

[논문] 한국태양에너지학회 논문집  
Journal of the Korean Solar Energy Society  
Vol. 23, No. 3, 2003

# 태양열 온풍 이용을 위한 재생기의 설계 최적화 모델에 관한 연구

우종수\*, 최광환\*\*, 윤정인\*\*

\* 부경대학교 기계공학부 냉동공조공학과 대학원(jswoo@tgpc.ac.kr)  
\*\* 부경대학교 기계공학부

## Response Surface Approach to Design Optimization of Regenerator Using Hot Air Heated by Solar Collector

Woo, Jong-Soo\*, Choi, Kwang-Hwan\*, Yoon, Jeong-In\*\*

\* Graduate School, Dept. of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University  
(jswoo@tgpc.ac.kr)

\*\* Dept. of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University

### Abstract

Absorption potential of desiccant solution significantly decreases after absorbing moisture from humid air, and a regeneration process requires a great amount of energy to recover absorption potential of desiccant solution. In an effort to develop an energy efficient regenerator, this study examines a regeneration process using hot air heated by solar radiation to recover absorption potential by evaporating moisture in liquid desiccant. More specifically, this study is aimed at finding the optimum operating condition of the regenerator by utilizing a well-established statistical tool, so-called response surface methodology(RSM), which may provide a functional relationship between independent and dependent variables. It is demonstrated that an optimization model to find the optimum operating condition can be obtained using the functional relationship between regeneration rate and affecting factors which is approximated on the basis experimental results.

**Keywords** : 반응표면분석법(Response surface methodology), 실험계획법(Design of experiment), 설계최적화(Design optimization), 액체건조제(Liquid desiccant), 태양열 집열판(Solar collector), 재생과정(Regeneration process)

## 1. 서 론

### 1.1 연구 배경

건조제를 이용한 공조방식에서는 건조제가 공기 중의 수분을 제거하면 건조제의 흡수포텐셜이 떨어지므로 연속적인 운전이 어렵게 된다. 그러므로, 건조제의 흡수포텐셜을 회복하기 위한 재생과정이 필요하게 된다. 한편, 재생과정에서 사용되는 소비동력을 줄이기 위하여 전기에너지가 아닌 자연에너지를 이용하려는 연구가 활발히 진행 중이다. 특히, 이러한 자연에너지 중에서도 비교적 용이하게 다량으로 얻을 수 있는 태양열을 이용하는 공조시스템이 많이 고안되고 있다. 일반적으로 건조제를 이용한 공조방식에서는 고체건조제를 이용한 흡착식과 액체건조제를 이용한 흡수식이 있는데, 본 연구에서는 일반적으로 널리 선호되는 액체건조제를 이용한 흡수식 공조방식의 재생과정에 대하여 고찰하고자 한다.

