고체흡착제를 사용하는 흡착식 제습이 대표적이다.

태양열을 이용한 산업용 제습 건조시스템은 일반적으로 온풍에 의한 방식과 흡습제에 의한 방식 등으로 구분할 수 있다. 온풍방식은 공기를 열매로 태양열을 집열하여 쇄석조 등에 고체 건조물을 가열시켜 수증기를 제거하는 방식이며, 흡습제에 의한 방식은 화학적 특성을 이용하는 제습이다.

흡습제를 이용한 태양열 이용 냉방·제습시스템은 1955년에 미국의 Lof[1, 1955]에 의해서 처음으로 실험이 행하여졌다. Lof가 제안한 시스템은 흡수실에서 액체흡수제의 일종인 트리에틸렌 글리콜을 사용하여 실내공기를 제습하고, 제습된 공기는 냉각탑에서 만들어진 냉각수에 의해 냉각된다. 태양열에 의해 가열된 공기는 전열탑에서 희석된 트리에틸렌 글리콜을 재생하는데 사용된다. 그러나 이 시스템은 장치가 갖는 한계성으로 인해 실용화에 이르지 못하고, 실험적 연구가 수행된 것이

전부로 그 이후의 연구는 지속되지 않았다.

1970년대에 소련의 Baum[2, 1972]이 한 아파트에 태양열로 냉방을 행하는 시스템을 설치하여 가동하였다. Baum이 제안한 시스템에서 사용된 액체흡수제는 본 연구에서 사용하고 있는 흡수제와 동일한 염화리튬 수용액으로 쉽게 실용화할 수 있는 특징을 갖고 있는데, 시스템 내에서의 주요 과정을 개략적으로 기술하면 다음과 같다.

먼저, 흡수기에서 흡수과정을 거친 저농도 염화리튬 수용액은 펌프에 의해 열교환기를 겸한 베드(bed)로 반송된 후, 개방식 평판 집열기를 따라 자유 낙하한다. 이 때, 집열기에서 흡수제가 태양열에 의해 가열되어 흡수제의 온도가 상승하게 되며 동시에 노점온도도 높아져 저농도 염화리튬 수용액으로부터 수분이 증발하여 고농도 수용액으로 바뀐다. 농축된 염화리튬 수용액은 열교환기에서 냉각된 후, 흡수기 내로 보내어지며 수증기는 증발기에서 냉각된다. 응축에 의해 냉각된 물은 냉각기로부터 물 공기 열교환기로 보내어져 공기를 냉각시킨다. 그러나 이 시스템은 유리한 기후 조건 아래에서만 운전이 가능하나, 한국이나 일본과 같이 습도가 높은 지역에서는 그대로 적용할 수 없는 단점을 갖고 있다.

1970년대 초 에너지 소비가 급증한 후 대체에너지에 관한 관심이 높아질 때 미국의 Rush[3, 1973]는 태양열을 이용하는 건조제 공조기를 설계하여 개발하였다. 이 시스템은 태양열에 의해 재생된 농축액을 습

공기와 직접 접촉시켜 제습하는 방식을 채택하고 있으나, 제습효율이 너무 낮고, 건조된 공기의 온도가 너무 높기 때문에 실내로 직접 유입하여 사용하기가 어렵다.

한편, 일본에서는 1980년대에 Matsuki[4, 1985]가 Rush의 방법과 원리가 비슷한 prototype 고체식 건조장치를 개발하였으며, Tanaka[5, 1988]는 염화리튬 수용액을 이용한 주택용 소용량 개방형 냉방시스템을 제안하였다. 이 장치는 동력을 절약하기 위하여 종래의 난방에 사용되어왔던 연돌효과를 얻을 수 있는 자연통풍방식을 채택하였다. 그러나 이 방식으로는 재생부하에서의 열 회수가 대단히 어렵기 때문에 냉방 COP가 매우 낮다.

그리고 Saito[6, 1983]는 이중층을 가진 실리카겔을 사용하는 passive 가열, 냉각 시스템을 제안하였으며, 개방형의 사이클의 일종으로 실리카겔을 사용하는 태양열 흡수 passive 냉각 시스템에 관한 일련의 실험이 Kimura[7, 1983]에 의해 수행되었다. 그러나 이들 시스템에 있어서 건조제인 실리카겔을 재생하기 위해서 태양열로부터 얻을 수 있는 온도 레벨보다 더 높은 고온이 필요하기 때문에 실용화에 이르지 못하였다.

일본의 칸사이전력(關西電力(株))에서는 여름에 냉방부하가 피크에 도달할 때, 전력 사용량이 증가하는 이른바 집중현상을 막기 위한 방편으로 액체흡수제를 이용하여 제습을 행함으로써 공기 중의 잠열을 빼앗

아 냉방부하를 줄이고자 하는 기초 실험을 수행하였으나 실용화에 이르지는 못했다. 이와 같이 선진국에서도 아직까지 액체흡수제를 이용하는 제습 시스템의 최적 설계에 있어서 그 특성 파악이 미흡하여 여전히 경험 값에 의존하여 설계하고 있는 실정이다.

한편, 우리나라에서도 태양열을 난방과 급탕에 이용하는데 관한 이론적인 연구와 실용화에 있어서 해결해야 할 기술적인 문제, 또는 성능향상을 위한 요소기술 개발에 관한 기초 연구가 대부분인 실정이다. 게다가 태양열을 냉방 및 제습의 열원으로 사용하는데 관한 본격적인 연구는 아직까지도 미흡한 상태이다.

1.3 연구의 목적

과거에 최[8, 1997]가 제안하고 개발한 '태양열 이용 다목적 공조 시스템'이 실제로 제작 설치되어 3년 간 운전한 결과, 시스템에 적용 가능한 효율을 얻었으나, 태양열을 직접 이용하는 재생기의 내구성에 그 한계점을 드러내었다.

따라서 이러한 문제점 해결과 효율 향상이라는 차원에서 '태양열 이용 다목적 공조시스템'을 현재 시판중인 기존의 태양열 온수기 시스템과 직접 연계하여 재생기(regenerator)를 대신하는 재생탑(regenerating tower)의 재생 가능성과 제습과 냉방을 실행하는 제습탑(dehumi-

difying tower)에 대한 기초 실험을 각각 수행하였다.

본 연구에서는 '태양열 이용 다목적 공조시스템'에서 가장 핵심적인 재생기와 제습기의 성능 향상과 실용화를 위해 컴팩트한 형상의 탑(tower) 형식으로 제작하여 그 성능을 파악하고자 한다. 또 시스템의 성능 향상을 위한 최적 조건을 규명하기 위해 최적화 기법의 하나인 반응표면분석법을 이용하여 각 인자들의 상관관계에서 최적의 설계 조건을 제시함으로써 향후 일련의 과정이 사이클로 작동될 수 있는 기초 자료를 제공하고자 한다.

또한, 기초 실험을 통하여 얻은 자료를 바탕으로 성능향상을 위한 연구의 일환으로 각 변수들의 상호 간섭에 의한 결과 예측의 불확실성을 해소하기 위해 최적화 기법을 이용하여 성능의 결과를 예측할 수 있는 최적 조건을 도출할 필요가 있다.

따라서 본 연구를 통하여 흡습제의 재생능력이 기존의 시스템보다 우수하고 특히 제습에 의한 만족할 만한 잠열부하를 처리하는 과정에서 제시된 최적의 조건을 설계의 기초자료로 활용하여 안정적인 제습/냉방 시스템을 구축하게 된다면, 현재 동절기에 난방과 온수 이용에 한시적으로만 사용되고 있는 태양열 온수기를 여름철 냉방을 위한 공기의 잠열부하를 경감시킬 수 있기 때문에 태양열 온수기의 연중 사용이 가능하여, 이른바 '태양열 이용 다목적 공조시스템'을 완성할 수 있다.

1.4 제습장치의 종류 및 원리

오늘날 일반적으로 사용되는 제습장치 종류에는 에어워셔(air-washer)를 통과한 후 냉각코일로써 공기를 노점온도 이하로 냉각하여 제습하는 냉각 제습법, 공기를 압축시켜 공기 중의 수분을 응축시키는 공기압축법, 그리고 흡착제나 흡수제를 사용하여 제습하는 고체흡착식 제습법 및 액체흡수식 제습법이 있다. 이들 제습법은 각각 다른 특징을 갖고 있으나, 여기에서는 흡착제나 흡수제를 이용하는 화학적 제습방식의 특징에 대해서만 고찰한다.

먼저, 흡수식 제습은 수분을 흡수하는 성질을 가진 LiCl수용액이나 염화칼슘 등과 같은 흡수제를 이용하여 공기 중의 수분을 제거한다. 흡수식 제습장치는 대상공기에 흡수제의 수용액을 직접 분무하는 습식타입과 흡수제를 침투시킨 다공질 표면에 대상공기를 통과시켜 제습하는 건식타입이 있다. 흡수식 제습장치의 흡수제로는 현재까지 LiCl수용액이나 트리에칠렌 글리콜 수용액이 널리 사용되고 있으며, 흡수기로 유입된 대상공기는 노즐에서 분무된 흡수액과 접촉하여 수분이 제거된다. 이 때, 수분을 흡수하여 농도가 낮아진 흡수액은 재생기로 보내져서 가열코일과 접촉하여 가열되면서 수분을 방출하여 고농도 용액으로 바뀐 후 다시 흡수기로 되돌아온다. 흡수액이 수분을 흡수할 때 발생하는 흡수열은 냉각코일에 의해서 제거되며, 흡수액은 흡수 → 가열 → 재생

→ 냉각의 순서로 순환한다.

건식 제습장치는 다공질 재질로 만들어진 로우터(rotor)에 LiCl 수용액과 같은 흡수제를 함침시켜 흡수 및 재생과정을 상호 반복하여 연속적으로 대상공기를 처리한다.

1.4.1 고체흡착제를 이용한 제습방식

고체흡착제를 이용하여 제습하는 제습기는 Briant사에 의해서 최초로 고안 되었다. 미국의 Briant사에 의해 30년 이상 제작되어온 이 제습기는 고체흡착제를 이용하여 제습함으로써 공업용 제습이나 각종 창고의 감습용 등으로 광범위하게 이용되고 있다. 이 제습기에 이용되는 흡착제는 다공질의 물질인 실리카겔(silica gel)로써, 그 자체의 표면 흡착력이 매우 크다. 이 방식에서는 습공기가 실리카겔 표면에 접촉하면 습공기 중에 포함된 수분이 흡수되는 것이 아니라 미세한 표면의 구멍에 흡착된다. 이와 동시에, 실리카겔은 흡착 시에 흡착열을 발생하여 건조공기의 온도를 상승시킨다. 수분을 흡착한 실리카겔은 점차로 그 흡착력이 떨어지나 가열코일에 의해서 다시 재생되어 실리카겔 중량의 약 40%까지 수분을 다시 흡착할 수 있게 된다.

이 방식의 제습은 공기를 압축하거나 물 또는 브라인(brine)에 의한 냉각과정을 거쳐서 습기를 제거하는 기존의 방식과는 달리 비교적 간단

하게 습기를 제거할 수 있다. 이 Briant사 제습기는 크게 본체, 흡착제, 건조공기 및 재생공기용 송풍기, bed 회전장치, 제어박스 등으로 구성되어 있다. 본체는 외부와 차단되어 거의 기밀에 가까우며, 내부는 실리카겔을 깔아서 매운 bed 모양의 형상을 하고 있다. 이 bed는 꼭대기 부분의 회전 장치에 의해 특수하게 기밀된 형태로 완전하게 분리되어져 있으며, 2개의 섹션(section)으로 나누어져 연속적으로 계속 회전한다. 한 섹션에서는 습공기가 흡착제와 접촉되어 수분을 빼앗기며, 다른 섹션에서는 흡수력이 떨어진 흡착제가 가열된 공기에 의해 재생된다.

이러한 흡착제는 순차적으로 흡착 및 재생사이클을 반복하는데 흡착과정은 다음과 같다. 제습기 내부로 보내어진 습공기는 건조 bed에서 흡착제와 접촉하여 공기 중의 수분을 빼앗겨 건조공기로 바뀐 다음, 송풍기에 의해서 정해진 장소로 반송된다. 이 때, 흡착열에 의해서 건조공기의 온도가 상승하므로, 경우에 따라서 냉각과정을 거치기도 한다. 한편, 재생과정에 있어서는 먼저 옥외로부터 공기를 유입한 다음, 가스버너나 전기히터 또는 증기코일로서 공기를 가열한다. 이 가열된 공기는 bed의 흡수력이 떨어진 흡착제와 접촉하여 흡착제를 가열함으로써 그 표면에 흡착된 수분을 증발시켜 흡수력을 복원시킨다.

재생과정에 사용된 습기가 많은 공기는 송풍기에 의해 옥외로 배출된다. Briant사 제습기는 화학약품, 식품, 양조, 성냥 제조 공장에서와 같

이 저온 저습한 공기를 필요로 하는 공업분야의 감습용으로 많이 이용되나, 우물물과 같이 온도가 낮은 물과 병용하면 공조장치에까지도 이용이 가능하다.

1.4.2 액체흡수제를 이용한 제습방식

지리적 조건으로 인하여 우리나라는 하계가 고온 다습하여 제습을 필요로 하는 장소가 많다. 그러나 우리나라의 공조 기술역사가 선진국에 비해 얼마 되지 않아 제습기가 제습 및 냉방으로 거의 사용되지 않았다. 특히, 액체흡수제의 화학적 성질을 이용하는 제습장치는 거의 잘 알려져 있지 않았으며 적용 사례도 매우 드물었다. 그러나 최근에 국내에서도 제습장치의 국산화가 이루어지고 나서부터 액체흡수제를 이용하는 제습장치가 점차로 널리 보급·이용되고 있다.

액체흡수제를 이용하여 습기를 제거하는 대표적 제습장치로써 Kathabar가 있다. Kathabar는 제습제로써 LiCl수용액을 이용하는 액체흡수식 습도 조절 장치의 상품명이다. 이 제습장치는 원래 미국에서 개발되어 먼저 상품화가 되었기 때문에, 상당한 수준의 기술과 함께 오랜 역사를 갖고 있다. 1931년에 F. R. Bichowsky가 이 원리에 관한 특허를 얻었으며, 1934년에 Midland-Ross사에 의해 처음으로 제작되었다. 이 시스템은 몇 차례의 개선 및 개량을 거쳐 성능 향상을 이룩하여

각종 산업분야의 제조공정, 제품의 건조, 저장을 비롯한 일반 공조분야에까지도 광범위하게 이용되고 있다. LiCl 수용액은 증기압이 매우 낮으므로 소정의 온도로 유지하여 공기와 충분히 접촉시키면, 그 증기압에 평형하는 수준까지 간단히 제습할 수가 있다. Kathabar 시스템은 Fig. 1.1과 같은 구성으로 이루어져 제습과 재생을 연속적으로 반복한다.

먼저, 대상공기는 제습기로 보내어져 분무된 LiCl수용액과 접촉하면서 공기 중에 포함된 수분이 제거된다. LiCl수용액은 펌프에 의해 압송되어 노즐로부터 제습기의 냉각코일 위로 분무되어 냉각코일은 공기와 수용액의 접촉이 충분히 이루어지도록 배치되어 있다. 냉각코일용 냉매로써는 물, 브라인, 암모니아, 프레온 등을 사용할 수 있다. LiCl수용액의 제습능력은 그 온도와 농도에 의해 결정되므로, 소정의 조절된 공기를 얻기 위해서 보통 농도를 일정하게 유지하면서 온도만을 조절하는 수법을 주로 채용하고 있다. LiCl수용액은 수분을 흡수하면 농도가 낮아지기 때문에 재생할 필요가 있는데, 재생기는 이러한 농도가 낮아진 수용액을 가열하여 수용액에 함유되어 있는 수분을 공기 중으로 방출시킨다.

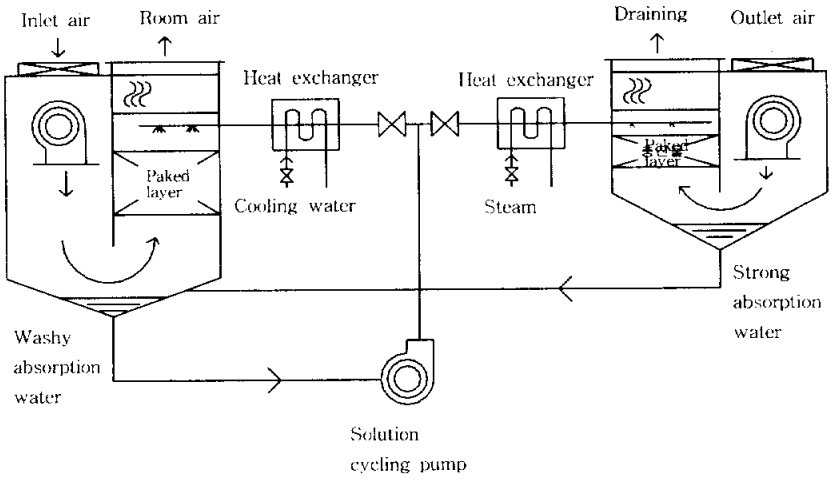


Fig. 1.1 Schematic of Kathabar system proposed

한편, Fig. 1.1에서와 같이 재생기는 제습기와 같은 구조로 구성되어 있으나, 냉각코일 대신에 가열코일이 있으며 가열코일로 증기를 통과시켜 가열한다. 이 재생과정은 운전 중에 중단되지 않고 연속해서 자동으로 반복되므로 수용액은 항상 일정한 농도로 제습기로 보내어진다. 그리고 제습기의 냉각코일과 약간의 가열코일을 적절히 조합하면 제습기 대신에 가습기로도 사용할 수 있다.

또한, LiCl수용액을 이용하는 제습장치인 Kathabar는 온도와 습도를 개별적으로 조절할 수 있다. 냉동기의 경우는 소정의 온도 및 습도를 얻기 위해서는 일단 과냉각한 후 가열하는 재열과정이 필요하며, 고체 흡착제의 경우도 마찬가지로 습구온도선을 따라 제습되기 때문에 대부

분의 경우 재열히터 또는 냉각기가 필요하다. 그러나 액체흡수식 제습기에서는 LiCl수용액의 농도를 적절히 조절함으로서 최단 거리의 엔탈피 변화로 소정의 저온 저습한 공기를 쉽게 얻을 수 있다. 또한 LiCl수용액의 농도 범위가 광범위하기 때문에 조절할 수 있는 온습도의 조절 범위도 넓어서 가습, 제습과 가열, 냉각과정을 자유롭게 조합할 수 있는 특징을 갖고 있다.

고체흡착제를 이용하는 방식에 있어서 처음에는 습도를 낮출 수 있으나, 사용하는 동안 점차로 공기 중의 습도가 상승한다. 따라서 회전 bed 타입 등을 이용하여 가능한 이 상승분을 적게 하려고 하나, 액체흡수식 제습기에서는 수분을 흡수한 용액이 계속해서 재생되기 때문에 항상 일정한 온습도의 공기를 계속해서 얻을 수 있다. 그리고 적절한 냉매를 사용하면 LiCl수용액은 -70℃까지 냉각할 수 있으므로 초저온 제습까지도 가능하게 된다. 또한 이 방식은 냉동기를 사용하는 다른 방식에 비해서 과냉 및 재열과정이 필요 없기 때문에 소비동력이 적으며, 재열용의 증기와 약간의 온수만 있어도 전력소비 사용량을 크게 줄일 수 있는 특징을 갖고 있다.

1.5 제안 시스템의 개략도

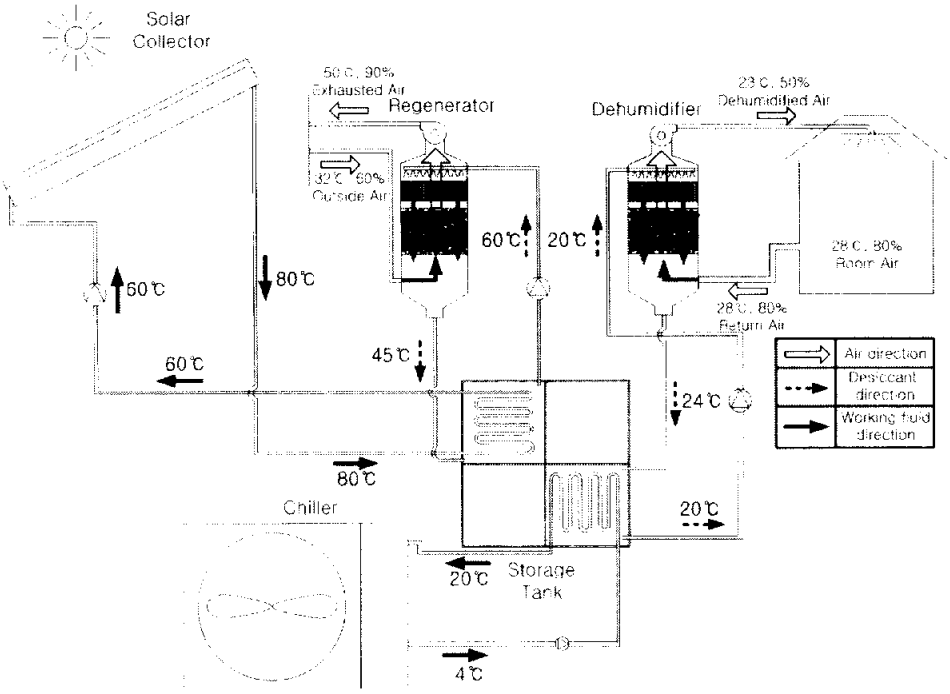


Fig. 1.2 Schematic of new system proposed

Fig. 1.2는 본 연구에서 제안하고자 하는 대상 시스템의 개략도이다. 현재 개발되고 있는 신재생에너지 이용 시스템에서는 한시적인 에너지 밖에 활용을 하지 못하고 있다. 예를 들면, 태양열온수기는 겨울철에 온수를 제조 하여 급탕이나 난방으로 사용하고 있으나, 태양열이 많이 얻어지는 여름에는 거의 사용되고 있지 않다. 그 결과, 일사량이 많은 하계에 태양열온수기를 가동하지 않음으로써 태양열온수기의 표면온도

를 100℃ 이상으로 상승시켜 시스템의 내구성을 급격히 떨어뜨린다. 이는 태양열온수기의 목적이 겨울철의 난방 및 급탕에만 국한되어 있기 때문이다.

반면에 일사가 가장 많은 여름철 한 낮에 대부분의 공조시스템이 가동되어 실내를 냉방시키고 있다. 그러므로 이로 인한 전력사용량이 급증하여 여러 가지 문제점이 초래되고 있는데, 그 해결책으로 하계에 냉방부하를 감소시키는 제습/냉방시스템을 전력이 아닌 신재생 에너지를 활용하는 방안이 적극 검토되었다. 그 중, 본 연구에서 제안하고 있는 시스템은 동절기에는 태양열온수기를 종전대로 난방 및 급탕으로 활용하고, 하절기에는 태양열온수기로부터 얻어진 온수를 흡습제인 액체흡수제를 재생시키는 열원으로 활용하여 제습 및 냉방이 가능 하도록 하는 것이다.

지금까지는 제습을 행한 후, 흡수력이 떨어진 액체흡수제를 다시 농축시키기 위하여 전기나 가스, 기름과 같은 화석연료를 재생과정의 열원으로 많이 사용하고 있어 에너지수급 및 균형에 많은 애로를 초래하고 있는 실정이다. 이 때 필요한 열원으로 태양열을 이용하고자 하는 것이 본 연구의 가장 큰 특징이다.

한편, 본 장치의 구성은 작동매체의 온도를 높이는 집열기, 태양열 온수기로부터 얻어진 작동매체를 흡수제와 직접 열교환을 시키는 열교환

기, 열교환기를 거쳐서 고온으로 바뀐 흡수제로부터 수분을 증발시키는 재생탑, 재생탑를 거쳐서 재생된 고농도 흡수제를 대상실의 고온다습한 공기와 직접 접촉시킴으로써 수분을 제거하는 제습탑, 그리고 마지막으로 필요에 따라 집열기와 열교환기, 그리고 재생탑 및 제습탑으로 용이하게 이동할 수 있도록 하는 저장탱크 블록으로 이루어져 있다.

