

태양열 이용 냉난방 공조시스템 개발

Development of Year-round Air Conditioning System Using Solar Energy

최 광 환

K. H. Choi

1. 서론

우리 나라와 같이 여름철이 고온 다습한 지역에서는 습도가 쾌적성을 결정하는 중요한 요소가 된다. 따라서 생활의 질적 향상과 더불어 쾌적한 생활을 영위하기 위하여 실내의 경우에는 공조장치 중 대표적인 에어컨(air-conditioner)으로 냉방을 행하여 고온 다습한 여름철의 거주 공간을 개선하고 있다. 하지만 이러한 상용 공조기는 고온 다습한 환경하에서 거주공간에 일정 온·습도를 유지하기 위해서는 재차 가습 또는 제습이 필요하게 되어 에너지를 이중으로 소비할 뿐만 아니라 실내가 과다하게 냉각되어 재실자에게 불쾌감은 물론 심지어 냉방병도 초래할 수 있다.

이로 인해 자연에너지에 대한 관심이 날로 증대되었고, 이러한 문제의 해결방안으로 자연에너지의 하나인 태양에너지가 각광을 받게되었다. 본 연구는 태양열 이용 냉난방 시스템에 관한 연구로 액체흡수제(liquid desiccant)로 염화리튬(LiCl)용액을 사용하는 태양열 이용 냉난방 공조시스템을 개발, 연구중이다.

2. 본론

액체흡수제로 LiCl용액을 사용하는 태양열 이용 냉난방 공조시스템은 그림 1과 같이 재생기(regenerator), 건조저장탱크(dryness storage tank), 현열교환기(heat exchanger), 전열교환기(total heat exchanger)로 이루어져 있다.

본 시스템에서는 작동매체인 LiCl용액을 전열교환기에서 대상공기인 실내공기와 접촉함으로써 현열 및 잠열교환이 동시에 이루어져 고농도 LiCl용액이 저농도 LiCl용액으로 바뀐다. 그 결과, 고온 다습한 실내공기는 LiCl용액으로 수분과 열을 동시에 빼앗겨 저온 건조한 공기로 바뀌어 냉방

및 제습효과를 나타낸다. 그러나 LiCl용액은 반대로 고농도 용액에서 저농도 용액으로 바뀌어 그만큼 흡수력을 상실한다. 따라서 이러한 과정을 반복하기 위해서는 저농도 용액을 다시 고농도 용액으로 환원시켜야 하며, 이 때 필요한 에너지를 태양열을 직접 이용하게 된다. 본 시스템에서는 태양열을 재생기로 집열하여 흡수력이 저하된 LiCl용액의 흡수포텐셜을 다시 상승시켜 전열교환기에서 다시 제습 및 냉방을 할 수 있도록 한다. 따라서 재생기는 작동유체인 저농도 LiCl용액을 고농도로 변환시켜 흡수력을 회복시켜 주는 장치로 본 시스템에서 그 비중이 가장 높다고 할 수 있으며 시스템의 전체의 성능이 재생기의 성능에 달려있다고도 언급할 수 있다.

2.1 재생기의 재생면 최적 구조 선정

본 시스템에서는 저농도 액체흡수제를 고농도 액체흡수제로 바꾸기 위하여 LiCl용액을 재생기의 재생면 상부로부터 하부로 직접 유하(流下)시킨다. 그러나, LiCl용액은 점성력이 크기 때문에 재생면에서 편류(偏流, channeling)현상을 일으킨다. 이러한 편류현상은 열전달 및 물질전달을 방해하기 때문에 재생효율을 극히 저하시킨다. 따라서 재생면에서의 재생효율을 높이기 위해서는 편류현상이 일어나기 어려운 유하면(trickling surface) 구조를 개발하는 것이 무엇보다도 중요하다. 본 연구에서는 이러한 대책으로 재생면의 여러 가지 형상 및 구조들을 제안하고, 실험을 통하여 재생면의 최적 구조를 규명하였다. 그림 2는 실내 실험 장치의 개략도를 나타내고 있다.

그림 3과 같이 제안된 표면구조를 가진 재생기에 있어 용액을 착색하여 실험을 행한 결과 기공형태인 타입 D는 편류현상이 극심하게 발생하여 실험조건에서 제외하여 나머지 타입에 대하여 재생량을 비교하는 실험을 행하였다.