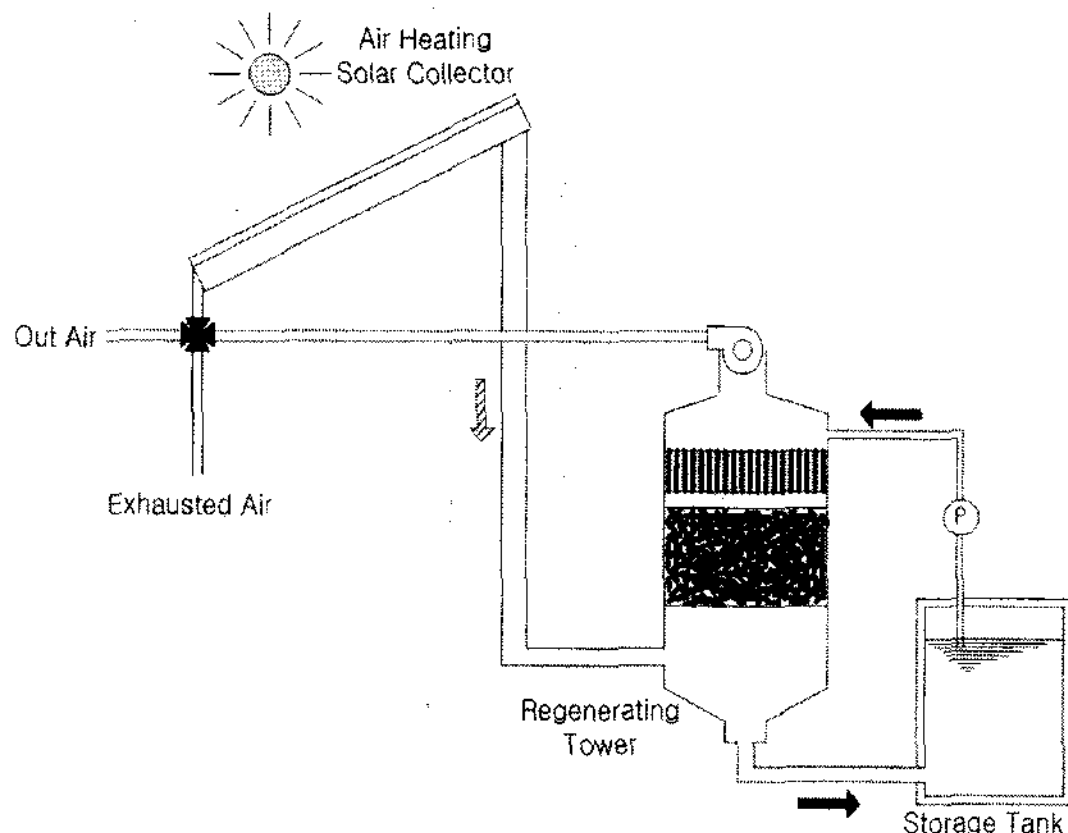


그림 1. 제안시스템의 개략도

한편, 본 연구에서는 '태양열 이용 냉난방 공조시스템'에서 가장 중요한 액체흡수제 재생과정의 에너지원으로 공기 가열식 태양열 집열기를 가동하여 얻은 온풍을 이용하는 시스템[참고문헌 (1)]을 대상으로 하며, 시스템의 개략도를

[그림 1]에 나타내었다. 금번 연구의 주된 목적은 전력소비량에 대한 제약 하에서 이 시스템의 재생성능을 최대화할 수 있는 최적 운전조건을 결정하는 것이다.

### 1.2 연구 목적

일반적으로 공학적 응용시스템의 설계 및 최적화는 시스템의 성능과 이에 영향을 미치는 변수들을 파악하는 것에서 출발한다. 이를 토대로, 시스템의 성능을 최적화하는 변수들의 값을 결정하는 것이 시스템 최적화의 근본적인 목표이다. 본 연구의 대상시스템에서는 시스템의 최종성능이 재생량이며, 이에 영향을 미치는 변수로서는 유입공기량과 액체흡수제의 용액순환량 등을 들 수 있다. 따라서, 재생량을 최대화하는 각 변수들의 값을 결정하는 것이 그 목표가 될 것이다.

만약, 시스템 성능과 각 변수들 사이의 함수관계를 알 수가 있으면, 다양한 최적화 기법을 적용함으로써 시스템 성능을 최적화하는 변수들의 값을 쉽게 결정할 수가 있다. 그러나, 실제적으로는 본 연구의 대상 시스템처럼 시스템 성능과 변수들 사이의 함수관계를 쉽게 알수 없는 경우가 대부분이다. 이러한 경우에는 실험적 방법을 통하여 시스템 성능과 변수들 사이의 함수관계를 추정하는 방안이 유용하게 활용되고 있는데, 그 대표적인 분석기법이 반응표면분석법(Response Surface Methodology; RSM)이다. RSM기법은 실험계획법(Design of Experiment)과 최적화기법(Optimization methodology)을 활용하여 공학시스템의 최적화를 추구하는 통계적 기법으로 다양한 산업분야에 널리 적용되어있다.

그러므로, 본 연구에서는 제한된 전력소비량으로 태양열 집열판의 재생성능을 최대화하는 운전조건을 결정하기 위하여 RSM기법을 활용하고자한다. 이를 위하여, 먼저 재생과정에서 전력소비량과 재생성능에 영향을 미치는 인자들을

파악하기 위하여 실험계획법을 이용한다. 더 나아가, RSM기법을 적용함으로써 전력소비량과 재생성능에 대한 함수를 도출하고, 이를 바탕으로 전력소비에 대한 제약 하에서 재생성능을 최대화하는 최적운전조건을 구할 수 있는 최적화 모델을 제안하고자 한다.

## 2. 반응표면분석법(RSM)

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 RSM기법은 공학 시스템의 설계 및 운용 단계에서 시스템 성능과 이에 영향을 미치는 요인들 사이의 함수관계를 추정하고, 이것을 이용하여 시스템의 최적 조건을 탐색하는 것을 목표로 한다. Box and Wilson (1951)[참고문헌 (2)]에 의해 처음 제안된 이래로 화학공정, 식품가공, 섬유 등의 산업분야에서 폭넓게 응용되어 왔으며, 공학시스템의 최적화를 위한 체계적인 분석기법으로 널리 인식되고 있다. RSM기법의 현황과 향후 연구방향에 대해서는 Myers(1999)[참고문헌 (3)]의 연구를 참고하기로 하고, 여기서는 개략적인 내용에 대해서만 언급하고자 한다.