먼저, 제습탑에서 습도가 높은 공기로부터 수분을 흡수한 흡수제는 제습과정을 연속적으로 반복함으로써 흡수력이 떨어져 더 이상 습도가 높은 공기를 건조시키지 못한다. 이 때 흡수력을 회복하기 위하여 태양열온수기로부터 얻어진 90℃ 이상의 작동매체와 액체흡수제를 저장탱크 내에 설치되어 있는 열교환기를 통하여 열교환을 시킨다. 실제로 하계에 태양열온수기로부터 얻어지는 온수의 온도는 거의 95℃에까지 이르며, 열교환 과정을 반복함으로써 탱크내에 저장되어 있는 액체흡수제의 온도를 최소한 60℃ 이상까지 상승시킨다. 60℃ 이상으로 상승된 액체흡수제는 노점온도가 높아서 상온에서도 쉽게 물질전달이 이루어진다. 즉, 액체흡수제에 포함되어 있는 수분이 쉽게 대기 중으로 증발한다. 이러한 과정을 담당하는 장치가 재생탑이며, 통상 외기가 그대로 도입되어 액체흡수제와 접촉하여 출구로 배출 되는데, 출구공기의 온도는 거의 50℃ 이상, 상대습도는 거의 85% 이상의 엔탈피가 높은 공기가 되어 대기로 빠져나간다.

이와 동시에 액체흡수제의 온도는 대략 45℃ 정도로 되어 탱크로 되돌아오는데, 동시에 수분을 빼앗김으로써 농도가 점차 짙게 되어 흡수 포텐셜을 되찾는다. 이 과정을 재생과정이라고 하는데, 재생과정을 거친 흡수제는 다시 흡수력을 얻어서 제습탑으로 이동한다. 한편, 제습탑으로 이동되는 고농도 액체흡수제는 온도가 높아서 직접 실내의 고온다습한 공기와 접촉할 수가 없다. 왜냐하면, 액체흡수제의 노점 온도가 높아서 제습력이 떨어질 뿐만 아니라, 제습된 공기의 온도가 너무 높아서 다시 실내로 되돌아가더라도 제습/냉방효과를 거둘 수가 없기 때문이다. 따라서 제습탑으로 이동하기 전에 액체흡수제의 온도를 떨어뜨릴 필요가 있는데, 여기에는 야간복사열을 이용하는 방법이나 지하수를 사용하는 방법 등과 같이 기존의 공조장치를 사용하지 않는 방안이 강구되고 있다.

한편, 제습탑으로 보내진 액체흡수제는 실내의 고온다습한 공기와 충진층에서 접촉하여 수분을 빼앗음과 동시에 현열 교환도 행한다. 그 결과, 실내의 고온다습한 공기는 수분을 빼앗겨 건조공기로 바뀌고, 동시에 온도도 내려가 제습으로 인한 냉방효과를 가져다준다. 일반적으로 습도가 50% 이내인 경우에는 공기온도가 28℃가 되더라도 PMV (Predicted mean vote)나 TSV(Thermal sensation vote)에서도 쾌적환경에 근접한다.

직접 제습이나 냉방효과를 얻을 수 없는 경우라도 여름철 냉방을 행하는 과정에서 고온다습한 공기 중 수분이 갖고 있는 잠열부하를 크게 경감시킬 수 있으므로 냉방부하를 경감시킨다. 그 결과, 잠열 부하를 처리하는 이 시스템을 사용할 때와 사용하지 않을 때의 여름철 실내 냉방부하는 크게 달라지며, 경우에 따라서는 공조기의 용량에서도 크게 차이가 난다.

일반적으로 하계에 일사가 강할수록 온도가 높아져 냉방의 필요성이 대두되는데, 이 제안시스템 또한 일사가 강할수록, 일사량에 비례하여 태양열온수기로부터 작동매체의 고온의 형태로 얻어지므로 재생 및 제습/냉방효율은 크게 향상되어 여름철 냉방부하를 크게 경감시킬 수 있다.

게다가 본 시스템은 동계에는 태양열온수기를 가동하여 고온의 작동매체를 제조해서 종래처럼 급탕 및 난방에 사용할 수 있으며, 하계에는 액체흡수제를 이용하여 실내 공기의 습도를 낮춤으로써 냉방효과를 연속적으로 가져다 줄 수 있다. 태양열온수기로부터 얻어지는 고온의 작동매체는 흡수력이 떨어진 액체흡수제를 고농도의 액체흡수제로 재생하는데 사용되며, 이러한 과정을 반복함으로써 여름철 실내 냉방부하 중 태양열온수기로부터 얻어진 고온의 작동 매체와 흡수제를 사용함으로써 잠열부하의 상당 부분을 제거할 수 있다.

뿐만 아니라, 태양열온수기의 집열면에 가장 많은 부하가 걸려 시스

템 수명을 단축시키는 하계에도 연속적으로 운전을 할 수 있음으로써 태양열온수기의 수명을 연장시킴은 물론, 부속기기인 고가의 안전밸브 보호나 작동매체의 자연증발 같은 현상을 미연에 방지할 수 있는 효과를 기대할 수 있다.

1.6 논문의 개요

최근에 대체에너지를 사용하는 여러 가지의 냉난방 장치가 개발 되었으나, 여전히 전기 동력의 사용이 많아 대체에너지 개발이라는 관점에서 별로 도움이 되지 않고 있다. 현재 공조 분야에서 문제가 되고 있는 것은 여름에 냉방부하가 집중될 때 많은 전력이 동시에 사용되어 전력사용 집중현상이 일어나는 것이며, 이는 예비전력 확보에 문제점으로 나타나고 있다.

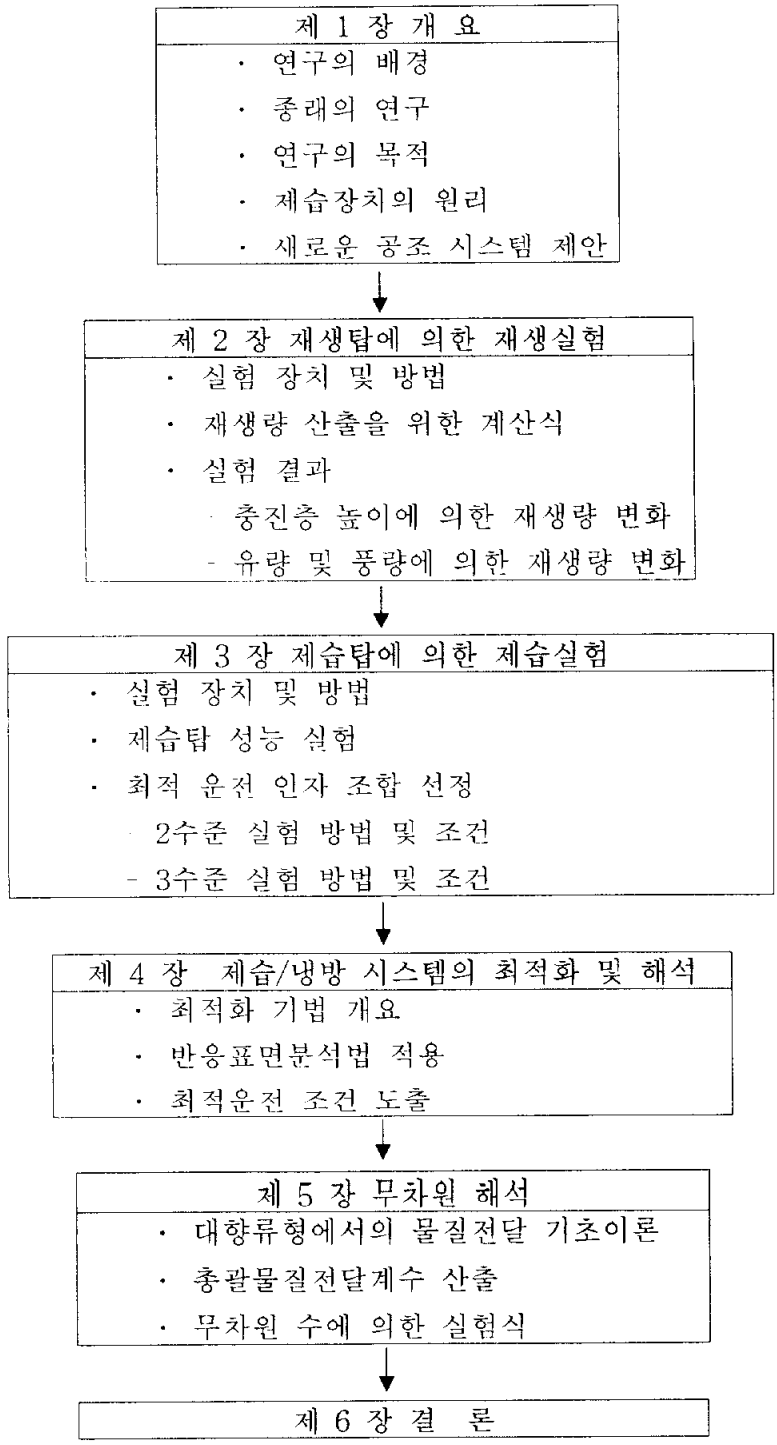
따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 자연에너지를 이용하는 한편, 환경 친화적인 공조 시스템을 개발할 필요가 있다. 이러한 목적에서 태양열을 이용하여 여름에 냉방 및 제습효과를 얻어서 기존의 냉방기기 사용에서 발생되는 에너지 사용과 관련된 여러 가지 문제들을 해결할 수 있는 Fig. 1.2와 같은 에너지 절약형 공조 시스템을 제안한다. 이 시스템의 핵심 구성 요소인 재생탑과 제습탑은 내부에서 기액접촉에 따른 물질전달과 열전달이 매우 복잡한 양상을 보이기 때문에 그 특성이 정

확히 파악되어 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 우선 재생탑에 관하여 유량, 풍량, 흡수제 온도에 의한 재생량의 정량적 변화를 실험을 통하여 규명할 것이며, 이어서 제습탑에 관하여 탑의 높이, 유량비(유량/풍량), 흡수제 농도에 의한 제습량의 정량적 변화를 규명하고자 한다. 또한 재생탑에 있어서 최적화 기법 중 반응표면분석법을 적용하여 재생량과 전력소비량에 관하여 고찰하고 최적 운전조건을 도출하고자 한다. 아울러 무차원 해석에 의해 관련된 실험식을 정의 하여 주어진 조건에서 총괄물질 전달량을 산출하고자 한다.

본 연구에서 실험을 통하여 파악한 장치의 특성과 최적운전 조건, 그리고 산출된 총괄물질 전달량을 토대로 연속적인 제습과정을 얻기 위한 상호 시스템적 기능을 갖추고 일련의 과정이 사이클로 작동될 수 있는 가능성을 제시하고자 한다.

본 논문 구성의 순서를 그림으로 그려 보면 다음과 같다.


제 1 장 개 요
· 연구의 배경
· 종래의 연구
· 연구의 목적
· 제습장치의 원리
· 새로운 공조 시스템 제안
제 2 장 재생탑에 의한 재생실험
· 실험 장치 및 방법
· 재생량 산출을 위한 계산식
· 실험 결과
- 충진층 높이에 의한 재생량 변화
- 유량 및 풍량에 의한 재생량 변화
제 3 장 제습탑에 의한 제습실험
· 실험 장치 및 방법
· 제습탑 성능 실험
· 최적 운전 인자 조합 선정
- 2수준 실험 방법 및 조건
- 3수준 실험 방법 및 조건
제 4 장 제습/냉방 시스템의 최적화 및 해석
· 최적화 기법 개요
· 반응표면분석법 적용
· 최적운전 조건 도출
제 5 장 무차원 해석
· 대향류형에서의 물질전달 기초이론
· 총괄물질전달계수 산출
· 무차원 수에 의한 실험식
제 6 장 결 론

제 2 장 재생탑에 의한 재생실험

2.1 재생탑의 개요

재생탑은 제습탑에서 제습과정을 거쳐 흡수 포텐셜이 낮아진 염화리튬 수용액의 흡수력을 높이기 위한 장치로, 펌프에서 재생기로 보내진 수용액은 재생탑의 상부에서 자연 낙하하면서 도입된 외기와 직접 접촉하여 용액속의 수분을 자연 증발시킨다. 그 결과 액체흡수제는 저농도 용액에서 고농도 용액으로 바뀌어 흡수포텐셜을 다시 회복한다.

재생탑 시스템을 구체적으로 설명하면, 태양열 온수기에서 생성되는 온수를 저장탱크에서 열교환시켜 액체흡수제의 온도를 높인 후, 재생탑으로 액체흡수제를 순환시켜 충진층에서 물질교환이 이루어지게 한다. 이 과정을 재생과정이라 하는데, 재생과정을 반복함으로써 액체흡수제에 포함되어 있는 수분이 공기 중으로 증발한다. 이 재생과정을 반복함으로써 액체흡수제의 농도는 저농도에서 고농도로 바뀌어, 제습탑에서 실내의 다습한 공기와 접할 때, 수분을 쉽게 흡수할 수 있는 포텐셜을 갖게 된다. 이러한 성질은 흡습제를 이용하는 제습방식에서 주로 사용된다.

한편, 제습탑에서 수분을 제거함으로써 액체흡수제의 농도는 반대로 고농도에서 저농도로 바뀌게 되고, 그 결과 공기 중의 수분을 제거하는 흡습력이 현저히 떨어지게 된다. 이러한 액체흡수제를 다시 흡습력을

갖도록 재생하기 위해서는 재생과정을 거쳐야 하는데, 이 때 많은 에너지를 필요로 한다.

Fig. 2.1에 액체흡수제에 의한 재생 및 제습 프로세스가 나타나있다.

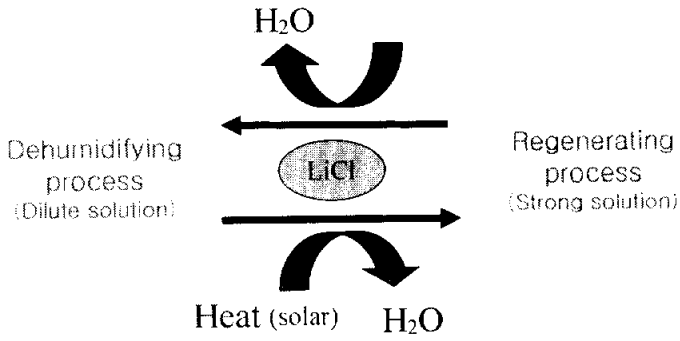


Fig. 2.1 Operating state in the liquid desiccant

2.2 재생탑 실험장치 제작 및 개요

본 연구에서 제안된 시스템에서는 태양열 온수기를 재생 구동원으로 하여 액체흡수제의 온도를 높임으로써 액체흡수제 중의 수분을 쉽게 증발시켜 다시 흡수포텐셜을 반복적으로 갖게 한다.

재생탑에서 재생량에 영향을 미치는 요소로서 액체흡수제의 온도 및 농도, 유량, 그리고 유입공기의 온도 및 습도, 풍향이 있으며, 재생탑은 설치공간을 고려하여 크기가 작으면서 재생량이 많아야 한다. 그러므로 같은 체적에서 재생량이 많으려면 실제로 액체흡수제와 공기가 접촉하

는 면적이 커야 하는데, 일반적으로 냉각탑 등에서는 이러한 목적으로 충진재의 일종인 래시힉 · 링(Raschig ring)을 사용해서 기액접촉면적을 크게 하고 있다.

Fig. 2.2에 본 실험에 사용된 재생탑의 개략도가 나타나 있다. 재생탑은 실제로 건물에 적용될 것을 고려하여 높이가 1m 이내, 폭이 0.5m, 너비 0.5m로 매우 컴팩트(compact)하게 제작하였다. 재생탑은 액체흡수제의 고유 성질인 강한 부식성으로 인하여 전부 비금속 계통인 아크릴로 제작되었다. 뿐만 아니라, 재생탑에서 큰 비중을 차지하는 충진층의 높이를 조절하여 재생량 변화를 조사할 수 있도록 분리 및 합체가 가능하도록 제작되었으나, 본 실험 장치에서는 충진층의 높이가 최대 0.5m를 넘지 않도록 설계되어 있다. Fig. 2.2에 나타나 있는바와 같이 재생탑 본체는 크게 기액 접촉을 도모하는 충진층과 액체흡수제의 균일한 분배를 위한 용액 분배기 그리고 비말제거를 목적으로 하는 엘리미네이터로 구성되어 있다

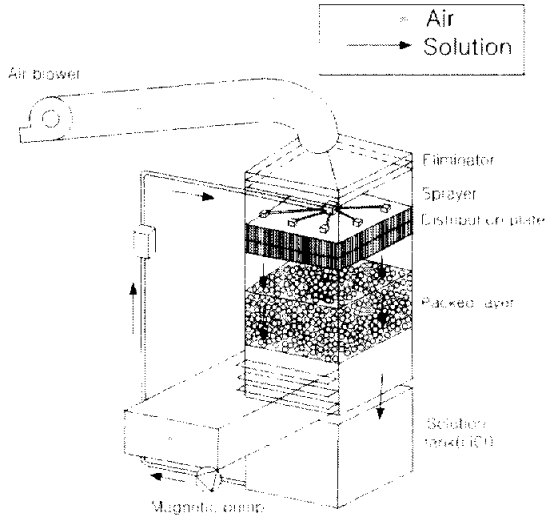


Fig. 2.2 Experimental schematic for regenerator

본 실험에 이용된 재생탑을 구성하고 있는 각 요소들에 대한 특징을 간략하게 기술하면 다음과 같다.

2.2.1 충진재의 선정

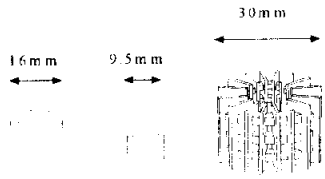
재생탑에서 기액접촉을 크게 하는 충진물(packing material)은 취급이 편리하고 충진층의 구조에 무리가 가지 않아야 하기 때문에, 단위체적당 중량이 적어야 한다. 또한 압력손실이 적어서 동력비가 적어야 할 뿐만 아니라, 공극률이 커야 하며 기액접촉이 좋고, 흡수효율도 좋아야 한다. 그리고 단위 면적당 표면적이 커야 하며, 내약품성 및 내열성 그

리고 내하중성이 뛰어나야 하고, 가격 또한 저렴하여 대량 생산도 가능해야 한다. 현재 사용되고 있는 충진물의 종류는 재질이 나무인 나무격자, 세라믹의 일종인 래시힉·링(raschig ring), 그리고 유기제품인 플라스틱 패킹(plastic packing) 등이 비교적 위의 조건들을 만족하고 있다.

나무격자의 충진물은 가격도 싸고 압력 손실은 작으나, 기액접촉이 작기 때문에 잘 사용되고 있지 않다. 그러나 래시힉·링은 가장 많이 사용되고 있는 충진재로, 다양한 직경의 원통형상이 주로 사용되며 구조적으로는 견고하다는 특징을 갖고 있으나, 압력손실이 크다는 단점도 있다. 게다가 충진층에서 래시힉·링을 잘못 배치하면, 충진탑 벽 방향으로 편류가 일어날 가능성이 있다. 이에 비해서 플라스틱 패킹은 경량이고 취급이 편리하며, 압력손실도 적고, 내약품성, 내열성, 그리고 내하중성도 뛰어나다. 그러나 기액접촉 면적비에 있어서는 래시힉·링보다 다소 떨어지는 단점을 갖고 있다.

본 실험에서 충진물 선정에 있어서 표면적이 넓은 다공질의 재료를 조사하여 접촉효율이 높으면서 체공 시간이 긴 충진재 3가지를 선택해서 예비실험을 통하여 상호성능을 비교하였다. Fig. 2.3에 3가지의 충진층 형상이 나타나 있다. 예비실험에서 래시힉·링의 경우, 세라믹 속의 미세한 공극 때문에 기액 접촉면적은 크나 압력손실 면에서 크게 불리하였다. 한편, 플라스틱 패킹의 경우, 제습량에서는 래시힉·링에 비하

여 다소 적었으나, 압력손실면에서 유리함을 알 수 있었다. Photo. 2.1에 충진층에 불규칙(random)하게 채워져 있는 플라스틱 충진재의 모습이 나타나 있다.



(a) (b) (c)

Fig. 2.3 Packed layer material (a), (b) raschig ring, (c) plastic packing

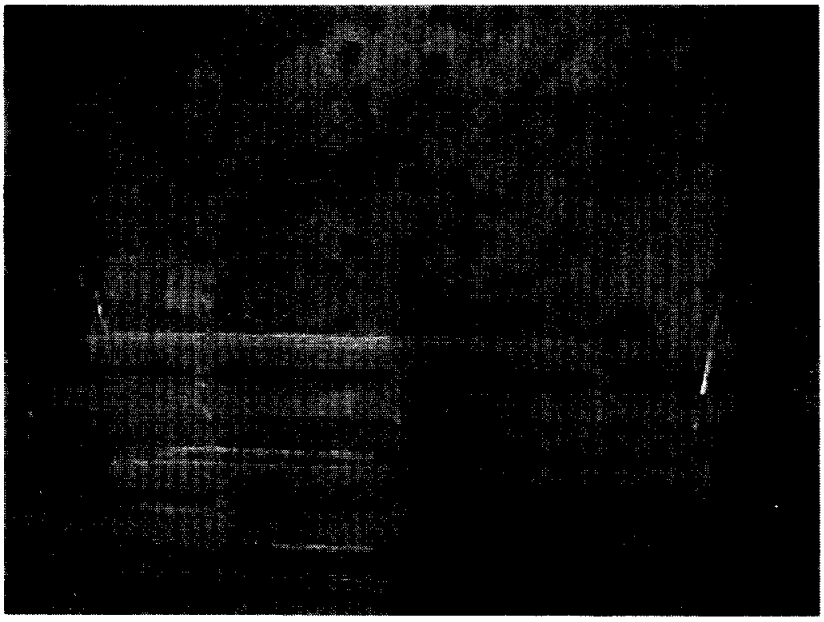


Photo. 2.1 View of plastic packing material packed

2.2.2 분배기(distributor)의 구조

점성이 있는 염화리튬수용액을 충진층 바로 위로부터 하부로 균일하게 살포하는 것이 중요하나 그리 용이하지는 않다. 따라서 이를 극복하기 위하여 특수한 고압 스프레이어(sprayer)를 설치하기도 하나, 본 시스템은 가능한 한 동력을 사용하지 않는 시스템이기 때문에 충진층 상부에 특수한 고압장치 없이 균등하게 살수할 수 있도록 Photo. 2.2와 같이 고안된 살수장치를 제작하여 사용하였다. 이 장치의 살수부는 오직 유량의 낙차에 의하여 충진물을 고루 적셔줄 수 있는 인위적 구조로 되어 있다. 이 살수장치의 개발 덕택으로 동력을 거의 사용하지 않고서도

충진층 바로 위에서부터 효과적인 살수가 가능하였다. 이는 충진층의 단면적을 균등 분할하여 하나의 분배기(distributor)로부터 염화리튬수용액이 미리 분할된 일정한 방향으로 흐르게 함으로써 용액의 편류현상을 방지할 수 있기 때문에 가능하였다. Photo. 2.2는 분배기의 모습을 보여 주고 있다.

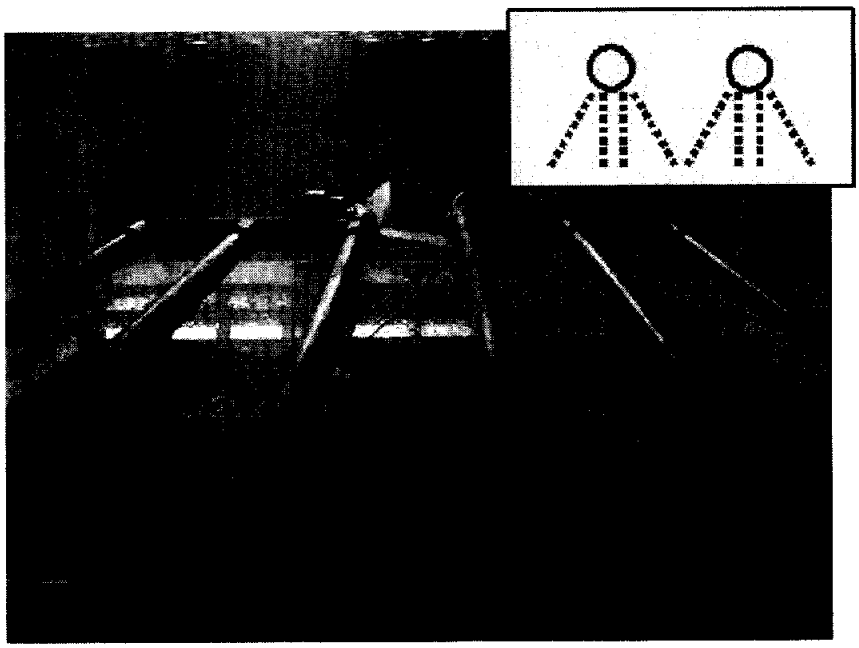


Photo. 2.2 View of Distributor

2.2.3 엘리미네이터(eliminator)의 구조

재생탑의 상부로 배출되는 고온다습한 공기와 함께 액체흡수제인 염화리튬수용액이 비말(飛沫)되어 덕트 상부로 빠져나가는 것을 방지하기 위하여, 상부에 서로 엇갈리게 단순히 구멍을 뚫은 3장의 엘리미네이터(eliminator)를 제작해서 재생탑 상부에 설치하였다.