접수일 : 1999년 8월 9일

최광환 : 부경대학교 냉동·공조공학과

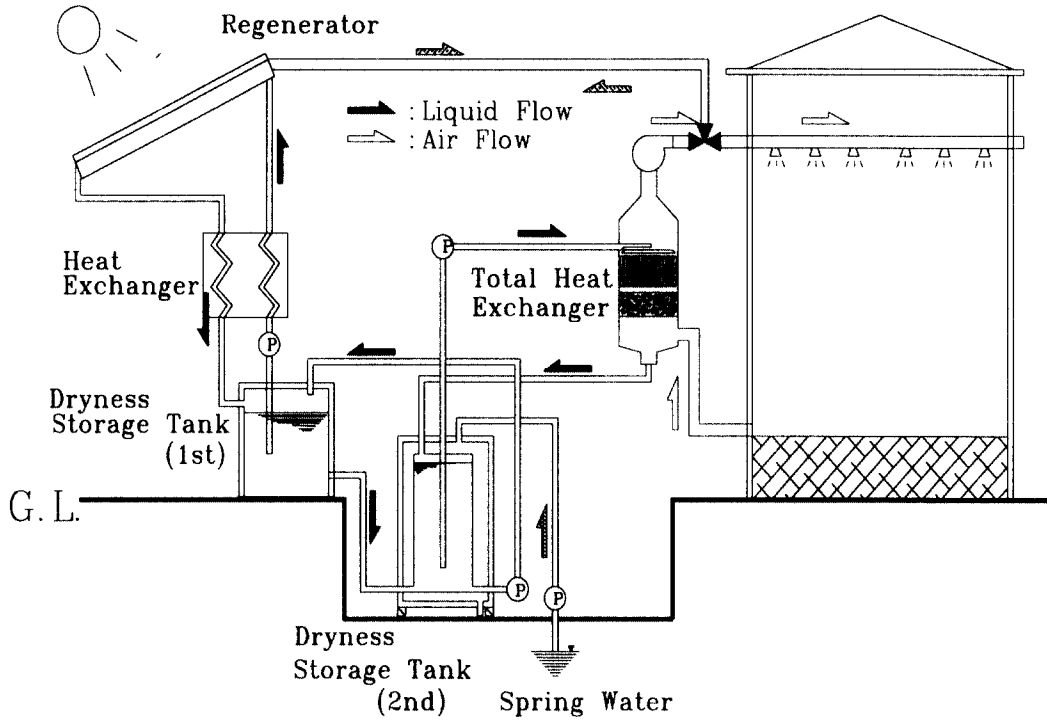


그림 1 태양열 이용 냉난방 공조 시스템 개략도

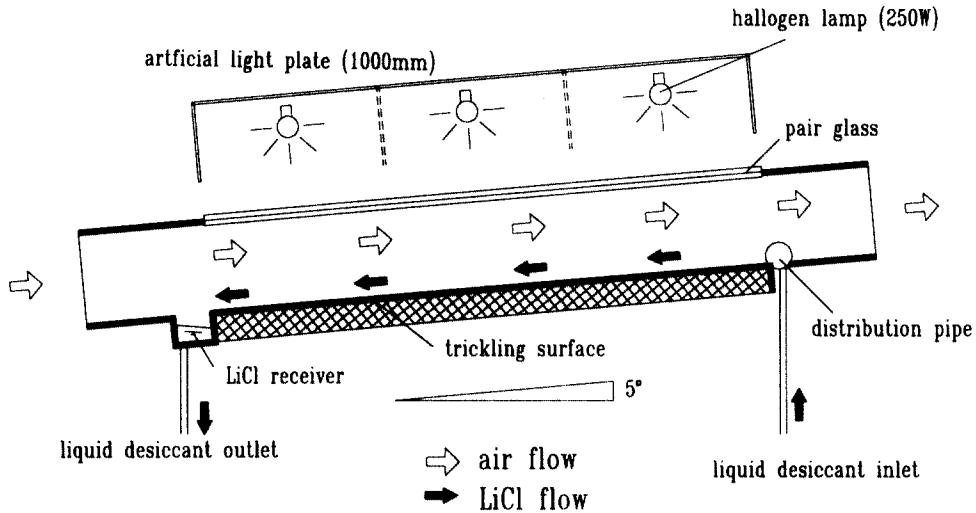


그림 2 실내 실험 장치 개략도

그림 4는 타입 D를 제외한 세 가지 타입에 따른 평균 수분 증발량을 나타내고 있다. 풍속에 따른 각 타입의 평균 수분 증발량을 비교해 보면, 풍속의 변화에도 불구하고 전반적으로 계단식 구조인 타입 B의 수분 증발량이 가장 많음을 알 수 있었다. 또한 간섭막대의 표면적, 피치 그리고 높이 등이 재생성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여

재생성능이 가장 높은 계단형 구조인 타입 B에 대하여 피치 구조에 관한 실험을 행하여 피치 간격이 그림 5에 나타낸 것과 같이 1cm일 경우 가장 재생량이 많음을 알 수 있었다. 또한 그림 6과 그림 7의 결과로부터 피치 높이는 4.5mm일 경우 보다 높은 재생량을 발생함을 알 수 있었다. 즉, 재생기의 편류현상을 방지하면

