

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 19, No. 3, 1999

태양열 이용 공조시스템의 동특성 해석

김 재 돌

동명대학 건축설비과

Dynamic Characteristic Analysis of Air-Conditioning System Using Solar Energy

J. D. Kim

Department of Architectural Equipment, Tongmyong College

ABSTRACT

The optimum drive control method have to be developed to exhibit the use object contributed trust, accuracy, amenity and energy save of product. To develop the optimum drive control method is, first, grasped the static characteristics for the entire system combined each element which consists the machine and performed the dynamic characteristics explanation based on the satisfied result which acquires at the static characteristics explanation. According to this explanation, the response of the system shows same characteristics tendency and the increasing same quantify comparing to response change of each element. So the dynamic response of the entire system shows different.

Therefore this study performs the static and the dynamic characteristic explanation of entire system and each element for using air-conditioning system of solar energy based on the performed result from now on, so for application of this result.

기 호 설 명

A	: 전열면적 [m^2]
DH	: 제습량 [kg/h]
GT	: 용액유량 [kg/h]
h	: 엔탈피 [$kcal/kg$]
L/G	: 유량비
RR	: 재생량 [kg/h]
SC	: 건조저장탱크 농도 [$wt\%$]
SN	: 시스템 결합시의 재생량 [kg/h]
SR	: 일사량 [W/m^2]
ST	: 건조저장탱크 온도 [$^{\circ}C$]
V	: 공기속도 [m/s]
ρ	: 용액밀도 [kg/m^3]

1. 서 론

최근 생활수준의 향상으로 쾌적한 생활공간 추구에 따른 냉방설비 설치율이 급격하게 증가되고, 또한 생산공장, 빌딩, 공공장소 및 지하공간 등에서도 냉방수요가 확대되고 있다^{1)~3)}. 이에 따라 산업분야의 경우 소형 냉각 및 제습장치가 공업제품의 제조공정이나 보관에 응용되어 제품의 고급화가 이루어지고 있다. 그러나 실내환경을 개선하는 보건용 공조시스템 뿐만 아니라 산업에 응용되는 산업용 공조시스템의 대부분은 전기 에너지를 구동원으로 하고 있다. 이 전기 에너지는 대부분 화석연료에 의해 생산되므로 에너지절약은 물론, 지구환경 보존 차원에서도 많은 문제점을 안고 있어 미활용에너지의 이용이 최근 활발히 요구되고 있다^{4)~7)}.

일반적으로 공조·냉동장치는 그 사용목적이나 용도, 용량, 설치조건 등에 따라 큰 영향을 받는 시스템으로서 제품의 신뢰성, 정확성, 쾌적성 및 에너지 절약에 기여하면서 그 사용목적에 충분히 발휘하기 위해서는 최적의 운전제어 기법이 개발

되어야 한다^{8)~10)}. 최적의 운전제어 기법을 개발하기 위해서는 먼저 장치를 구성하는 각 요소들 및 각 요소들이 결합된 전체 시스템에 대한 정적 특성(static characteristics)이 파악되어야 하고, 정적인 해석에서 획득된 만족한 결과를 바탕으로 동적인 특성(dynamic characteristics)해석이 수행되어야 한다. 이들이 실험이나 수치해석에 의해 정확히 파악됨으로서 사용하고자 하는 시스템이 동적으로도 충분히 만족할 수 있는 제어시스템의 설계가 가능하게 된다^{11)~12)}.

따라서, 본 연구에서는 태양열을 구동열원으로 하여 냉난방을 할 수 있는 공조시스템에 있어 다양한 외부조건 변화에 따른 정적특성 해석을 수행하였다. 그 결과 시스템 각 구성요소 및 전체 시스템에 가장 큰 영향을 미치는 요소들을 대상으로 그 정적특성 결과를 제어공학적으로 활용하여 태양열 이용 냉난방 공조 시스템의 동특성 해석을 수행하였으며, 최적 제어시스템 개발을 위한 자료를 제공하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 나타내며, 장치는 크게 재생기, 제습기 및 건조저장탱크로 구성되어 있다. 재생기는 1200mm×1200mm크기의 강판에 흑색 에폭시로 코팅이 되어 있으며, 재생면 상부에는 16mm두께의 이중유리로 제작하였다. 제습기는 향류형으로 전체 크기가 400mm×400mm×1000mm로, 상부로부터 엘리미네이터, 스프레이, 용액분배기, 충전층 및 용액탱크로 구성되어 있다. 그리고 건조저장탱크는 300mm×300mm×700mm의 크기에 좌·우측을 각각 3단계로 나누어 용액의 입·출구가 설치되어 있고, 제습기에서 냉각감습된 공기는 모델하우스로 순환할 수 있도록 시스템이 구성되어 있다.