엘리미네이터는 원형 격자로 제작해서 엘리미네이터 사이의 간격을 좁게 함으로써 간혹 공기 중에 포함되어 재생기 밖으로 비산되는 액체흡수제를 거의 방지할 수 있었으며, 실제로 실내 취출구 관말에서 비산되는 여부를 확인한 결과, 덕트로 비산되는 염화리튬 수용액양이 거의 없음을 확인할 수 있었다. Photo. 2.3에 엘리미네이터의 설치 형상을 나타내었다.

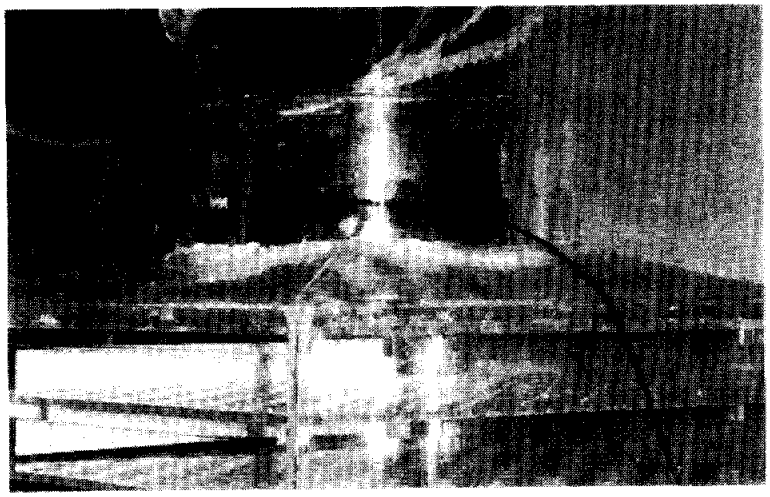


Photo. 2.3 View of eliminator

2.3 재생탑 성능 실험 방법

본 시스템의 가동은 실제적으로는 옥외에서 행하나, 옥외의 실험 에서는 재생탑의 성능을 정성적으로 밖에 파악할 수 없다. 따라서 이러한 어려움을 없애고 재생탑의 성능을 정량적으로 파악하기 위하여 공기의 온도 및 습도, 용액의 온도 및 농도, 그리고 풍량과 유량을 일정하게 조절할 수 있는 항온항습실에서 실험을 행하였다.

실제 작동에서는 태양열 온수기에서 얻어진 온수를 저장탱크로 보내어 티타늄(titanium) 열교환기로 보내어진 액체흡수제와 강제로 열 교환을 한다. 그러나 본 실험에서는 열교환이 이루어진 액체흡수제의 온도를 40℃, 50℃, 그리고 60℃로 가정하고, 이 3단계로 나누어진 액체흡수제의 온도를 전기히터로 미리 가열, 저장탱크에 저장한 다음 실험에 임하였다. 이 온도 범위는 실제 태양열온수기를 하계에 이용하면 간단히 얻을 수 있는 온도 범위이다. 한편, 본 실험에서는 액체흡수제의 부족으로 인한 실험 오차 범위를 최소화하기 위하여 액체흡수제의 양을 60리터로 고정하였으며, 이 60리터로써 모든 경우에 대한 실험을 행하였다.

실험이 끝난 후 액체흡수제로부터 증발된 수분의 양은 액체흡수제의 농도를 측정할 수 있는 초음파 농도계를 사용하여 측정하였고, 이 측정값에 따른 수분의 부족분을 증류수로써 보충하여 액체흡수제의 농도를

실험 전의 상태로 만들었다. 그리고 재생탑의 공기 입구와 출구에 온도 센서 및 습도계를 설치하여 입출구의 공기 온도와 상대습도를 측정함과 동시에 출구 측에 설치되어 있는 풍속계로써 공기의 풍속을 측정하여, 액체흡수제 측으로부터 공기 측으로 전달된 수분량을 농도계에서 얻어진 재생량과 비교하여 정확히 산출하였다. 이렇게 산출된 수분 증발량은 나중에 해석에 있어서 물질전달율을 구하는데 직접 사용하였다.

한편, 재생탑에서는 충진재가 충진층에 밀집되어 있기 때문에 압력손실이 발생한다. 이 압력손실은 재생탑을 실제로 건축물에 적용하는데 휀(fan) 동력비의 상승 형태로 영향을 미치기 때문에, 가능한 충진층에서의 압력손실을 최소화 할 필요가 있다. 본 실험 장치에서는 압력손실을 최소화하기 위하여 재생탑의 하부에 휀을 설치하는 대신에 상부에 휀을 설치하여 흡입식으로 하부로부터 공기를 유입하였다. 흡입되는 공기의 양은 3단계로 구분하여 풍량에 대한 재생량의 변화를 관찰하였다. 액체흡수제의 용액은 마그네틱 펌프에 의해 저장탱크로부터 충진층의 상부로 보내어져 살수기를 거쳐서 중력에 의한 자유 낙하 형태로 균일하게 살수되었으며, 액체흡수제의 유량도 3단계로 분류하여 유량에 의한 물질 전달량의 변화를 조사하였다.

본 실험에서는 공기의 도입량과 액체흡수제의 유량 모두 재생량에 영향을 미치는 것으로 간주하여 충진층으로 액체흡수제의 용액 양과 유입

공기의 풍량을 엄격히 조절하였다. 이 조절을 위하여 가변 인버터(inverter)를 사용하였으며, 인버터의 노이즈를 없애기 위하여 지면에 접지 하여 측정기기의 오차를 최소화하였다. 특히 액체흡수제의 유량 조절은 저장탱크와 충진층 상부로 연결되는 배관 도중에 유량계를 설치하여 인버터 제어의 정확성을 관찰하였다.

실제 실험에서는 액체흡수제의 초기 농도를 25w.t.%로 설정하였는데, 이는 여름의 경우 상온에서 액체흡수제가 습공기 중의 수분을 제거하기 어려운 농도로 용액을 다시 재생 할 필요가 있는 농도 값이다. 온도 측정은 재생탑의 내부와 외부, 그리고 충진층을 10cm 간격으로 나누어 온도센서를 충진재 내부에 설치하여 수분의 이동에 따른 온도 변화를 조사하였다. Table 2.1은 실험에 사용된 측정기기의 목록을 나타내고 있다. Photo. 2.4는 데이터를 PC로 저장하는 집록장치가, 그리고 Photo. 2.5에는 액체흡수제의 농도 값을 순시로 측정할 수 있는 초음파농도계가 각각 나타나있다.

Table 2.1 Measuring instrument

Kind of instrument	Expenditure
Thermocouples (φ0.2)	Temperature
TR 72U(Japan)	Temperature Humidity
KANOMAX (Japan)	Air velocity
FuJi Ultrasonic Meter (Japan)	Density of desiccant
NetDAQ, FLUKE (U.S.A)	Data acquisition
Flex-tube, Dwyer (U.S.A)	Pressure

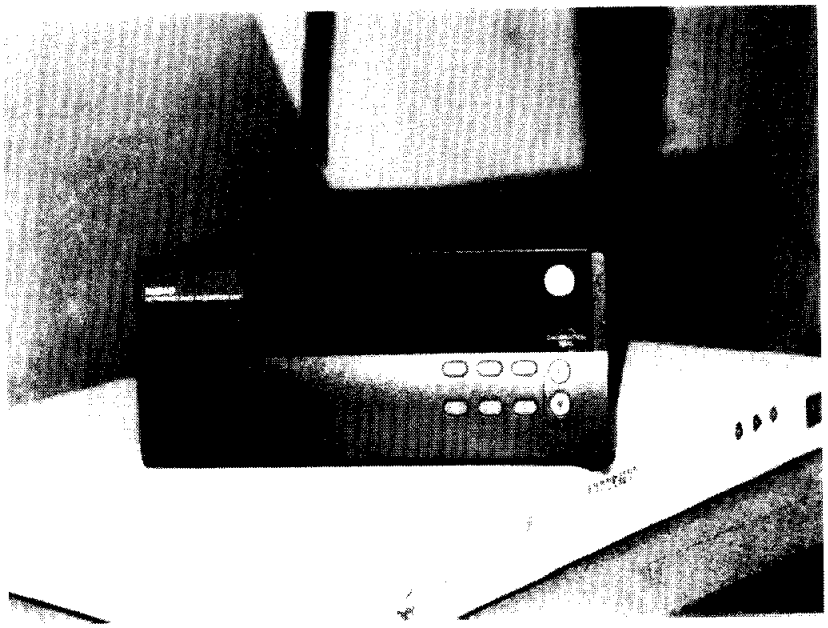


Photo. 2.4 Data acquisition system (NetDAQ)

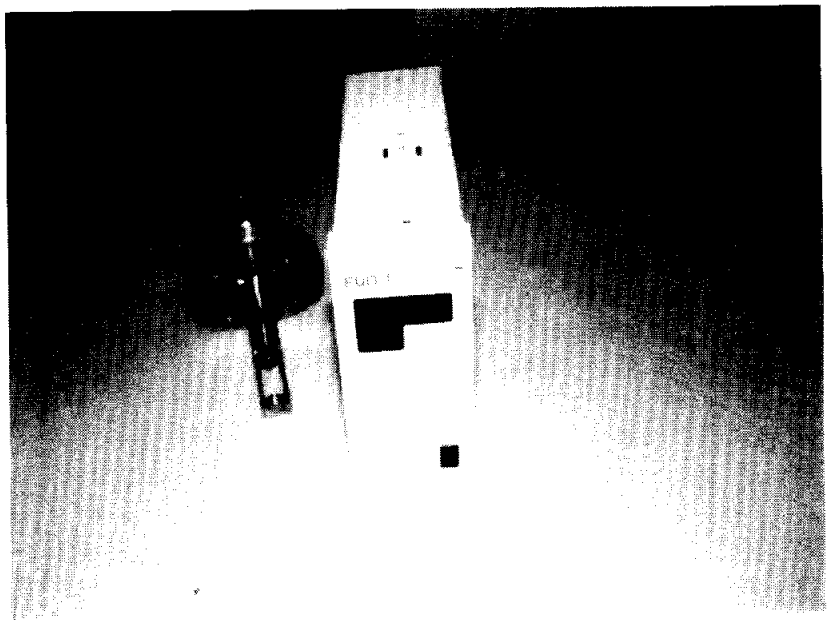


Photo. 2.5 Ultra concentration meter

본 실험은 재생량에 미치는 인자들의 영향을 조사하는데 목적이 있으며, 액체흡수제로 사용되는 염화리튬의 초기농도를 25w.t.%로 고정하였다. 풍량은 100m^3/h, 145m^3/h, 그리고 190m^3/h인 3 단계로 변화시켜 풍량에 의한 재생량 변화를 관찰하였다. 도입공기의 온도와 습도는 여름의 외기 상태를 가정하여 30℃, 50%로 실험 중 일정하게 유지하였다. 액체흡수제의 유량 조절은 인버터로 마그네틱 펌프의 회전수를 조절하면서 6 ℓ/min, 10 ℓ/min, 그리고 14 ℓ/min인 3 단계로 변화시켜 실험을 행하였다. Table 2.2에 실험 조건이 나타나 있다.

Table 2.2 Experimental conditions

Item	Condition of experiment
Inlet air temperature & humidity	30℃, 50%
Air volume	100m^3/h, 145m^3/h, 190m^3/h
Temperature of desiccant	40℃, 50℃, 60℃
Desiccant flow rate	6 ℓ/min, 10 ℓ/min, 14 ℓ/min
Packed layer height	0.3m, 0.4m, 0.5m

실험은 한 패턴이 끝나면 운전을 정지시키고 액체흡수제의 용액과 유입공기를 다시 원상태로 만든 다음, 다른 실험에 지장을 초래하지 않도록 하였다. 특히 재생량에 영향을 미치는 유입공기의 온도 변화는 전 실험 동안 30±0.5℃로 엄격히 조절하여 실험의 정도를 높였다.

측정은 재생탑의 입출구 상태가 정상 상태에 도달하고 난 다음, 10초 간격으로 10분간 연속해서 측정하였으며, 해석에 있어서는 이 10분간의 데이터를 평균한 값을 사용하였다. Photo. 2.6에 실험 전경이 나타나 있다.

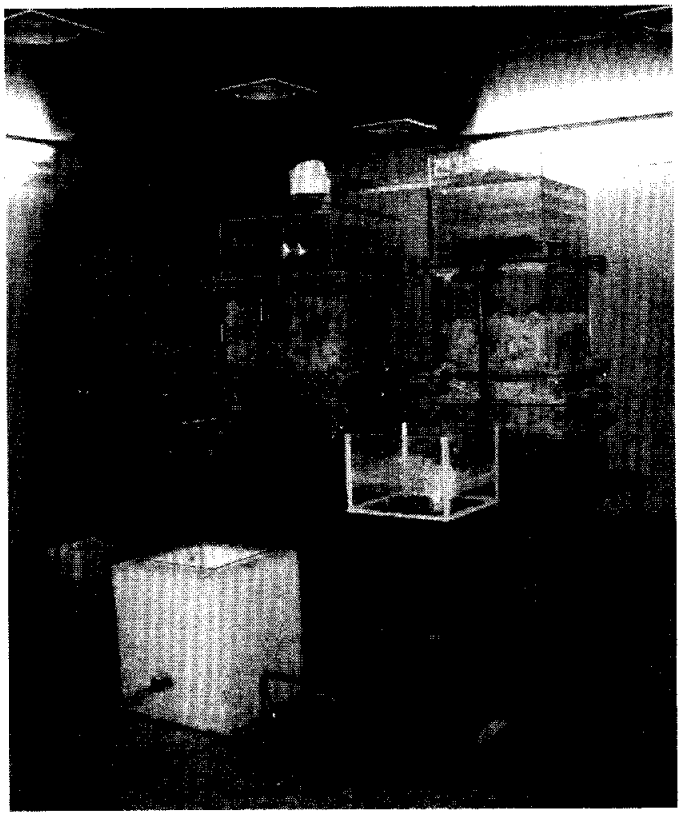


Photo. 2.6 View of experimental apparatus

2.4 재생탑의 재생량 산출을 위한 이론 및 계산식

본 논문에서는 충진층에서의 기액 모습을 Fig. 2.4와 같은 모델로 표시하여 재생량을 산출하였다.

재생량은 유입공기의 절대습도량과 배출되는 공기의 절대습도량의 차에 풍량을 곱해서 구할 수가 있다.

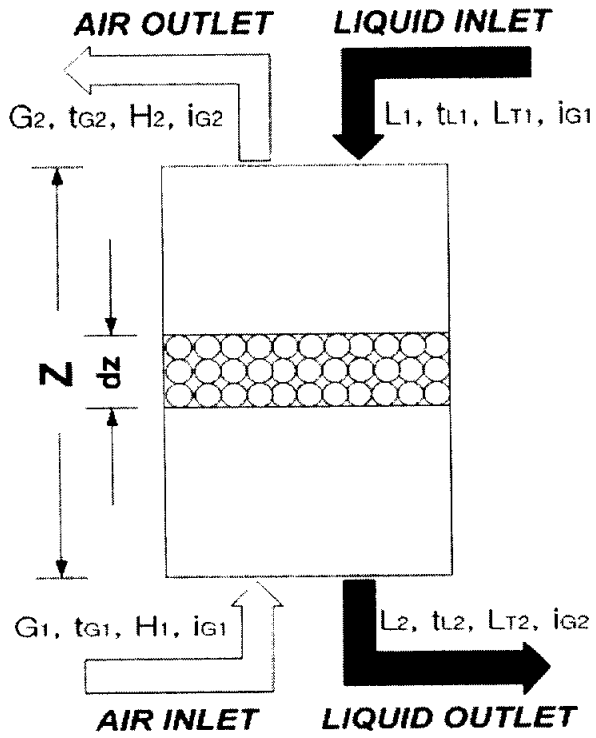


Fig. 2.4 Mass transfer model between air and desiccant flows in the tower

즉, 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$W = G \times (X_0 - X_i) \tag{2.1}$$

$$= K_G \times a \times (H_G - H_L) \tag{2.2}$$

여기서 W는 재생량, G는 풍량, Xo는 출구공기의 절대습도, Xi는 입구공기의 절대습도이다. 그리고 K_G는 물질전달계수를, a는 접촉면적을 나타낸다.

또한 공기측과 액체흡수재측의 열전달계수는 다음과 같이 표시된다.

$$dq_G = G \times C_{HG} \times t_G \tag{2.3}$$

$$= h_G \times a \times (t_a - t_i) \times z \tag{2.4}$$

$$dq_L = L \times C_{HL} \times t_L \tag{2.5}$$

$$= h_L \times a \times (t_i - t_L) \times z \tag{2.6}$$

만약에 열전달량과 물질전달량이 공기로부터 액체흡수제로 이동되었다고 가정을 하면 물질전달 및 열전달 평형식으로부터 dW=dL이 된다. 따라서 본 논문에서는 식(2.1)을 사용하여 재생된 액체흡수제의 농도 및 재생량을 산출하였다.

2.5 재생탑 성능 실험 결과

2.5.1 충진층 높이에 따른 재생량 변화

1) 액체흡수제 온도가 40℃일 때의 재생량 변화

액체흡수제의 온도가 40℃일 때, 풍량과 유량이 증가할수록 재생량이 증가하나, 충진층의 높이가 40cm 이상의 범위에서는 재생량에 큰 변화를 나타내고 있지 않다. 한편, 재생량은 충진층의 높이가 30cm에서는 약 4.5kg/h였으나, 충진층 높이가 40cm와 50cm 범위에서는 약 5.2kg/h로 약간 증가하였으나 충진층 높이에 대한 영향은 거의 없었다. Fig. 2.5에 액체흡수제의 높이에 따른 재생량의 변화가 나타나있다.

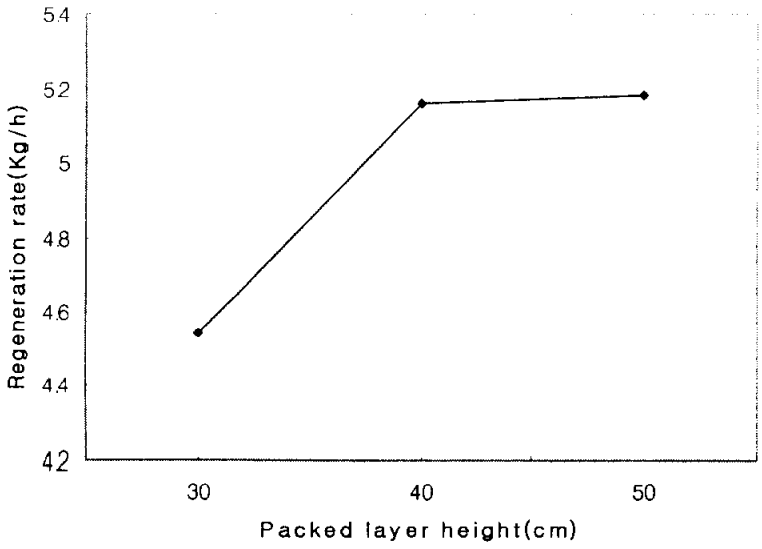


Fig. 2.5 Changes in regeneration rate against packed layer height (in case of 40℃)

2) 액체흡수제 온도가 50℃일 때의 재생량 변화

액체흡수제의 온도가 50℃일 때는 충진층의 높이에 따른 재생량의 변화가 40℃일 때보다는 많았다. 충진층의 높이가 30cm인 경우에는 약 6.0kg/h의 재생량을 보였으며, 40cm와 50cm에서는 약 7.2kg/h의 재생량을 보여 충진층 높이에 따른 재생량의 증가가 있었다. 그러나 충진층 높이가 30cm에 비해서 40cm와 50cm에서의 재생량은 약간 증가하였으나, 40cm와 50cm에서는 거의 재생량의 변화가 없었다.

한편, 같은 충진층 높이인 30cm에서는 온도범위가 40℃와 50℃에서의 재생량 변화는 약 1.5kg/h 정도의 차이가 났다. 이는 충진층 높이가 30cm에서 40cm로 바뀌었을 때의 변화량 0.5kg/h에 비하면 약 3배 정도의 증가량을 보였다.

Fig. 2.6는 충진층의 높이에 따른 액체흡수제의 재생량 변화를 보여주고 있다.

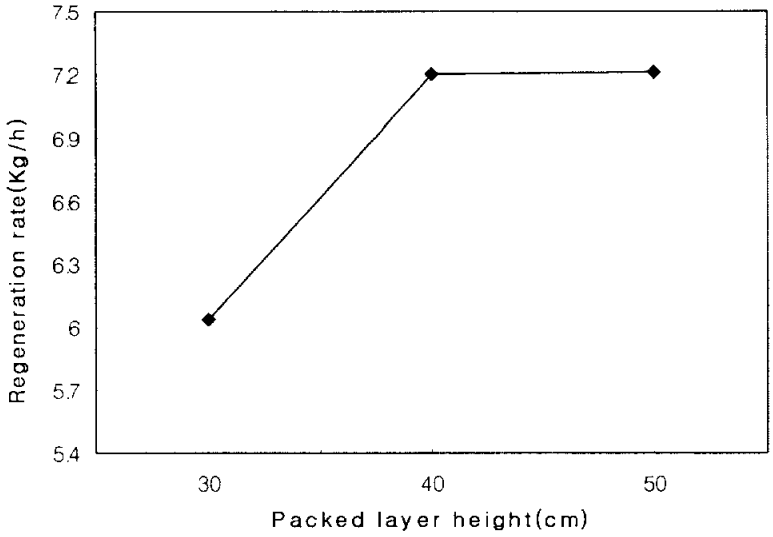


Fig. 2.6 Changes in regeneration rate against packed layer height (in case of 50℃)

3) 액체흡수제 온도가 60℃일 때의 재생량 변화

액체흡수제의 온도가 60℃일 때는 충진층의 높이에 따른 재생량의 변화는 온도가 40℃, 50℃일 때보다도 훨씬 증가하였다. 충진층의 높이가 30cm인 경우에는 약 9.6kg/h의 재생량을 보였으며, 40cm와 50cm에서도 약 9.9kg/h로 많은 재생량을 보였다. 그러나 액체흡수제의 온도가 높을수록 충진층 높이에 대한 재생량 기대가 어렵다는 것을 알았다. 충진층 높이가 30cm일 때는 재생량이 약 9.6kg/h였으나 40cm와 50cm에서는 모두 약 9.9kg/h의 재생량을 보였다. 한편, 같은 충진층 높이인 30cm에서는 온도범위가 40℃와 50℃에서 각각 4.5kg/h와 6.0kg/h로 약

1.5kg/h정도의 재생량 차이가 나타났다. 그러나 온도범위가 60℃에서는 40℃에 비해서는 약 5.1kg/h, 50℃에 비해서는 3.6kg/h나 증대하였다. 이는 액체흡수제의 흡수포텐셜 능력이 액체 흡수제의 온도에 의존한다는 것을 잘 설명하고 있다.

그러나 충진층 높이가 40cm와 50cm인 경우에는 온도범위의 변화에 따른 재생량의 차이가 거의 일정하였다. 즉, 충진층 높이가 40cm와 50cm인 경우의 온도변화에 따른 재생량은 40℃와 50℃에서는 약 2kg/h 정도였으며, 50℃와 60℃에서의 차이는 이 보다 약간 증대한 2.6kg/h 정도의 차이를 나타내고 있다. 이는 온도변화에 따른 차이, 즉 60℃ 범위는 40℃에서보다도 약 5.1kg/h 정도가 증가하였으며, 50℃에 비해서는 약 3.6kg/h의 증가를 보여주었다. Fig. 2.7은 액체흡수제의 온도가 60℃일 때의 충진층 높이에 따른 재생량의 변화를 보여주고 있다.