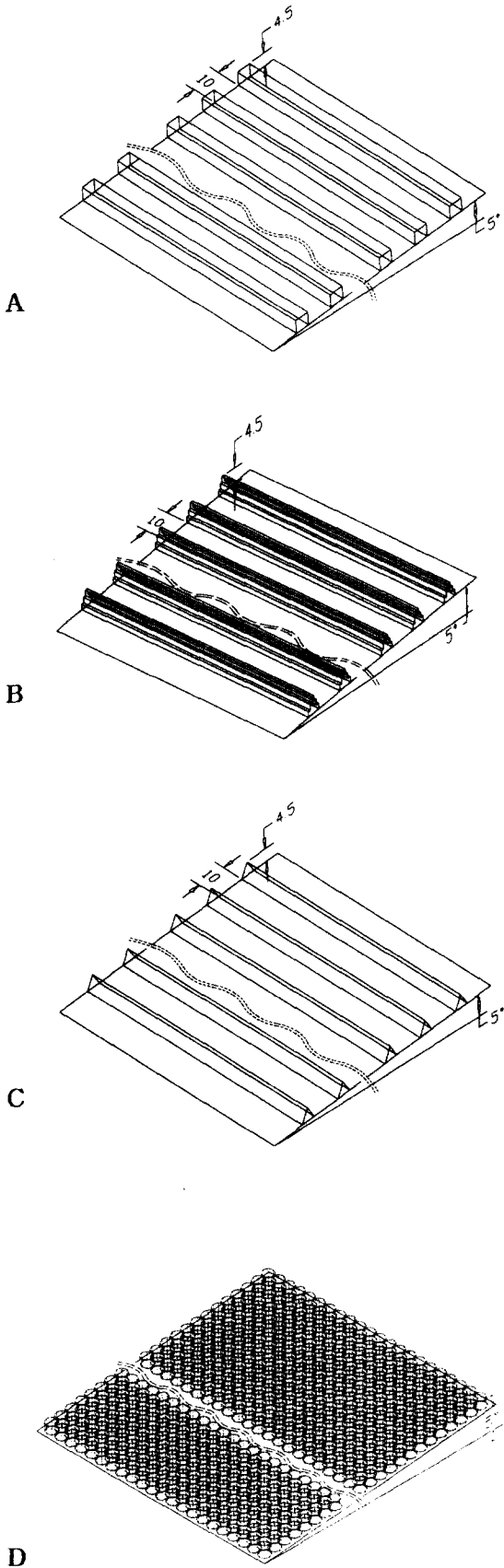


그림 3 네 가지 재생면 표면 구조 개략도

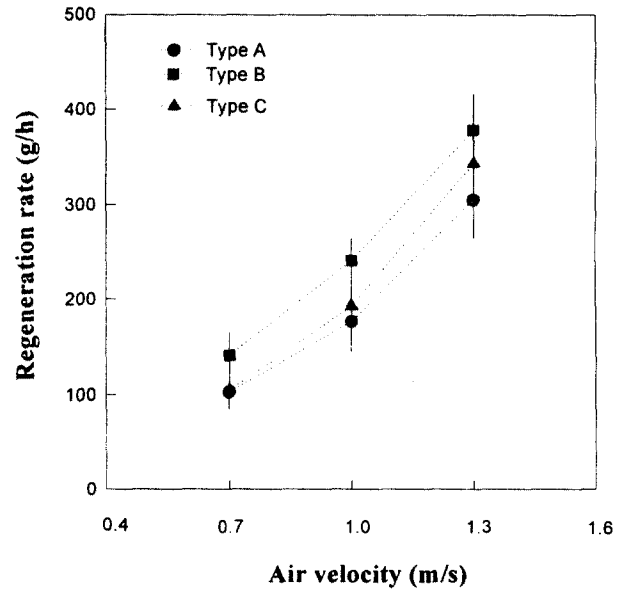


그림 4 세 가지 타입에 따른 수분 증발량

서 가장 많은 재생량을 발휘하는 재생기의 표면구조선정의 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 제안된 표면 구조 중 가장 많은 재생량을 발휘하는 구조는 계단형태인 타입 B였다.
- 2) 타입 B에 있어서 최적의 피치간격과 높이는 각각 1cm, 4.5mm임을 알 수 있었다.

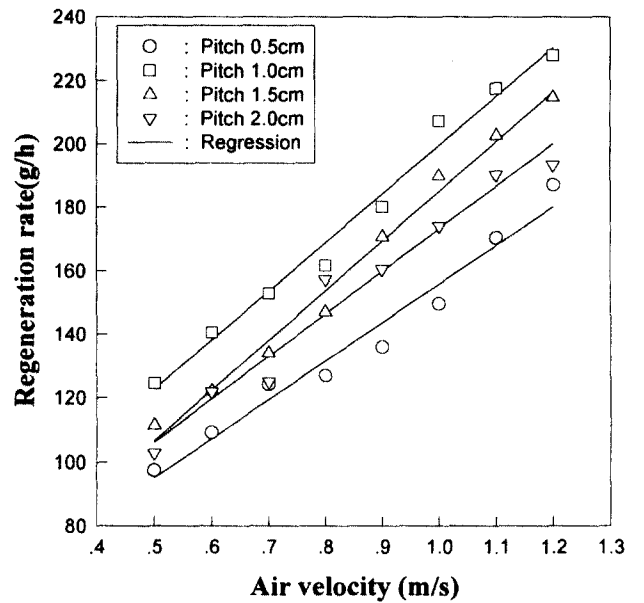


그림 5 풍속에 따른 각 피치에서의 재생량

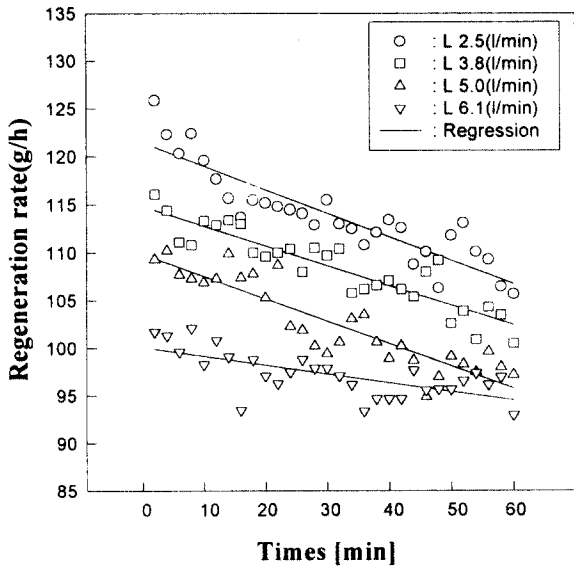


그림 6 각 유량에 대한 재생량 (막대높이 6mm)