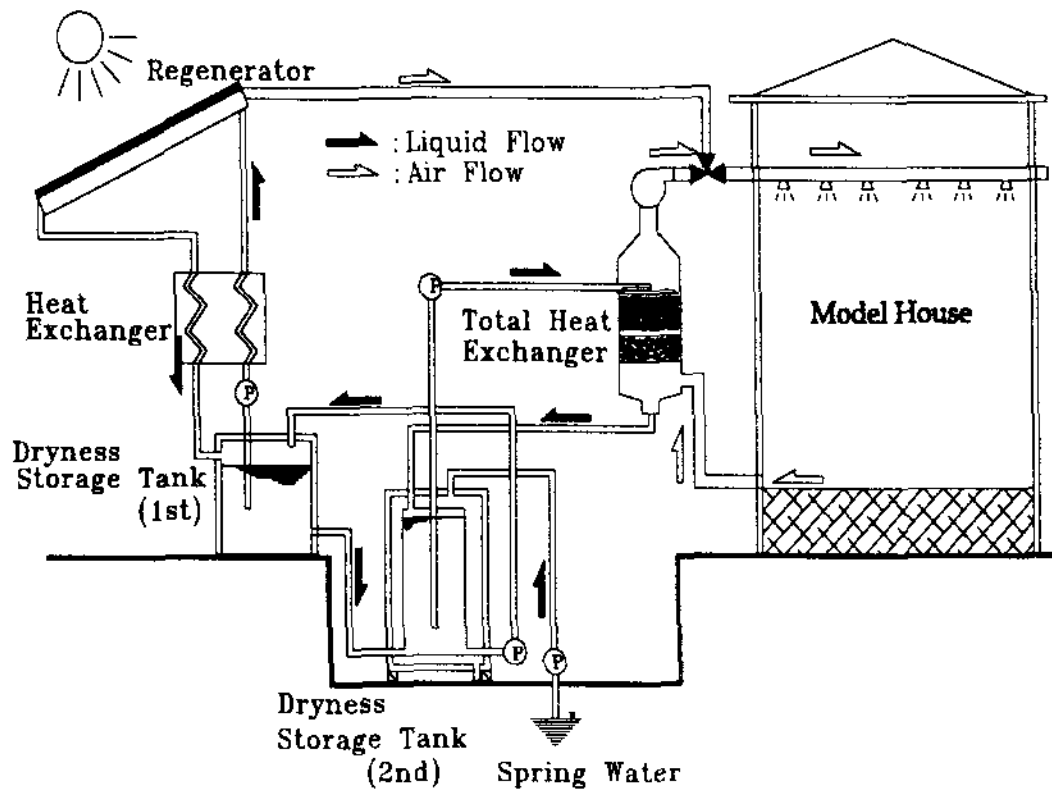


Fig. 1. Schematic diagram of air-conditioning system using solar energy

Table 1. Conditions of experiment in analysis of static characteristics

Components	Parameters	Ranges
Regenerator	Solar radiation[W/m ²] Air velocity[m/s]	800 1.5
Dehumidifier	Packed layer height [mm]	9.5, 30, 16
Storage tank	Baffle size[15cm] Solution flow rate [3l/min]	Top input Low input

2.2 실험방법

정특성 실험은 각 요소별로 실시하였으며, 시스템 각 구성요소에 영향을 미치는 여러 가지 외부 요인들 가운데 가장 큰 영향을 미치는 파라미터만을 대상으로 하였다. Table 1은 각 구성요소에 가장 큰 영향을 미치는 인자들과 그 범위를 나타낸다.

3. 시스템의 동특성 해석

정특성 해석을 통하여 획득된 결과를 바탕으로 동적특성 해석을 위한 모델을 작성하였다. 다음으

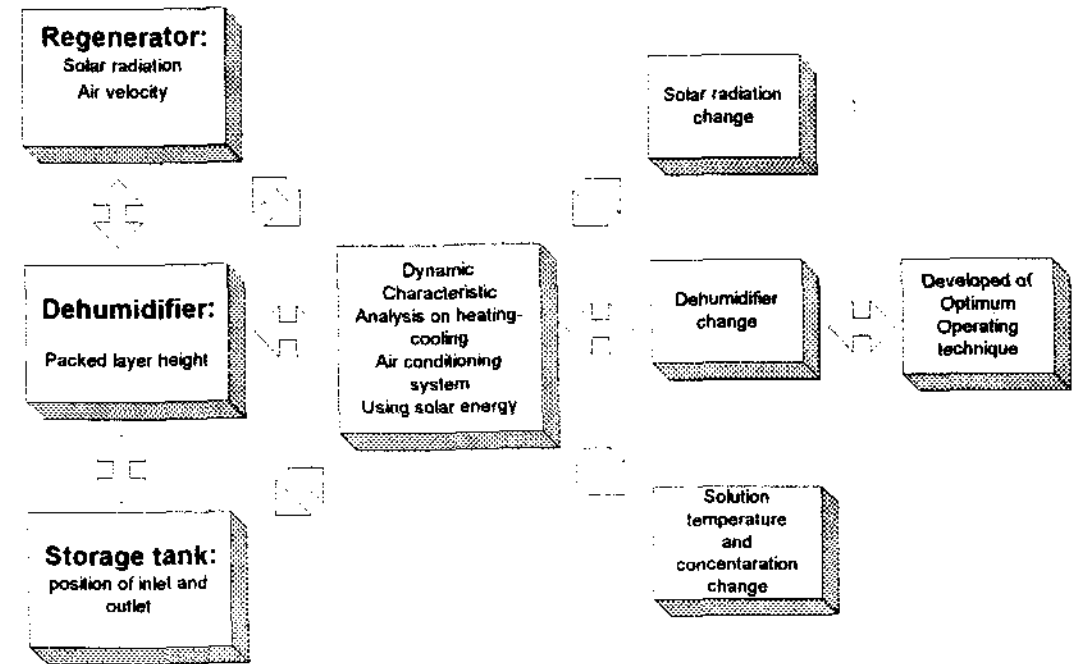


Fig. 2. Model for dynamic analysis on system

로 동특성 해석을 위한 기초방정식은 정특성 해석의 실험결과에서 획득된 상관식을 이용하였으며, 이 상관식으로부터 열물질평형식을 적용하고, 선형화 하여 전달함수를 구하였다. 그리고 동특성 해석은 이들 전달함수를 블록선도화 하고, 등가변환 하여 시스템 각 구성요소 및 전체 시스템에 가장 큰 영향을 미치는 파라미터들에 대해 동적인 응답특성을 MATLAB 4.2를 이용하여 실시간 및 주파수 영역에서 평가하였다.