일반적으로 시스템 성능을 변수  $Y$  로, 그리고  $Y$ 는  $n$ 개의 설계변수  $X_1, X_2, \dots, X_n$  에 의해 결정된다고 할 때, 시스템 성능과 설계변수 사이의 함수관계는 일반적으로 다음 식(1)과 같이 나타낼 수가 있다.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1)$$

한편, 함수  $f(\cdot)$ 의 형태가 알려져 있지 않

은 경우, 이차 다항방정식을 이용하여 추정하는 것이 적절하다. 그러므로, 시스템 성능과 설계변수 사이의 함수관계는 다음 식(2)와 같은 모델로 추정되는 것이 일반적이다.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (2)$$

식(2)에서  $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}$ 는 각각 상수, 선형 및 이차항의 계수를 나타내며,  $\varepsilon$ 은 추정모델에서 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(3)과 같은 최적화모델을 세울 수가 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Max} \\ & Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \\ & \text{subject to } (X_1, X_2, \dots, X_n) \in \Omega \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)에서  $\Omega$ 는 설계변수에 대한 제약을 나타낸다.

본 연구에서는 태양열 집열판에서 얻어지는 온풍을 액체흡수제의 재생열원으로 사용하는 재생기 성능을 최적화하는 실험조건을 규명하기 위하여 RSM기법을 적용하여 식(2)와 같은 최적화 모델을 제안하고자 한다. 그러므로 위 최적화 모델을 직접 품으로써 재생량을 최대화할 수 있는 재생기의 최적 운전조건을 결정할 수 있다.

## 3. 실험장치 및 실험방법

### 3.1 실험장치

실험장치는 여러 조건 하에서 실험을 할 수

있도록 재생성능에 영향을 미치는 요인인 액체 건조제의 온도, 유량, 그리고 유입공기의 온도와 습도, 풍향 등을 변화시킬 수 있도록 제작하였다. 실험장치는 전열교환이 일어나는 충전층(Packed layer), 용액과 공기의 흐름을 분리시켜 액적발생을 억제시키는 기액분리판(Distribution plate), 용액을 충전층에 균일하게 분사시키는 분배기(Sprayer), 용액의 비말현상을 방지하기 위한 엘리미네이터(Eliminator), 배기용 블로어, 용액공급용 마그네틱 펌프, 유량 제어 및 측정을 위한 인버터와 유량계, 염화리튬 용액의 농도 변화를 측정하는 초음파 농도계 그리고 데이터를 처리하는 집록장치와 컴퓨터로 구성되어 있다.([그림 2] 참조)