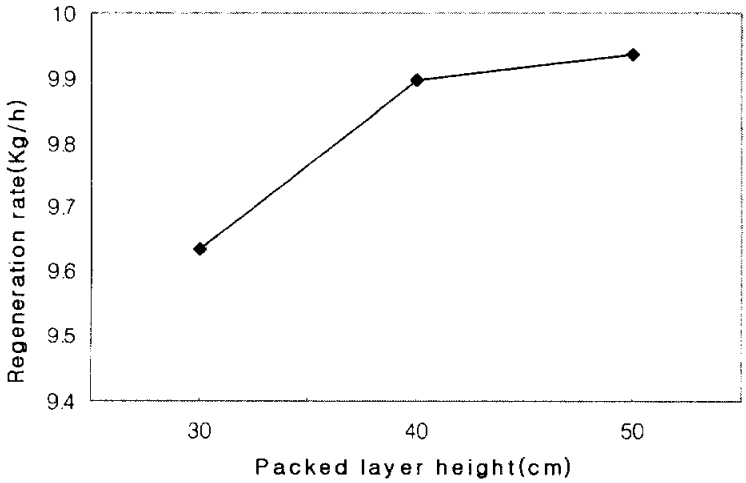


Fig. 2.7 Changes in regeneration rate against packed layer height (in case of 60℃)

2.5.2 유량 변화에 따른 재생량 변화

1) 용액의 온도가 40℃인 경우

액체흡수제의 온도가 40℃일 때의 재생량 변화에 있어서는 풍량과 유량이 증가할수록 약간 재생량이 증가하는 경향을 보였으나, 그 증가폭은 매우 적었다. 액체흡수제의 유량과 풍량의 변화에 따른 재생량의 차이의 결과가 Fig. 2.8에 나타나 있다.

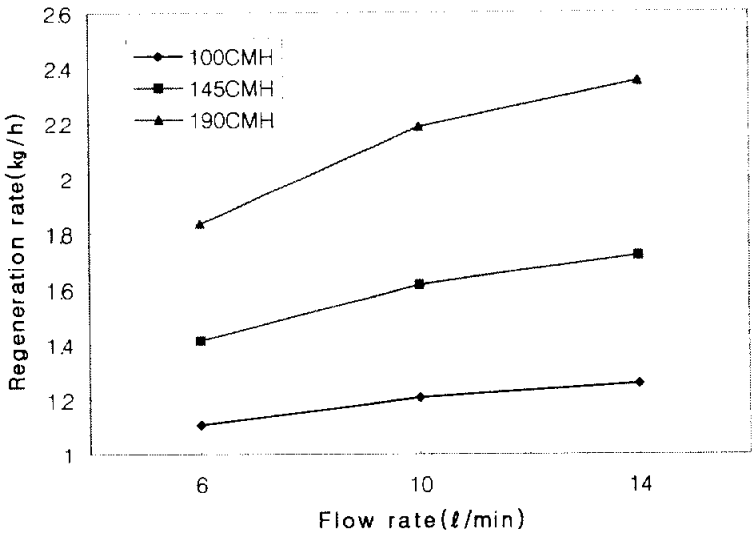


Fig. 2.8 Changes in regeneration rate against flow rate (in case of 40℃)

먼저, 그림에 나타나 있는 것과 같이 풍량이 100m^3/h일 경우에 액체흡수제를 6ℓ/min로 순환하였을 때의 재생량은 약 1.1kg/h 정도였다. 그러나 순환량을 10ℓ/min, 14ℓ/min로 각각 증가시켰을 경우, 재생량이 각각 1.2kg/h, 1.3kg/h로 액체흡수제의 유량 증가에 따른 재생량의 증가는 매우 미미하였으며, 용액 순환량이 증가하여도 재생량의 증가에는 별다른 차이점을 발견할 수 없었다.

한편, 풍량을 145m^3/h로 올려서 실험한 결과, 풍량이 100m^3/h인 결과와 전반적으로 약간 상승하는 경향을 나타내었으나, 재생량의 증가 비

율은 거의 같은 경향을 보였다. 유량이 6ℓ/min일 때는 약 1.4kg/h, 10ℓ/min일 때는 약 1.6kg/h, 그리고 14ℓ/min일 때는 약 1.7kg/h가 재생되었으며, 이는 풍량이 100m^3/h인 경우의 재생량과 단수 비교하면 최소 25%에서 최대 38%정도 증가하였다. 그리고 풍량의 증가에 의한 재생량의 증가폭은 100m^3/h인 경우와 비교하여 약간 증가하는 추세를 나타내었다.

반면에 풍량을 190m^3/h로 증가하여 실험한 결과에서는 전반적으로 재생이 많이 되고 있음을 보여주었다. 유량이 6ℓ/min인 경우에 재생량이 약 1.8kg/h, 10ℓ/min인 경우에는 2.2kg/h, 그리고 14ℓ/min인 경우에는 2.4kg/h로 비교적 많은 재생량을 얻을 수 있었다. 이 결과, 유량이 많은 14ℓ/min에서 풍량이 적은 100m^3/h와 비교를 하였을 경우, 재생량은 약 100% 정도 차이가 났으며, 유량이 적은 6ℓ/min에서 풍량이 적은 100m^3/h와 비교하면 약 70% 정도 증가함을 보여주었다.

2) 용액의 온도가 50℃인 경우

액체흡수제의 온도가 50℃일 때의 재생량 변화에 있어서는 풍량과 유량이 증가할수록 약간 재생량이 증가하는 경향을 보였으며, 그 증가율은 용액의 온도가 40℃인 경우와 거의 유사하였다. 그러나 전반적으로 재생량은 용액의 온도가 40℃일 때의 값과 비교해서 최소 80%에서 최

대 100% 정도로 증가함을 알 수 있었다. Fig. 2.9은 액체흡수제의 유량과 풍량의 변화에 따른 재생량 차이의 실험 결과를 보여주고 있다.

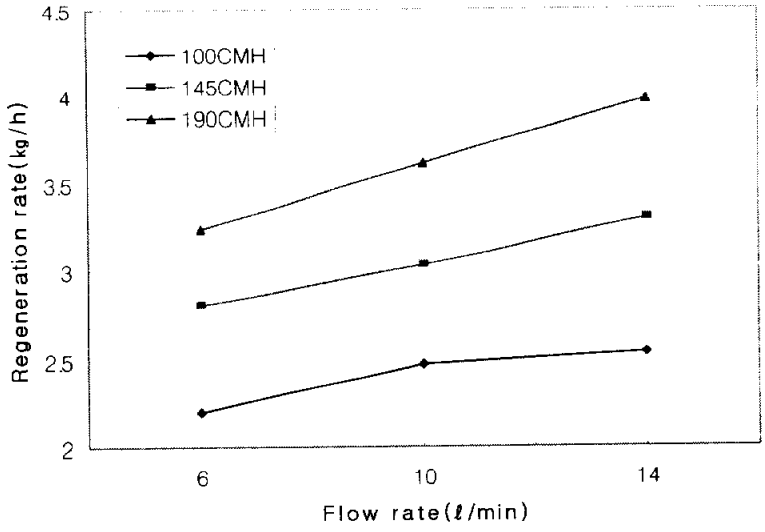


Fig. 2.9 Changes in regeneration rate against flow rate (in case of 50℃)

그림에 나타나 있는 것과 같이 풍량이 100m^3/h일 경우, 액체흡수제를 6ℓ/min, 10ℓ/min, 그리고 14ℓ/min로 변화시켰을 때, 재생량은 각각 약 2.2kg/h, 약 2.5kg/h, 그리고 약 2.6kg/h로 나타났으며, 그 차이는 약 0.3kg/h 밖에 나지 않았다.

한편, 풍량이 145m^3/h인 경우에도 풍량이 100m^3/h인 결과와 비교하여 재생량의 증가 비율 경향은 비교적 유사하나, 재생량 변화에서는 약간

차이가 났다. 이 때 재생량은 6ℓ/min, 10ℓ/min, 그리고 14ℓ/min로 변화시켰을 때, 각각 약 2.8kg/h, 약 3.0kg/h, 그리고 약 3.3kg/h 정도로 나타났으며, 그 증가 비율은 용액의 온도가 40℃인 경우의 비율과 거의 유사하였다.

반면에 풍량을 190m^3/h로 증가하여 실험한 결과에서는 그림에서와 같이 재생량이 많음을 알 수 있었다. 유량이 6ℓ/min인 경우에 재생량은 약 3.3kg/h, 10ℓ/min인 경우에는 약 3.6kg/h, 그리고 14ℓ/min인 경우에는 약 4.0kg/h 정도로 비교적 많은 재생량을 나타내었으며 전반적인 재생량의 상승폭은 용액의 온도가 40℃인 경우의 결과와 유사하였다.

3) 용액의 온도가 60℃인 경우

액체흡수제의 온도가 비교적 고온인 60℃일 때의 재생량 변화에 있어서는 풍량과 유량이 증가할수록 재생량이 많이 증가하는 경향을 보였으며, 그 증가율은 용액의 온도가 40℃와 50℃인 경우와 비교하면 차이가 있음을 알 수 있다. 또한 전반적으로 재생량도 용액의 온도가 40℃와 50℃일 때의 값과 비교해서 증가함을 알 수 있었다. Fig. 2.10은 액체흡수제의 유량과 풍량의 변화에 따른 재생량 차이의 결과를 보여주고 있다.

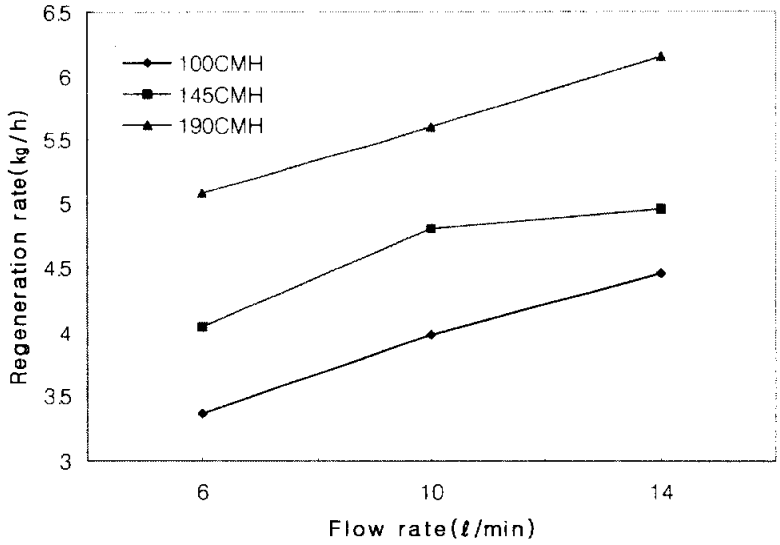


Fig. 2.10 Changes in regeneration rate against flow rate (in case of 60℃)

Fig. 2.10에 나타나 있는 것과 같이 풍량이 100m^3/h일 경우, 액체흡수제를 6ℓ/min, 10ℓ/min, 그리고 14ℓ/min로 변화시켰을 때의 재생량은 각각 약 3.4kg/h, 약 4.0kg/h, 그리고 약 4.4kg/h로 비교적 많았다. 그리고 유량에 따른 재생량의 변화량은 약 1.0kg/h로, 용액의 온도가 40℃와 50℃인 경우의 약 0.2kg/h와 약 0.4kg/h와 비교해서 현저히 많음을 알 수 있었다.

한편, 풍량이 145m^3/h인 경우에도 풍량이 100m^3/h인 결과와 비교하여 재생량의 증가 비율 경향은 비교적 유사하나, 재생량 변화에서는 약간 차이가 났다. 유량을 각각 6ℓ/min, 10ℓ/min, 그리고 14ℓ/min로 변화

시켰을 때, 이때의 재생량은 각각 약 4.0kg/h, 약 4.8kg/h, 그리고 약 5.0kg/h 정도였다.

반면에 풍량을 190m^3/h로 증가하여 실험한 결과에서는 그림에 나타나 있는 것과 같이 재생량이 증가함을 알 수 있었다. 유량이 6ℓ/min인 경우에는 재생량이 약 5.1kg/h, 10ℓ/min인 경우에는 약 5.6kg/h, 그리고 14ℓ/min인 경우에는 약 6.2kg/h 정도로 많은 재생량을 나타내었으며, 전반적인 재생량의 상승폭은 용액의 온도가 40℃와 50℃인 경우의 상승폭과 비교하여 증가함을 알 수 있었다.

2.5.3 풍량 변화에 따른 재생량 변화

1) 용액온도가 40℃인우

액체흡수제 용액 온도가 40℃일 때, 풍량과 유량이 증가할수록 재생량이 약간 증가하는 경향을 나타내나, 그 증가폭은 매우 적다. 액체흡수제의 유량과 풍량의 변화에 따른 재생량의 차이가 Fig. 2.11에 나타나 있다.

먼저, 풍량이 100m^3/h일 경우, 액체흡수제를 6ℓ/min로 순환하였을 때의 재생량은 약 1.11kg/h 정도였다. 그러나 순환량을 10ℓ/min, 14ℓ/min로 각각 증가시켰을 경우, 재생량이 각각 1.21kg/h, 1.25kg/h로, 액체흡수제의 유량 증가에 따른 재생량의 증가는 매우 미미하였으며,

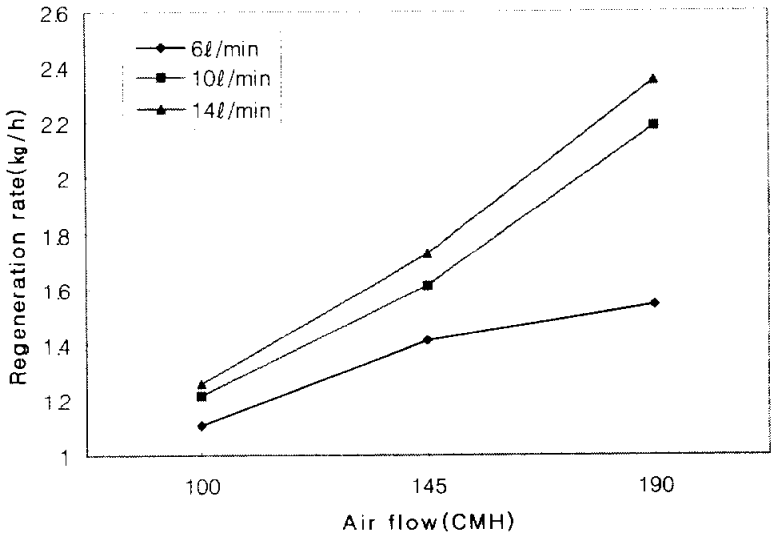


Fig. 2.11 Changes in regeneration rate against air flow (in case of 40℃)

용액 순환량이 증가하여도 재생량은 별로 증가하지 않았다.

풍량을 145m^3/h로 증가시켜 실험한 결과, 전반적으로 재생량이 약간 상승하였으나, 풍량이 100m^3/h인 때와 마찬가지로 재생량의 증가 비율은 거의 같은 경향을 보였다. 유량이 6ℓ/min일 때는 약 1.41kg/h, 10ℓ/min일 때는 약 1.61kg/h, 그리고 14ℓ/m일 때는 약 1.72kg/h가 재생되었으며, 이는 풍량이 100m^3/h인 경우의 재생량과 단순 비교하면 최소 25%에서 최대 38%정도 증가하였다.

반면에, 풍량을 190m^3/h로 올려서 실험한 결과, 전반적으로 재생이 많이 되었다. 재생량은 유량이 6ℓ/min인 경우, 약 1.85kg/h, 10ℓ/min인

경우에 약 2.19kg/h, 그리고 14ℓ/min인 경우에 약 2.35kg/h로 비교적 양호한 재생량을 얻었다. 그 결과, 유량이 많은 14ℓ/min에서 풍량이 적은 100m^3/h와 비교를 하였을 경우, 재생량은 약 100% 정도 더 많았으며, 유량이 적은 6ℓ/min에서도 약 70% 정도 더 증가하여 유량이 많을수록 재생량이 많았다.

2) 용액온도가 50℃인 경우

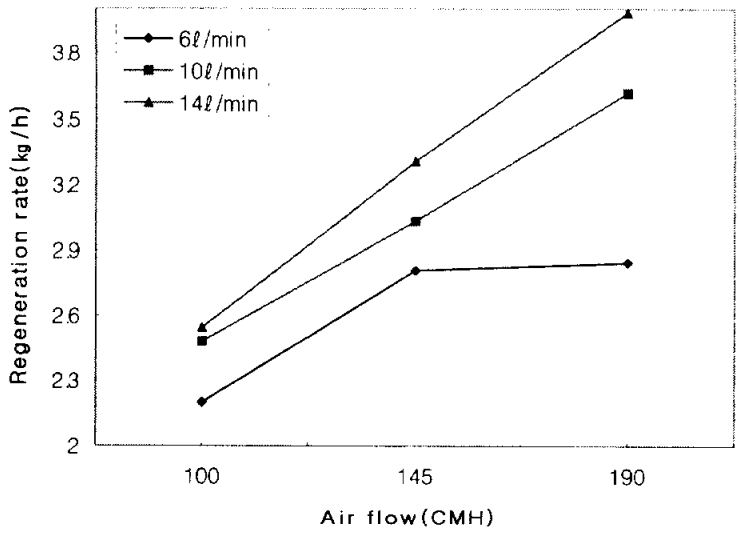


Fig. 2.12 Changes in regeneration rate against air flow (in case of 50℃)

액체흡수제 용액 온도가 50℃일 때는 풍량과 유량이 증가할수록 재생량이 약간 증가하는 경향을 보였으며, 그 증가율은 용액의 온도가 40℃

인 경우와 거의 유사하였다. 그러나 재생량은 전반적으로 용액의 온도가 40℃일 때의 재생량과 비교하여 최소 80%에서 최대 100% 정도 더 증가하였다. Fig. 2.12은 액체흡수제의 용액온도가 50℃일 때 유량과 풍량의 변화에 따른 재생량 차이를 보여주고 있다.

그림에서와 같이 풍량이 100m^3/h일 경우, 유량을 6ℓ/min, 10ℓ/min, 그리고 14ℓ/min로 변화시켰을 때, 재생량은 각각 약 2.20kg/h, 약 2.48kg/h, 그리고 약 2.55kg/h로, 그 차이는 약 0.35kg/h에 불과하다.

한편, 풍량이 145m^3/h인 경우, 풍량이 100m^3/h인 결과와 비교하면 재생량의 증가 비율은 비교적 유사하나, 실질적 재생량에서는 약간 더 많았다. 유량을 6ℓ/min, 10ℓ/min, 그리고 14ℓ/min로 변화시켰을 때, 재생량은 각각 약 2.81kg/h, 약 3.03kg/h, 그리고 약 3.30kg/h 정도였다. 이 증가 비율은 용액의 온도가 40℃인 경우와 거의 동일하다.

반면에, 풍량을 190m^3/h로 증가하여 실험한 재생량은 풍량이 적을 때의 재생량과 비교하면 재생량이 많았다. 유량이 6ℓ/min인 경우에 재생량은 약 3.25kg/h, 10ℓ/min인 경우에는 약 3.62kg/h, 그리고 14ℓ/min인 경우에는 약 3.98kg/h 정도였다. 이 또한 재생량의 증가율 또한 용액의 온도가 40℃인 경우와 거의 유사하였다.

3) 용액온도가 60℃인 경우

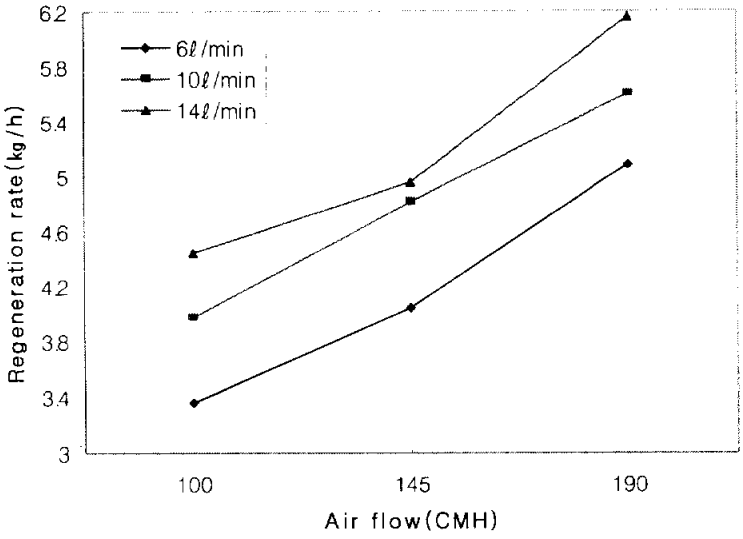


Fig. 2.13 Changes in regeneration rate against air flow (in case of 60℃)

Fig. 2.13은 액체흡수제의 온도가 고온인 60℃일 때 재생량의 변화를 나타내며, 풍량과 유량이 증가할수록 재생량은 크게 증가함을 나타내고 있다. 그 증가율은 용액의 온도가 40℃와 50℃인 경우와 비교하여도 차이가 많았다. 또한 재생량도 용액의 온도가 40℃와 50℃일 때의 재생량과 비교해서 많았다.

그림에 나타나 있듯이, 풍량이 100m^3/h일 경우, 액체흡수제를 6ℓ/min, 10ℓ/min, 그리고 14ℓ/min로 변화시켰을 때의 재생량은 각각 약 3.36kg/h, 약 3.97kg/h, 그리고 약 4.44kg/h로 비교적 많았다.

그리고 유량이 6ℓ/min, 14ℓ/min일 때의 재생량 차이는 약 1.04kg/h로, 용액의 온도가 40℃와 50℃인 경우의 약 0.15kg/h와 약 0.35kg/h에 비해서 현저히 많았다.

한편, 풍량이 145m^3/h인 경우도 풍량이 100m^3/h인 결과에 비해서 재생량의 증가율은 비교적 유사하나, 재생량에서는 약간 차이가 났다. 유량을 각각 6ℓ/min, 10ℓ/min, 그리고 14ℓ/min로 변화시켰을 때, 재생량은 각각 약 4.04kg/h, 4.80kg/h, 그리고 4.96kg/h 정도였다.

반면에, 풍량을 190m^3/h로 올려서 실험한 결과에서는 유량이 6ℓ/min인 경우, 재생량이 약 5.08kg/h, 10ℓ/min인 경우, 재생량이 약 5.60kg/h, 그리고 14ℓ/min인 경우에는 재생량이 약 6.15kg/h 정도로 재생량의 상승폭이 용액의 온도가 40℃와 50℃인 경우의 상승폭에 비하여 크게 증대하였다.

2.5.4 흡수제 온도에 의한 재생량 변화

1) 용액순환량이 6ℓ/min인 경우

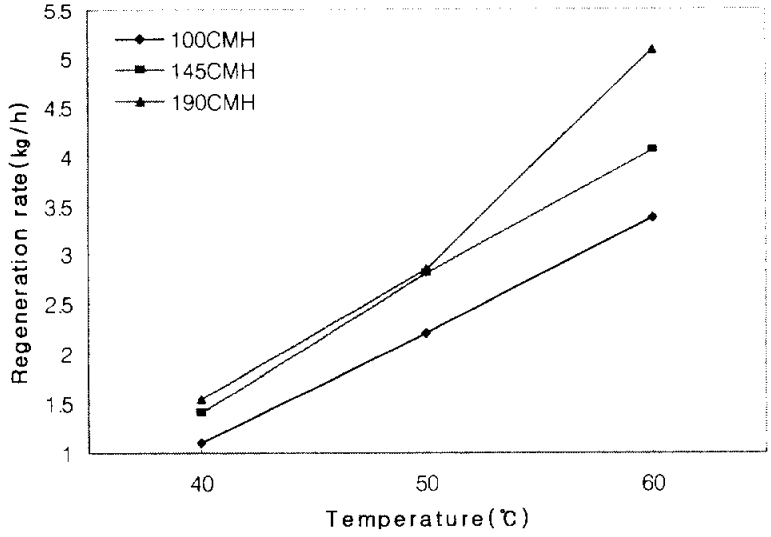


Fig. 2.14 Changes in regeneration rate against desiccant temperature (in case of 6ℓ/min)

액체흡수제 용액 순환량이 6ℓ/min일 때, 풍량과 온도가 증가할수록 재생량이 증가하는 경향을 나타내며, 그 증가폭은 비교적 크다. 액체흡수제의 온도와 풍량의 변화에 따른 재생량의 차이가 Fig. 2.14에 나타나 있다.

먼저, 풍량이 100m^3/h 일 경우, 용액온도 40℃로 순환하였을 때의 재생량은 약 1.11kg/h 정도였다. 그러나 용액 풍량을 145m^3/h, 190m^3/h로 각각 증가시켰을 경우, 재생량이 각각 1.4kg/h, 1.5kg/h로 액체흡수제의

온도 변화에 따른 재생량의 증가는 미미하게 나타났으며, 재생량의 증가량은 풍량의 변화에 큰 영향을 받지 않음을 보여주고 있다.

용액 온도를 50℃로 증가시켜 실험한 결과, 전반적으로 재생량이 상승하여 용액 온도가 40℃인 때의 재생량의 증가 비율과 거의 같은 경향을 보였다. 풍량이 100m^3/h일 때는 약 2.2kg/h, 풍량이 145m^3/h일 때는 약 2.8kg/h, 그리고 풍량이 190m^3/h일 때는 약 2.85kg/h가 재생되었으며, 이는 용액 온도가 40℃인 때의 재생량과 단순 비교하면 최소 90%에서 최대 100% 정도 증가하였다.