3.1 공조 시스템의 동특성 모델

Fig. 2는 공조시스템의 동적모델을 나타낸 것으로 재생기에서는 일사량과 공기풍속을 제습기에서는 공기유량비에 따른 제습제의 충전높이, 건조저장탱크에서는 건조저장탱크 내 배플의 크기 및 용액유량에 따른 용액의 출입구 위치 등의 외란이 각각의 구성요소에 작용하였을 경우 그리고 이들이 동시에 시스템에 작용하였을 경우에도 그 동적인 특성을 해석하였다.

3.2 동특성 기초방정식 및 전달함수

재생기에 있어 가장 큰 영향을 미치는 일사량과 공기속도에 있어 먼저, 정특성 해석으로부터 획득된 일사량이 재생량에 미치는 영향의 결과는 다음과 같은 상관식으로 정리하였다.

$$RR = -0.000615SR^2 + 0.8987SR - 34.14 \quad (1)$$

이 식으로부터 열물질수지식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$SR - \overline{SR} = (h/A) \frac{dRR}{dt} \quad (2)$$

여기서, SR 은 일사량 [W/m^2], A 는 재생기의 전 열면적 [m^2]을 나타내며, h 는 공기층 엔탈피 [$kcal/kg$]를 각각 나타낸다.

상기의 식을 정상상태에서의 열물질수지식으로 정리하면 다음과 같으며,

$$SR_s - \overline{SR}_s = 0 \quad (3)$$

식(1)로부터

$$\frac{SR - \overline{SR}_s}{RR - \overline{RR}_s} = 6.23 \quad (4)$$

가 된다.

따라서, 식(3)과 (4)로부터 다음 식을 유도할 수 있다.

$$(\overline{SR}_s - \overline{SR}) - 6.23(RR_s - RR) = (h/A) \frac{dRR}{dt} \quad (5)$$

여기서, 편차변수를 $\overline{SR}_s - \overline{SR} = SR$, $RR_s - RR = RR$ 라 두면, 식(5)는 다음과 같이 표시된다.

$$SR - 6.23RR = (h/A) \frac{dRR}{dt} \quad (6)$$

따라서, 일사량이 재생량에 미치는 영향에 대하여는 식(6)을 라플라스(Laplace)변환하여 정리하면 다음과 같은 전달함수를 유도할 수 있다.

$$\frac{RR(s)}{SR(s)} = \frac{1}{6.23 + (h/A)s} \quad (7)$$

그리고, 풍속이 재생량에 미치는 영향은 일사량과 동일한 방법으로 해석하면 다음과 같은 전달함수를 유도할 수 있다.

$$\frac{RR(s)}{AV(s)} = \frac{-1}{0.009 + \frac{1}{\rho A} s} \quad (8)$$

제습기의 경우도 정적특성 해석으로부터 획득된 제습기 내 충전재의 직경 16 mm 경우에 있어서, 충전층 높이 9.5mm, 30mm, 20mm, 용액유량 $2.9 \times 10^3 [kg/h]$ 있어 용액유량비가 제습량에 미치는 영향에 대하여 해석한 결과 각각 다음과 같은 상관식이 얻어졌다.

$$DH = -0.3685L/G + 3.1033 \quad (9)$$

$$DH = -0.3877L/G + 2.679 \quad (10)$$

$$DH = -0.5989L/G + 2.1763 \quad (11)$$

이 식들로부터 제습기에서 용액유량 및 충전층 높이가 제습량에 미치는 열물질수지식은 다음과 같다.

$$DH - \overline{DH} = \frac{1}{\rho A} \frac{dDH}{dt} \quad (12)$$

이와 같은 방법으로 상기의 상관식들을 재생기에서와 동일한 방법으로 전달함수를 유도하면 각각 다음과 같다.

$$\frac{DH}{\left(\frac{L}{G}\right)_s} = \frac{1}{0.3721 + \frac{1}{\rho A} s} \quad (13)$$

$$\frac{DH}{\left(\frac{L}{G}\right)_s} = \frac{1}{0.6072 + \frac{1}{\rho A} s} \quad (14)$$

$$\frac{DH}{\left(\frac{L}{G}\right)_s} = \frac{1}{0.3708 + \frac{1}{\rho A} s} \quad (15)$$

여기서, DH 는 제습량[kg/h], G/L 은 유량비, A 는 면적[m²], ρ 는 밀도[kg/m³]를 각각 나타낸다.

건조저장탱크의 경우는 탱크 내에 배플이 있는 경우를 대상으로 배플크기 150mm, 용액유량 3ℓ/min의 경우를 대상으로 용액의 순환유로가 상부입력 하부출력과 하부입력 상부출력에 있어 시간에 따른 탱크내의 온도 및 농도분포를 파악하였으며, 이에 대한 정특성 상관식을 정리하면 다음과 같다.

$$ST = -1.4609t^2 + 0.115t + 25.72 \quad (16)$$

$$SC = -1.5411t^2 + 0.1159t + 26.23 \quad (17)$$

상기의 상관식으로부터 재생기 및 제습기에서와 동일한 방법으로 정리하면, 상부입력 하부출력의 경우에 있어서 온도에 대한 전달함수 및 하부입력 상부출력의 경우에 있어서 농도에 대한 전달함수는 각각 다음과 같다.

