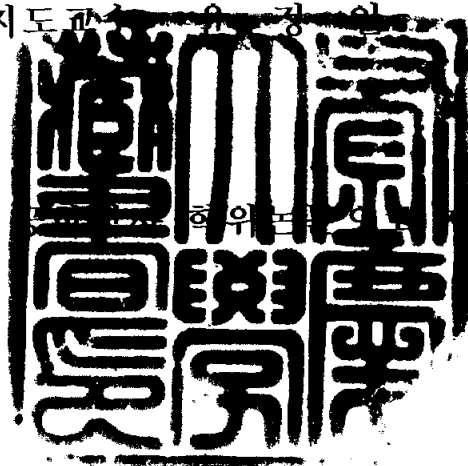


공 학 석 사 학 위 논 문

계면활성제를 이용한 플레이트 흡수기의
열 및 물질전달 특성에 관한 연구

지도교수 유 강 인

이 논문을



출함

2004년 2월

부경대학교 대학원

냉동공조공학과

방 기 석

방기석의 공학석사 학위논문을 인준함

2003년 12월

주 심 공학박사 오 후 규



위 원 공학박사 김 은 필



위 원 공학박사 윤 정 인



목 차

Abstract	iii
Nomenclature	v
 제 1 장 서 론	 1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 흡수기에 관한 종래의 연구들	3
1.2.1 플레이트 흡수기의 수치 해석적 연구	3
1.2.2 플레이트 흡수기의 실험적 연구	5
1.2.3 계면활성제의 영향에 관한 연구	7
 제 2 장 실험 이론	 9
2.1 흡수식 냉난방기의 작동원리 및 기본구성	9
2.2 계면활성제 흡수촉진 이론	13
 제 3 장 실험장치 및 방법	 18
3.1 실험장치의 구성	18
3.2 실험방법	36
3.2.1 흡수 실험 순서	36
3.2.2 흡수 열교환기의 성능 평가 방법	37
3.2.3 실험조건 및 시스템 열평형	44

제 4 장 실험결과 및 고찰	46
4.1 계면활성제에 의한 열 및 물질전달 촉진	46
4.1.1 계면활성제 농도에 따른 흡수기의 열 및 물질전달 특성	46
4.1.2 용액 유량에 따른 계면활성제의 영향	51
제 5 장 결 론	55
참고문헌	56
ACKNOWLEDGEMENTS	61

Study on Heat and Mass Transfer Characteristic in Plate Absorber Using surfactant

Ki-Suk Bang

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

Abstract

Recently, the usage of an absorption chiller/heater is positively promoted in the viewpoint of unused energy applications, the preservation of earth environment, and the settlement of unbalance demand between electric energy and city gas. The use of an absorption chiller/heater which uses heat source energy as a driving power can not only reduce the electric power demand but also obtain the promotive effect of city gas demand. An absorption chiller/heater can utilize the unused energy of the life waste heat, the industry waste heat, the solar energy and the earth energy. These energy contribute to a energy saving. But the absorption chiller/heater has the demerit that the size of absorption chiller/heater is larger than the type of vapor

compression based on same capacity. In this study, the experimental apparatus of an absorber is manufactured as a plate which is newly applied in an absorber. The characteristic of heat/mass transfer is searched by the experimental method in the plate absorber. The absorption enhancement by surfactant in the plate absorber is examined closely through the experiment of heat and mass transfer characteristic to the quantitative and qualitative analysis.

Nomenclature

A	: Heat transfer surface area	[m ²]
a	: Circulation ratio of solution	[-]
c	: concentration	[wt%]
c _p	: Specific heat of constant pressure	[kJ/kg · K]
D	: Absorption rate of water vapor	[kg/s]
G	: Mass flow rate	[kg/s]
h _r	: Latent heat of evaporation	[kJ/kg]
L	: Length of plate	[m]
P	: Pressure	[mmHg]
Q _r	: Refrigeration capacity	[kW]
Re	: Reynolds number	[-]
ΔT_{lm}	: Logarithmic mean temperature difference	[°C]

Greek letters

Γ	: Flow rate of film	[kg/m · s]
----------	---------------------	------------

Subscripts

f	: Liquid film
i	: Inlet
o	: Outlet
s	: Solution
w	: Water

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

흡수식 냉난방기는 1777년에 Gerald Nairne가 H_2SO_4 가 수증기를 흡수하는 현상을 발견하고, 그 원리를 이용해서 1810년에 스코틀랜드의 John Leslie가 제작한 간흡식(間欠式)냉동기가 세계에서 최초의 것으로 불려지고 있다.

1850년에는 프랑스의 Edmond Carre에 의해 물- H_2SO_4 계 흡수냉동기가 개발되었다. 또한 프랑스의 Ferdinand Carre는 냉매로 암모니아(NH_3), 흡수제로 물을 이용한 흡수냉동기를 제작하여 1859년에 특허를 취득하였다.

20세기 초반까지 주목되고 있던 흡수냉동기는 1925년 이후 압축식 암모니아냉동기의 급속한 발전에 의해 주목을 덜 받게 되었지만, 1930년대가 되어 냉매로 물, 흡수제로 LiBr(취화리튬)수용액을 조합한 현재의 흡수식 냉동사이클이 개발된 것으로 다시금 주목되게 되었다.

또한 최근에는 프레온계 냉매에 의한 오존층파괴문제에 대한 1992년 몬트리올의정서 제3회 체약국제회의에서의 결정에 의해, 특정 프레온(CFC)이 1996년에 전폐되고, 더욱이 오존층파괴가 비교적 경미한 HCFC도 2020년까지 원칙적으로 전폐되도록 된 것도 흡수냉동기의 보급에 일조하고 있다.

국내의 경우는 생활수준의 향상에 따른 욕구로써 보다 쾌적한 생활공간의 추구를 위해 냉난방기기의 설치율이 날로 증가하고 있는 가운데 특

히 냉방기의 설치율이 매년 급격히 증가하고 있는 실정이다. 따라서 하절기의 냉방수요가 증가하게 되어 전력 수급 불균형 문제가 국가에너지 정책에서 심각한 문제로 작용하고 있다.

이러한 전력 수급의 불균형문제를 해결하기 위해서는 전력을 사용하는 냉방기를 다른 에너지를 사용하여 냉방수요를 충족시킬 필요가 있는데 여기에 부합하는 에너지가 청정연료인 가스이다.

청정연료인 가스를 수입하는 것은 수요가 가장 많은 겨울에만 집중적으로 할 수 있는 것이 아니다. 따라서 연중 일정한 양만큼 수입을 할 수밖에 없는데, 여름철에는 수입한 가스가 남아돌아 수입한 가스를 저장하는데도 엄청난 비용을 들이고 있는 실정이다. 따라서 여름철에 남아도는 청정연료인 가스를 사용하여 냉방을 하고, 그로 인해 여름철의 전력피크 문제를 해결하여 남아도는 가스문제를 해결하는 등의 큰 장점을 가진 흡수식 냉난방기가 각광을 받고 있는 것이다.⁽¹⁻⁵⁾ 그러나 지금까지 개발되어진 국내의 흡수식 냉난방기의 주류는 30RT이상의 중대형의 공조용 냉난방기로써 널리 보급되어 있는 것이 국내의 실정이다.