반면에, 용액 온도를 60℃로 올려서 실험한 결과에서는 전반적으로 재생이 많이 되었다. 재생량은 풍량이 100m^3/h일 때는 약 3.4kg/h, 풍량이 145m^3/h일 때는 약 4.1kg/h, 그리고 풍량이 190m^3/h일 때는 약 5.1kg/h가 재생되었다. 그 결과, 풍량이 많은 190m^3/h에서 40℃와 60℃를 비교 하였을 때 재생량이 약 230% 정도 더 증가하여 재생량은 용액 온도에 크게 의존함을 알 수 있었다.

2) 용액순환량이 10ℓ/min인 경우

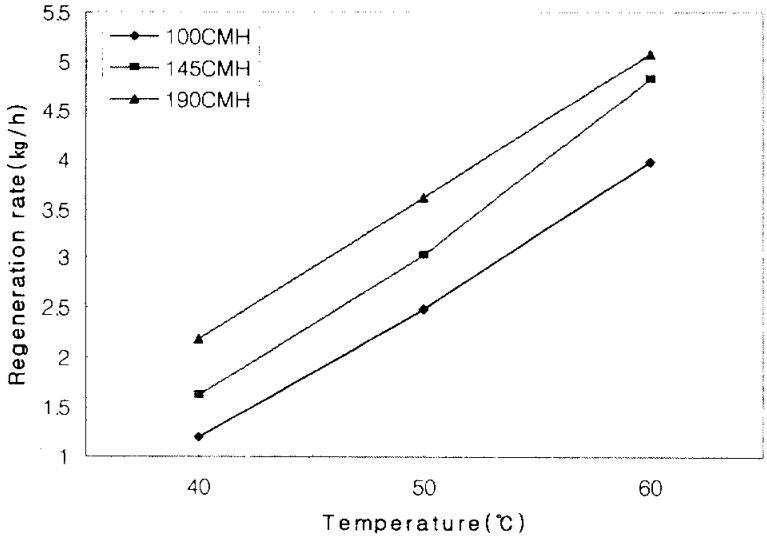


Fig. 2.15 Changes in regeneration rate against desiccant temperature (in case of 10ℓ/min)

액체흡수제 용액 순환량이 10ℓ/min일 때, 풍량과 온도가 증가할수록 재생량이 증가하는 경향을 나타내며, 그 증가폭은 비교적 크다. 액체흡수제의 온도와 풍량의 변화에 따른 재생량의 차이가 Fig. 2.15에 나타나 있다.

먼저, 풍량이 100m^3/h 일 경우, 용액온도 40℃로 순환하였을 때의 재생량은 약 1.25kg/h 정도였다. 그러나 풍량을 145m^3/h, 190m^3/h로 각각 증가시켰을 경우, 재생량이 각각 1.6kg/h, 2.2kg/h로 액체흡수제의 풍량 변화에 따른 재생량의 증가는 미미하게 나타났으며, 재생량의 증가량은

풍량의 변화에 큰 영향을 받지 않음을 보여주고 있다.

용액 온도를 50℃로 증가시켜 실험한 결과, 전반적으로 재생량이 상승하여 용액 온도가 40℃인 때의 재생량의 증가 비율과 거의 같은 경향을 보였다. 풍량이 100m^3/h일 때는 약 2.5kg/h, 풍량이 145m^3/h일 때는 약 3.05kg/h, 그리고 풍량이 190m^3/h일 때는 약 3.55kg/h가 재생되었으며, 이는 용액 온도가 40℃인 때의 재생량과 단순 비교하면 최소 60%에서 최대 100% 정도 증가하였다.

반면에, 용액 온도를 60℃로 올려서 실험한 결과에서는 전반적으로 재생이 많이 되었다. 재생량은 풍량이 100m^3/h일 때는 약 3.95kg/h, 풍량이 145m^3/h일 때는 약 4.8kg/h, 그리고 풍량이 190m^3/h일 때는 약 5.05kg/h가 재생되었다. 그 결과, 풍량이 많은 190m^3/h에서 40℃와 60℃를 비교 하였을 때 재생량이 약 300% 정도 증가하여 재생량은 용액 온도에 크게 의존함을 알 수 있었다.

3) 용액순환량이 14ℓ/min인 경우

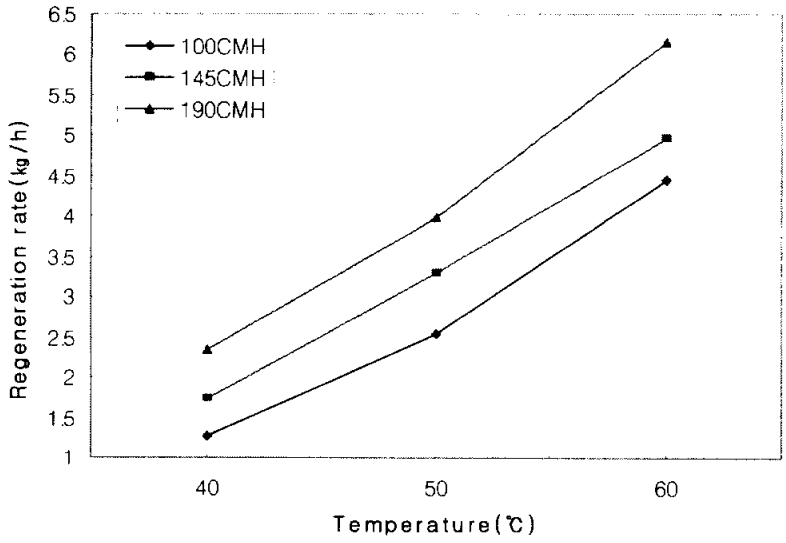


Fig. 2.16 Changes in regeneration rate against desiccant temperature (in case of 14ℓ/min)

액체흡수제 용액 순환량이 14ℓ/min일 때, 풍량과 온도가 증가할수록 재생량이 증가하는 경향을 나타내며, 그 증가폭은 비교적 크다. 액체 흡수제의 온도와 풍량의 변화에 따른 재생량의 차이가 Fig. 2.16에 나타나 있다.

먼저, 풍량이 100m^3/h 일 경우, 용액온도 40℃로 순환하였을 때의 재생량은 약 1.25kg/h 정도였다. 그러나 풍량을 145m^3/h, 190m^3/h로 각각 증가시켰을 경우, 재생량이 각각 1.7kg/h, 2.3kg/h로 액체흡수제의 풍량 변화에 따른 재생량의 증가는 미미하게 나타났으며, 재생량의 증가량은

풍량의 변화에 큰 영향을 받지 않음을 보여주고 있다.

용액 온도를 50℃로 증가시켜 실험한 결과, 전반적으로 재생량이 상승하여 용액 온도가 40℃일 때의 재생량의 증가 비율과 거의 같은 경향을 보였다. 풍량이 100m^3/h일 때는 약 2.5kg/h, 풍량이 145m^3/h일 때는 약 3.3kg/h, 그리고 풍량이 190m^3/h일 때는 약 3.95kg/h가 재생되었으며, 이는 용액 온도가 40℃일 때의 재생량과 단순 비교하면 최소 80%에서 최대 100% 정도 증가하였다.

반면에, 용액 온도를 60℃로 올려서 실험한 결과에서는 전반적으로 재생이 많이 되었다. 재생량은 풍량이 100m^3/h일 때는 약 4.45kg/h, 풍량이 145m^3/h일 때는 약 4.95kg/h, 그리고 풍량이 190m^3/h일 때는 약 6.1kg/h가 재생되었다. 그 결과, 풍량이 많은 190m^3/h에서 40℃와 60℃를 비교 하였을 때 재생량이 약 285% 정도 증가하여 재생량은 용액 온도에 크게 의존함을 알 수 있었다.

2.6 요약

태양열 이용 제습/냉방 공조시스템에서 재생탑의 재생성능에 영향을 미치는 인자들 중, 전열교환 과정에서 충진층의 높이와 흡수제의 유량, 공기의 풍량, 흡수제의 온도에 대하여 실험하고, 이를 분석한 결과, 다음의 결론을 얻었다.

1. 본 실험을 통하여, 난방용으로만 사용되어온 태양열 집열기를 하계에 집열기로 부터 얻은 온수를 사용하여 액체흡수제를 예열함으로서 태양열 이용 제습/냉방 장치에 적용할 수 있음을 확인하였다.
2. 하계에 태양열온수기로 온수를 40℃에서 60℃로 상승을 시킬 수 있으면, 재생탑에서 최소 4.5kg/h에서 9.6kg/h 정도로 액체흡수제를 재생시킬 수 있기 때문에 태양열온수기의 계절적 한계를 벗어날 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.
3. 한편, 액체흡수제 온도의 변화에 의한 재생량은 큰 차이를 보였으며, 용액온도가 높을수록 재생량이 급격하게 많아짐을 알 수 있었다. 용액온도가 40℃일 때 평균 재생량이 약 5.1kg/h로, 50℃일 때의 7.1kg/h 그리고 60℃일 때는 약 9.8kg/h로 재생량이 용액온도에 크게 의존함을 알 수 있었다.
4. 충진층의 높이에 따른 재생량의 차이는 약간 있으나, 40cm와 50cm에서는 거의 재생량의 차이가 없어 충진층 높이에 따른 효과를 기대할 수 없음을 알았다.

제 3 장 제습탑에 의한 제습실험

3.1 제습탑의 개요

습도를 조절하는 방법에는 여러 가지가 있으나, 액체흡수제에 의한 제습작용은 습도 조절은 물론 온도 조절도 가능하며, 연속적 취급이 용이하고, 대용량의 공기를 동시에 처리할 수 있는 등 다른 제습법에 없는 특징을 갖고 있다. 모든 흡습제 중에서 액체흡수제로 사용되기 위해서는 낮은 수증기압을 지녀야 하고, 화학적으로 안정하여 분해나 증발을 일으키지 않아야 하고, 독성이나 부식성이 없어야 하는 등 여러 가지 조건들을 만족하여야 한다. 그러나 이러한 요구 조건을 충족시키는 흡습제는 실질적으로 극히 적으며, 현재 실제로 여러 제습시스템에 사용되고 있는 것은 염화리튬(LiCl, lithium chloride)과 트리에틸렌 글리콜(triethylene glycol)정도이다. 그러나 이 두 가지 액체흡수제 중 흡습특성과 화학적 안정성에 있어서 염화리튬이 월등히 뛰어난 특성을 나타내고 있다. 액체흡수제로 유망한 염화리튬용액의 주요 특징을 기술하면 다음과 같다.

염화리튬 수용액은 1) 수증기 분압이 낮고, 2) 농도의 사용 범위가 넓으며, 3) 화학적으로 안정하고, 4) 분해나 증발이 일어나지 않으며, 5) 무독, 무미, 무취이며, 6) 강한 살균작용을 하기 때문에 액체흡수제로 많이 사용되고 있다. 이러한 까닭으로 수년전부터 일본에서는 LiCl수용

액을 이용한 제습장치가 점차 확대 보급되어 왔다. 이 LiCl수용액은 액체흡수제로써의 필요조건을 대체로 만족시키고 있기 때문에, 현재 가장 실용적인 흡수제로 사용되고 있다. 이것은 실리카겔과 같은 고체 흡착제에 비하여 점도가 낮고, 열전도성도 좋을 뿐만 아니라, 조작이 용이하고 흡수력이 뛰어나기 때문이다. 그러나 LiCl수용액을 이용한 제습은 비교적 새로운 기술로써 정확한 이론 해석이나 구체적인 설계 예 등에 관한 것은 물론이며 제습장치 및 원리에 관한 문헌도 비교적 드문 형편이다.

3.2 제습탑 실험장치 제작 및 개요

제습기에는 크게 직교형과 향류형이 있으나, 일반적으로 압력손실을 무시하면 향류형이 직교형보다 성능이 뛰어나다. 따라서 본 연구에서는 제습 성능 향상을 목적으로 Fig. 3.1과 같은 단순한 향류형 제습탑을 제작하여 실험하였다.

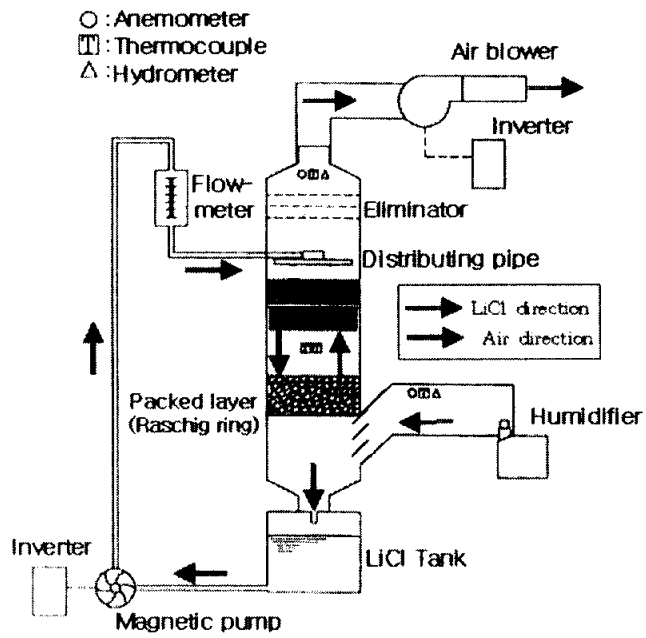


Fig. 3.1 Experimental schematic for dehumidifier

본 연구에서는 태양열 이용 공조시스템에서 냉방과 제습은 물론, 난방까지도 가능한 모형 전열교환기를 직접 제작해서 작동유체로써 흡수력이 강한 LiCl수용액을 사용하여 실내에서 실험을 수행하였다. 일반적으로 전열교환기에서 냉방이나 제습, 혹은 난방에 있어서 각각의 효율을 좌우하는 것은 대상공기와 LiCl수용액과의 접촉시간 및 접촉면적이라고 할 수 있다. 즉, 충진층(packed layer)내에서 LiCl 수용액의 체공시간을 길게 하거나, 기액 접촉면적을 크게 하는 것이 무엇보다도 중요하다. 따라서 기액접촉면적을 증대시키는 구조가 바람직하나, 실제로

넓은 공간을 확보하기에는 많은 제약이 따르고 있다. 본 장치의 충진재로써는 제한된 공간 속에서 많은 접촉면적과 오랜 체공시간을 갖게 하기 위하여 플라스틱 계통인 플라스틱 패킹(plastic packing)을 사용하였다.

한편, 본 장치에서는 충진층을 중심으로 LiCl수용액과 공기를 최대한 효율적으로 접촉시키기 위하여 제습탑의 상부에 송풍팬을 부착해서 대상공기가 덕트로 최소한의 저항으로 흡입되도록 하였으며, 액체 흡수제인 LiCl수용액은 반대로 충진층의 상부로부터 살수하여 충진재의 표면을 균일하게 적시면서 자연 낙하하도록 하였다. 그러나 실제로는 LiCl 수용액의 점도와 공기의 저항 때문에 충진층 내에서 기액이 균일하게 접촉되기가 어렵다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 공기 경로와 액체흡수제가 지나가는 경로를 별도로 만들어 서로 간섭 없이 유통하도록 하였다.

일반적으로 냉방 및 제습, 그리고 난방에 있어서 각각의 성능을 좌우하는 것은 액체흡수제 측에서 LiCl수용액의 농도, 온도, 유량이며, 대상공기 측에서는 공기의 온도와 습도, 풍량으로 간주할 수가 있다. 그러므로 실내 실험실에서 각 입구 상태를 일정하게 유지하면서 다른 조건들을 변화시켜 실험을 수행하면 냉방 및 제습 그리고 난방 시의 상호 영향을 조사할 수가 있다. 특히, 냉방 실험 모드에 있어서 LiCl수용액의

온도를 시수를 사용하여 낮춘 후, 고온 다습한 공기와 직접 접촉시키면 현열 및 잠열을 동시에 빼앗아 제습/냉각을 할 수 있으며, 난방 모드에서는 재생기에 의해서 가열된 LiCl수용액을 전열교환기에서 저온 저습한 공기와 직접 접촉시켜 온풍을 만들어 난방을 할 수 있다. 한편, 충분한 일사를 얻지 못할 경우에는 심야전력 등을 이용하여 LiCl수용액의 포텐셜 에너지(potential energy)를 높여 난방으로 혹은 냉방으로 사용할 수 있다.

본 실험은 이러한 특징을 갖고 있는 전열교환기의 특성을 파악하기 위한 것으로, 재생 시에 태양열 대신에 전기 히터를 사용하여 LiCl 수용액의 농도와 온도를 임의로 조절하여 정상상태 하에서 실험하였다. 이와 동시에 공기 측의 요소들을 온열환경 실험실에서 조절 변화시켜 가면서 반복하여 실험하였다.

모든 측정 상태가 정상상태에 도달하였다고 가정하였을 때 측정을 개시하였으며, 측정에서는 C-C열전대와 습도계 및 농도계로써 공기측과 LiCl 수용액측의 거동을 관찰하였다. 데이터 집록장치(Net DAQ)를 사용하여 연속적으로 측정한 누적 결과를 해석에 사용하였다.

3.3 제습탑 성능 실험

본 연구에서는 개량된 제습탑을 사용하고 액체흡수제인 LiCl수용액을 실제로 제습에 이용하였을 때, 어느 정도의 제습효과가 있는가를 조사하기 위하여 실험장치 전체가 정상상태에 도달할 때까지 운전한 다음, 실측을 개시하였다.

실험실에서 항온항습기와 가습기 2대를 사용하여 26℃, 60%인 습공기를 인위적으로 만들어 실험하였으나, 실제로는 설정 환경이 다소 변동하여 공기온도가 26±1℃, 상대습도는 60±4% 정도의 범위였다. LiCl수용액은 충진층에서 자유 낙하 하면서 습공기로부터 수분을 빼앗은 후 용액탱크로 유입되며 제습기의 상부에 설치된 흡입 휀에 의해 습공기는 충진층의 하부로부터 유입된다. 이때, 액체흡수제가 습공기의 유입되는 통로로 역류하지 않도록 공기 유입부에 베인(vane)을 설치하였다.

일단, 제습과정을 거친 LiCl수용액은 다시 용액탱크로 되돌아와서 기존의 고농도 LiCl수용액과 합류하나, LiCl수용액은 마그네틱 펌프에 의해 제습기로 운반되어 제습과정을 반복하도록 되어 있다.

본 연구에서는 제습탑의 성능을 평가하기 위해서 충진재의 종류와 충진층의 높이, 용액의 농도 및 온도, 그리고 용액의 유량 및 풍량의 변화에 따른 제습량의 변화를 조사하였다. 뿐만 아니라, 제습량에 영향을 미치는 인자들(유량, 풍량, 용액의 온도 및 농도, 충진층의 높이, 충진재의

종류)의 효과를 실험계획법을 사용하여 조사하였다.

한편, 측정에 있어서 공기와 용액의 온도는 C-C열전대로 측정 하였으며, 도입공기의 입·출구 상대습도는 디지털 습도계를 이용하여 측정한 값을 분석에 사용하였다. 실험에 사용한 제습탑은 여러 차례의 실험을 통하여 다운사이징(down sizing)이 된 가로 0.5m × 세로 0.5m로 전체높이가 최대 1m로 충진층의 높이를 조절할 수 있도록 제작되었다.

3.4 제습탑 성능 실험 결과

제습탑의 제습성능에 영향을 미치는 인자는 앞에서 언급한 인자 중, 도입공기의 온도 및 습도를 일정하게 두면 6인자가 된다. 본 실험은 제습성능에 영향을 미치는 인자들이 제습성능에 미치는 기여율을 파악하는 데 그 목적이 있으므로 먼저 단순한 $L_8(2^7)$ 직교배열표를 이용한 2수준 실험을 행하였다.

Table 3.1에 2인자 실험의 인자 기호 및 인자 수준을 나타내었다.

Table 3.1 Levels of factor ($L_8(2^7)$)

Level / Factor	Symbols	Level 1	Level 2
Height of packed layer (cm)	**A**	20	40
Packed layer (-)	**B**	plastic packing	raschig ring
Concentration of desiccant (w.t.%)	**C**	30	35
Temperature of desiccant (℃)	**D**	20	25
Solution flow rate (ℓ/min)	**E**	10	20
Air volume (m^3/h)	**F**	80	100

제습량에 영향을 미친다고 가정한 6인자의 제습성능에 미치는 기여율을 파악하기 위하여 $L_8(2^7)$형 직교배열표를 사용, 실험을 실시하여 주효과를 조사 하였는데, Table 3.2에 $L_8(2^7)$ 직교배열표로의 인자 배치를 나타내었다.

여기에서 1~6열에 주요 인자 A, B, C, D, E, F를 배치하고 7열은 오차항으로 설정하였으며, 이에 입각하여 인자 수준을 조합하고 난수표를 이용해서 무작위로 실험 순서를 정하여 실험하였다.

Table 3.2 $L_8(2^7)$ Factor arrangement

Number of experiment	Number of line						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1	1
3	0	1	1	0	0	1	1
4	0	1	1	1	1	0	0
5	1	0	1	0	1	0	1
6	1	0	1	1	0	1	0
7	1	1	0	0	1	1	0
8	1	1	0	1	0	0	1
Basic arrangement	a	b	a b	c	a c	b c	a b c
Arrangement	A	B	A×B	C	A×C	D	e

본 실험은 실험계획법에 따라 실험 조건, 실험 순서, 실험수준 등을 미리 선정하여 행하였다. 그리고 해석에서는 분산분석법을 이용하여 유의(有意)하다고 판단되는 인자의 주 효과와 제습량에 미치는 인자의 기여율을 실험 결과로부터 얻었다.

분산분석이란 특성치의 산포를 제곱합(변동)으로 나타내며, 이 제곱합을 실험과 관련된 요인마다의 제곱합으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 요인이 무엇인가를 찾아내는 분석방법이다. 실험으로 부터 얻어지는 데이터의 분석에는 분산분석이 그 밑바탕을 이루고 있다고 볼 수 있으며, 실험계획법에서 가장 많이 사용하는 분석방법이다. 따라서 본 실험은 각 실험조건별의 제습량을 바탕으로 분산분석을 행하였다.

Fig. 3.2에 $L_8(2^7)$형 직교배열표를 사용한 2수준 실험에 의한 각 조건에서의 제습량을 나타내고 있다. 1차적으로 분산분석을 한 결과, 인자 A(충진층 높이), 인자 B(충진재 종류), 인자 F(LiCl수용액 유량)가 제습량에 미치는 영향은 거의 없음을 알았다. 그러므로 유의하지 않은 3인자를 오차항으로 다시 풀링(pooling)한 후, 분산분석표를 재작성 하였다.

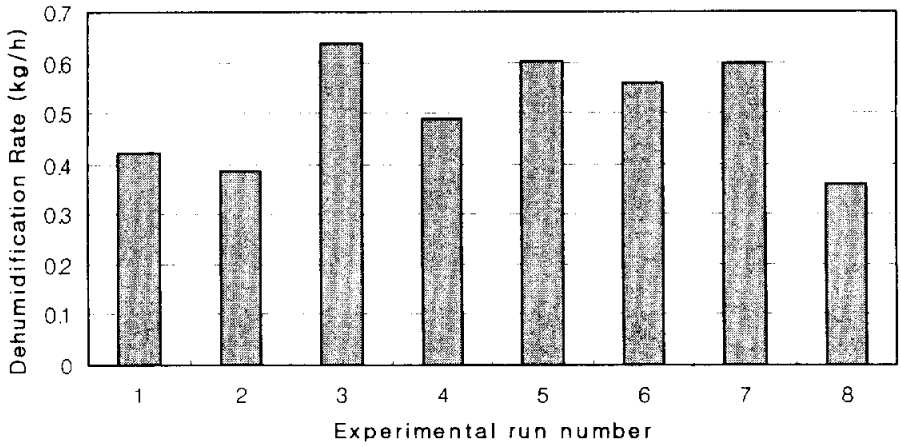


Fig. 3.2 Changes in dehumidification rate

이렇게 하여 최종적으로 분산분석한 결과를 Table 3.3에 나타내었다.

Table 3.3 Analysis table of variance $L_8(2^7)$

Factor		S	Φ	V	F_0	ρ(%)
Concentration of desiccant	A	34063	1	34063	17.332	39.2
Temperature of desiccant	B	27319	1	27319	13.901	30.9
Air volume	D	12417	1	12417	6.318	12.8
Error	e	7861	4	1965.3	-	17.1
Total	T	81660	7	-	-	100

각 인자가 제습량에 미치는 기여율은 식(3.1)을 사용하여 구하였다.

$$\rho = \frac{S - \Phi \cdot V_e}{S_T} \times 100 \quad (\%) \qquad (3.1)$$

여기서, ρ는 기여율, S는 변동, Φ는 자유도, V_e는 분산, S_T는 변동합이다.