$$\frac{ST}{GU}(s) = \frac{-0.00075 + 26.9404s}{s} \quad (18)$$

$$\frac{SC}{GU}(s) = \frac{-0.0002 + 26.9357s}{s} \quad (19)$$

전체 시스템에 있어서의 기초방정식과 전달함수는 각 구성요소의 기초방정식과 전달함수로부터 계산하였다. 즉, 재생기에 있어서 일사량이 재생량에 미치는 영향에 대한 전달함수인 식(7)과

제습기에서 충전재 직경 16mm 경우에 있어서 충전층 높이 20mm, 용액유량 2.9×10³[kg/h] 있어 용액유량비가 제습량에 미치는 영향에 대한 전달함수인 식(15) 그리고 건조저장탱크에서 상부입력 하부출력에 있어 온도에 대한 전달함수인 식(19)을 등가변환 하여 전체 시스템의 동특성 해석을 위한 전달함수를 유도하면 다음과 같다.

$$\frac{SN(s)}{GT(s)} = \frac{-0.00075 + 26.9404s}{\left(6.23 + \frac{h}{A} s\right)\left(0.3708 + \frac{1}{\rho A} s\right)s} \quad (20)$$

3.3 동특성 블록선도

시스템의 동특성 해석을 위한 블록선도는 3.2항에서 구한 각 구성요소의 각종 외란에 대한 전

Table 2. Transfer functions of the system

Symbols	Transfer functions
GA	$\frac{RR(s)}{SR(s)} = \frac{1}{6.23 + (h/A)s}$
GB	$\frac{RR(s)}{AV(s)} = \frac{-1}{0.009 + \frac{1}{\rho A} s}$
GC	$\frac{DH}{\left(\frac{L}{G}\right)_s} = \frac{1}{0.3721 + \frac{1}{\rho A} s}$
GD	$\frac{DH}{\left(\frac{L}{G}\right)_s} = \frac{1}{0.6072 + \frac{1}{\rho A} s}$
GE	$\frac{DH}{\left(\frac{L}{G}\right)_s} = \frac{1}{0.3708 + \frac{1}{\rho A} s}$
GF	$\frac{ST}{GU}(s) = \frac{-0.00075 + 26.9404s}{s}$
GG	$\frac{SC}{GU}(s) = \frac{-0.0002 + 26.9357s}{s}$
GH	$\frac{SN(s)}{GT(s)} = \frac{-0.00075 + 26.9404s}{\left(6.23 + \frac{h}{A} s\right)\left(0.3708 + \frac{1}{\rho A} s\right)s}$