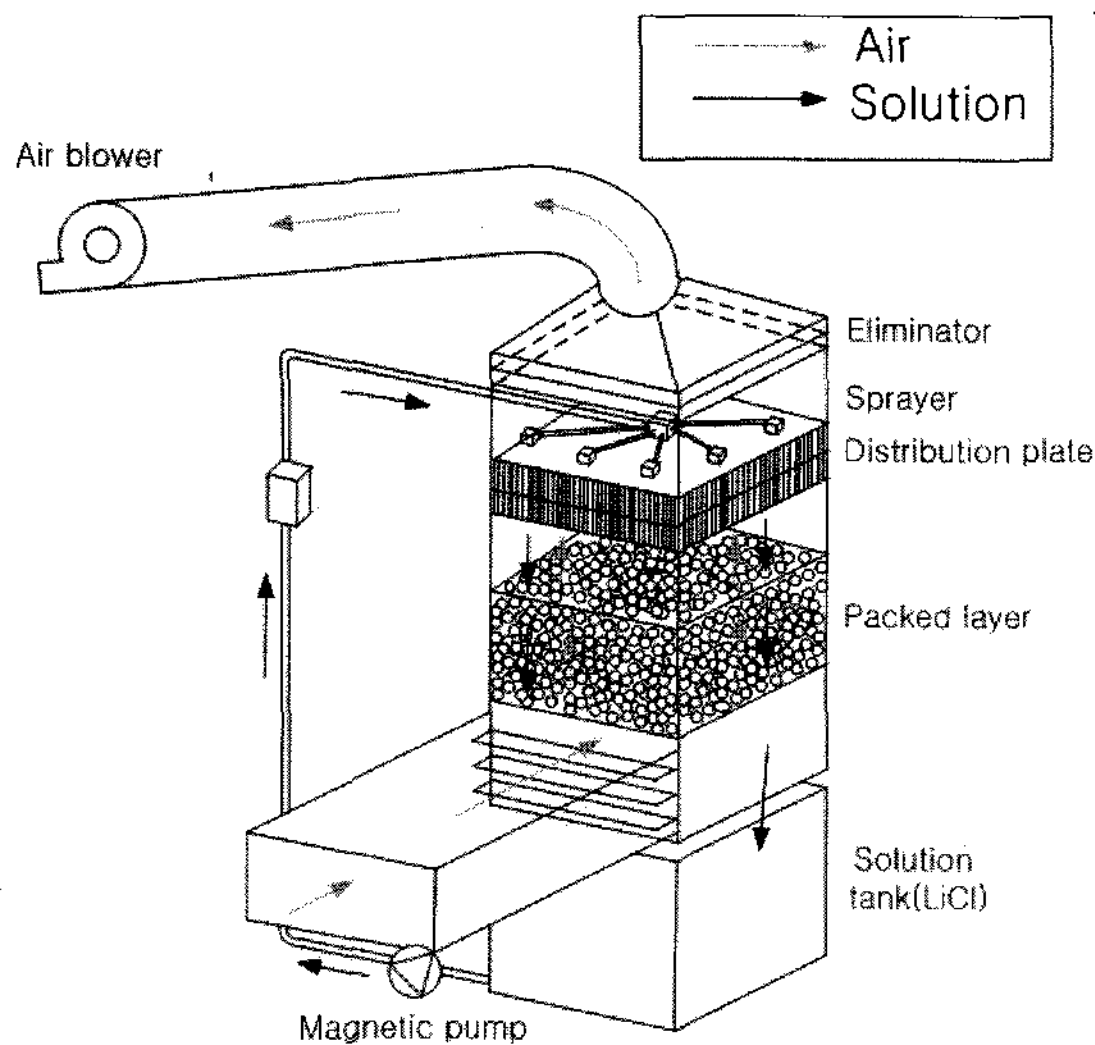


그림 2. 실험장치

본 실험에서는 종전의 실험[참고문헌 (4)]을 바탕으로 충전층의 높이를 30cm로 고정하고, 다른 요인들을 변화시켜 가면서 재생량을 관찰하였다. 그리고 순환용 저장탱크와 배관계통은 10mm 두께의 발포 폴리에틸렌으로 단열하여 주위와의 흡·방열에 의한 영향을 최대한 배제하

였으며, 열전대 및 습도계를 설치하여 각 상태 값을 측정하였다. 실험에 사용된 측정기기의 종류 및 그 용도는 [표 1]과 같다.

표 1. 측정기기와 용도

측정 기기	용도
Thermo-couple (Φ0.2)	온도
Beam 1000	온도, 습도
ClimoMaster, KANOMAX	풍속
FUD-1, Fuji Ultrasonic Eng.	용액 농도
NetDAQ, FLUKE	데이터 집록
Flex-tube, Dwyer	압력

### 3.2 실험방법

본 연구에서는 재생과정에서 재생성능에 유의(有意)한 영향을 미치는 인자들을 파악하기 위하여 실험계획법을 이용하였다. 실험계획법을 이용하여 최적 운전 조건을 결정하고자 하는 것은 새로운 시도는 아니나 [참고문헌 (5)], 기존의 연구에서는 실험계획법을 통하여 얻은 실험 결과를 바탕으로 인자들이 재생성능에 미치는 영향이 유의(有意)한 지 여부만을 판단하고 주어진 처리수준(Treatment level)의 조합 중에서 가장 나은 성능을 나타내는 값을 최적 조건으로 선택하여 왔다. 그러나, 주어진 처리수준의 조합 중에서 최적 존재하지 않을 수도 있는데, 이러한 경우 재생성능과 인자들 사이의 함수관계를 구할 수 있다면 실험이 행해진 처리수준의 조합 이외에서 존재하는 최적 조건을 구할 수도 있다. 따라서, 본 연구에서는 실험계획법을 통하여 얻은 실험결과를 바탕으로 하여 재생성능과 인자들 사이의 함수관계를 도출할 수 있는 RSM 기법을 적용하였다.

실험은 작동유체로 사용되는 염화리튬(Lithium Chloride)용액의 농도와 온도를 각각 25wt%, 30℃, 유입공기온도는 70℃로 유지시킨 상태에서 실시되었다. 이전의 실험결과를 바탕으로 하여, 유입공기량과 용액순환량을 재생성능에 영

향을 미치는 인자로 규정하고, 이러한 인자들에 대해 2<sup>3</sup>요인배치법(2인자3수준)을 적용하였다. 각 인자들의 처리수준은 [표 2]에 정리된 바와 같다.

표 2. 인자와 처리수준

인 자 (단위)	처리수준		
유입공기량 (m <sup>3</sup> /h)	100	145	190
용액순환량 (ℓ/min)	6	10	14

#### 4. 실험결과 및 최적운전조건 도출

##### 4.1 실험결과

실험방법에서 언급한 실험조건과 인자들의 처리수준에 따라 실험을 행한 결과 [표 3]과 같은 결과를 얻었다. 재생성능을 대표하는 척도로 재생량을 기록하였으며, 소음요인의 영향을 최소화하기 위하여 처리수준의 조합 별로 랜덤(random)하게 실험을 행하였다.

표 3. 처리수준별 재생량

		유입공기량(m <sup>3</sup> /h)		
		100	145	190
용액 순환량 (ℓ/m)	6	0.97	1.24	1.42
	10	1.09	1.31	1.53
	14	0.87	1.18	1.37

한편, 재생장치의 운전에 있어서는 동력 사용량을 최대한 절감 하는 방안이 강구된다. 그러므로, 에너지 소비의 효율성을 제고하기 위해서 먼저 전력소비량에 대해서 고려할 필요가 있다. 본 실험결과에서 용액순환량이 증가함에 따라 재생량이 많아짐을 관찰할 수 있다. 하지만, 용액순환량을 증가시키기 위해서는 전력소비가 많아지게 되므로 전력소비에 제약이 있는 경우, 재생성능을 향상시키기 위하여 용액순환량을 무

작정 증가시킬 수는 없다. 유입공기량과 용액순환량에 대한 처리수준별 전력소비량을 측정하여 [표 4]에 정리하였다.