Table 3.3에서 알 수 있듯이 제습탑의 제습능력에 영향을 미치는 유의한 인자는 A(LiCl 농도), B(LiCl 온도), D(풍량)임을 쉽게 알 수 있다. 또한 본 실험조건에서 제습성능에 가장 영향을 미치는 인자는 용액농도로 그 기여율은 39.2%였으며, 그 다음 큰 기여율은 용액온도였다. 인자 D(풍량)의 경우, 제습량에 유의하지는 않지만 무시할 수 있는 인자로 간주할 수는 없다.

장치의 외적요소로 볼 수 있는 충진층 높이와 충진재의 종류, 즉 제습탑의 형상인자들은 제습성능에 그다지 유의한 영향을 미치지 않는다는 결과가 나타났다. 이는 본 실험에 사용된 제습탑은 이전의 연구로 크기가 많이 축소되어서 전체 높이에 대해서 충진층의 높이 변화가 그다지 크지 않았기 때문이다. 그리고 충진재의 종류는 많으나, 본 연구에서는 3가지 충진재만을 사용하여 실험하였기 때문에 두 충진재가 제습성능에 미치는 영향이 거의 비슷하여 비교가 되지 않았기 때문으로 생각된다. Fig. 3.3, 3.4, 3.5에서 유의하다고 판단되는 인자들, 즉 LiCl수용액 농도 및 온도, 그리고 풍량의 요인효과를 추정하는 요인효과도를 나타내었다.

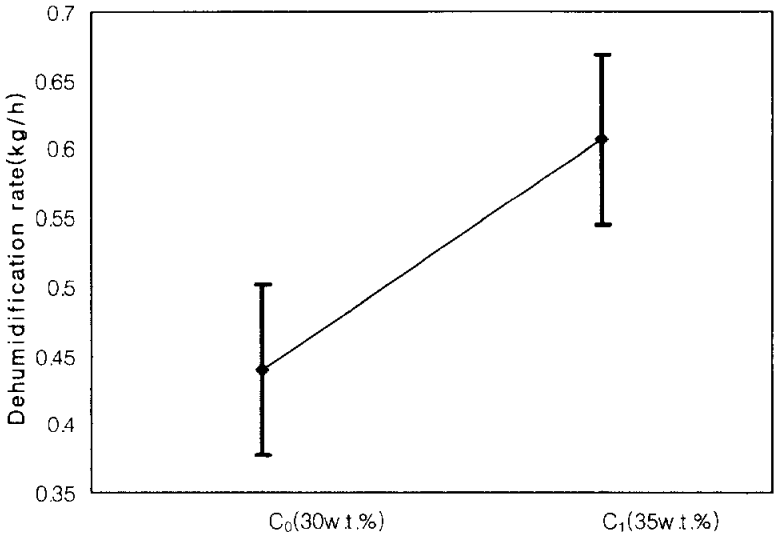


Fig. 3.3 Main effect of factor A (concentration of desiccant)

LiCl수용액의 농도를 보면, C_0(30w.t.%)일 때 제습량이 0.45kg/h, C_1(35w.t.%)일 때 0.6kg/h로 나타났다. Fig. 3.3에서 알 수 있듯이 LiCl 수용액의 농도가 높을수록 제습에 유리함을 알 수 있다.

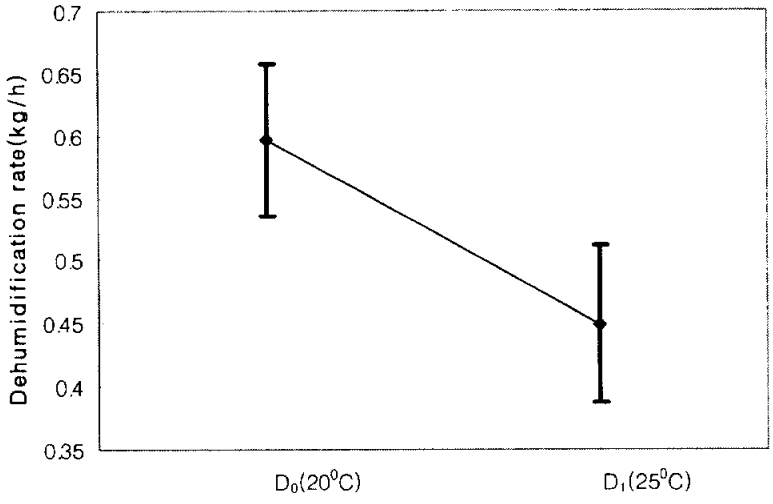


Fig. 3.4 Main effect of factor B (temperature of desiccant)

LiCl수용액의 온도를 보면, D_0(20℃)일 때 제습량이 0.6kg/h, D_1(25℃)일 때 0.45kg/h로 나타났다. Fig. 3.4에서 알 수 있듯이 LiCl수용액의 온도가 낮을수록 제습에 유리함을 알 수 있다.

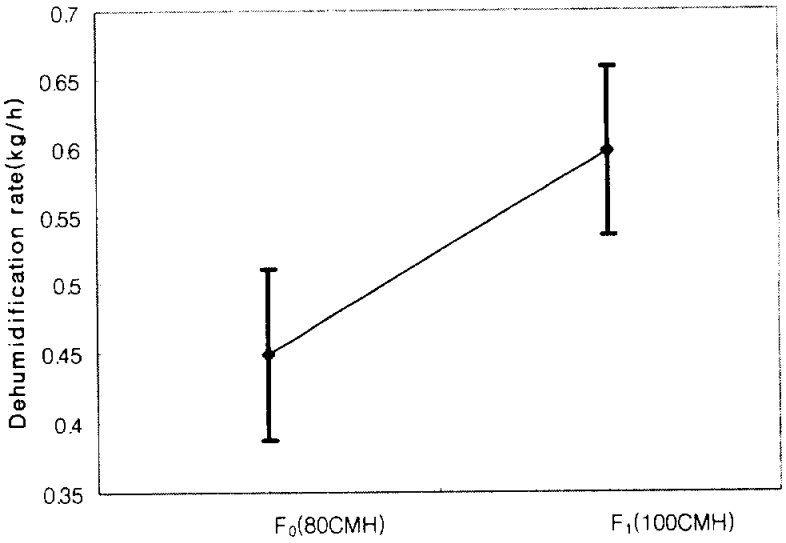


Fig. 3.5 Main effect of factor D (air volume)

LiCl수용액의 풍량을 보면, F_0(80m^3/h)일 때 제습량이 0.45kg/h, F_1(100m^3/h)일 때 0.6kg/h로 나타났다. Fig. 3.5에서 알 수 있듯이 LiCl 수용액의 풍량 많을수록 제습에 유리함을 알 수 있다.

유의한 인자들의 요인효과도를 보아 알 수 있듯이, LiCl수용액 농도가 높을수록 제습성능에 유리하였으며, LiCl수용액 온도는 낮을수록 제습량이 많았고 풍량은 많을수록 제습성능이 뛰어남을 알 수 있었다.

3.5 제습탑 운전 인자 영향에 관한 실험

3.5.1 직교배열표를 이용한 최적운전 인자 선정

본 실험은 최대의 제습성능을 발휘하는 최적운전 조건을 파악하는데 그 목적이 있으므로, 이전에 행한 $L_8(2^7)$형 직교배열표를 사용한 2수준 실험 결과로 부터 제습량에 유의한 영향을 미치는 인자들에 대하여 수준수를 증가시킨 후, $L_{27}(3^{13})$직교배열표를 사용한 3수준 실험을 행하였다. 3수준 실험에 있어서 실험 방법 및 분산분석법은 2수준 실험과 거의 동일하게 행하였으며, Table 3.4에 3인자 실험의 인자 기호 및 인자 수준을 나타내었다.

Table 3.4 Levels of factor ($L_{27}(3^{13})$)

Level / Factor	Symbols	Level 0	Level 1	Level 2
Concentration of desiccant (w.t.%)	**A**	25	27.5	30
Temperature of desiccant (℃)	**B**	15	20	25
Inlet air temperature (℃)	**C**	26	28	30
Inlet air humidity (%)	**D**	50	60	70
Solution flow rate (ℓ/min)	**F**	10	15	20
Air volume (m^3/h)	**G**	100	175	250

인자들의 수준 선정 시, 용액 농도의 수준은 실제 시스템에서 사용할 수 있는 범위로 정하였다. 실제로 재생기에서의 용액농도가 30w.t.% 이상이 되면 재생이 쉽지 않기 때문에 최대 농도를 30w.t.%로 한정하였으며, 제습탑에서 제습할 수 있는 농도로 판단되는 25w.t.%를 최소 농도로 정하였다. 그리고 용액의 온도는 일반 시수 및 지하수와 열교환 하였을 때 얻을 수 있는 온도인 15℃에서 25℃의 범위 내에서 수준을 정하였다.

선정된 인자 A, B, C, D, F, G를 9, 10, 1, 2, 5, 8열에 각각 배치하였으며, 실험 순서는 선정된 인자 외에 기타 원인들의 영향이 실험 결과에 미치는 것을 방지하기 위하여 난수표를 이용해서 무작위로 정하였다. Table 3.5에 $L_{27}(3^{13})$ 직교배열표를 이용한 수준의 조합 및 실험 순서를 나타내었다

Table 3.5 ($L_{27}(3^{13})$) Factor arrangement

Number of experiment	Number of line												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	2	2	2
5	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2	0	0	0
6	0	1	1	1	2	2	2	0	0	0	1	1	1
7	0	2	2	2	0	0	0	2	2	2	1	1	1
8	0	2	2	2	1	1	1	0	0	0	2	2	2
9	0	2	2	2	2	2	2	1	1	1	0	0	0
10	1	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2
11	1	0	1	2	1	2	0	1	2	0	1	2	0
12	1	0	1	2	2	0	1	2	0	1	2	0	1
13	1	1	2	0	0	1	2	1	2	0	2	0	1
14	1	1	2	0	1	2	0	2	0	1	0	1	2
15	1	1	2	0	2	0	1	0	1	2	1	2	0
16	1	2	0	1	0	1	2	2	0	1	1	2	0
17	1	2	0	1	1	2	0	0	1	2	2	0	1
18	1	2	0	1	2	0	1	1	2	0	0	1	2
19	2	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1
20	2	0	2	1	1	0	2	1	0	2	1	0	2
21	2	0	2	1	2	1	0	2	1	0	2	1	0
22	2	1	0	2	0	2	1	1	0	2	2	1	0
23	2	1	0	2	1	0	2	2	1	0	0	2	1
24	2	1	0	2	2	1	0	0	2	1	1	0	2
25	2	2	1	0	0	2	1	2	1	0	1	0	2
26	2	2	1	0	1	0	2	0	2	1	2	1	0
27	2	2	1	0	2	1	0	1	0	2	0	2	1
Basic arrangement	a	b	a b	a b^2	c	a c	a c^2	b c	a b c	a b^2 c^2	b c^2	a b^2 c	a b c^2
Arrangement	C	D	e	e	G	e	e	F	A	B	e	e	e

3.5.2 직교배열표를 이용한 실험 결과

2수준 실험과 동일하게 분산분석법을 이용하여 유의하다고 판단되는 인자의 주 효과를 구한 후, 제습탑의 최적 운전조건을 구하였다. Fig. 3.6에 3수준 실험에 의한 각 조건에서의 제습량을 나타내고 있다.

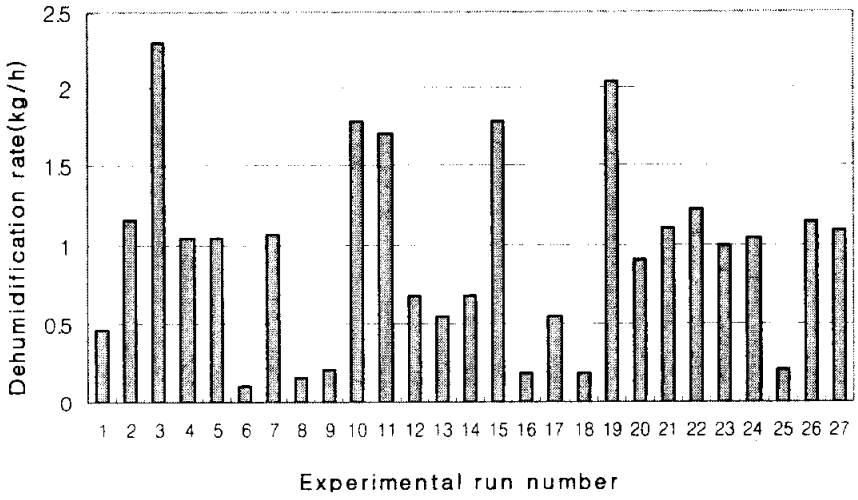


Fig. 3.6 Changes in dehumidification rate

위의 각 실험조건에서 구해진 제습량을 토대로 분산분석한 결과를 Table 3.6에 나타내었다. 분산분석 결과, 2수준 실험 결과와 동일하게 LiCl수용액의 유량이 제습능력에 미치는 영향은 거의 없었으며, 이와 반대로 도입공기의 상태값은 제습량에 영향을 크게 미친다는 것을 알 수 있었다.

Table 3.6 Analysis table of variance $L_{27}(3^{13})$

Factor		Fluctuation	Degree of freedom	Variance	Variance rate
Concentration of desiccant	A	0.38	2	0.19	6.08
Temperature of desiccant	B	3.25	2	1.63	52
Inlet air temperature	C	2	2	1.00	32
Inlet air humidity	D	2.42	2	1.21	38.72
Air volume	G	1.61	2	0.81	25.76
Error	e	0.5	16	0.03	-
Total	T	11.41	26	4.87	-

제습탑의 제습성능에 유의한 영향을 미치는 인자 A(LiCl수용액 농도), B(LiCl수용액 온도), C(도입공기 온도), D(도입공기 상대습도), G(풍량)의 요인효과를 추정하는 요인효과도를 각각 Fig. 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11에 나타내었다.

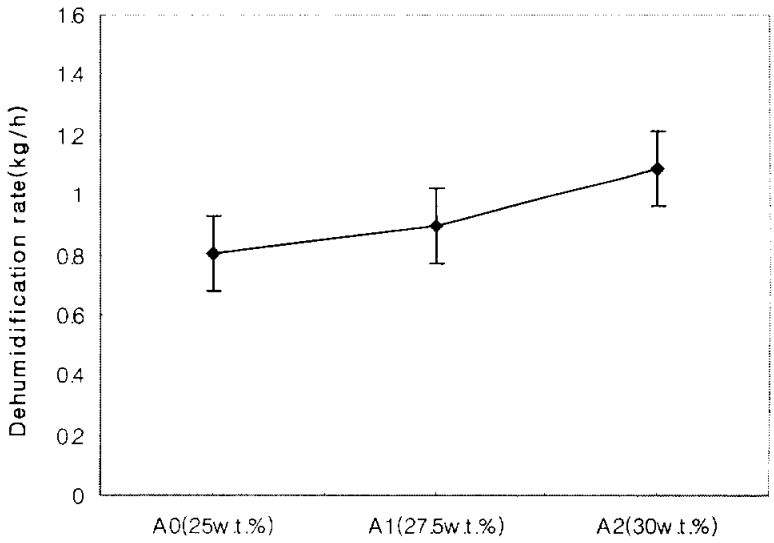


Fig. 3.7 Main effect of factor A (concentration of desiccant)

Fig. 3.7에서 알 수 있듯이 LiCl수용액의 농도를 보면 A0(25w.t.%)일 때 0.8kg/h, A1(27.5w.t.%)일 때 0.9kg/h, 그리고 A2(30w.t.%)일 때 1.1kg/h 로 농도가 높을수록 제습량이 높게 나타남을 알 수 있다.

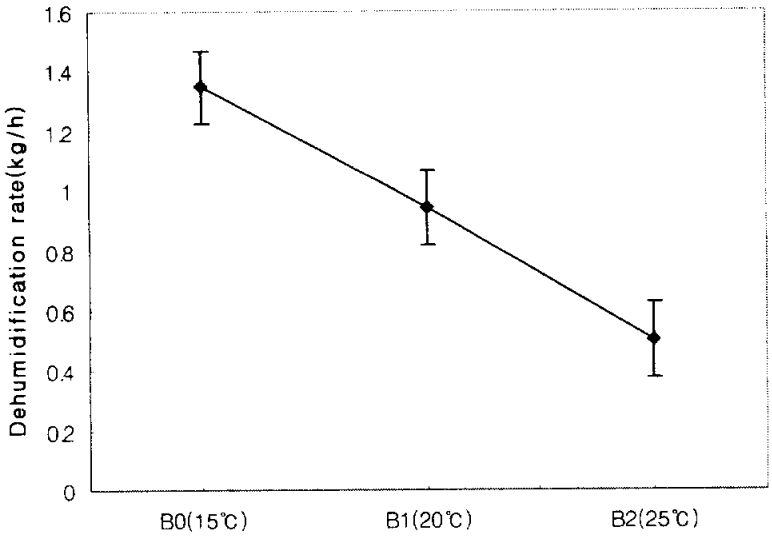


Fig. 3.8 Main effect of factor B (temperature of desiccant)

LiCl수용액의 온도를 보면, B0(15℃)일 때 제습량이 1.35kg/h, B1(20℃)일 때 0.9kg/h, B2(25℃)일 때 0.5kg/h로 나타났다. Fig. 3.8에서 알 수 있듯이 LiCl수용액의 온도가 낮을수록 제습에 유리함을 알 수 있다.

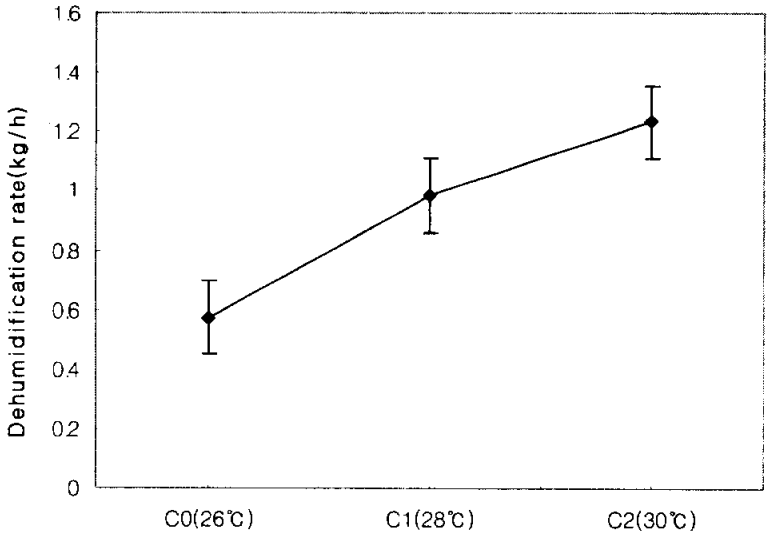


Fig. 3.9 Main effect of factor C (temperature of inlet air)

Fig. 3.9에서 보는 바와 같이 도입공기 온도는 C0(26℃)일 때 제습량이 0.6kg/h로 나타났으며, C1(28℃)일 때 1.0kg/h, C2(30℃)일 때, 1.25kg/h로 나타났다. 이는 외부 도입공기의 온도가 높으면 높을수록 제습량이 증가함을 보여준다.

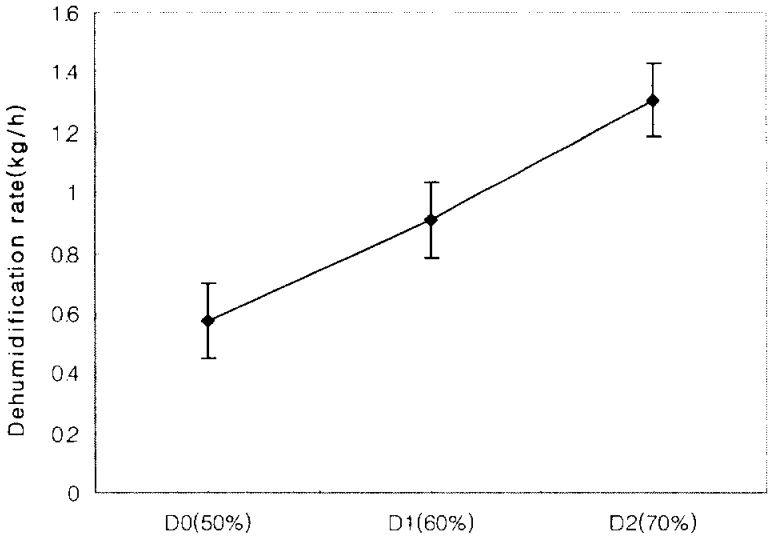


Fig. 3.10 Main effect of factor D (humidity of inlet air)

Fig. 3.10과 같이 도입공기의 상대습도가 D0(50%)일 때 0.6kg/h, D1(60%)일 때 0.8kg/h, D2(70%)일 때 1.3kg/h로 나타났다. 이는 도입공기의 상대습도가 높을수록 제습량이 많아짐을 보여준다.

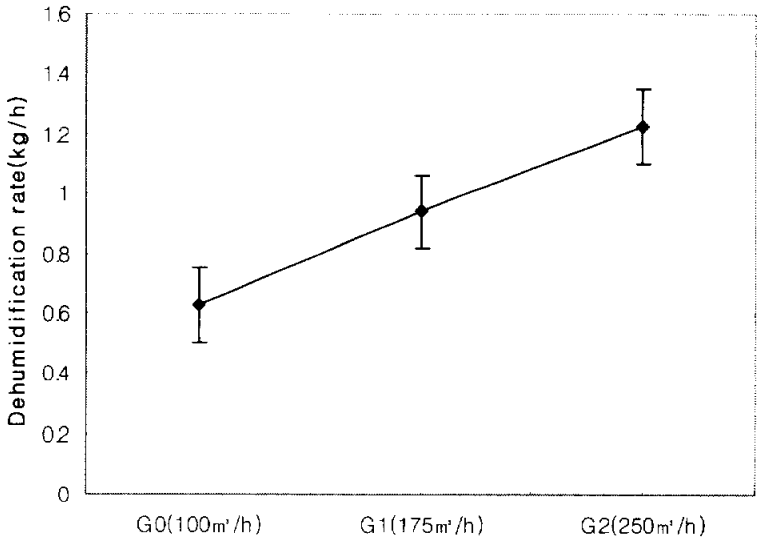


Fig. 3.11 Main effect of factor G (air volume)

Fig. 3.11와 같이 풍량의 경우 G0($100m^3/h$)일 때 0.65kg/h 이고, G1 ($175m^3/h$)일 때 0.9kg/h이며, G2($250m^3/h$)일 때 1.25kg/h였다. 이는 풍량이 많을수록 제습량에 유의함을 보여준다.

각 인자들의 요인효과를 보아서 알 수 있듯이, LiCl수용액 농도(인자 A)가 높을수록 제습량이 많았으며, 이와 반대로 LiCl수용액 온도(인자 B)는 낮을수록 제습량이 많았다. 또한 도입공기 온도(인자 C)와 도입공기 상대습도(인자 D)는 그 값이 클수록 도입공기의 절대습도가 LiCl수용액의 절대습도에 비해 상대적으로 높아 제습량이 많이 발생함을 알 수 있었다. 그리고 도입공기의 풍량(인자 G)은 캐리오버 (carry-over)

가 발생하지 않는 범위 내에서는 풍량이 증가할수록 제습량도 증가함을 알 수 있었다. 그러나 최대의 성능을 발휘하는 최적 인자 조합 선정 시, 인자 C(도입공기 온도), 인자 D(도입공기 습도)는 임의로 설정할 수 있는 조건이 아니므로, 인자 A, B, G로 한정해서 설정하였다.

Fig. 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11의 결과로부터 제습탑의 최적 운전조건은 A2B0G2, 즉 용액 농도 30%(인자A), 용액 온도 15℃(인자 B), 풍량 250m^3/h(인자 G)의 조합이며, 최적 인자 조합 시의 모평균을 추정 한 결과, 제습량이 2.73±0.19kg/h임을 알 수 있었다.

3.6 요약

태양열 이용 냉난방 공조시스템에서 제습탑의 제습성능에 영향을 미치는 인자들 중, 전열교환이 일어나는 과정의 운전인자인 주요 인자에 대하여 실험계획법 중 최소의 실험 회수로 최대의 정보를 획득할 수 있는 직교배열표를 사용하여 실험하고, 이를 분산분석한 결과, 다음의 결론을 얻었다.