흡수식 냉난방기는 흡수기, 재생기, 증발기, 응축기, 용액열교환기의 주요장치로 구성되는데 여기서 흡수기가 차지하는 비중은 전열면적으로는 약 33%, 체적으로는 약 27%를 차지한다. 그러므로 흡수식 냉난방기의 소형·경량화 및 고효율화를 위해서는 흡수기 부분에 대한 연구가 필수적이다.⁽⁶⁻⁹⁾

흡수식 냉온수기의 소형경량화를 위한 연구 중의 하나로 고성능 전열관의 개발과 함께 플레이트 열교환방식을 이용하여 고밀도화하는 것이 제안되고 있다.⁽¹⁰⁾

기기 전체를 크게 하지 않고 전열면적을 증대시키기 위해서는 단위용

적당의 전열면적을 증대시킬 필요가 있으며, 흡수기와 증발기에 효율이 낮으며, 부피가 크기 때문에 시스템의 설치, 유니트화에 어려움이 있는 수평관군형 열교환기 방식 대신에 플레이트형 열교환방식을 채용하는 것으로 고밀도화를 도모할 수 있다.

본 연구에서는 흡수기·증발기에 종래의 수평관군방식 대신 단위용적당의 전열면적을 증대시킬 수 있는 플레이트 흡수기의 보다 상세한 특성을 조사하기 위하여 평판형 플레이트 흡수기를 제작하여 흡수실험을 수행하였다. 그리고 용액에 계면활성제 농도를 달리하면서 그 성능의 향상에 관한 특성에 대한 실험을 수행하였다.

1.2 흡수기에 관한 종래의 연구들

지금까지 플레이트흡수기에 대한 연구는 일본을 중심으로 최근 활발하게 연구되고 있으며, 상용화단계에 이르고 있지만 아직 발표된 연구결과는 극히 미미하다. 그리고 흡수기에 대해서는 열 및 물질이동이 공존한다는 복잡한 현상 때문에 세부적인 연구결과가 나온 것이 미미하며, 아직까지 많은 부분에 대해서 명확하게 이론적인 정립이 되어 있지 않은 상태이다. 또 흡수기에서의 열 및 물질전달 촉진 방법의 하나로 계면활성제를 첨가하고 있는데, 계면활성제 첨가에 의한 열 및 물질전달 향상의 정확한 메카니즘은 아직 정확히 규명되지 않고 있다. 또한 계면활성제의 적정농도에 관한 연구 결과도 미미한 실정이다.

1.2.1 플레이트 흡수기의 수치해석적 연구

플레이트 흡수기에 관한 대부분의 수치해석적 연구는 흡수 열전달률에 대한 용액 온도와 농도, 시스템 압력과 같은 작동 조건의 효과와 같은 온도와 농도를 얻기 위해 수직 플레이트의 액막으로 증기의 흡수가 일어

나는 열 및 물질전달 과정 분야에서 수행되었다.

Grossmas 등⁽¹¹⁻¹³⁾ 은 벽면에서의 온도와 열유속이 일정하다는 가정 하에 경사면을 유하하는 정상 액막으로의 냉매증기 흡수과정 및 독립적인 온도 요소를 지닌 용액의 물질적 특성을 분석하여 온도 및 농도 프로파일을 예측 할 수 있도록 하였다.

Wassenaar 등⁽¹⁴⁾ 은 하나의 불안정한 요소를 지닌 2성분 혼합물을 이용하여 냉각수에 의해 냉각된 수직 평면의 열 및 물질전달을 냉각된 막 흡수기의 변화에 대해 분석하였다. 출구 반응은 흡수기 입구의 냉각수 온도, 흡수 물질전달률과 용액 농도에 따라 변화함을 밝히고 있다.

위 연구들은 단지 실제 흡수과정을 고려하지 않은 이론적인 흡수과정에 대한 분석이었다. Jernquiet 등⁽¹⁵⁾ 은 벽체 온도가 일정하다는 가정 하에 실제 흡수식 냉온수기의 작동 조건을 취하여 막 두께, 속도, 온도 및 농도 구배의 발달을 분석할 수 있도록 수직 플레이트 벽에서 흡수과정의 발달된 유하 액막 모델에 대하여 연구하였다.

Kawae 등⁽¹⁶⁾ 은 실제 흡수식 냉온수기의 전형적인 값을 작동 파라미터로 선택하여 벽체 온도가 일정하다는 가정 하에 수치해석에 의한 흡수 물질전달률에 대한 액막 두께, 벽 온도, 시스템 압력, 입구 용액 온도 및 농도와 같은 작동 조건과 LiBr 용액의 물리적 상태량 변화에 대한 연구를 수행하였다.

김 등⁽¹⁷⁾ 은 수치해석을 통하여 공랭형 수직평판 흡수기를 대상으로 흡수기 벽면에서의 열 유속에 의한 대류경계조건을 도입하여 냉매증기의 흡수량, 열 및 물질전달 계수를 구하였다.

Jung 등⁽¹⁸⁾ 은 일정한 온도의 냉각공기, 특성 불변의 LiBr 용액을 가정하여 공랭식 비정상 준 1차원 운동량 및 열 물질전달 모델을 제시

하였다.

Homma등⁽¹⁹⁾ 은 냉각수에 의해 냉각된 수직 플레이트 벽에서 LiBr 용액의 유하 액막을 분석하였다. 확산에 따른 열 영향은 무시되었고, 작동조건에서 냉각수의 질량 유량은 이미 알고 있다고 가정하였다. 이것은 입구와 출구 냉각수 온도사이의 온도차가 먼저 결정되고, 흡수기가 작동되는 동안 정상유동으로 제어되는 플레이트 흡수기의 작동 조건과 모델링과는 일치하지 않는다.

냉각수에 의해서 냉각되어지는 플레이트 흡수기에서의 흡수과정의 종래 모델들은 흡수식 냉온수기에서의 실제 흡수과정과는 잘 일치하지 않는 경우가 많았다.

1.2.2 플레이트 흡수기의 실험적 연구

증기 흡수 과정에서의 실험적인 연구는 가공된 열전달 표면을 사용하고 계면활성제를 더함으로써 시스템 압력의 효과, 용액의 온도와 농도, 그리고 흡수 열과 물질 전달률을 촉진시키는 분야에서 수행되어져 왔다.

Morioka 등⁽²⁰⁾ 은 수직 플레이트와 시스템 압력 및 냉각제 온도의 영향이 같은 최대 외경의 수직관 외부 LiBr 용액 유하 액막으로의 수증기 흡수에 대한 실험적 연구를 수행하여 최대 흡수 물질전달률을 위한 액막의 최적 두께를 제시하였다.

서 등⁽²¹⁾ 은 막 레이놀즈수, 흡수기 내 압력강하에 따른 냉각제 및 용액 온도, 흡수 질량 유속에 대한 영향이 수직 플레이트와 같은 수직 관 내 LiBr 용액 유하 액막으로의 수증기 흡수에 관한 실험적 연구를 수행하여 과냉 상태 하의 흡수 질량 유속이 과열 상태보다 더 증가된다는 것을 알게 되었으며 최대 흡수 질량 유속을 위한 액막의 최적 막 레이놀즈

수를 제시하였다.