표 4. 처리수준별 전력소비량

(단위 : Watt)

		유입공기량		
		100	145	190
용액 순환량	6	84.94	98.44	111.94
	10	108.56	122.06	135.56
	14	139.50	153.00	166.50

##### 4.2 최적 운전조건의 도출

[표 3]에 나타난 실험결과로부터 유입공기량이 190m<sup>3</sup>/h, 용액순환량이 10ℓ/min.일 때, 재생성능이 최대인 것으로 판정할 수 있다. 그러나, 이러한 결론은 9개 처리수준의 조합 중 하나가 최적의 운전조건이라는 가정을 전제로 하고 있다. 다시 말하면, 용액순환량이 10ℓ/min.일 때 보다 9ℓ/min. 나 11ℓ/min.일 때가 더욱 좋은 재생성능을 얻을 수도 있기 때문에, 단편적으로 10ℓ/min.의 용액순환량이 최적의 운전조건이라고 단정할 수가 없다. 예를 들어, 실험결과로부터 용액순환량이 6, 10, 14ℓ/min.일 때, 재생량은 각각 1.42, 1.53, 1.37kg/h로 됨을 알 수 있다.

만약, 용액순환량과 재생량의 함수관계가 [그림 3]과 같다면 재생량을 최대화하는 용액순환량은 10ℓ/min.가 아닌 Aℓ/min.가 된다. 이러한 경우, 각 인자들과 재생성능 사이의 함수관계를 알 수 있으면 주어진 처리수준보다 더 나은 재생성능을 보이는 최적의 인자수준을 구할 수가 있다. 뿐만 아니라, 이러한 운전조건을 실현하기 위해서 135.56Watt의 전력이 소비됨을 [표 4]으로부터 알 수 있다. 만약, 전력소비량을 120Watt 이하로 제한하고자 하는 경우에는 이러한 운전조건은 실현할 수조차 없게 된다.

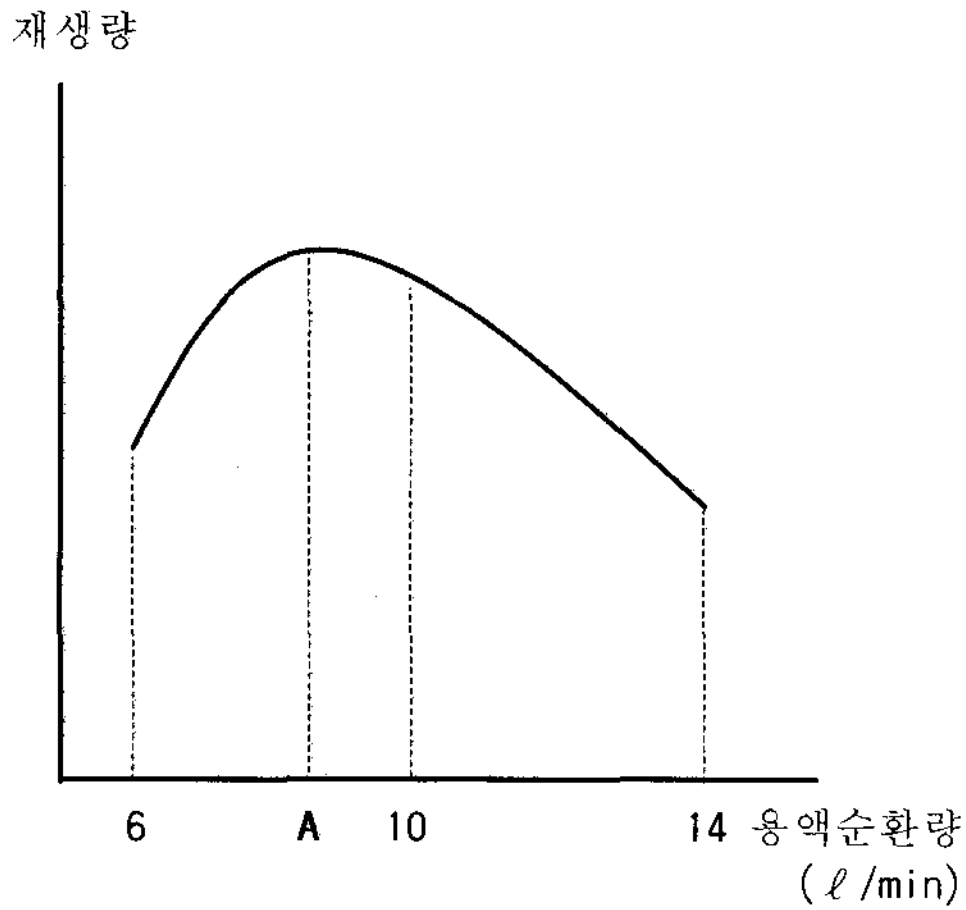


그림 3. 재생량과 용액순환량의 함수관계  
(유입공기온도=70℃, 유입공기량=190m<sup>3</sup>/h)