1. $L_8(2^7)$직교배열표를 사용한 2수준 실험 결과, 제습성능에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 LiCl수용액 농도였으며, 그 기여율은 39.2%였다.
2. 전열교환기의 외적 요소인 충진층 높이와 충진재 종류가 제습성능에 미치는 영향은 거의 없었으며, 또한 운전 요소인 LiCl 수용액 유량의

영향도 거의 없었다.

3. $L_{27}(3^{13})$직교배열표를 사용한 3수준 실험을 통하여 전열교환기의 최적 인자 조합은 A2B0G2로 용액 농도 30%(인자A), 용액 온도 15℃(인자 B), 풍량 250m^3/h(인자 G)일 때였다.

4. 최적 인자 조합 시의 모평균을 추정한 결과, 제습량은 2.73±0.19 kg/h였다.

제 4 장 태양열 이용 제습/냉방 시스템의 최적화 및 해석

4.1 최적화 기법의 개요

우리는 실험을 하거나 어떤 작업을 수행하고자 할 때 그 결과가 가장 양호한 상태로 되기를 바라며, 그 방법으로 경험적으로 또는 감각적인 방법에 의존하거나 때로는 시행착오를 거듭하면서 최상의 조건을 구해 나가는 것이 종래의 방법이다. 그러나 현상이 복잡하거나 오차가 있어 결과에 변동이 있게 되는 문제에서는 데이터를 취하여 통계적으로 해석하거나 복잡한 수학적 관계를 통계적인 방법을 통해 최적해를 구하여야 한다.

최적화 문제 중에는 실험 장치의 설계, 실험 계획 등 계획 단계의 최적조건을 구하는 방법과 실험을 진행하면서 최적 조건을 구하는 방법이 있다. 이 경우 그 관계의 요인과 특성치를 수학적으로 파악하여 계획적으로 행해진 실험결과를 사용하여 그들의 관계를 추정하거나 이미 존재하는 데이터를 해석하여 계획적인 탐색을 함으로써 실험적으로 또는 데이터에 의하여 최적조건을 구할 수 있다.

실험조건의 최적화에는 실험계획법을 사용하는 방법, 회귀분석을 사용하는 방법, 탐색법 및 EVOP(Evolutionary operation) 등이 있다. 여기서 일반적으로 실험의 준비 단계에서 모델링이 용이하며 최적해를

도출하는 과정이 비교적 명확한 실험계획법에 주목하여 그 방법을 본 실험에 적용하여 여러 변수들의 관계에서 최적의 조건을 규명하고자 한다.

실험계획법(Design of experiments)은 실험의 특성에 영향을 미치는 여러 가지 인자를 선정하고 이들의 관계를 알아보기 위한 계획을 수립하여 실험의 최적조건을 경제적으로 찾아내는 기법이다.

데이터의 해석방법에는 목적 특성의 변화에 미친 여러 가지 인자들의 영향 정도를 정량적으로 평가하는 분산분석(ANOVA : Analysis of variance), 반응표면 분석(Response analysis), 상관분석(Correlation analysis), 회귀분석(Regression analysis), 요인 배치 분석(Factorial design analysis), 혼합물 분석(Mixture analysis)등이 있으며 이들 분석 기법을 통하여 요인효과의 추정과 최적조합의 실험조건을 설정하고 설계방식을 표준화한다.

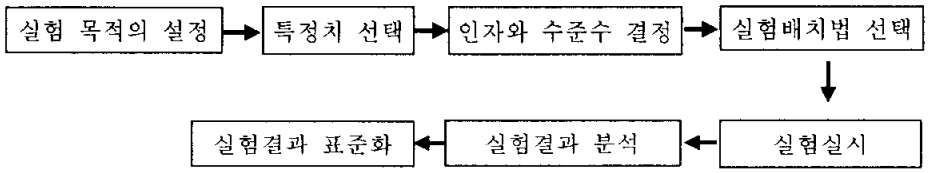
실험계획에 관하여 중요한 두 가지의 원리로 랜덤화의 원리(Principle of randomization)와 반복의 원리(Principle of replication)가 있다.

랜덤화의 원리는 실험 순서에서 생기는 오류를 최소화하기 위한 방법으로 원래의 데이터에 사람이 손을 대면 반드시 에러가 생기며, 샘플링하면 샘플링 에러, 실험하면 실험에러, 분석하면 분석에러 등이 생긴다. 만약 이런 에러가 한쪽으로 몰리면 실험한 것과 관계없이 엉뚱한 결과

가 도출될 수 있다. 그러나 실험에서 발생되는 모든 에러를 모든 실험에 동등하게 분배하다면 에러로 인한 잘못된 결론을 피할 수 있다. 이러한 방법이 랜덤화 원리이며 모든 실험 순서는 랜덤으로 정해서 실험하므로써 실험 순서에서 생기는 오류를 최소화 할 수 있다.

반복의 원리는 두 가지의 목적이 있다. 첫째, 실험자체의 신뢰성 검증이다. 같은 조건에서 두 번 실험하여 실험결과가 심하게 차이 나면 실험을 의심하여 잘못된 결론을 피할 수 없다. 둘째, 인자간의 교호작용 검출이다. 2원 배치 이상에서 반복 실험해야만 교호작용이 검출된다. 반복실험을 하지 않으면 교호작용이 검출되지 않으므로 반복을 시켜주면 오차항의 자유도가 커지게 되어 오차분산의 신뢰도가 좋게 추정되고 실험결과의 신뢰성을 높일 수 있다.

실험계획법의 진행 순서는 다음과 같다.



4.2 반응표면분석법의 특징 및 적용

일반적으로 공학적 응용시스템의 성능은 여러 가지 설계변수들의 영향을 받으며, 이들 사이의 함수관계를 토대로 시스템 최적화가 가능하다. 하지만, 대부분의 경우에 있어서 이러한 함수관계는 알려져 있지 않거나 복잡하게 주어지므로, 시스템의 최적 조건을 탐색하는 것이 용이하지 않다. 기본적으로 RSM(Response surface methodology)기법은 공학 시스템의 설계 및 운용 단계에서 시스템 성능과 이에 영향을 미치는 요인들 사이의 함수관계를 추정하고, 이것을 이용하여 시스템의 최적조건을 탐색하는 것을 목표로 한다. RSM기법은 Box and Wilson(1951)에 의해 처음 제안된 이래로 화학공정, 식품가공, 섬유 등의 산업분야에서 폭넓게 응용되어 왔으며, 공학시스템의 최적화를 위한 체계적인 분석기법으로 널리 인식되고 있다.

반응표면분석법에는 중심합성법(Central composite), 박스 벤켄법(Box behnken), 면중심 중심 합성법(Create response surface), 다중 반응 최적법(Multi response optimizer)등이 있다.

중심합성법은 효율적으로 1차, 2차항을 추정하고자 할 때와 설정된 요인들이 관심 반응 값에 어떤 영향을 미치는지 알고자 할 경우, 반응값을 최적화시키기 위하여 요인들을 설정할 경우에 많이 사용된다.

일반적으로 시스템 성능을 변수 Y로, 그리고 Y는 n개의 설계변수

$X_1, X_2, ..., X_n$에 의해 결정된다고 할 때, 시스템 성능과 설계변수 사이의 함수관계는 일반적으로 다음 식(4.1)과 같이 나타낼 수가 있다.

$$Y = f(X_1, X_2, ..., X_n) \tag{4.1}$$

한편 함수 $f(\cdot)$의 형태가 알려져 있지 않은 경우, 이차 다항방정식을 이용하여 추정하는 것이 적절하다. 그러므로 시스템 성능과 설계변수 사이의 함수관계는 다음 식(4.2)와 같은 모형으로 추정되는 것이 일반적이다.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_i X_{i+} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=i}^{n} \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon \tag{4.2}$$

식(4.2)에서 β_0, β_i, β_{ij}는 각각 상수, 선형 및 이차항의 계수를 나타내며, ε은 추정모형에서 설명되지 않는 오차항을 나타낸다. 본 연구에서는 실험계획법을 통하여 얻은 수치들을 직접 사용하며 또 RSM기법을 적용함으로써 위 식의 각 계수들을 추정할 수가 있다. 그 결과 RSM기법을 적용하여 얻은 시스템 성능과 설계변수들 사이의 함수관계를 이용하여 다음 식(4.3)과 같은 최적화모형을 세울 수가 있다.

$$\text{Max} \quad Y=\beta_0+\sum_{i=1}^{n}\beta_i X_{i+}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=i}^{n}\beta_{ij}X_iX_j+\epsilon \tag{4.3}$$

$$\text{subject to } (X_1,X_2,\ldots X_n)\in\Omega \tag{4.3.1}$$

식(4.3.1)에서 Ω는 설계변수에 대한 제약을 나타낸다.

본 연구에서는 태양열 집열판에서 얻어지는 열원을 액체흡수제의 재생열원으로 사용하는 재생기 성능을 최적화하는 실험조건을 규명하기 위하여 RSM기법을 적용하여 식(4.3)과 같은 최적화 모형을 제안하고자 한다. 그러므로 위 최적화 모형을 직접 풂으로써 재생량을 최대화할 수 있는 재생기의 최적 운전조건을 결정할 수 있다.

4.3 반응표면분석법에 의한 재생탑 성능 실험

실험방법에서 논의한 실험조건과 인자들의 처리수준에 따라 실험을 행하여 Table 4.1에 정리된 바와 같은 결과를 얻었다. 재생성능을 대표하는 척도로 재생량을 기록하였으며, 소음요인의 영향을 최소화하기 위하여 처리수준의 조합 별로 랜덤한 순서로 실험을 행하였다.

Table 4.1 Regeneration rate in process levels

		Air flow rate(m^3/h)		
		100	145	190
Solution flow rate (ℓ/min)	6	0.97	1.24	1.42
	10	1.09	1.31	1.53
	14	0.87	1.18	1.37

한편, 재생장치의 운용에 있어서 에너지 소비의 효율성을 제고하기 위해서는 전력소비에 대해 고려할 필요가 있다. 위 실험결과에서 용액순환량이 증가함에 따라 재생성능이 향상됨을 관찰할 수 있다. 하지만, 용액순환량을 증가시키기 위해서는 전력소비가 늘어나게 되고, 따라서 전력소비에 제약이 있는 경우 재생성능을 향상시키기 위하여 용액순환량을 무작정 증가시킬 수는 없다. 유입공기량과 용액순환량에 대한 처리수준 별 전력소비량을 측정하여 Table 4.2에 정리하였다.

Table 4.2 Electricity consumption in process levels (Watt)

		Air flow rate(m^3/h)		
		100	145	190
Solution flow rate (ℓ/min)	6	84.94	98.44	111.94
	10	108.56	122.06	135.56
	14	139.50	153.00	166.50

Table 4.1에 정리된 실험결과로부터 유입공기량이 190m^3/h, 용액순환량이 10ℓ/min일 때 재생성능이 최대인 것으로 판정할 수 있다. 하지만 이러한 결론은 9개 처리수준의 조합 중 하나가 최적의 운전 조건이라는 가정을 내포하고 있다. 다시 말하면, 용액순환량이 10ℓ/min일 때 보다, 9ℓ/min 나 11ℓ/min일 때 더욱 좋은 재생성능을 얻을 수도 있으므로, 엄밀하게 이야기하자면 10ℓ/min의 용액순환량이 최적 조건이라고 할 수 없다. 예를 들어, 실험결과로부터 용액순환량이 6ℓ/min, 10ℓ/min, 14ℓ/min일 때 재생량은 각각 1.42kg/h, 1.53kg/h, 1.37kg/h이라는 것을 알 수 있다. 만약 용액순환량과 재생량의 함수관계가 Fig 4.1과 같다면 재생량을 최대화하는 용액순환량은 10ℓ/min이 아닌 A라고 할 수 있다. 이러한 경우, 각 인자들과 재생성능 사이의 함수관계를 알 수 있다면 주어진 처리수준보다 더 나은 재생성능을 보이는 최적의 인자수준을 알 수 있다. 뿐만 아니라, 이러한 운전조건을 실현하기 위해서 135.56Watt의 전력이 소비됨을 Table 4.2로부터 알 수 있다. 만약 전력소비량을 120Watt 이하로 제한하고자 하는 경우에는 이러한 운전조건은 실현할 수조차 없게 된다.

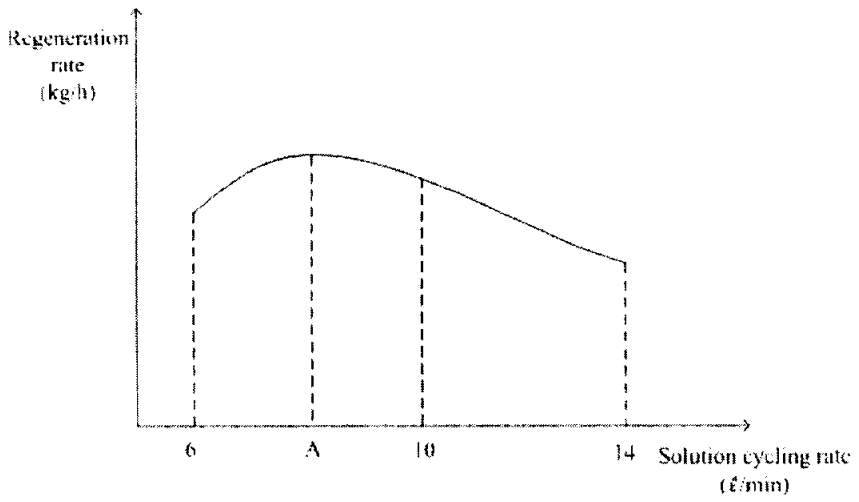


Fig. 4.1 Function relation of regeneration and desiccant rate (inlet air temp. of 60℃, air volume of 190m^3/h)

Table 4.1에 주어진 실험결과를 토대로 재생량과 이에 영향을 미치는 요인들 사이의 함수관계를 도출하기 위하여, 재생량을 Y라 하고, 유입 공기량, 용액순환량을 각각 X_1, X_2라 하자. 4.1절에서 소개한 RSM기법을 적용함으로써 다음과 같은 함수관계를 도출할 수 있다.

$$Y = -0.4321 + 0.0095X_1 + 0.1499X_2 + 1.73e^{-5}X_1^2 - 0.0084X_2^2 - 6.94e^{-5}X_1X_2 \quad (4.4)$$

위 식에서 각 계수들은 인자들의 주 효과 및 교호작용효과의 크기를 나타내는 것으로 분산분석(Analysis of variance, ANOVA)을 통하여 그 유의성을 판정할 수 있으며, 그 결과는 Table 4.3에 정리된 바와 같다. 분산분석 결과 R^2 값이 98.8%로 나타나 추정된 모형은 신뢰할 만한 것으로 평가할 수 있다.

마찬가지로 Table 4.2에 주어진 실험결과를 바탕으로 전력소비량과 유입공기량, 용액순환량 사이의 함수관계를 도출할 수 있다. 전력소비량을 W라 할 때, RSM기법을 적용하면 다음과 같은 함수관계를 도출할 수 있다.

$$W = 33.235 + 0.300X_1 + 2.245X_2 + 0.229X_2^2 \qquad (4.5)$$

위 모형에 대한 분산분석의 결과는 Table 4.4에 나타난 바와 같고, R^2 값은 100%로 나타나 추정된 모형은 통계적으로 완벽한 것으로 나타났다.

Table 4.3 ANOVA Table (R^2=0.988)

Source	DF	SS	MS	F
Model	5	0.3689	0.0738	129.56
(Linear)	2	0.3294	0.0145	25.44
(Square)	2	0.0389	0.0195	34.16
(Interaction)	1	0.0006	0.0006	1.10
Error	3	0.0017	0.0006	
Total	8	0.3706		

Table 4.4 ANOVA Table (R^2=1.000)

Source	DF	SS	MS	F
Model	5	5585.48	1117.09	-
(Linear)	2	5558.69	2792.85	-
(Square)	2	26.79	13.40	-
(Interaction)	1	0	0	-
Error	3	0	0	
Total	8	5585.48		

4.4 재생 성능을 위한 최적운전 조건 도출

에너지 효율적인 재생기의 최적 운전 조건을 도출하기 위하여 RSM 기법을 적용하여 구한 함수관계를 이용하여 최적화 모형을 수립할 수 있다. 즉, 전력소비에 대한 제약 하에서 재생량을 최대화하는 최적화 모형은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{Maximize} \quad Y = -0.4321 + 0.0095X_1 + 0.1499X_2 + 1.73e^{-5}X_1^2 - 0.0084X_2^2 - 6.94e^{-5}X_1X_2 \qquad (4.6)$$

$$\text{subject to} \quad 100 \leq X_1 \leq 190,\ 6 \leq X_2 \leq 14$$

$$W = 33.235 + 0.300X_1 + 2.245X_2 + 0.229X_2^2 \leq W_{\max} \qquad (4.6.1)$$

위 식에서 W_{max}는 최대 허용 전력소비량을 표시하며, Y와 W는 각각 식 (4.4)과 (4.5)로 주어진다. 따라서 최적화 모형을 풂으로써 W_{max}이하의 전력소비로 재생성능을 최대화하는 최적해를 구할 수 있다. 최대 허용 전력소비량이 변화함에 따른 최적해를 Table 4.5와 Fig 4.2에 정리하였다.

Table 4.5 Table of sensitivity analysis with respect to W_{max}

W_{max} (W)	Optimum solution		Regeneration rate (Kg/h)
	X_1 (m^3/h)	X_2 (ℓ/min)	
100	150.20	6.00	1.25
102	156.87	6.00	1.28
104	163.53	6.00	1.31
106	170.20	6.00	1.34
108	176.87	6.00	1.37
110	182.28	6.08	1.39
112	186.82	6.20	1.41
114	190.00	6.41	1.44
116	190.00	6.79	1.46
118	190.00	7.15	1.47
120	190.00	7.51	1.49
122	190.00	7.86	1.50
124	190.00	8.20	1.51
126	190.00	8.53	1.51
128	190.00	8.85	1.52
130	190.00	9.16	1.52
132	190.00	9.47	1.53
134	190.00	9.67	1.53
136	190.00	9.67	1.53
138	190.00	9.67	1.53
140	190.00	9.67	1.53

Fig 4.2에서 점선은 최대 허용 전력량에 대한 제약이 120Watt로 주어지는 경우, 최적해는 용액순환량이 7.51 ℓ/min, 유입공기량이 190m^3/h이며, 이 때 최대로 얻을 수 있는 재생량은 약 1.49kg/h임을 알 수 있다.

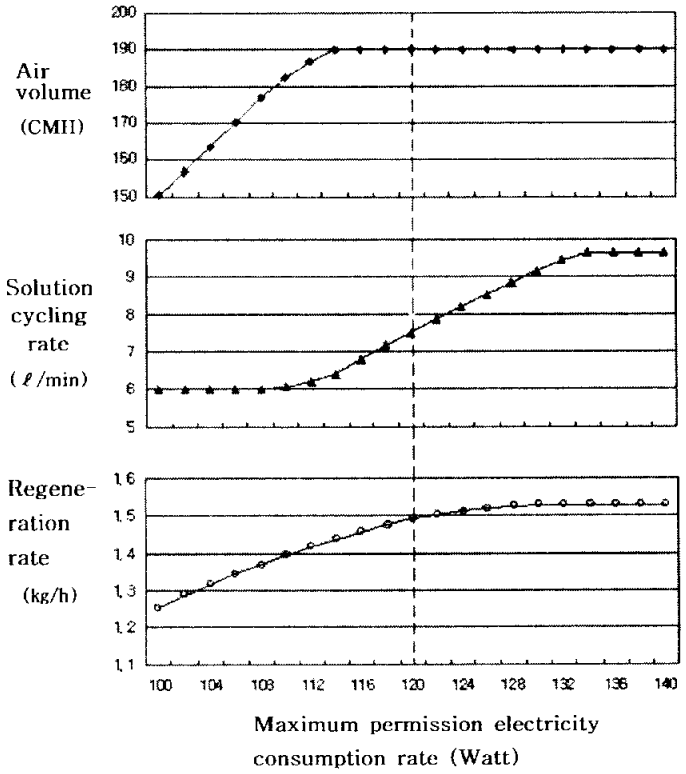


Fig. 4.2 Sensitivity analysis with respect to W_{max}

한편, Fig 4.3에서는 최대 허용 전력소비량이 120Watt로 주어질 때, 재생량에 대한 Contour plot을 나타낸다.

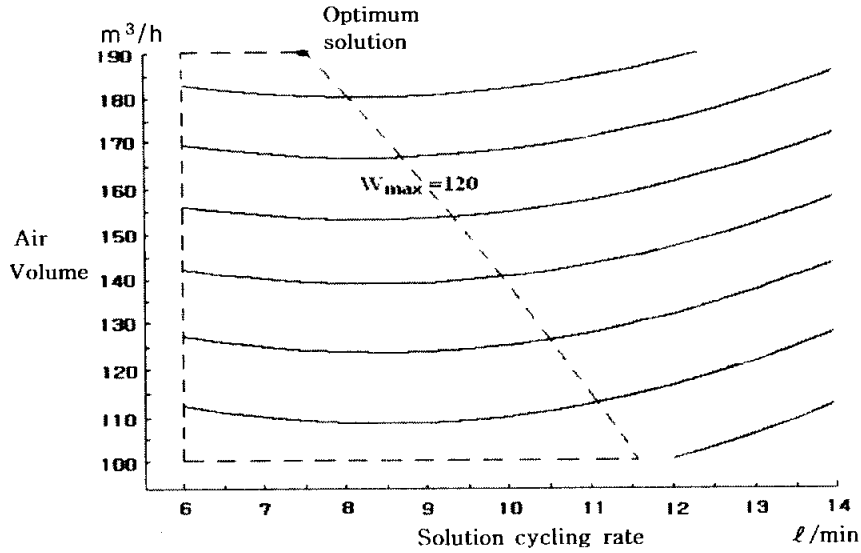


Fig. 4.3 Optimum solution when W_{max} is 120

점선으로 표시된 부분은 제약식으로 구성된 실행가능영역을 나타내며, 실선으로 표시된 부분은 재생량에 대한 Contour plot이다. 여기서도 재생량을 최대화하는 최적해가 용액순환량은 7.51 ℓ/min, 유입공기량은 190m^3/h일 때임을 알 수 있다.

4.5 요약

태양열 온수기로부터 얻어진 온수를 통하여 가열공기를 액체흡수제 재생과정의 에너지원으로 사용할 경우, 재생성능을 최대화하는 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 태양열 이용 냉난방공조시스템 개발에 있어서 처음으로 최적 운전조건을 결정하는 설계최적화 모형을 본 연구에서 제안하였다.
2. 재생성능에 영향을 미치는 인자들에 대해 실험계획법을 적용하여 얻은 실험결과를 토대로 RSM(Response surface methodology) 기법을 적용함으로써 재생성능과 인자들 사이의 함수관계를 도출 하였다.
3. 이러한 함수관계를 바탕으로 하여 시스템 최적화 모형을 수립함 으로써 제한적인 전력소비량으로 재생성능을 최대화하는 최적 운전조건을 찾을 수 있음을 보였다.
4. 본 연구에서 제안된 바와 같이 RSM기법을 활용한 시스템 최적화 모형의 수립은 다양한 공학적 응용시스템의 최적화에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

제 5 장 물질전달의 무차원 해석

5.1 대향류형 제습탑에 있어서의 물질전달 기초 이론

Fig 5.1에 제습탑 및 재생탑 내부의 충진층에서 액체흡수제와 습공기가 접촉하여 일어나는 기액계면(界面) 모델이 나타나있다. 여기서 기액계면에서의 절대습도인 x_i는 정상상태에서 흡수가 이루어지면 기체 측의 물질이동 속도와 액체 측의 물질이동 속도가 같기 때문에 충진층의 미소 높이 dZ에서의 수분흡수량 dN_A(kg/h)는 식 (5.1)로 나타내어진다.

$$dN_A = k_x \cdot (x_i - x) \cdot dA \qquad (5.1)$$

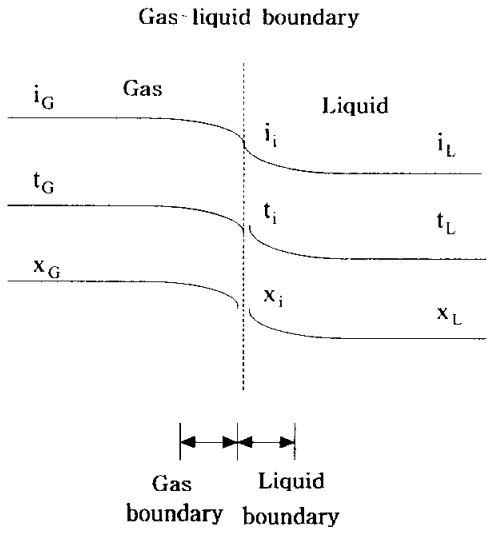


Fig. 5.1 Model of gas-liquid boundary based on a single film theory

여기서 dA는 dZ내에서의 기액접촉 면적이며, k_x는 물질전달율이다. 한편, 충진층 내의 임의의 미소 높이 dZ에 있어서 흡수량 dN_A는 다음 식으로도 나타낼 수 있다.

$$dN_A = -G \cdot d\left(\frac{x}{1-x}\right) \tag{5.2}$$

그리고 충진층의 단위 체적당 평균 기액접촉 면적을 a로 하면, dA= a · A · dZ이기 때문에 식(5.1)은 식(5.3)으로 나타낼 수 있다.

$$dN_A = k_x a \cdot (x_i - x) \cdot A \cdot dZ \tag{5.3}$$

여기서 식(5.2)와 식(5.3)으로부터 아래와 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$dZ = -\frac{G}{A \cdot k_x a} \cdot \frac{dx}{(1-x)^2 \cdot (x_i - x)} \tag{5.4}$$

한편, 위 식에서 공기 중에 포함되어 있는 수분량은 매우 적기 때문에 일반적으로 (1-x)≒1로 간주할 수 있다. 따라서 식(5.4)은 식(5.5)으로 나타낼 수 있다.

$$Z = \frac{G}{A \cdot k_x a} \int_1^2 \frac{dx}{x_i - x} \qquad (5.5)$$

본 장치에서 공기와 액체흡수제인 LiCl수용액이 충진층에서 직접 접촉할 때, 구동력은 흡수포텐셜 차, 즉 공기의 절대습도와 기액계면에서 액체의 증기압에 상당하는 용액의 절대습도 차에 의해 결정된다.