Strenger 등⁽²²⁾ 은 두께 5mm, 높이 3m, 폭 0.3m의 플레이트를 대상으로 냉각수가 내부로 흐르는 수직 플레이트 외부 LiBr 용액 유하 액막으로의 수증기 흡수에 관한 실험에서 총괄 열전달계수를 $0.3 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$ 에서 $1.8 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$ 까지 변화시켰을 때의 총괄 열전달계수에 대한 시스템 압력, 용액 온도 및 농도의 영향을 조사하였다.

Becker 등⁽²³⁾ 은 LiBr/ZnBr₂ (2:1 mol)와 CH₃OH의 혼합물을 작동 유체로 하여 종래의 셸 앤 튜브 타입에 상응하는 플레이트 타입 소형 흡수기를 제작하여 실험을 수행하였으며, 플레이트를 물결 형상으로 만들어 흡수 열 및 물질전달률을 개선시켜 종래보다 2~4배 더 큰 총괄 열전달계수를 얻었다.

Shitara 등⁽²⁴⁾ 은 흡수 열 및 물질전달률을 향상시킨 주름판을 이용한 소형 플레이트 흡수기에 관한 실험을 수행하여 주름의 피치와 높이가 흡수 열 및 물질전달률에 미치는 영향을 조사함으로써 피치 6mm, 높이 mm에서 흡수가 가장 활발함을 보였고, 기존 40RT 용량의 셸 앤 튜브 타입 흡수기와 비교하여 플레이트 타입 흡수기가 최고 50%까지 컴팩트화 가능함을 보였다.

플레이트 흡수기에 관한 다수의 실험적 연구는 특히 일본에서 중점적으로 수행되고 있으나 대부분 자료유출을 꺼려 자세한 성능 및 설계자료는 거의 공개되고 있지 않다. Daikin의 경우 시제품개발 단계에 접어들어 상품화 테스트를 수행중인 것으로 알려지고 있으나, 공개된 자료는 없는 실정이다.

1.2.3 계면활성제의 영향에 관한 연구

Kasiwagi⁽²⁵⁾ 는 정지 흡수용액 중에 계면활성제를 미량 첨가하여 흡수촉진에 미치는 효과와 그 메카니즘을 밝혔으며 처음으로 표면난류 현상(마랑고니 대류)면활성제 첨가농도에 대해서는 계면교란이 발생하기 시작하는 농도는 용액과 알코올 방울의 계면사이 표면장력 차에 의하여 발생한다고 주장하였다. 그리고 계 0.01wt% 이상이며, 그 이하의 농도에서는 거의 계면교란이 발생하지 않는다고 하였다. 또 첨가농도가 2wt% 이상이 되면 계면활성제의 액막이 흡수용액의 전 표면을 덮어버려 증기흡수는 현저히 저하한다고 주장했다.

Hozawa 등⁽²⁶⁾ 은 정지 흡수용액에서의 n-octanol에 의한 마랑고니 대류 효과를 실험적 및 이론적으로 연구 발표하였으며, 용해도 이하의 계면활성제를 첨가하여 계면활성제가 용액 중에 완전히 녹아있는 상태에서 충분한 흡수촉진이 일어나는 것을 발견하여 포화용해농도 이상으로 첨가할 경우에만 마랑고니 대류가 발생한다고 주장한 Kasiwagi 이론을 반박하였다.

Setterwall 등⁽²⁷⁾ 은 정지용액에서의 흡수시험을 통하여 계면활성제의 구조 이성체의 영향과 첨가농도의 영향을 검토하였으며 계면활성제를 첨가함으로써 약 30% 정도의 흡수능력 향상이 있었다고 보고하였다. 앞의 세 가지 연구가 정지 흡수용액 중에 계면활성제를 첨가한 경우의 실험인데 비해, Takahara 등⁽²⁸⁾ 은 평활 경사평면을 흘러내리는 용액에 계면활성제를 첨가하여 계면활성제 농도와 흡수촉진효과와의 관계를 조사하였는데 계면활성제를 첨가함으로써 흡수량은 4~5배 증가하였으며 그리고 용해도 이하의 계면활성제 첨가농도에 있어서도 충분한 효과가 있었다고 주장하였다.

Jung 등⁽²⁹⁾ 은 유하액막식 흡수기를 이용하여 4 가지 종류의 계면활

성제 n-heptanol, n-octanol, 3-octanol, 2-ethyl-1-hexanol를 첨가하여 LiBr/H₂O계에서 그 효과를 실험하였으며 이들은 n-heptanol이 가장 좋은 효과를 나타내고 3-octanol의 효과가 가장 미미하다고 발표하였다.

Hoffmann 등⁽³⁰⁾ 은 1열 24단의 평활관과 외형 가공관으로 구성되는 두 가지 형태의 수평관군 흡수기에서 10~640ppm 계면활성제 (n-octanol, 2-ethyl-1-hexanol)를 첨가하여 계면활성제 농도가 열전달 특성에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였는데 열전달계수가 평활관에 있어서는 60~140%, 외형 가공관에서는 20~40% 정도 향상되었다고 보고하였다.

박 등⁽³¹⁾ 은 35RT 규모의 상용기 수준의 실험장치에서 0~3000ppm 농도범위의 계면활성제를 첨가하여 첨가농도에 따른 흡수기 내에서의 전열관 각 단의 흡수용액 농도변화를 조사하였는데 계면활성제 첨가에 의한 농도 폭의 향상은 8~10% 정도이며, 첨가량 3000ppm 이상부터는 증가폭이 감소한다고 보고하였다.

제 2 장 실험 이론

2.1 흡수식 냉난방기의 작동원리 및 기본구성

흡수란 흡수용액과 냉매와의 증기압 차를 이용하여 냉매를 수용액 내에 밀어 넣는 것을 말한다.⁽³²⁾

냉동기의 능력을 향상시키기 위해서는 증발기에서 발생하는 냉매증기를 보다 많이 용액에 흡수되게 하여야 한다.

냉각된 물 표면에 수증기를 직접 접촉하게 하여 응축시키는 응축의 경우와 비교하여 생각하면, 응축에서는 물의 온도를 내리는 것에 의해 증기압을 저하시키는 반면, 흡수에서는 물에 리튬브로마이드(LiBr) 등과 같은 염류를 용해시켜 증기압을 낮춘다. 그러므로 본질적으로는 응축과 흡수는 같은 원리라 할 수 있다.

그러나 흡수과정에서는 흡수용액 중에 냉매증기가 흡수될 때 방출되는 잠열이나 회석열에 의한 열이동 외, 물질이동에 의한 농도분포도 공존하기 때문에 보다 복잡한 현상이 일어난다.⁽³³⁾

Fig. 2.1은 흡수과정을 개념적으로 나타낸 것이다. 냉매 흡수가 없는 평형상태에서는 증발기, 흡수기내의 압력은 P_1 으로 유지되고 있으며, 이때 물 및 흡수용액의 온도는 각각 압력 P_1 에 평형하는 온도(포화온도) T_1 , $T_1 + \Delta T_1$ 이 된다. 여기서 ΔT_1 은 리튬브로마이드와 같은 염을 물에 용해함으로써 생기는 비점(boiling point) 상승이며 평형상태가 되기 위해서는 흡수기내의 온도를 증발기내의 온도 T_1 보다 비점상승분 ΔT_1 만큼 높은 온도로 유지할 필요가 있다. 여기서 흡수기를 냉각하기 시작하면 용액온도는 저하하여 흡수기내 압력도 용액온도에 상당하는 포화압