[표 3]에 주어진 실험결과를 토대로 재생량과 이에 영향을 미치는 요인들 사이의 함수관계를 도출하기 위하여, 재생량을  $Y$  라 하고, 유입공기량, 용액순환량을 각각  $X_1$ ,  $X_2$  라고 가정한다. 그리고, 앞에서 설명한 RSM기법을 적용함으로써 아래 식 (4)와 같은 함수관계를 도출할 수 있다.

$$Y = -0.4321 + 0.0095X_1 + 0.1499X_2 + 1.73e^{-5}X_1^2 - 0.0084X_2^2 - 6.94e^{-5}X_1X_2 \quad (4)$$

위 식에서 각 계수들은 인자들의 주 효과 및 교호작용 효과의 크기를 나타내는 것으로 분산분석(ANOVA, Analysis of Variance)을 통하여 그 유의(有意)성을 판정할 수 있으며, 그 결과를 [표 5]에 나타낸다. 분산분석 결과,  $R^2$  값이 98.8%로 나타나 추정된 모델은 매우 신뢰할 만한 것으로 평가할 수 있다.

이와 마찬가지로, [표 4]에 주어진 실험결과를 바탕으로 전력소비량과 유입공기량, 용액순환량 사이의 함수관계도 도출할 수 있다. 전력소비량을  $W$  라 할 때, RSM기법을 적용하면 다

음과 같은 함수관계를 도출할 수 있다.

$$W = 33.235 + 0.300X_1 + 2.245X_2 + 0.229X_2^2 \quad (5)$$

위 모델에 대한 분산분석의 결과는 [표 6]에 나타난 것과 같으며,  $R^2$  값은 100%로 나타나 추정된 모델은 통계적으로 완벽한 것으로 나타났다.

표 5. 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		

표 6. 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		

사용동력을 최대한 절감하려는 효율적 재생기의 최적 운전조건을 도출하기 위하여 RSM기법을 적용하여 구한 함수관계를 이용하면 최적화 모델을 수립할 수 있다. 그러므로, 전력소비에 대한 제약 하에서 재생량을 최대화하는 최적화 모델은 다음 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.



$$\begin{aligned} &\text{Maximize } Y \\ &\text{subject to } 100 \leq X_1 \leq 190, \quad 6 \leq X_2 \leq 14 \\ &W \leq W_{\max} \end{aligned} \quad (6)$$

위 식에서  $W_{\max}$  는 최대 허용 전력소비량을 표시하며, 재생량  $Y$  와 전력소비량  $W$  는 각각 식 (4)과 (5)로 주어진다. 따라서, 최적화 모델을 풀으로써  $W_{\max}$  이하의 전력소비로 재생능을 최대화하는 최적해를 구할 수 있다. 최대 허용 전력소비량이 변화함에 따른 최적해를 [표 7]과 [그림 4]에 나타내고 있다.

표 7.  $W_{\max}$  값의 변화에 따른 최적해

$W_{\max}$	최적운전조건		재생량
	$X_1$	$X_2$	
100	150.20	6.00	1.2582
102	156.87	6.00	1.2887
104	163.53	6.00	1.3177
106	170.20	6.00	1.3451
108	176.87	6.00	1.3710
110	182.28	6.08	1.3954
112	186.82	6.20	1.4189
114	190.00	6.41	1.4412
116	190.00	6.79	1.4609
118	190.00	7.15	1.4776
120	190.00	7.51	1.4917
122	190.00	7.86	1.5033
124	190.00	8.20	1.5127
126	190.00	8.53	1.5199
128	190.00	8.85	1.5253
130	190.00	9.16	1.5288
132	190.00	9.47	1.5306
134	190.00	9.67	1.5309
136	190.00	9.67	1.5309
138	190.00	9.67	1.5309
140	190.00	9.67	1.5309

[그림 4]에서 점선은 최대 허용 전력량에 대한 제약이 120Watt로 주어지는 경우, 최적해는 용액순환량이 7.51 l/min., 유입공기량이 190m<sup>3</sup>/

h이며, 이 때 최대 얻을 수 있는 재생량은 약 1.49kg/h임을 알 수 있다.