달함수들을 결합하여 블록선도화 하였으며, 해석은 이 블록선도를 등가변환하여 해석하였다. Fig. 3은 각 구성요소가 결합된 시스템의 동특성 블록

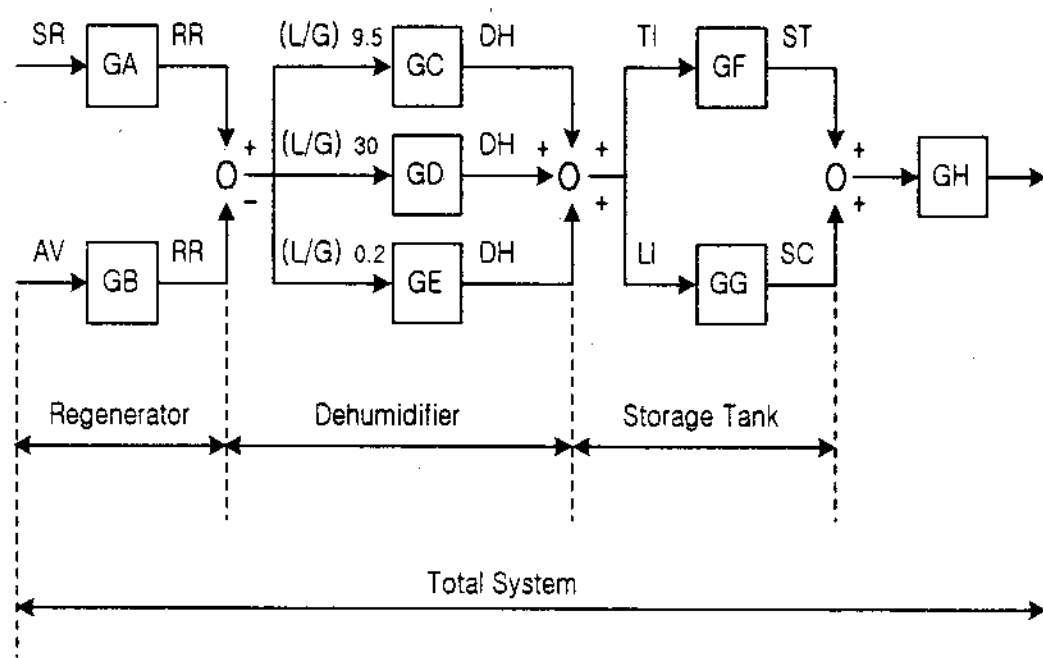


Fig. 3. Block diagram of the system

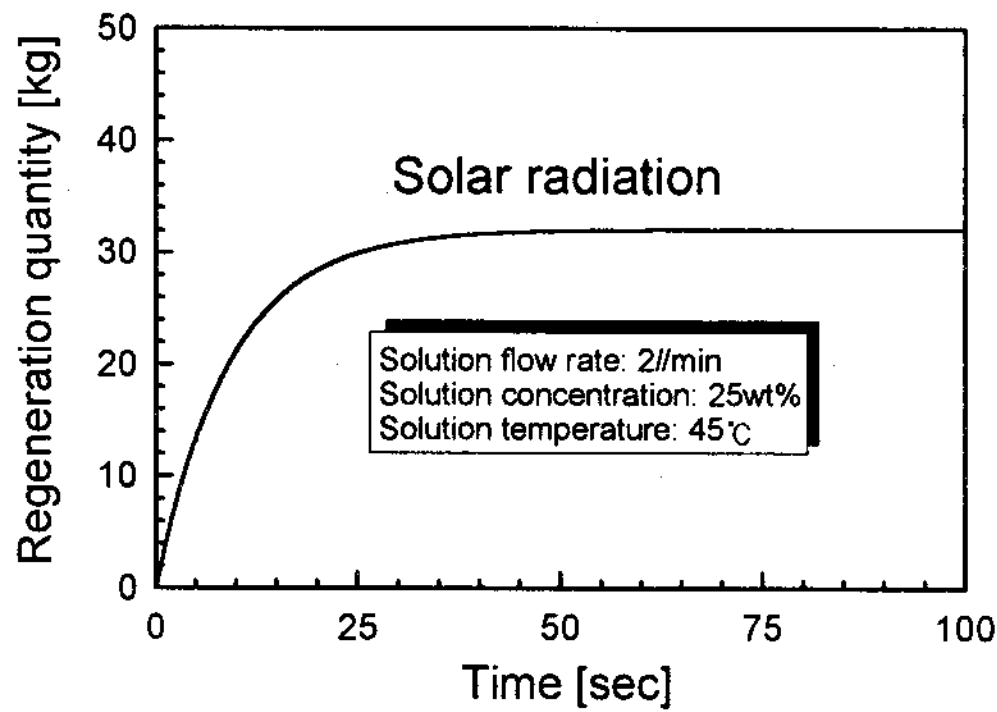


Fig. 4. Step response of regeneration quantity by solar radiation

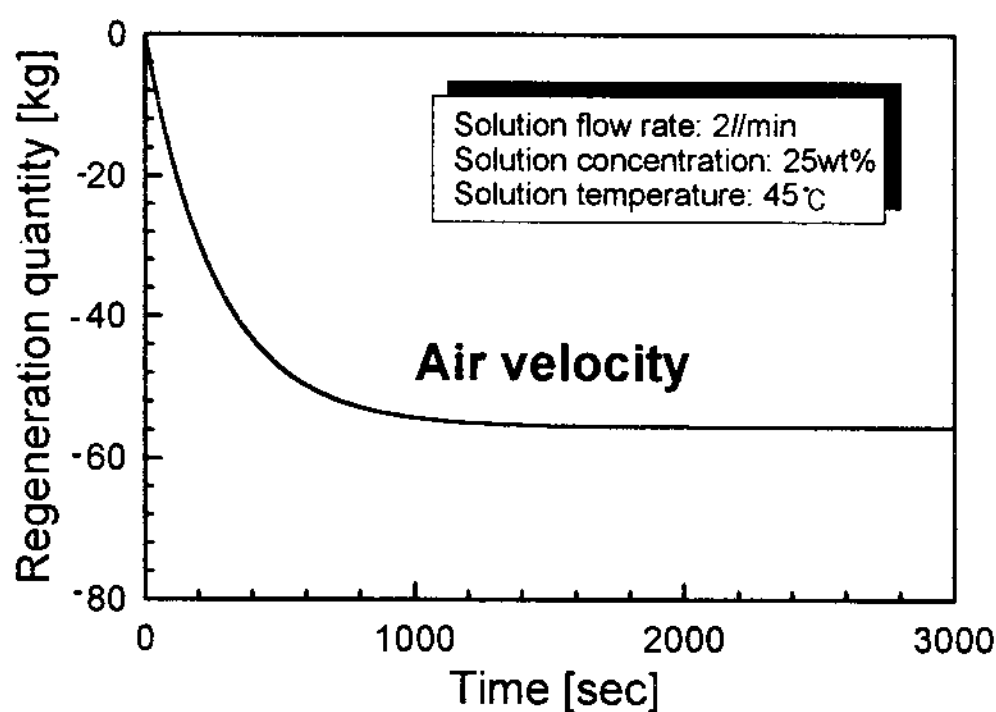


Fig. 5. Step response of regeneration quantity by air velocity

선도를 나타낸다. 그림에서 각 블록의 전달함수는 Table 2와 같다.

4. 해석결과 및 고찰

4.1 일사량 및 공기속도의 스텝변화에 따른 재생량의 응답

Fig. 4, 5는 실시간 영역에서 정적 특성해석 결과 재생량에 가장 큰 영향을 미치는 일사량과 공기속도에 대한 동적특성 해석을 나타낸 결과이다.

전달함수는 극점(pole)과 영점(zero)을 각각 가지며, 식(7), (8)에서 영점은 상수 값이므로 존재하지 않지만 극점은 존재한다. 이러한 극점이 실시간 영역에서 갖는 의미는 다음과 같다. 극점이 음의 실수축 상에 존재하는 경우, 전달함수를 거친 출력값 $y(t)$ 는 $\exp(pt)$ 에 의해 지배되는 과도 특성을 나타낸다. 일반적으로 과도응답 특성의 시간상수 τ 는 $\exp(-t/\tau)$ 의 형태로 표현되므로, $p=-1/\tau$ 임을 알 수 있다. 이들 값은 모두 공기와 용액의 물성값에 의해 결정된다.