2.2 재생성능에 영향을 미치는 인자

제안된 태양열 이용 냉난방 공조시스템 중 재생기의 재생성능, 즉 재생량에 영향을 미치는 인자로는 재생기의 운전에 관련된 인자와 재생기 형상에 관련된 인자로 분류할 수 있다. 재생기 운전 관련된 인자로는 일사량, 유입공기의 온·습도 및 재생기내 공기층 풍속, 재생면을 유하하는 LiCl용액의 유량, 온도 및 농도가 있고, 재생기 형상에 관련된 인자로는 재생기의 크기, 경사각, 공기층 두께가 있다. 하지만 재생기 형상에 관련된 인자 중

재생기의 크기에 관한 실험은 시간적으로나 경제적으로 실험 장치를 만드는 데에 드는 수고가 많기 때문에 이에 유사한 해외 연구 결과를 토대로 정방향으로 설정하였다.

먼저 재생기의 형상 인자가 재생성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여 가로 1200mm×세로 1200mm인 재생기를 경사각과 공기층 두께의 변동이 가능하도록 제작하였다.

가. 형상인자 중 재생기 경사각이 재생성능에 미치는 영향

편류현상을 방지하면서 최대의 재생량을 발휘하는 재생기의 경사각을 구하기 위하여 표 1, 표 2와 같은 조건으로 실험을 행하였으며 실험 순서는 실험 오차를 최소화한 줄이기 위하여 난수표를 사용하여 불규칙(random)하게 선정하였다.

표 1 공통 실험 조건

항 목	조 건
운전 시간	1 hr.
일사량	600W/m ²
공기풍량	1700m ³ /h
용액초기온도	35℃
용액초기농도	25wt%
도입 공기 온도	28℃
도입 공기 습도	60%
공기층 두께	5cm

(air velocity : 0.5 m/s)

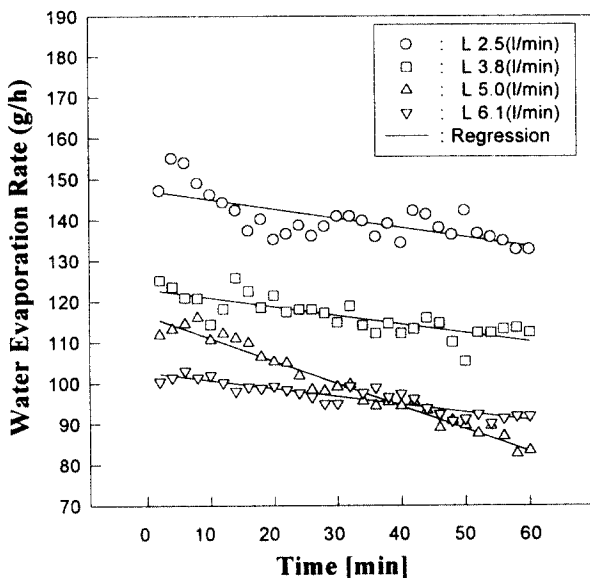


그림 7 각 유량에 대한 재생량 (막대높이 4.5mm)

표 2 최적 경사각 실험 조건

경사각도(°)	유량(ℓ/min.)	실험순서
5	2	4
	3	1
7.5	2	2
	3	6
10	2	3
	3	5

그림 8과 그림 9는 표 2에 대한 실험결과를 나타내고 있다.

위의 그림으로부터 유량의 변화에 관계없이 경사각도 5° 일 경우 재생량이 가장 많음을 알 수 있었다.

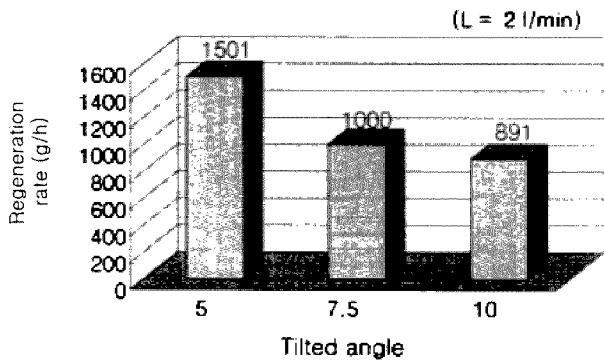


그림 8 경사각에 대한 재생량 변화

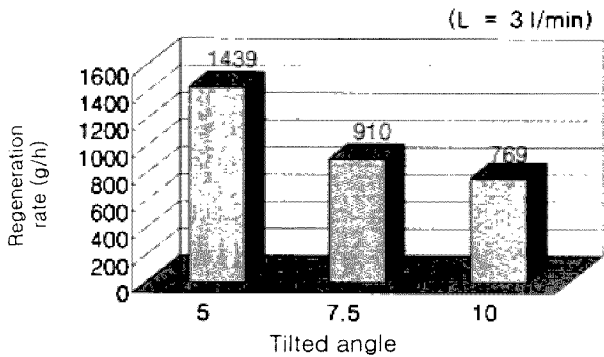


그림 9 경사각에 대한 재생량 변화

나. 형상인자 중 재생기 공기층 두께가 재생성능에 미치는 영향

최적의 재생기 설계를 위해서는 재생기내의 공기층 두께를 명확하게 할 필요가 있다. 재생기내의 공기층 두께의 변동은 공기층 내의 풍속의 변동에 영향을 미치기 때문에 본 실험에서는 표 3, 표 4의 실험 조건을 토대로 공기층 두께를 5, 7cm로, 풍량을 110m³/h, 170m³/h로 각각 나누어서 실험을 행하였다.