력이 되기 때문에 평형상태인 압력 P_1 보다 조금 낮아진다. 따라서 압력차 ΔP 에 의해 증발기에서 흡수기내로 냉매증기가 유입되고 이와 동시에 증발기에서는 냉매가 증발하기 시작한다. 냉매가 증발하면 증발잠열에 의해 증발기내의 온도가 저하하게 되고 또 포화압력도 낮아지게 된다. 그러므로 증발기내를 초기의 상태인 온도 T_1 , 압력 P_1 을 유지하기 위해서는 증발잠열에 상당하는 열량을 보충할 필요가 있다. 즉 외부의 저온열원에서 열을 빼앗아와야 한다. 한편, 흡수기에서는 냉매증기가 흡수용액에 흡수되어 용액 내에서 증기의 상태를 유지하는 것은 불가능하므로 잠열을 방출하고 액화한다. 이 잠열과 용액의 회석열에 상당하는 열을 냉각수에 의해 계 밖으로 방출하고, 용액온도를 $T_1 + \Delta T_1$ 보다 조금 낮은 온도로 유지한다면 흡수기내 압력도 용액온도 및 농도에 상당하는 포화압력 P_1 보다 ΔP_1 만큼 낮은 압력을 유지할 수 있어 흡수가 지속적으로 일어난다.

흡수기내의 흡수용액의 양은 한정되어 있으므로 흡수가 진행되어감에 따라 흡수용액은 점점 회석되고 이에 따라 흡수능력이 저하하여 간다. 그러므로 흡수가 계속 진행되게 하기 위해서는 흡수용액의 농도를 다시 고농도가 되게 재생하여 줄 필요가 있다.

흡수용액 내의 냉매를 증발시켜 흡수용액을 농축하는 과정을 재생이라 하는데 재생과정의 개념도를 Fig. 2.2에 나타내었다. 초기의 평형상태에서는 계 내의 압력이 P_2 , 응축기의 온도가 T_2 , 재생기의 온도가 $T_2 + \Delta T_2$ 로 유지되고 있다. 이 상태에서 도지가스 등에 의해 재생기를 가열하기 시작하면 용액의 온도가 상승하게 되고 이에 따라 증기압도 높아진다. 이렇게 되면 응축기와 재생기 사이에 ΔP_2 만큼 압력차가 생기게 되어 재생기에서 발생한 냉매증기는 응축기로 이동하게 된다. 이 때 응축기내를 냉각하여 온도와 압력을 초기의 상태인 압력 P_2 , 온도 T_2 로 유지한다면 발생한 증기는 응축기내에서 액화하게 된다. 에너지적으로는 재

생기에서의 가열량이 발생증기의 증발잠열과 흡수액의 농축에 사용되고, 응축기에서는 발생증기의 액화에 따른 열량 분만큼 냉각수에 의해 제거된다.

위의 흡수과정, 재생과정에서는 이해를 쉽게 하기 위해 증발과 흡수, 재생과 응축이 각각 독립적으로 작동하는 것 같이 나타내었지만, 실제로는 이들 과정이 연속적으로 연결되어 흡수사이클을 형성한다. 냉매를 흡수하여 회석된 흡수용액을 재생기내에 용액펌프로 보내고, 가열에 의해 농축하여 짙어진 흡수용액은 다시 흡수기에 돌아오며, 이때 발생한 고온·고압의 냉매증기는 응축기내에서 잠열을 방출하고 액화되어 증발기에 공급되는 사이클을 형성한다. 이러한 일련의 과정을 Fig. 2.3에 나타내었다.