그림에서 알 수 있듯이 일사량과 공기속도의 변화에 따라 재생기내의 용액 재생량이 받는 동적인 응답은 일사량 변화의 경우에는 정성적으로 비례하는 경향을 보였으며, 공기속도의 경우에는

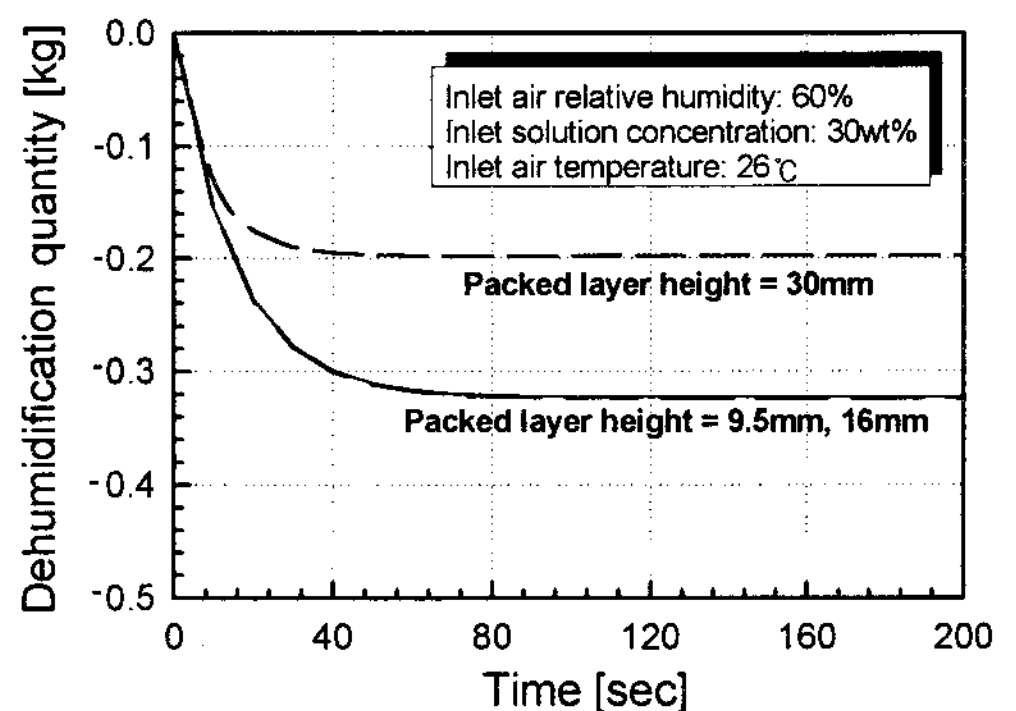


Fig. 6. Step response of dehumidification quantity by L/G

반비례하는 경향을 보였다. 그러나 정량적으로는 큰 차이를 나타내지 않았다.

응답속도의 경우에 있어서는 일사량 변화에 따른 용액 재생량이 받는 응답속도가 공기속도의 변화에 따른 응답속도의 경우보다 빠른 응답을 보였다. 따라서, 상기의 결과들은 실제 제어시스템 설계시 재생기에 큰 영향을 미치는 일사량과 공기속도에 대한 컨트롤러의 적정 설정값 선정에 대한 기초적 자료가 될 것으로 판단된다.

4.2 용액유량과 공기유량비의 스텝변화에 따른 제습기내 제습량의 응답

Fig. 6은 용액유량과 공기유량비의 스텝변화에 따른 제습기 내의 제습량의 응답을 충전재의 높이를 파라미터로 하여 실시간 영역에서 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 용액유량과 공기유량비의 변화에 따라 제습기내 공기의 제습량이 받는 동적인 응답의 경우 충전재의 높이에 따른 제습량의 정성적인 변화는 동일하였다. 그리고 정량적인 변화에서는 미소하지만 높이 9.5mm, 16mm는 거의 같이 나타났으며, 30mm가 가장 많은 제습량을 나타내었다. 응답속도의 경우에 있어서는 실시간 영역에서 알 수 있듯이 3가지 형태의 경우 모두 정량적, 정성적으로 동일한 경향을 나타내었다.

4.3 건조저장탱크의 입출구 위치에 따른 탱크 내부 용액의 온도와 농도의 응답

Fig. 7과 8은 배플의 크기가 각각 15cm이고, 용액의 순환량이 3[l/min]일 때, 건조저장탱크의 입출구 위치에 따른 건조저장탱크 내부 용액의 온도와 농도의 동적응답을 주파수 영역에서 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 보오드 선도상에서의 온도와 농도의 변화는 정성적, 정량적인 면에서 동일한 경향을 나타내었다. 따라서, 건조저장탱크에 있어 용액의 입출구 위치는 온도와 농도의 동적응답에 영향을 나타내지 못하다는 것을 알 수