표 3 공통 실험 조건

항 목	조 건
운전 시간	1 hr.
경사각	5°
일사량	600W/m ²
용액 초기온도	35℃
용액 초기농도	25wt%
도입 공기 온·습도	28℃ 60%
유량	2 l/min.

표 4 최적 공기층 두께 실험 조건

공기층 두께(cm)	풍 량(m ³ /h)	실험 순서
5	110	3
	170	2
7	110	4
	170	1

그림 10과 그림 11은 표 4에 대한 실험결과를 나타내고 있다.

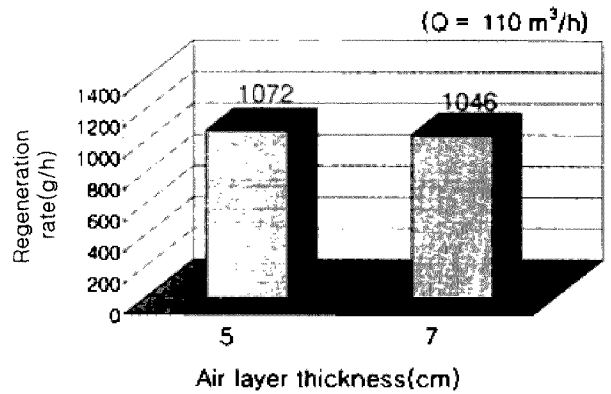


그림 10 공기층에 대한 재생량 변화

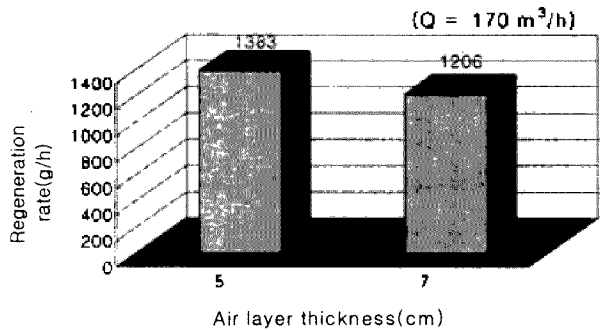


그림 11 공기층에 대한 재생량 변화

위의 그림으로부터 풍량의 변화에 관계없이 공기층 두께 5cm일 경우 재생량이 가장 많음을 알 수 있었다.

다. 재생기의 운전인자가 재생량에 미치는 영향

재생기의 재생성능에 영향을 미치는 운전인자에 관한 실험은 실험 인자수나 그 인자의 수준(level)이 많아지므로 형상인자의 실험과는 달리 실험 회수는 상당히 증가하게 된다. 따라서, 본 실험에서는 실험계획법(design of experiments)중 최소의 실험 횟수로 최대의 정보를 얻을 수 있는 직교배열표(table of orthogonal arrays)를 사용하여 실험을 계

획, 실시하여 인자들이 재생성능에 미치는 영향을 분석하였다. 먼저 2수준 실험을 통하여 재생기 운전 관련 인자 즉, 일사량, 유입공기의 온·습도 및 풍속, 재생면을 통과하는 용액의 유량, 용액의 온도 및 농도가 재생성능에 미치는 기여율을 파악하고 나아가서 3수준 실험을 통하여 최대의 재생량을 발휘하는 최적 운전조건을 제시하였다.

표 5는 2수준 실험에 사용된 인자 및 인자의 수준을 나타내고 있으며 표 6은 $L_8(2^7)$ 직교배열표를 사용한 실험조건과 실험순서를 나타내고 있다.

표 5 인자의 수준 및 수준수

인자 \ 수준	기호	수준 1	수준 2
일사량(W/m ²)	A	800	400
공기 속도(m/s)	B	1	0.5
용액 유량(l/min)	C	0.5	1
용액 농도(wt%)	D	23	25
용액 온도(°C)	E	35	40

표 6 $L_8(2^7)$ 직교배열표를 사용한 실험조건

인자 번호	ABCDEee	실험조합	실험 순서
	1234567		
1	0000000	A ₀ B ₀ C ₀ D ₀ E ₀	6
2	0001111	A ₀ B ₀ C ₀ D ₁ E ₁	1
3	0110011	A ₀ B ₁ C ₁ D ₀ E ₀	7
4	0111100	A ₀ B ₁ C ₁ D ₁ E ₁	2
5	1010101	A ₁ B ₀ C ₁ D ₀ E ₁	4
6	1011010	A ₁ B ₀ C ₁ D ₁ E ₀	8
7	1100110	A ₁ B ₁ C ₀ D ₀ E ₁	3
8	1101001	A ₁ B ₁ C ₀ D ₁ E ₀	5

본 실험은 실험계획법에 따라 실험조건, 실험순서, 실험의 수준 등을 미리 선정하여 행해졌다. 그리고, 해석에서는 분산분석법을 이용하여 유의(有意)하다고 판단되는 인자의 주효과와 재생량에 미치는 기여율을 실험 결과로부터 얻었다. 그림 12는 2수준 실험에 의한 각 조건에서의 재생량을 나타내고 있으며 표 7은 분산분석결과를 나타내고 있다.