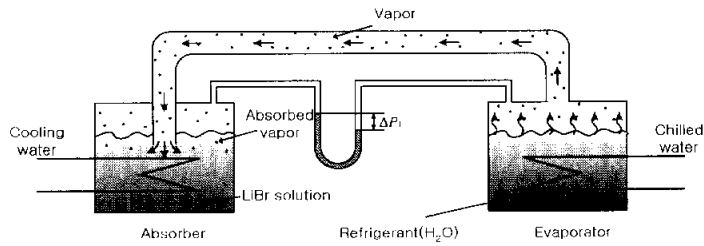


Fig. 2.1 Mechanism of vapor absorption in absorber

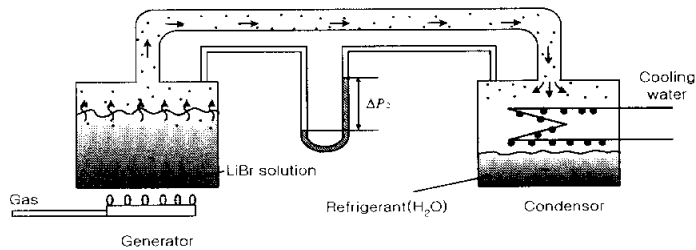


Fig. 2.2 Mechanism of vapor generation in generator

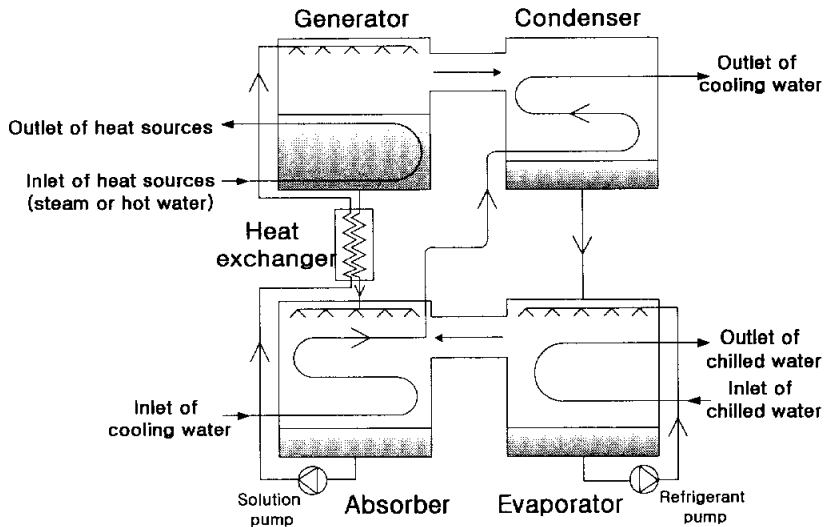


Fig. 2.3 Basic composition of absorption chiller/heater

2.2 계면활성제 흡수촉진 이론

2.2.1 마랑고니 효과

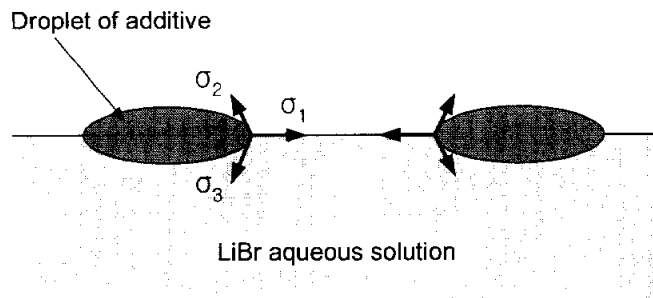
액체의 표면장력은 일반적으로 용액온도 및 용해되어 있는 물질의 농도에 의존한다. 따라서 기액계면에서 온도 및 농도가 일정하지 않을 경우에는 표면장력의 불균형 의한 유동이 발생하게 된다. 이러한 표면장력 구배에 의하여 발생하는 유동을 마랑고니 대류라고 한다⁽³⁴⁾. 흡수기내에서의 증기흡수과정은 흡수용액 표면에서의 열 및 물질이동이 동시에 발생하며 물질확산계수의 값이 열확산계수에 비하여 현저히 작은 값 ($Le=D/\alpha=0.01$)을 나타낸다. 그러므로 흡수용액 표면에서 냉매증기 (H_2O)가 흡수되면 농도저하가 현저히 발생하고 또한 흡수열의 방출로 용액표면 온도도 상승하게 되어 포화증기압이 증가한다. 이에 따라 증기 흡수능력이 저하된다. 이러한 점을 개선하기 위해서는 용액표면을 교란시켜 표면의 용액과 액막 내부의 용액을 서로 뒤섞이게 할 필요가 있다. 그러므로 흡수식 냉난방기의 흡수기에서는 흡수용액에 계면활성제를 미량 첨가하여 증기 흡수시 발생하는 흡수용액과 계면활성제간의 표면장력 차에 의해 마랑고니 대류를 발생시켜 흡수용액 내부로 열 및 물질이동을 촉진하는 방법을 이용하고 있다.

2.2.2 마랑고니 대류 모델

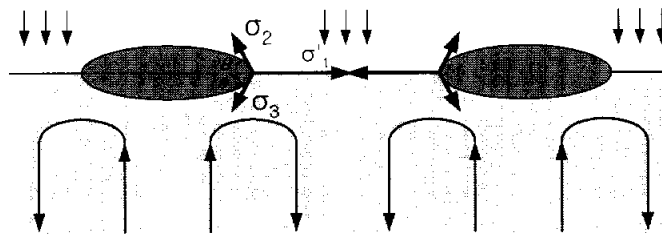
(1) Kashiwagi model⁽³⁴⁾

흡수용액에 계면활성제를 포화용해농도(0.01wt%) 이상으로 첨가하면 계면활성제는 액적(droplet) 상태로 용액표면에 존재하게 된다. 이 상태에서 냉매증기가 용액표면에 접촉하게 되면 냉매증기는 계면활성제가 액적으로 존재하는 부위에서는 흡수가 일어나지 않고, 액적이 존재하지 않는 부위에서만 흡수가 일어나게 된다. 이로 인하여 계면활성제가 없는 부위는 냉매증기의 흡수로 흡수용액의 표면농도가 저하하게 되고 이에 따라 표면

장력은 증대하게 된다. Fig 2.4와 같은 계면교란(interfacial turbulence) 발생모델을 생각하여 보면, 증기가 흡수되기 전의 평형상태에서는 Fig. 2.4의 (a)와 같이 흡수용액의 표면장력 σ_1 과 계면활성제의 표면장력 σ_2 , 용액과 계면활성제 사이의 표면장력 σ_3 과의 관계는 $\sigma_1 = \sigma_2 \cos \theta + \sigma_3 \cos \phi$ 로 나타낼 수 있다. 그런데 냉매증기가 흡수되기 시작하면 흡수용액의 표면농도 저하에 따른 표면장력의 증가에 의해 흡수용액의 표면장력 σ_1' 은 $\sigma_2 \cos \theta + \sigma_3 \cos \phi$ 보다 큰 값을 갖게 된다. 그러므로 Fig. 2.4의 (b)와 같이 계면활성제 액적 주변에서 마랑고니 대류가 발생하게 된다.



(a) Without water vapor absorption



(b) With water vapor absorption

Fig. 2.4 Marangoni convection mechanism by Kashiwagi model

(2) Hozawa model⁽³⁵⁾

Hozawa 등은 용해도 이하의 계면활성제를 첨가하여 계면활성제가 용액내부에 완전히 녹아있는 상태에서도 마랑고니 대류가 발생한다고 주장하며 포화용해농도 이상으로 첨가할 경우에만 마랑고니 대류가 발생한다고 주장한 Kashiwagi 모델을 반박하였다. 그들의 연구에서 가장 중요한 점은 계면활성제를 첨가한 흡수용액 표면장력의 용매농도 의존성을 밝혔다는 것이다. Fig. 2.5에 나타난 것과 같이 계면활성제를 첨가하지 않는 순수한 흡수용액의 표면장력은 용액의 농도가 증가함에 따라서 증가한다. 그러나 계면활성제를 미량 첨가하면 그 양상은 변화하여 용액의 농도가 증가할수록 표면장력은 감소한다.

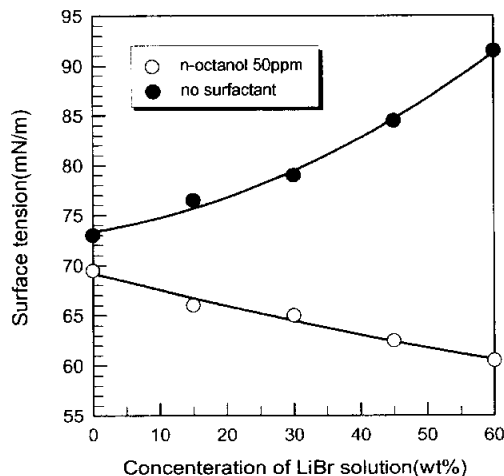


Fig. 2.5 Surface tension LiBr aqueous solution with and without surfactant

이러한 성질은 다음과 같이 설명할 수 있다. 흡수용액 내에 포화용해도보다 적은 계면활성제가 용해되어 있다. 여기에 LiBr분자가 더해지면,

물분자는 계면활성제 분자와 결합하려고 하는 힘보다 전해질 이온과 결합하려고 하는 힘이 더 크기 때문에, 계면활성제 분자와 결합하기에 앞서 전해질 이온인 Li^+ , Br^- 이온과 먼저 결합한다. 결과적으로 흡수용액 내의 일부 계면활성제 분자는 LiBr 수용액 내에 녹아 있을 수가 없게 되어 용액표면으로 분리되어 나온다. 이러한 현상을 염석효과라 하는데, 이로 인하여 용액표면에서의 표면장력은 감소하게 된다. 즉 계면활성제를 미량 첨가한 경우, 용액의 농도가 증가할수록 용액표면에서의 표면장력은 감소하게 되며 이러한 성질이 마랑고니 대류를 일어나게 하는 구동력이 된다.

Hozawa 등의 모델은, 계면활성제에 의한 계면교란의 발생은 용해도와는 그다지 관계가 없고, 어떤 원인으로 인해 용액의 표면에 농도 구배가 형성되어 염석효과에 의해 표면장력의 차이가 생기면 마랑고니 효과에 의한 대류가 발생하여 이것이 계속 지속된다는 것이다. 이러한 이론을 Fig. 2.6과 같은 모델을 통하여 알아본다.

Fig. 2.6에서와 같이, 어떤 원인에 의하여 국소적으로 A점에서는 냉매 증기 흡수량이 많고 B점에서는 흡수량이 적은 경우를 생각해 본다. A점의 용액표면에서 국소적으로 냉매증기를 많이 흡수하게 되면, 앞에서 설명한 염석효과에 의해 계면활성제는 LiBr 농도가 낮은 용액에 더 잘 용해될 수 있으므로, 용액표면에 존재하는 계면활성제는 감소하게 된다. 따라서 이 부분에서의 표면장력은 증대한다. 표면장력이 큰 A점의 용액은 주위의 용액표면을 끌어당기게 되며, 주위의 용액표면은 A점으로 끌려오면서 수증기를 흡수하여 표면장력이 증가되어 A점에 도착한다. 이렇게 하여 A점에서는 표면장력이 큰 상태로 계속 유지되고 A점을 중심으로 양쪽에서 끌려온 용액은 서로 부딪치어 아래로 침강하게 되며 그림과 같은 대류 셀(convective cell)을 형성하게 된다. 한편 냉매증기 흡수

량이 적은 B점에서는 농도가 짙은 흡수용액이 Bulk측으로부터 솟아올라 오기 때문에 표면장력이 작은 상태로 계속 유지된다.