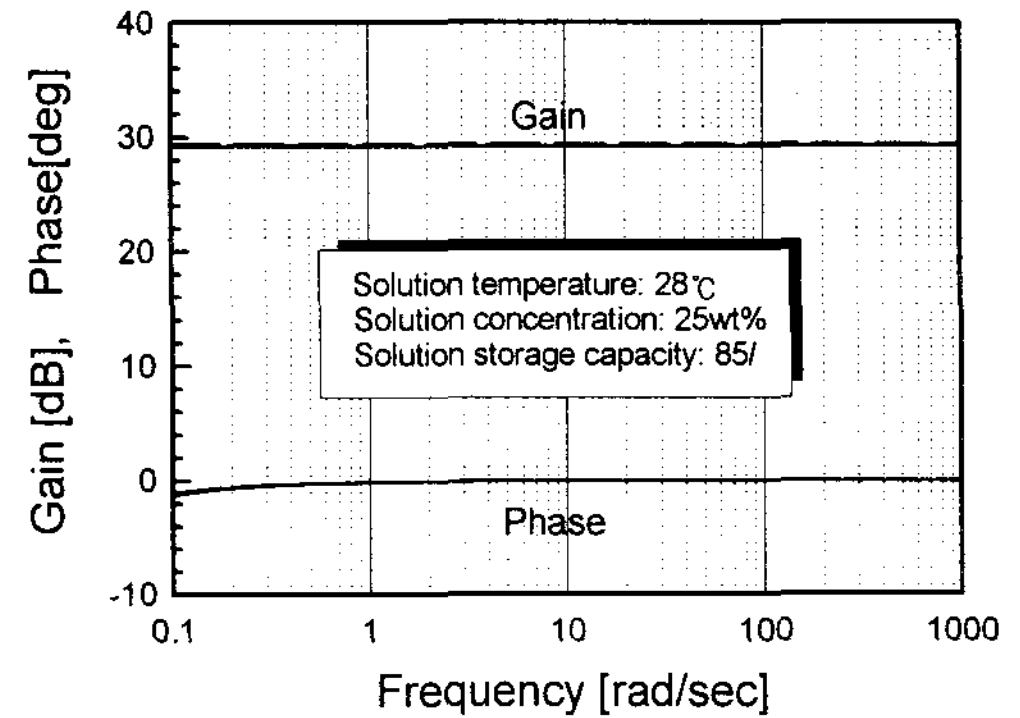


Fig. 7. Frequency response of solution temperature

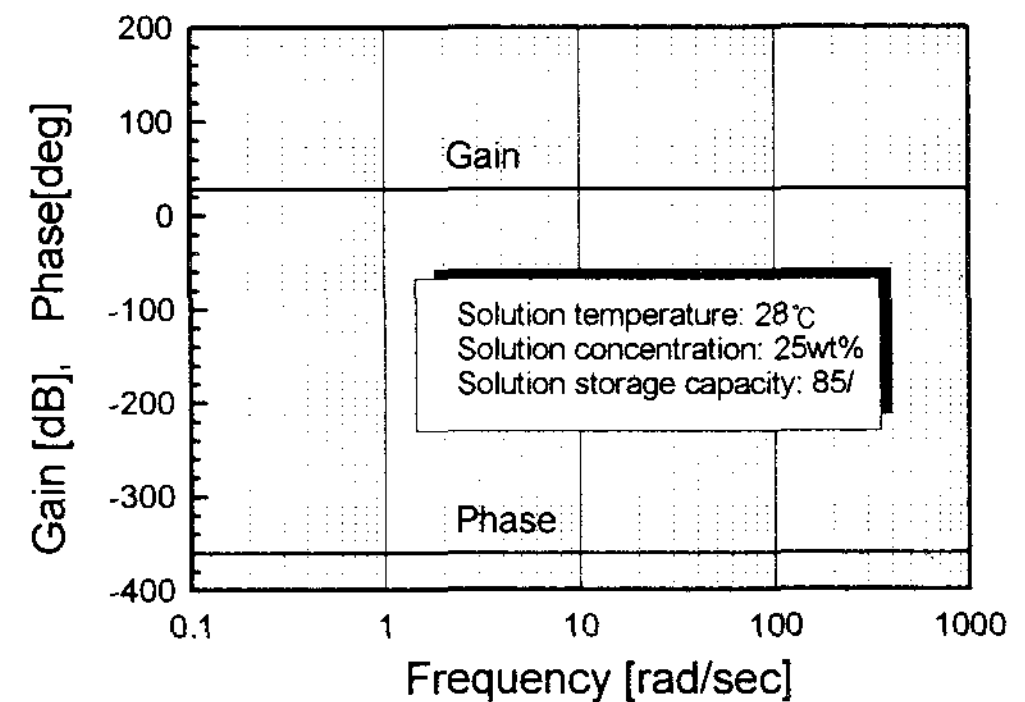


Fig. 8. Frequency response of concentration

있으며, 그림의 위상값에서도 알 수 있는 바와 같이 시간지연에 관한 동적인 영향도 거의 없는 것을 알 수 있다.

4.4 전체 시스템에서 재생기내 용액 재생량의 응답

Fig. 9는 재생기에서의 일사량과 제습기에서 용액유량과 공기유량비가 각각 동시에 변화하였을 때, 재생기 내 용액의 재생량의 응답을 주파수 영역에서 나타낸 것이다. 재생기에서의 일사량의 변화에 따른 재생기내 용액의 재생량의 응답변화에 비해서 전체 시스템에서의 재생량이 받는 응답은 정성적인 경향은 동일하지만 정량적인 면에서는 증가하는 경향을 나타내었다. 그리고 응답속도에 있어서는 정량적으로 증가하는 경향을 보였다. 이