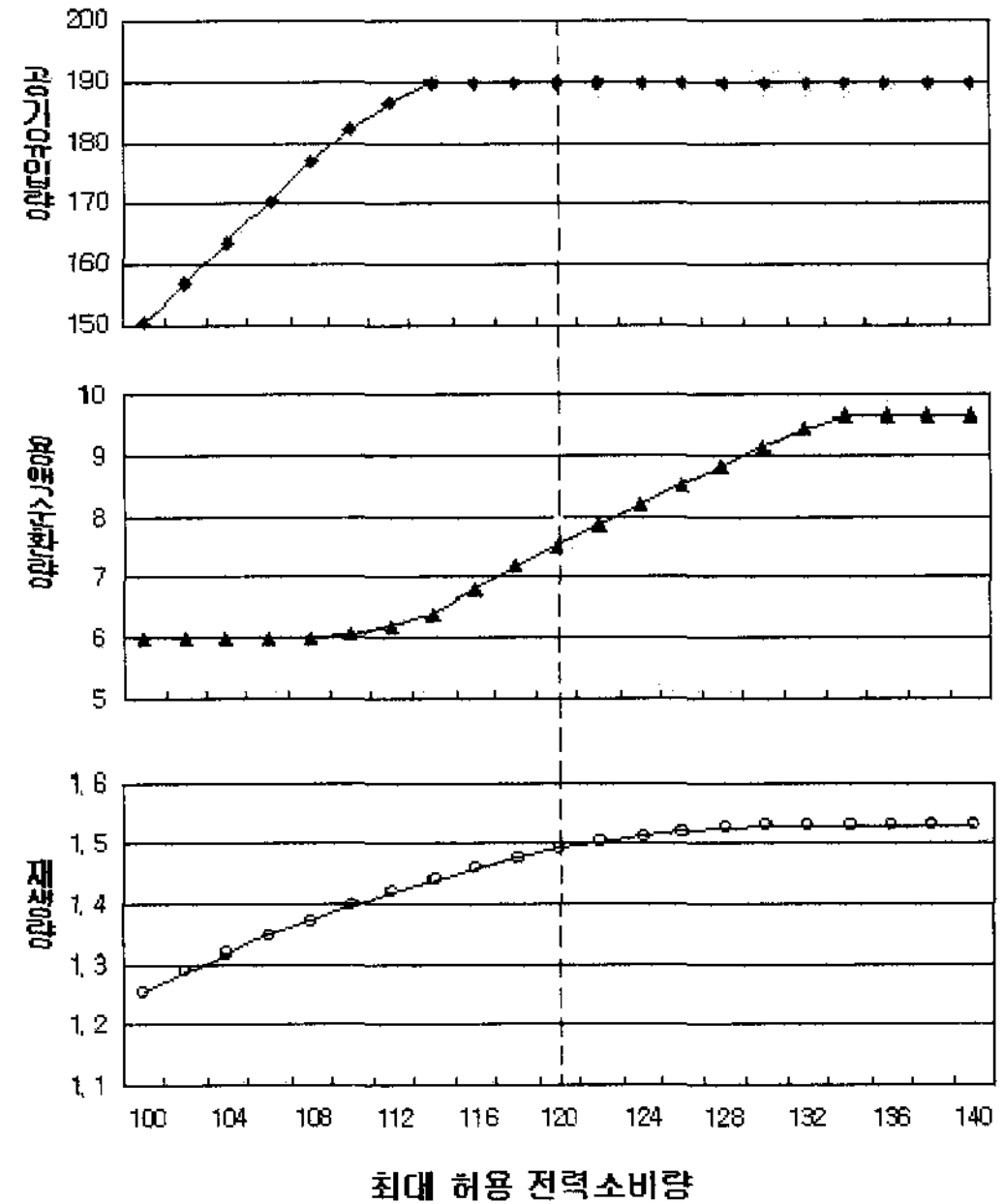


그림 4.  $W_{\max}$  값의 변화에 따른 최적해

한편, [그림 5]에서는 최대 허용 전력소비량이 120Watt로 주어질 때, 재생량에 대한 Contour Plot을 나타낸다.