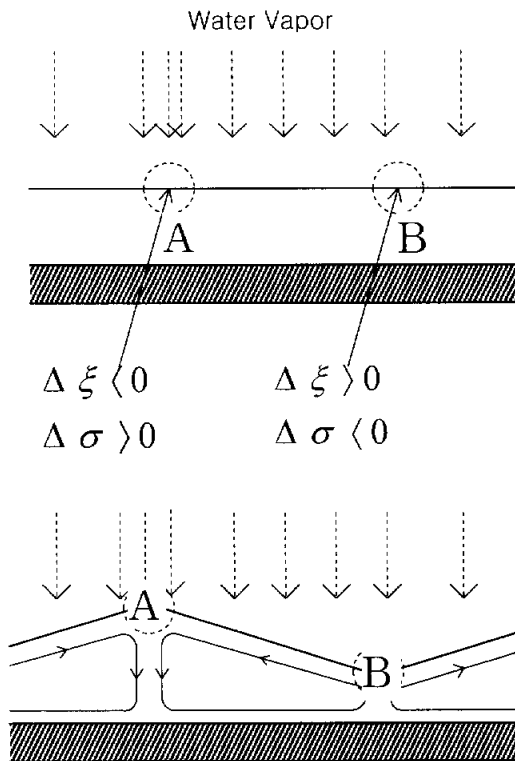


Fig. 2.6 Marangoni convection mechanism by Hozawa model

이상이 Hozawa 등의 모델에 의한 계면교란 발생의 기본원리이지만 표면장력은 농도뿐만 아니라 온도나 계면활성제 농도에도 의존하므로 그 영향에 대해서도 검토가 필요하다. 국소적인 표면의 계면활성제 농도에 대해서는 염석효과의 설명으로도 알 수 있는 바와 같이 평균 계면활성제 농도를 결정하면 표면근방의 용액내의 용매농도에 의해서 정해지므로 독립변수라고 생각할 필요는 없다. 따라서 표면장력은 용매농도와 온도 2개 변수의 함수라고 생각하는 것이 가능하다.

제 3 장 실험장치 및 방법

3.1 실험장치의 구성

본 연구에 사용된 플레이트 흡수기 실험장치는 1RT의 냉동능력을 갖는 배치(batch)식 모델 흡수기로 최대 2시간의 연속 운전이 가능하게 구성되어 있다. 실험 장치의 전체 모습을 Fig. 3.1에, 그 시스템 구성을 Fig. 3.2에 나타내었다.

실험 장치의 주요부는 흡수식 냉동기의 본래 목적인 냉열을 얻기 위한 증발기(④)와 증발기에서 증발한 냉매 증기를 흡수하는 흡수기(③), 흡수기에서 냉매 증기를 흡수하여 희석된 용액을 저장하기 위한 희용액탱크(⑥), 흡수기에 설정된 온도와 농도를 공급하기 위한 농용액 탱크(⑬), 흡수기의 흡수열을 제거하기 위해 공급되는 냉각수를 일정한 온도로 공급하기 위한 항온조(①)와 증발기의 냉수를 일정한 온도와 유량으로 공급하기 위한 항온조(②), 증발기에 일정온도의 냉매를 공급하기 위한 냉매탱크(⑦) 및 냉매 탱크내의 냉매 온도를 일정하게 유지하기 위한 냉각 및 가열시스템(⑧)으로 구성되어 있다.

냉매 탱크 내에서 일정온도로 설정된 냉매액은 증발기로 보내져서 증발기 내 열교환기 내로 공급되는 일정온도의 냉수로부터 부하를 얻어 증발기 내에서 증발하고 증발기와 흡수기 사이에 놓여 있는 엘리미네이터를 통과하여 흡수기로 보내진다.

흡수 용액은 농용액 탱크 내에서 설정의 온도와 농도에 셋팅한 후 용액 순환 펌프에 의해 흡수기에 보내진다. 이 때 항온조에서 일정온도로 설정된 냉각수를 흡수기로 공급하여, 증발기로부터 증발한 후 엘리미네이터를 통하여 흡수기로 공급되는 냉매증기를 흡수할 때 발생하는 흡수

열을 제거하도록 하였다. 냉매 증기를 흡수한 회 용액은 실험 장치 하부의 회용액 탱크에 저장된다. 항온조는 항상 일정온도를 유지하도록 제어되며, 용액의 유량은 전자유량계를 사용하여 측정하였으며 유량 설정은 수동에 의한 니들 밸브의 개폐로 조정하였다.

Fig. 3.3에 실험에 사용된 부속기기와 계측장비 세팅 사진을 나타내었으며, Table 3.1은 이들의 사양을 나타내고 있다.

본 실험장치는 시스템내의 진공을 유지하기 위하여 진공펌프가 설치되어 있으며, 기기내의 압력을 알 수 있도록 고압용 디지털 압력 센서를 재생기 상부에, 저압용 디지털 압력계를 흡수기 상부에 설치하였다. 또한, 흡수기에는 2HP/5kW급 항온조에서 냉각수를, 증발기에는 3HP/8kW급 항온조에서 냉수를 공급하도록 수순환용 배관이 설치되어 있으며, 흡수기, 증발기, 재생기 및 탱크류의 각 수·용액배관의 입·출구 온도측정을 위하여 씨스형 열전대를 설치하였다. 그리고 냉각수, 냉수 및 용액유량을 측정하기 위하여 수유량계 및 용액유량계를 설치하였다. 또한 용액농도 측정을 위한 샘플채취기(sampler)를 농용액이 유입되는 흡수기 입구 및 출구 측에 부착하였으며, 냉매 및 용액의 일정한 유입을 위한 기어펌프(gear pump, Iwaki)도 설치되어 있다.