위의 분산분석표를 보아 알 수 있듯이 재생성능에 영향을 미치는 인자 중 인자 E인 용액온도가 재생성능에 미치는 기여율이 42%로 가장 높음을 알 수 있었다.

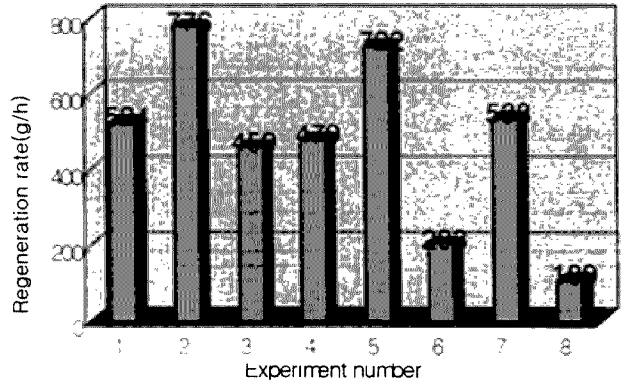


그림 12 각 조건별 재생량의 변화

표 7 분산분석표

인자	자유도	분산	분산비	기여율
일사량 A	1	56280	3.36	9.9
풍속 B	1	52003	3.11	8.8
용액농도 D	1	56280	3.36	9.9
용액온도 E	1	184523	11.03	42
오차 e	3	16730	-	29.4
합계 T	7	-	-	100

또한 최대의 재생성능을 발휘하는 최적운전 조건을 파악하기 위하여 $L_{27}(3^{13})$ 직교배열표를 사용한 3수준 실험을 행하였다. 실험 방법 및 분산분석법은 2수준 실험과 동일하게 행하였다. 표 8은 3수준 실험에 사용된 인자 및 인자의 수준을 나타내고 있다.

표 8 인자의 수준 및 수준수

인자 \ 수준	기호	수준 1	수준 2	수준 3
일사량(W/m ²)	A	400	600	800
공기 속도(m/s)	B	0.5	0.8	1.2
용액 유량(l/min)	C	2	3	4
용액 농도(wt%)	D	24	26	28
용액 온도(°C)	E	35	40	45

표 9 ~ 표 12는 실험결과를 토대로 작성한 재생성능에 유의한 영향을 주는 인자들의 일원표를 나타내고 있다.

표 9 A 일원표

A ₁	A ₂	A ₃
5267	5520	7048

표 10 B 일원표

B ₁	B ₂	B ₃
5098	5715	7022

표 11 D 일원표

D ₁	D ₂	D ₃
6817	5938	5080

표 12 E 일원표

E ₁	E ₂	E ₃
4476	5745	7614

위의 일원표로부터 일사량은 A₃, 풍속은 B₃, 용액농도는 D₁, 용액온도는 E₃일 때가 재생량이 가장 많음을 알 수 있다. 따라서, 재생기 최적인전조건의 조합은 A₃B₃D₁E₃이다. 그리고, 최적수준에서의 모평균 즉, 재생량을 구해보면 1283±116g/h가 된다는 것을 추정할 수 있다.

태양열 이용 냉난방 공조시스템의 중요 구성 요소중 하나인 재생기의 재생성능에 영향을 미치는 운전인자에 관한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 재생성능에 유의한 인자는 일사량, 풍속, 용액농도, 용액온도였다.
- 2) 본 실험조건에 있어서 액체흡수제의 유량에 의한 재생성능의 영향은 거의 없음을 알 수 있었다.
- 3) 본 실험에서 선정된 인자들 중에서 재생성능에 가장 크게 영향을 미치는 인자는 용액온도로 그 기여율은 약 42%였다.
- 4) 본 실험에서 선정한 조건내에서 재생기의 최적인전 조건을 조합해 보면, 일사량 800W/m², 풍속 1.2m/s, 용액농도 24%, 용액온도 45℃인 것으로 나타났다.
- 5) 최적인자 조합시의 모평균 즉, 재생량은 1283±116(g/h)으로 추정할 수 있다.

2.3 Pilot 실험에 의한 성능파악

실물 운전에 의한 시스템의 성능을 파악하기 위

하여 부경대학교 부지 내에 약 12평 정도의 실물 모델 하우스를 제작하여 실험을 행하였다. 그림 13은 실험동의 평면도를 나타내고 있다. 사진 1은 실험동 옥상에 설치된 재생기를 사진 2는 기계실내의 전열교환기, 사진 3은 완성된 실험동전경을 보여주고 있다.