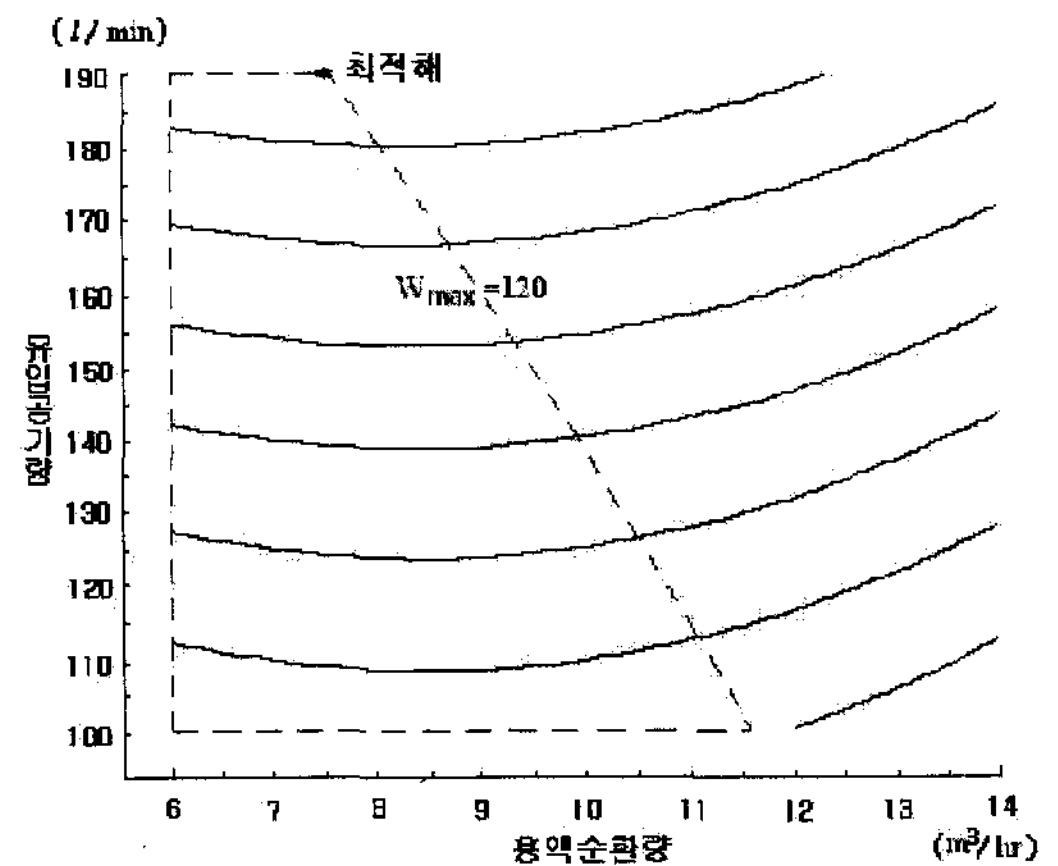


그림 5.  $W_{\max}$  가 120Watt일 때 최적해

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<sup>3</sup>/h일 때 임을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서 공기 가열식 태양열 집열기로부터 얻어지는 가열공기를 액체흡수제 재생과정의 에너지원으로 사용한다고 가정하였을 경우, 재생능을 최대화하는 최적 운전조건을 결정하는 설계최적화 모델을 제안하였다.

이를 위하여 재생능에 영향을 미치는 인자들에 대해 실험계획법을 적용하여 얻은 실험결과를 토대로, RSM기법을 적용함으로써 재생능과 인자들 사이의 함수관계를 도출하였다.

금번 연구에서 이러한 함수관계를 바탕으로 하여 시스템 최적화 모델을 수립함으로써 제한적인 전력소비량으로 재생능을 최대화하는 최적 운전조건을 찾을 수 있음을 보였다.

마지막으로, 본 연구에서 제안된 바와 같이 RSM기법을 활용한 시스템 최적화 모델의 수립은 다양한 공학적 응용시스템의 최적화에 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다.

## 사 사

본 연구는 2000년도 부경대학교 연구년 교수 지원 사업에 의하여 연구되었기에 이에 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. K. H. Choi, 1993, 'Research on Open Cycle Solar Absorption System for Low Temperature Dehumidifying and Drying', Ph.D. Thesis, University of Waseda, Japan.
2. G. E. Box, K. B. Wilson, 1951, 'On the Experimental Attainment of Optimum Conditions', Journal of the Royal Statistical Society, Ser. B, Vol. 13, pp. 1-45.
3. R. H. Myers, 1999, 'Response Surface Methodology-Current Status and Future Directions', Journal of Quality Technology, Vol. 31, pp. 30-44.
4. 김종률, 최광환, 윤정인, 김재돌, 우종수, 2001, '공기 가열식 태양열 집열기의 온풍을 이용한 재생탑의 재생효율에 관한 연구: 제1보 온풍 온도가 재생량에 미치는 영향에 관한 실험', 한국태양에너지학회 학술발표대회 논문집, pp. 18-26.
5. 김보철, 최광환, 금종수, 윤정인, 정용현, 2001, '공기 가열식 태양열 집열기의 온풍을 이용한 재생탑의 재생효율에 관한 연구: 제2보 실험계획법에 의한 요인효과 분석', 한국태양에너지학회 학술발표대회 논문집, pp. 27-32.
6. Y. J. Kim, B. R. Cho, 2000, 'Economic Integration of Design Optimization', Quality Engineering, Vol. 12, No. 4, pp. 561-567.
7. 박성현, 1998, '현대 실험계획법', 민영사, pp. 177-209
8. 谷津 進, 1991, '實驗の計畫と解析', 日本規格協會.
9. 武藤時宗, 昭和 61年, '實驗計畫法テキスト', 新技術社.
10. 산업자원부, 1999, '태양열 이용 냉난방 공조 시스템 개발에 관한 최종보고서'.