일반적으로 공기와 물이 접촉하여 기액계면에서 열과 수분이 동시에 이동할 때는 Lewis 관계(R=α/ $k_x \cdot C_{pm}$ =1)가 성립한다. 이 Lewis 관계는 물 대신에 LiCl수용액이나 트리에치렌 글리콜용액이 공기와 접촉할 때도 성립한다고 알려져 있다. 즉 Lewis값이 1이면, 적어도 불포화공기의 경우는 이론적으로도 절대습도기준 총괄 물질전달계수 $k_x a$가 엔탈피 기준 총괄열전달계수 k_a와 같은 값으로 된다. 따라서 냉각탑에서는 액상(液狀) 내부의 저항이 작고, 기상(氣狀) 측의 열 및 물질전달에 있어서 Lewis 관계가 성립하므로 k_a로서 냉각탑의 특성을 표시하는 경우가 많으나, 본 연구에서는 제습의 거동을 관찰하기 위하여 k_a대신에 $k_x a$를 사용하여 충진층 내의 물질전달 특성을 파악하였다.

5.2 절대습도차에 의한 총괄물질전달계수($k_x a$) 산출

한편, 냉각탑에서는 k값과 접촉면적 a를 포함한 k_a(kcal/m^2 · h)로써 충진재의 총괄적인 특성을 평가하고 있다. 본 실험에서는 냉각탑 원리와 비슷한 전열교환기의 해석에 있어서도 수분의 이동 상태를 중심으로 식(5.6)로부터 얻어지는 절대습도기준 총괄 물질전달계수인 $k_x a$로서 전열교환기의 제습 성능을 평가하기로 하였다. 그러므로 식(5.5)를 변형하면 $k_x a$는 다음 식으로 나타내어진다.

$$k_x a = \frac{G}{A \cdot Z}\int_1^2 \frac{1}{x_i - x}dx \qquad (5.6)$$

$$\approx \frac{G}{A \cdot Z}(x_{G1} - x_{G2}) / \frac{\Delta x_1 - \Delta x_2}{\ln(\Delta x_1 / \Delta x_2)}$$

5.3 무차원 수(Re, Sh)에 의한 실험식 제안

가열 혹은 냉각에 의해서 공기중으로 또는 그 반대 방향으로 물질인 수분이 이동하는 물질전달에 대한 일반식은 다음과 같다.

$$Sh = k \times Re^{a} \times Sc^{b} \tag{5.7}$$

여기서, $Sh = kl/D$ (5.7.1)

$$Sc = \nu/D \tag{5.7.2}$$

$$Re = Vl/\nu \tag{5.7.3}$$

먼저, 식 (5.7)에서 실험으로부터 구한 Sc값은 약 0.636이었다. 그리고 Sh는 물질전달의 정도를 나타내는데, 여기서 물질전달계수 k_x는 충진층 내에서 용액과 공기의 접촉면적을 정확히 알지 못하면 직접 구할 수가 없다. 그러므로 k를 구하기 위해서는, 우선 냉각탑의 성능을 나타내는 k_x대신에 절대습도차에 의한 총괄물질전달계수인 $k_x a$를 아래 식 (5.8)를 이용하여 구한 다음, 충진재의 비표면적으로 나누면 물질전달율 k_x를 쉽게 구할 수 있다.

$$K = K_x a/(a \times \gamma) \tag{5.8}$$

한편, Sh와 Re를 계산하기 위해서는 대표길이를 결정하여야 하는데, 여기서는 충진층이 물질전달에 영향을 미치는 요소로 간주하여 충진층의 높이를 대표 길이로 사용하였다. 그리고 충진재가 완전히 액체흡수제에 의해 젖었다고 가정하면, 충진층 내에서 공기와 용액의 접촉면적 a는 본 실험에서는 대략 $255m^2/m^3$ 정도가 된다.

Fig 5.2는 본 실험 결과로부터 구한 Re수와 Sh수, 그리고 Sc수로 플롯팅(plotting)한 그림이다. 편의상 평판에서의 강제대류 물질전달식과 비교한 것이나, 그래프에 나타나 있는 것처럼 Re수에 따른 Sh수는 전반적으로 평판형에서의 강제대류 물질전달식보다 큰 값을 나타내었다. 이것은 제습탑 충진층에서의 물질전달이 평판형에서의 강제대류보다 더 활발히 진행되고 있다는 것을 알 수 있다.

한편, 본 연구의 결과로부터 제안된 상관식은 다음과 같다.

$$Sh = 0.82 \times Re^{0.5} \times Sc^{0.33} \qquad (5.9)$$

여기서 상관계수인 R^2값은 약 0.923으로 그 신뢰도가 높음을 알 수 있으며, 실험결과로부터 대향류형(Count flow type)은 평판형보다도 물질전달에 있어서 유리 할 것으로 추측된다.

이는 충진층내에서 충진재가 불규칙하게 충진(Packing)되고, 또한

기액의 흐름이 역으로 이루어지므로 와류현상에 따른 상승효과가 물질전달 양상에 반영된 것이라고 추측 되나, 향후 이에 관한 보다 체계적이고 면밀한 연구가 수행되어야 그 효과 및 원인을 보다 정확히 예측 할 수 있을 것으로 사료된다.

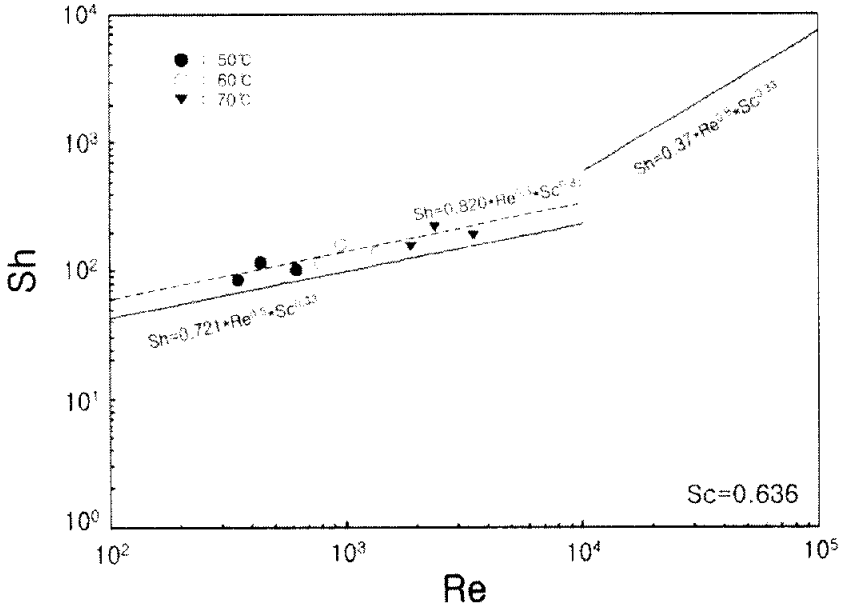


Fig. 5.2 Interrelation of Re and Sh numbers

5.4 요약

그래프에 나타나 있는 것처럼 Re에 따른 Sh수는 전반적으로 평판에서의 강제대류 물질전달식보다 큰 값을 나타내었다. 이것은 재생탑 충진층에서의 물질전달이 평판에서의 강제대류보다 더 활발히 일어난다는 것을 알 수 있다.

1. 본 실험 결과로부터 구한 Re수와 Sh수, 그리고 Sc수로 플롯팅(plotting)한 결과 상관식은 $Sh=0.82\times Re^{0.5}\times Sc^{0.33}$과 같음을 알 수 있었다.
2. 수차례에 걸친 실험 결과로부터 엔탈피기준, 총괄열전달계수인 k_a대신에 절대습도기준, 총괄 물질전달계수인 $k_x a$로 제습탑의 성능을 확인할 수 있었고, 따라서 $k_x a$에 관한 보다 많은 실험 데이터를 축적한다면 본 시스템의 제습탑 및 재생탑의 설계 시 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

제 6 장 결론

열원으로 태양열 온수기로부터 얻어지는 온수를 이용하여 가동되는 '태양열이용 냉난방공조시스템'을 개발하여 여름에 집중되는 전력 소비를 완화하여 전력난을 해결하는 한편, 신재생에너지를 이용함으로써 대체에너지 사용효과와 환경친화적인 에너지 소비 형태를 구현하는 것이 무엇보다도 절실히 요구된다.

따라서 본 연구에서는 먼저 태양열을 이용하여 액체흡수제를 작동매체로 제습/냉방을 수행하는 새로운 공조시스템을 제안하였으며, 시스템의 주요 요소에 대한 기초실험을 우선 행하여 실험 결과들을 토대로 각 요소 장치를 개발, 시스템으로 구성하였다.

또한 태양열을 직접 이용하는 재생탑과 제습/냉방을 실현하는 제습탑에 대한 실험을 통하여 그 성능을 규명하고 또 향상시켰다. 마지막으로 기초실험을 통하여 얻은 자료를 바탕으로 성능향상을 위한 연구의 일환으로 각 변수들의 상호 간섭에 의한 결과 예측의 불확실성을 해소하기 위해 최적화기법을 이용하여 성능의 결과를 예측할 수 있는 최적의 운전조건을 도출하였다.

본 연구를 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 여름에 태양열온수기를 이용하여 온수를 60℃ 이상으로 만들 수 있으면, 열교환을 통하여 액체흡수제인 염화리튬 수용액의 온도를 40℃ 이상으로 승온시킬 수 있으므로 최소 4.5kg/h 정도로 액체 흡수제를 재생시킬 수 있어 제안시스템의 적용 가능성을 확인할 수 있었다.
2. 하계에 태양열온수기로 온수를 40℃에서 60℃까지 상승을 시킬 수 있으면, 재생탑에서 최소 4.5kg/h에서 9.6kg/h 정도로 액체흡수제를 재생시킬 수 있기 때문에 태양열온수기의 계절적 한계를 벗어날 수 있는 가능성을 충분히 확인하였다.
3. 한편, 액체흡수제 온도의 변화에 의한 재생량은 큰 차이를 보였으며, 용액온도가 높을수록 재생량이 급격하게 많아짐을 알 수 있었다. 용액온도가 40℃일 때 평균 재생량이 약 5.1kg/h로, 50℃일 때의 7.1kg/h 그리고 60℃일 때는 약 9.8kg/h로 재생량이 용액온도에 크게 의존함을 알 수 있었다.
4. 충진층 높이에 따른 재생량의 변화에 있어서도 충진층의 높이가 40cm 이상을 넘는 범위에서도 재생량 차이가 거의 발생하지 않아 충진층 높이에 따른 재생성능 향상은 기대할 수 없었다.
5. 제습탑 개발에서는 충진층의 높이가 40cm인 경우에도 제습탑의 전체 높이가 1m를 넘지 않을 정도로 시스템을 컴팩트하게 만들 수 있는 최적 모델을 완성하였으며, 그 개념을 확대하여 재생탑에도 적용

해서 태양열 이용을 용이하게 하였다.

6. 재생탑 및 제습탑에서 성능에 영향을 미치는 인자들의 영향을 조사하기 위하여 실험계획법에 입각하여 실험하고 해석한 결과, 성능에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 재생탑의 경우 액체흡수제의 온도이고, 제습탑의 경우 액체흡수제의 농도임을 알 수 있었다.

7. 충진재 비교에 있어서는 직경이 작은 세라믹 계통의 래시힉·링이 제습량이 많았으며, 직경이 큰 플라스틱 충진재는 상대적으로 제습량이 적었다. 그러나 운전시의 동력비를 고려하면 압력손실이 가장 작은 플라스틱 충진재가 충진재 중에서 비교적 유리한 것으로 판단되나, 압력손실과 제습량을 고려한 최적조건을 제시하기 위해서는 보다 정확한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

8. 재생성능에 영향을 미치는 인자들에 대해 실험계획법을 적용하여 얻은 실험결과를 토대로 최적화 기법인 RSM기법을 적용함으로써 재생성능과 인자들 사이의 함수관계를 도출하였다. 이러한 함수 관계를 바탕으로 하여 시스템 최적화모형을 수립함으로써 제한적인 전력소비량으로 재생성능을 최대화하는 최적 운전조건을 찾을 수 있었다.

9. 수차례에 걸친 실험 결과로부터 엔탈피기준, 총괄열전달계수인 k_a대신에 절대습도기준 총괄 물질전달계수인 k_ra로 제습탑 및 재생탑의 성능을 확인할 수 있었다. 따라서 k_ra에 관한 보다 많은 실험 데이터

를 축적한다면 본 시스템의 제습탑 및 재생탑의 설계 시 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

10. 본 태양열 이용 제습/냉방 시스템은 자연 에너지를 이용함으로써 에너지절약 면에서 유리하고, 제습을 통하여 실내온열환경을 개선시키므로 기존 공조기가 거주자에게 제공하는 쾌적 범위 보다 넓은 쾌적 범위를 제공할 수 있다.

그러므로 본 연구를 통하여 제습에 의한 잠열부하를 처리하는 과정에서 제시된 최적의 조건을 설계의 기초 자료로 활용하여 안정적 제습/냉방 시스템을 구축하게 되면 현재 동절기에 난방과 온수 이용에 한시적으로만 사용되고 있는 태양열 온수기를 여름철 냉방을 위한 공기의 잠열부하를 경감시킬 수 있기 때문에 태양열 온수기의 연중사용이 가능하여, 이른바 '태양열 이용 다목적 공조시스템'을 완성할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Lof, G. O. G. : "House Heating and Cooling with Solar Energy", Solar Energy Research, Madison. University of Wisconsin Press, 33, 1955.

2. Baum, V. A. et al : "Efficiency of a Solar Cooler with an Open Flat Solution Regenerator", Applied Solar Energy, 8~26, 1972.

3. Rush. W. R., 1973, "Relative to H.R.10952" , Institute of Gas Technology.

4. Matsuki, K., Fujimura, K. and Shinobu, Y., "Field Experiment of Solar Dehumidifying System", Proceeding of the International Symposium on Thermal Application of Solar Energy, pp. 583~587, Japan, 1985.

5. Tanaka, "Solar Air Conditioning System", Se Jin Publisher, pp. 1~27, 1988.

6. Saito, Y. : "Design and Performance of an Integrated Desiccant/Collector", ISES Proceeding, Vol.1, pp.140~144, 1983.

7. Kimura. K., Tamura. F. : "Experimental Study and Energy Analysis on Open Cycle Solar Absorption System Combined with

Domestic Hot Water Supply", ISES Proceedings, BOl.1, pp. 130~134, 1983.

8. K. H. Choi et al., "Study on Development of Year-round Air Conditioning System Using Solar Energy", Report, pp. 19~69, 1997.

9. Engelbach, A. G. : "Air Conditioning by Means of the Chemical Absorption Process", Institution of Heating & Ventilation Engineering Journal, August 1969.

10. K. H. Choi : "Research on Open Cycle Solar Absorption System for Low Temperature Dehumidifying and Drying", Ph.D. thesis, University of Waseda, Tokyo, Japan, 1993.

11. R. V. Dunkle and I. L. Maclaine-Cross : "Theory and Design of Rotary Regenerators for Air Conditioning", Mech. and Chem. Engineering. Trans., Inst. of Enger., Australia, MC6, 1970.

12. Close, D. J. and Dunkle, R. V. : "Use of Adsorbent Beds for Energy Storage in Drying of Heating Systems", Solar Energy, Vol.19, pp.233-238, Pergamon, Press, 1977.

13. Nobuo Nakahara et al. : "Study on Heat Storage Water Tank(Part 3 : Estimation of Tank Efficiency for Multi-connected

Complete-blending Tanks by System Simulation using Design of Experiments Method)", Air-Conditioning and sanitary Engineering of Japan, No. 20, pp. 59~71, 1982.

14. Otto : "Heat Storage of Renewable Energy by Using Temperature Selective Storage Tank", Proceeding of the 34th Anniversary Heat Transfer Symposium, pp. 719~720.

15. Toshihiko Matsuto et al. : "Dynamic Design of Thermal Storage Tank System(Part 1 : Non-Dimensionalized Simulation Model and Proposition of Some Characteristic Values)", Air-Conditioning and sanitary Engineering of Japan, No. 20, pp. 39~46, 1982.

16. Toshihiko Matsuto et al. : "Dynamic Design of Thermal Storage Tank System(Part 2 : Interrelation among the Design Variables and their Rational Determination)", Air-Conditioning and sanitary Engineering of Japan, No. 20, pp. 49~56, 1982.

17. Iwata Takeshi et al. : "Study on Intake Pipe of Temperature-stratified Thermal Storage Tank", Air-Conditioning and sanitary Engineering.

18. Isihara Norimasa et al. : "Study on Multi-hole Inlet for Temperature-stratified Thermal Storage Tank", Air-Conditioning and sanitary Engineering.

19. K. T. Kang, M. G. Choi : "The sanitizing effects of desiccant based cooling", Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 27, No. 6, pp. 541~547, 1998.

20. Etkin. D. S. : "Biocontaminants in Indoor Environments", Microbial Contaminants in Indoor Air. Cutter Information Corp, 1994.

21. Gupta. M. C., Mullick. S. C. : "Solar Desorption of Absorbent Solutions", Solar Energy, Vol. 16, 1974.

22. F. Sick, J. A. Duffie et al. : "Analysis of the Seasonal Performance of Hybrid Liquid Desiccant Cooling Systems", Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, pp. 1045~1049, 1984.

23. Robison, H. I. : "Passive and Low-Energy Research and Practice-Dehumidification", Energy and Ecology in Houses PLEA'84, Ed. A. Bowen, Pergamon Press Ltd., Oxford.

24. Robison, H. I., Griffiths, W and Arnas, O. : "Liquid Desiccant Vapor Compressor Hybrid Air Conditioner and Energy Storage System for Load Management", Solar Energy in the Southeast, Ed. D.p. Colvin, N.C.S.E.A., Raleight, North Carolina, 1984.

25. Robison, H. I. : "Heating, Cooling, and Dehumidifying by Low-Temperature Sources using Liquid Desiccants", Proceedings of Solar Energy Storage Options, San Antonio, Texas, 1979.

26. Kimura, K. and Tanabe, S. : "Experimental study and Energy Analysis on the Open Cycle Solar Absorption Cooling System using LiCi Solution", Proceedings of the International Symposium on Thermal Application of Solar Energy, Japan, 1985.

27. K. C. Kim : "Research on Characteristics of Regenerator in Solar Absorption Air Conditioning System using Absorbent", A Thesis of Ph. D. Pukyong University, 1997.

28. B. C. Kim et al. : "Optimal Trickling Surface of the Regenerator in an Open Cycle Solar Absorption System for Dehumidifying", ISES Solar World Congress, Vol. 4, pp. 425~433, 1997.

29. K. H. Kim : "Study on the Appraisal of Dehumidifier's Performance for the Development of Solar Air Conditioning

System", A Thesis of Ph. D. Pukyong University, 2000.

30. J. R. Kim : "Study on Characteristics of Storage Tank in Solar Air Conditioning System", A Thesis of Ph. D. Pukyong University, 2002.

31. K. H. Choi et al. : "Research on the regeneration performance of regenerator in the solar absorption cooling/drying system using liquid desiccant", Proceedings of World Renewable Energy Conference, 1999.

32. Kimura, K., Choi, K. H., Tokita, Y. and Somekawa, N. : "The Experimental Study on Open Cycle Solar Absorption Dehumidifying/Drying System-Part 1 Fabrication of Regenerator and Results of Regeneration Experiments, Proceedings of Annual Conference", Architecture Institute of Japan, pp.669-670, 1988. (in Japanese)

33. Choi, K. H. and Kimura, K. : "Experiments of Regenerator in An Open Cycle Solar Absorption Dehumidifying/Drying System, Proceedings of International Solar Energy Society", Solar World Congress Kobe, 1988

34. Trebal R. E. : "Mass-Transfer Operations", McGraw-Hill International Editions Chemical Engineering Series, 1981.

35. K. H. Choi : "Application for Air Conditioning of Cooling System Using Desiccant", Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 27, No. 6, pp. 513~522, 1998.

감사의 글

수많은 시간이 지나고 수많은 어려움을 겪고 난 후 이 글을 쓰고 있는 지금의 심정은 정말 가슴 벅찹니다. 들뜬 마음을 뒤로하고 이 조그만 결실을 보기까지 도와주신 고마운 분들에게 먼저 감사의 말씀을 드립니다.

저의 학위과정을 마치기까지 세심한 지도와 학문의 길을 열어주신 최광환 지도교수님께 머리 숙여 감사를 드리며, 알찬 논문을 위해 조언과 격려를 해 주신 오후규 교수님, 금종수 교수님, 김영진 교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 멀리서 저의 논문 심사를 위해 노고를 아끼지 않으신 생산기술연구원 윤재호 박사님께도 감사의 말씀을 드립니다. 또한 강의실과 연구실에서 뵐 때마다 가르침과 격려를 해 주신 윤정인 교수님, 김영수 교수님, 김종수 교수님, 정석권 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

어려움에 처해 힘들 때마다 격려 해 주시고 명쾌한 답을 주신 에너지기술연구원 김종률 박사님, 대구보건대학 추홍록 교수님, 양산대학 신상운 교수님, 신창FA 조기준 사장님께 깊은 감사를 드리며, 또한 실험실에서 수년간 함께 하면서 실험과 데이터 정리를 도와준 석사과정 김동은, 정재호군과 학부생들께 진심으로 고마움을 전하며 훌륭한 결과 있기를 바랍니다.

직장 생활하면서 학업에 충실할 수 있도록 배려해 주신 대구기능대학 이창우 학장님과 박희옥 실장님, 그리고 건축설비자동화과 교수님 여러분들께 깊은 감사를 드리며, 선배 교수님이면서 동료 이상으로 항상 격려하고 자상한 마음을 나눠준 손동욱 교수님, 안병건 교수님께도 진심으로 감사드리며 좋은 결실 맺기를 기원합니다.

새로운 과정을 시작할 때마다 늘 책과 씨름하는 아들이 안타까워 언제 끝나는가만 물으시든 어머니... 어머니! 고맙습니다. 그리고 이제 끝났습니다. 이제는 가슴속에 계시는 아버지 전에도 이 기쁨을 전해 주십시오.

늦게 박사과정을 시작한 남편을 뒷바라지하며 불평 한마디 없이 오늘의 결실을 함께 이루어낸 사랑하는 아내, 많은 시간을 아빠와 함께 못하여 늘 아쉬워하는 소영, 동길이와 이 기쁨을 함께 나누고자 합니다.

공업계 고교를 진학하며 이공계에 들어선지 어언 30년... 조선소 현장에서 흘린 땀들이 밑거름이 되어 배관기능장, 공조냉동기계기술사에 이어 오늘 공학박사 학위를 받음으로 관련분야의 최고 영예를 얻었습니다. 이 영예를 얻기까지 저에게 많은 분들의 스승이 계셨습니다. 은사님들의 가르침을 가슴에 새기며 늘 겸손하고 성실한 기술인으로 살아가기를 다짐합니다. 감사합니다.

2004년 7월 우 종 수