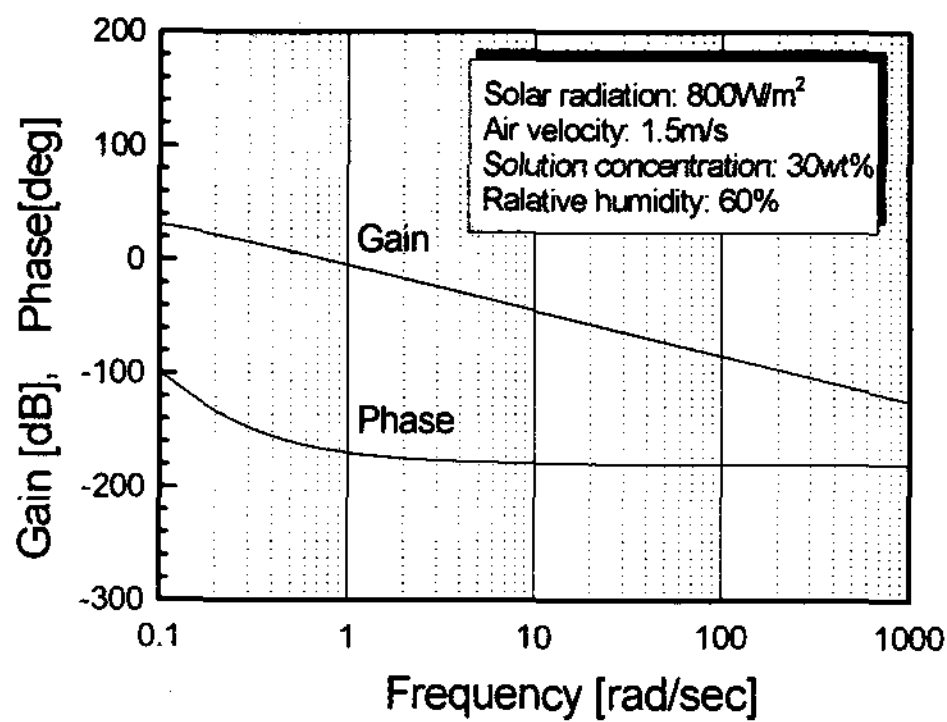


Fig. 9. Frequency response of regeneration quantity when various disturbance input in the system

것은 전체 시스템의 경우 여러 외란에 따른 용액 측과 공기측의 물성치가 변화함으로서 이에 따른 시정수 및 시간지연 요소의 영향 때문으로 생각 된다.

5. 결 론

태양열 이용 냉난방 공조시스템의 최적 운전 기법 개발을 위해 시스템을 구성하는 각 구성요소들에 대한 동적특성 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 시스템을 구성하는 각 구성요소들의 정특성 실험 결과를 바탕으로 각 구성요소에 가장 큰 영향을 미치는 파라미터들을 설정하여 이들이 각 구성요소들에 미치는 정적인 특성을 수행하고, 이들의 영향에 대한 상관식을 제안하여 동적해석을 위한 기초식으로 정리할 수 있었다.
2. 정적인 해석결과로부터 획득된 상관식을 제어 공학적으로 해석하고, 이들을 열물질수지식에 기초하여 라플라스 변환하여 전달함수를 도출할 수 있었다. 또한 이들 도출된 전달함수를

블록선도화 하고, 등가변환하여 실시간 영역 및 주파수 영역에서 동적특성 해석이 가능하였다.

3. 재생기 단독에 있어 일사량과 공기속도의 동적응답은 반대로 나타났으며, 제습기의 경우에는 충전층의 높이가 낮을수록 동적인 응답은 작게 나타났다. 그리고 건조저장탱크에 있어 용액의 입출구 위치는 탱크내의 온도 및 농도의 동적응답에 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.
4. 각 구성요소 단독에서의 응답변화에 비해서 전체 시스템에서의 응답은 정성적인 경향은 동일하지만 정량적인 면에서는 증가한 경향을 나타내어 전체 시스템에서의 동적응답은 다르게 평가됨으로 실제 제어시스템 설계시에는 이 부분에 대한 충분한 검토가 필요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. J. A. Duffie, W. A. Beckman, 1991, "Solar engineering of thermal processes", Wiley-Interscience publication.
2. 伊藤定佑, 1985, "平板形太陽熱集熱器の集熱性能の改善", 日本機械學會論文集(B), 51卷, 第464號, pp.1290~1296.
3. 山本降夫・井出祐一, 1980, "ルームクーラの應用例 事例(I) ヒートポンプ式ルームエアコン", 冷凍, 第55卷, 第630號, pp.23~28.
4. Rush, W. F., 1978, "Solar Desiccant systems for heating and cooling", Institute of gas technology, Chicago.
5. 鳥越邦和・山下浩幸・蛭子毅・川端克宏, 1992, "空調用空冷式熱交換器における最新の技術動向", 冷凍, 第67卷, 第782號, pp.1~10.

6. 望月貞成・八木良尙・楨本達三, 1979, “プレートフィン形空冷コンデンサの過渡特性に関する研究”, 冷凍, 第54卷, 第624號, pp.17~25.
7. T. Munner and M. Hawas, 1981, “Calculation of the top loss coefficient by the network method and applications to solar collectors”, Solar energy, Vol. 6, No. 10, pp.971~981.
8. Olsen T. G., 1976, “Desiccant sysetm potential for humid climates”, Jt. Conf. Am. Sect. Int. Sal. Energy, Vol. 10, No. 12, pp.34~43
9. 藤井哲・本田博司・野津滋・川上修二, 1977, “過熱蒸氣の水平管内凝縮”, 冷凍, 第52卷, 第596號, pp.553~576.
10. 野津滋・本田博司・藤井哲, 1983, “過熱蒸氣の水平管内凝縮 - 熱傳達と壓力降下の式の提案 -”, 冷凍, 第58卷, 第669號, pp.15~24.
11. 野津滋・藤井哲・本田博司, 1982, “空冷コンデンサの傳熱面積の計算法”, 冷凍, 第57卷, 第660號, pp.41~53.
12. 野津滋・藤井哲・本田博司, 1983, “空冷コンデンサの平均凝縮熱傳達係數と摩擦係數の實用簡易式の提案”, 冷凍, 第58卷, 第670號, pp.11~16.
13. J.Chi and D.Didion, 1992, “A simulation model of the transient performance of a heat pump”, Int. J. Refrig., Vol. 5, No. 3, pp.176~184.