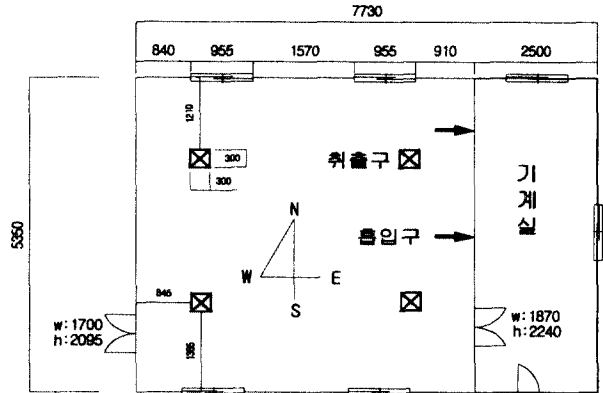


그림 13 실험동 평면도

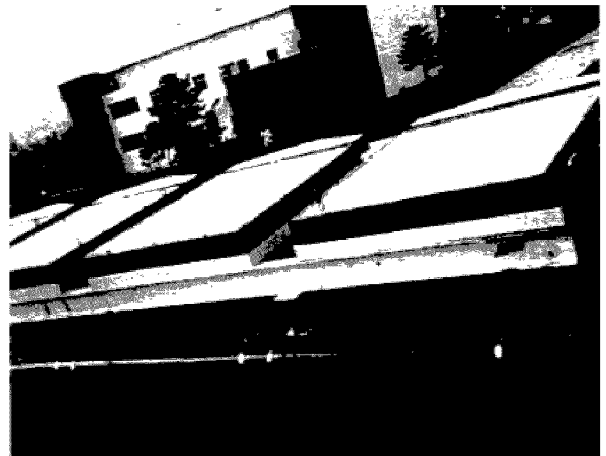


사진 1 실험동 옥상에 설치된 재생기

실물 운전에 의한 재생기와 전열교환기의 성능을 조사하기 위하여 위에 열거한 장치를 하나의 시스템으로 구성하여 하계와 동계로 구분하여 실험을 행하였다.

가. 하계실험

본 시스템은 전천후 냉난방 공조시스템으로 제안되었지만 주목적은 제습·냉방에 있다고 할 수 있다. 따라서 하계에 재생기가 각각 어느 정도의 성능을 발휘하는 지를 파악하기 위하여 재생기의 입·출구에 온·습도센서를 부착하여 재생량을 측

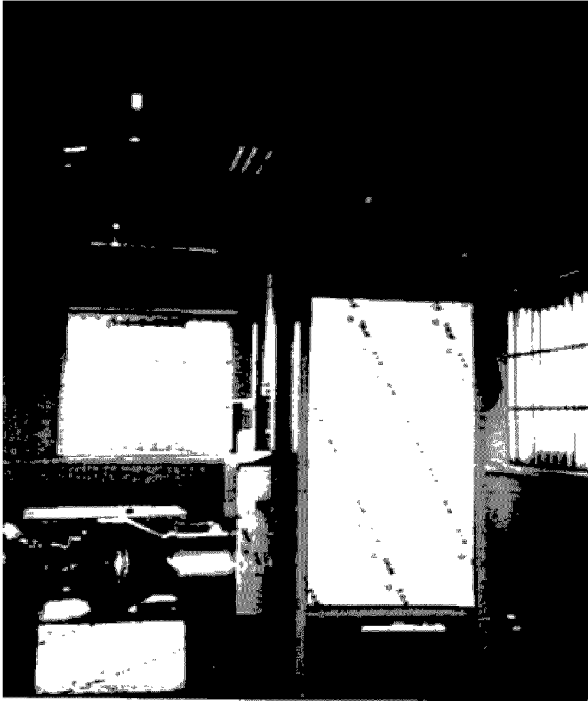


사진 2 기계실내의 전열교환기

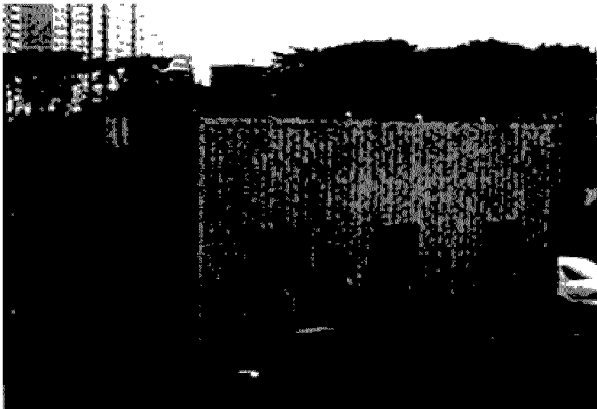


사진 3 실험동 전경

정하였으며, 이와 함께 LiCl용액의 농도도 측정하여 재생량을 검토 확인하였다.

실물 실험동의 하계 실험은 1998년 8월 1일부터 9월 30일까지 행하였으며, 그림 14에 1998년 8월 25일의 재생기의 실험 결과를 나타내었다.

태양열 이용 냉난방 공조 시스템의 실물 실험동의 하계실험(98. 8. 1 ~ 98. 9.30)을 행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 하계 기간 실험을 통하여 맑은 날을 기준으로 1일 운전시(9시간 운전) 재생기는 약 13~15kg 정도 증발시켰다.

<재생기 상태치의 시각 변동('98. 8.25)>

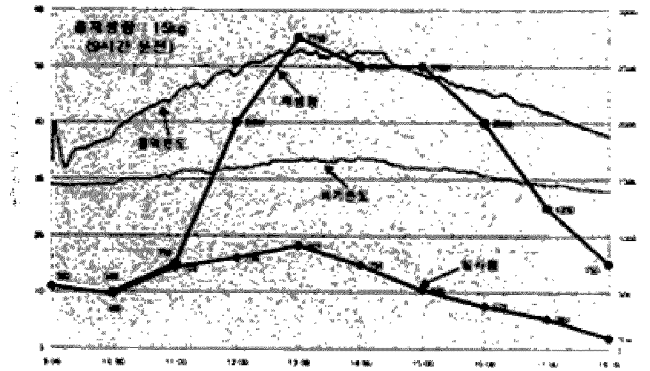


그림 14 시각 변동에 따른 재생기의 상태치('98. 8.25)