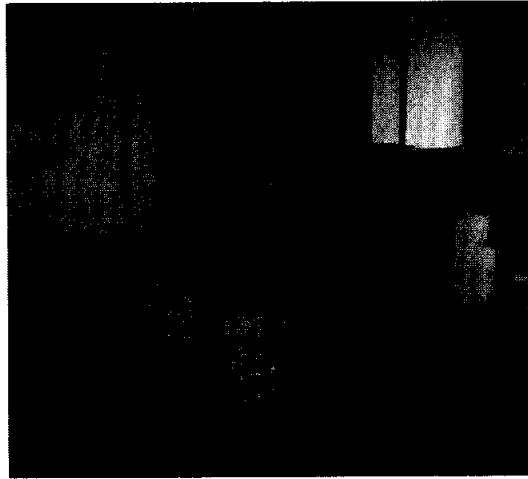
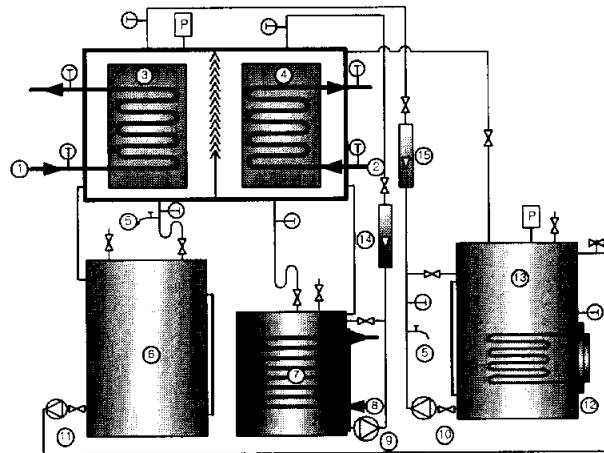


Fig. 3.1 Experimental apparatus



- ① Cooling water ② Chilled water ③ Absorber ④ Evaporator ⑤ Sampling valve
 ⑥ Weak solution tank ⑦ Refrigerant tank ⑧ Chiller ⑨ Water pump ⑩ Solution pump
 ⑪ Solution circulation pump ⑫ Heater ⑬ Strong solution tank ⑭ Refrigerant flowmeter
 ⑮ Solution flowmeter [P] Pressure gauge ① Thermometer

Fig. 3.2 Schematic diagram of experimental Apparatus

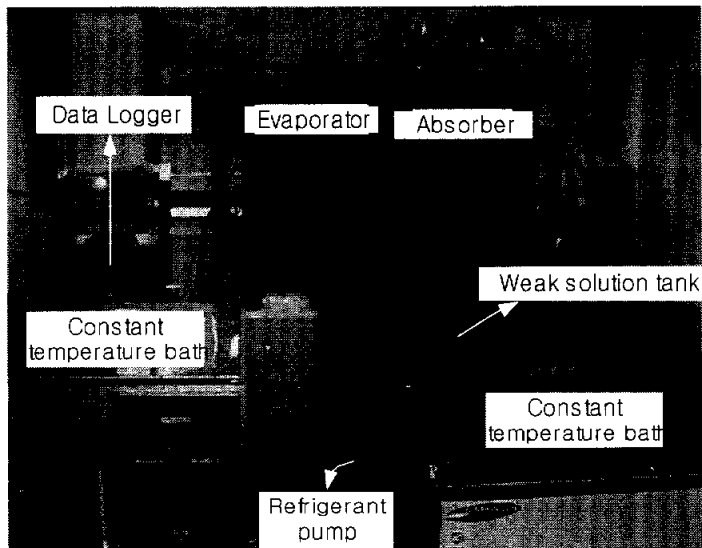


Fig. 3.3 Photograph of experimental apparatus

Table 3.1 Specification of Experimental Apparatus

Measuring Instrument	Specification	Maker	Model No.	Accuracy
Vacuum pump	0.5 PS 5×10^{-4} Torr	Shinmyung	D10A	-
High pressure transducer	-14.7~35 PSIG	SETRA	280E	$\pm 0.5\%$
Low pressure transducer	0~100 Torr	MKS	128AA-0010 0D	$\pm 0.25\%$
Constant temperature bath for cooling water	4~40 l/min -10°C ~60°C	AR	AR 3RT	$\pm 0.2\%$
Constant temperature bath for chilled water	4~40 l/min -10°C ~60°C	Samwon	M9911	$\pm 0.2\%$
Magnet gear pump	3.9~4.5 l/min	Iwaki	MDG -M4T6A100	-
LiBr solution flow meter	0~2 l/min	Flowcell	NO.002959	$\pm 0.8\%$

가. 흡수기/증발기 플레이트

Fig. 3.4은 본 플레이트 흡수기의 기본 형상을 나타내 것이다. 플레이트 상부에서 농용액의 흡수용액이 흘러 내려 플레이트 양쪽을 타고 유하하도록 하였으며, 냉각수는 아래의 냉각수관 양쪽에서 플레이트 내부를 흐르므로 흡수용액과 대향류로 열교환 하도록 하였다.

플레이트 크기는 Fig. 3.5와 3.6과 같이 폭 400mm, 높이 600mm로 이는 예비실험 및 문헌자료를 통해 약 1RT의 능력을 가지게 설계하였으며, 수평관군 흡수기의 전열면적이 $0.3 \sim 0.5 \text{m}^2/\text{RT}$ 인 점을 고려하면 적정 크기라 생각된다.

플레이트 판은 동판을 사용하였으며 동판의 두께는 제작상의 편의를 위하여 1mm를 사용하였으나 실제 대량 생산과 상용화를 위해서는 더 얇은 판을 사용할 수 있을 것이라 생각된다. 동판과 동판 사이의 간격은 4.5mm로 설정하였다. 이는 기존 수평관군 흡수기의 냉각수 유량과 유속을 고려하여 결정하였다.

플레이트 내부는 냉각수가 흐르고 외부는 약 6mmHg의 고진공 상태이므로 플레이트 내부와 외부의 압력차이가 1기압 이상 나게된다. 이 경우 플레이트 중앙부분에 굴곡이 생기게 된다. 이것을 방지하기 위해서 플레이트 내부 냉각수 측에 배플을 설치하여 플레이트 형상을 유지할 수 있도록 하였다. Fig. 3.6은 실제 제작된 플레이트의 형상사진을 나타낸 것이다.

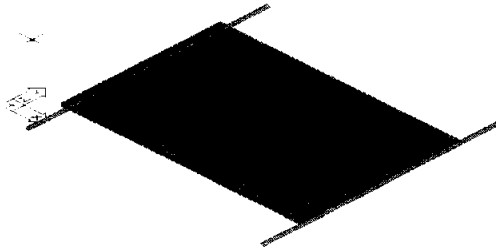


Fig. 3.4 Plate basic form

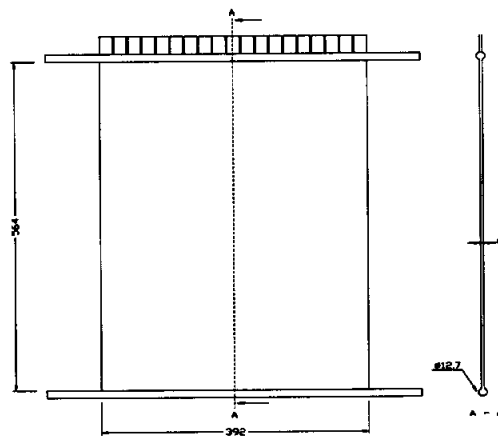


Fig. 3.5 Plate layout

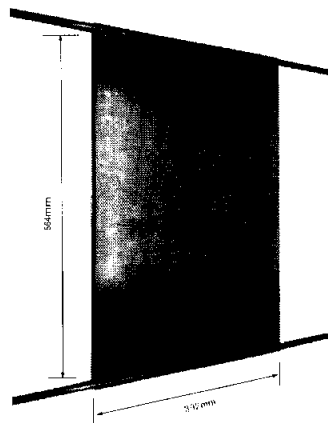


Fig. 3.6 Heat exchanger of plate absorber

고성능 플레이트 흡수기를 위해 플레이트 표면에 지름 10mm의 뎀플을 중심 거리 20mm 간격으로 형성하여 흡수용액의 유동을 교란시키고자 하였다. 뎀플은 플레이트 표면에서 약 1mm 정도 들어가도록 제작하였다. 그 간략도를 Fig. 3.7에 나타내었으며, 제작된 실물 사진을 Fig. 3.8에, 뎀플 확대사진을 Fig. 3.9에 각각 나타내었다.