나. 동계실험

본 시스템은 제습·냉방에 중점을 두면서 시스템의 절환없이 난방을 행할 수 있도록 제안되었으며, 이 가능성을 확인하기 위하여 동계 실험을 행

<재생기의 시간에 따른 동계실험 결과 ('99.1.21)>

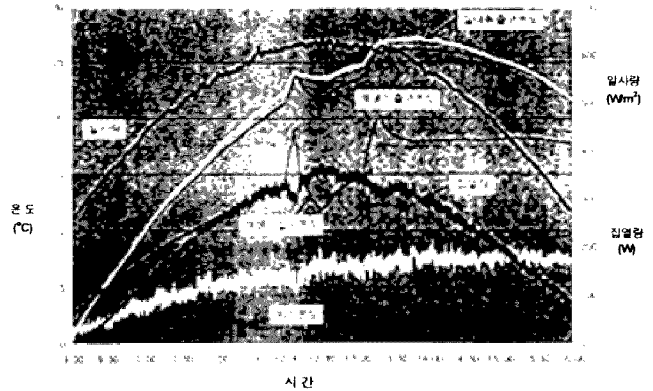


그림 15 시각 변동에 따른 집열기 상태값(1999. 1.21)

하였다. 동계 실험은 댐퍼(damper)의 개폐조절을 하여 하계에 사용된 재생기 즉, 동계의 집열기에서 가열된 공기를 그대로 실내로 순환하는 형태로 하여 실험을 행하였다. 또한 집열 효율을 정확히 구하기 위하여 인위적으로 댐퍼를 조작하여 집열기 입구로 외기를 간헐적으로 혼입하였다.

그림 15는 1999년 1월 21일의 실험 결과를 나타내고 있으며, 그림 16은 본 평판형 집열기의 집열 효율을 나타내고 있다.

장치의 절환이 없는 하나의 시스템 즉, 하계에는 재생기로 동계에는 집열기로 사용하는 태양열 이

< 재생기의 동계집열효율 ('99.1.21) >

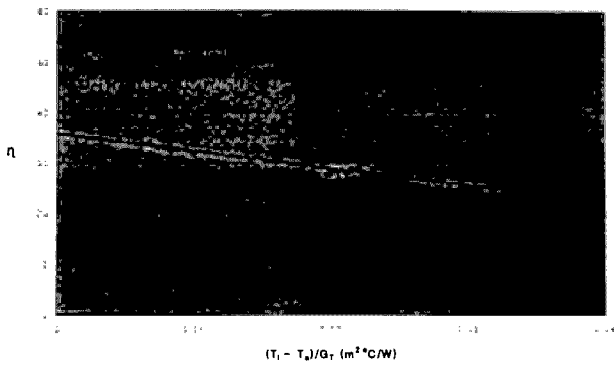


그림 16 집열기의 동계 집열 효율(1999. 1.21)

시스템과의 경쟁에서도 우위를 차지할 수 있을 것이다.

알 립

위의 내용은 산업자원부 및 에너지관리공단이 후원이 되어 99년 6월 24일에 개최한 제 11회 신·재생에너지 워크샵에 발표한 내용을 재정리한 내용이며, 동시에 이 연구는 산업자원부의 대체에너지 개발 사업의 일환으로 96년 1월부터 98년 12월까지 3년간에 걸쳐 본인 과제(과제번호: 961A201316AG1) 총책임자로 수행된 내용의 일부임을 알려 드립니다.

용 냉난방 공조 시스템 중 집열기의 동계 실험(1998. 11.20 ~ 1999.2.20)을 행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 본 평판형 집열기의 출구 공기온도는 최대 30°C 정도로 단순한 난방전용 시스템의 효율에 비하면 다소 낮았으나, 난방부하를 크게 경감시킬 수 있을 것으로 사료된다.
- 2) 본 평판형 집열기의 동계 집열 효율은 최대 36% 정도였으나, 위에서 언급한 집열판 구조의 개선이 이루어지면 집열효율은 더욱 높아질 것으로 사료된다.

3. 결 론

우리나라에서 여름에 전력 문제가 되는 것은 보다 쾌적한 환경을 추구하는 인간의 본능적 요구를 충족시키기 위하여 해마다 판매량이 증가하는 에어컨 사용과 관계가 깊다고 할 수 있다. 해마다 증가하는 에어컨 사용에 지금까지의 에너지 공급체제로써는 그 한계가 있다. 따라서 공조시스템에서 기존의 에너지 사용을 억제할 수 있는 새로운 신기술이 개발되거나, 태양열 이용 냉방시스템과 같이 풍부한 자연에너지 및 미이용 에너지를 최대한 활용할 수 있는 시스템이 개발되어야 할 것이다.

한편, 지금까지의 집열기는 특수한 목적 이외에는 동계를 제외하고서 거의 사용되지 않아서 에너지 수급이 편중되어 왔다. 그러나 이러한 계절적 특성에 편중되지 않고 전부 활용할 수 있는 새로운 태양열 이용 공조시스템이 개발되면 집열기의 문제점을 해결할 수 있을 뿐만 아니라 새로운 활용 영역을 구축해 나갈 것이며, 이러한 태양열 이용 냉난방 공조시스템의 요소 기술들이 개발되면, 전체 시스템의 성능도 향상되어 기존의 다른