본 제작 플레이트에서는 플레이트 내부의 냉각수 유로를 1패스로 제작하여 플레이트 내부의 유동을 정확하게 파악함으로서 플레이트 용액 측 열전달 및 물질전달 특성을 보다 정확하게 파악하도록 하였다. 제작된 플레이트는 플레이트 내부 배플을 부착하여 냉각수에 패스를 두어 유동을 교란시키고 내부 열전달률을 향상시켰다.

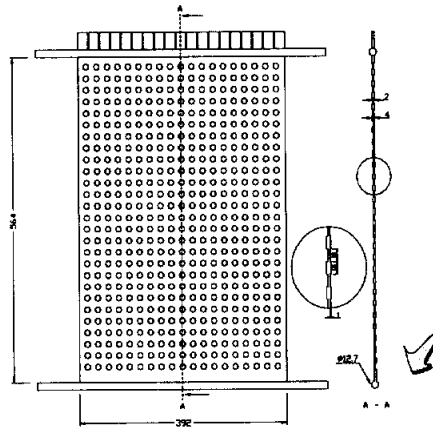


Fig. 3.7 Dimple plate layout

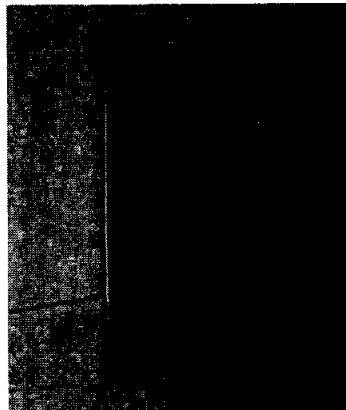


Fig. 3.8 Dimple plate photograph

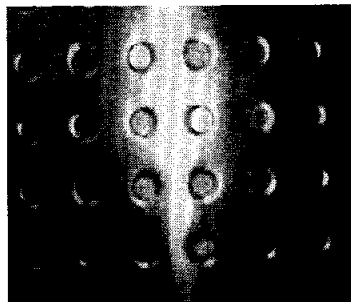


Fig 3.9 Magnification photograph of dimple plate surface

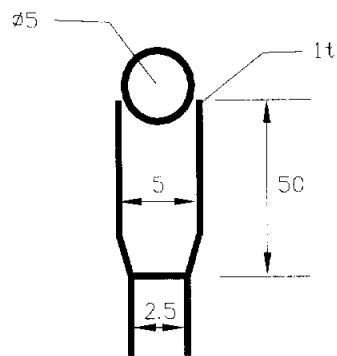
나. 플레이트 흡수기용 최적 용액 Tray 설계 및 제작

플레이트 흡수기용 트레이는 플레이트 위에 용액을 고르게 뿌려주고 플레이트의 어느 한 면이나 한쪽으로 용액이 쏠리는 현상을 방지하여 주어야 하므로 기존의 수평관형 트레이와는 차이가 있다.

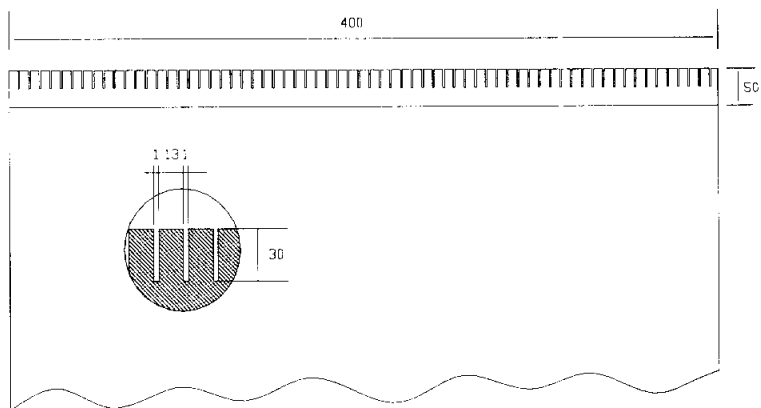
본 연구에서 고안한 트레이의 형상을 Fig. 3.10에 나타내었다. 그림에서와 같이 용액은 플레이트 상부의 원통형 1차 트레이 내부로 흘러 들어와 원통관 하부에 뚫려 있는 구멍을 통하여, 플레이트 상부의 슬릿형 2차 트레이 내부로 용액을 흘려준다. 1차 원통형 트레이에서 흘러온 농용액은 2차 슬릿형 트레이 하부에 쌓이고 슬릿사이를 흘러 넘쳐 플레이트 평판을 적시며 유하 하게 되어 있다. 슬릿은 13mm 간격으로 용액이 흘러내리는 구멍은 1mm로 하였다. 또한 플레이트 위의 슬릿형 트레이의 높이는 50mm, 슬릿의 높이는 30mm로 제작하였으며, 하부에 20mm의 간격을 두어 용액이 쌓여 흘러 넘치도록 설계하였다.

이 플레이트형 흡수기로 용액 탱크로부터 보내진 농용액이 상부의 원통형 분배기에서 한번 플레이트 상부의 슬릿형 트레이에 분사되고, 플레이트 상부의 슬릿형 트레이 하부에 용액이 고여서 슬릿으로부터 흘러 넘쳐 플레이트의 표면을 유하한다. 냉각수는 플레이트 하부의 냉각수관의 양측에서 유입하고 플레이트 내부를 흘러 흡수용액과 대향류 열교환하여 상부의 냉각수관의 양측에서 유출된다. 플레이트 내부의 냉각수 흐름을 난류로 만들어 전열을 촉진하기 위해, 플레이트 내부에 베플을 삽입하였다.

또한, 바깥 공기온도의 변화에 의한 유체의 온도 및 냉동 능력, 흡수 능력에 미치는 영향을 제거하기 위하여 배관 및 열교환기, 각종 탱크는 단열재에 의하고 단열 하여 외기의 영향을 가능한 한 받지 않도록 했다.



(a) Side diagram



(b) Front diagram

Fig. 3.10 Tray on Plate

다. 농용액 탱크 및 희용액 탱크

Fig. 3.11는 농용액 탱크를 나타낸 것으로, 외형 치수 $\phi 430\text{mm} \times$ 높이 800mm 의 원형탱크로 최대 2시간의 연속 운전이 가능하다. 탱크내의 용액 농도는 샘플링 밸브에서 취출한 용액을 굴절율계로 측정함으로써 농도를 측정할 수 있으며, 비중계도 병행하여 사용하였다.

농용액 탱크에는 히터를 부착하여 가열함으로써 희용액을 재생시켜 농용액을 얻을 수 있도록 하였다. 이때 발생한 냉매 증기는 증발기로 유입되어 응축되도록 하였으며, 이때 증발기는 응축기로 사용되도록 설계하였다.

또한, 냉매 탱크와 마찬가지로 용액탱크의 외면에는 보온을 목적으로 한 단열재를 붙이고, 가능한 한 바깥 공기 온도의 영향을 적게 받도록 하였다. 농용액 탱크 내의 압력을 읽을 수 있도록 농용액 탱크 상부에는 진공용($0 \sim 760\text{mmHg}$) 압력계를 설치하였다.

Fig. 3.12는 희용액 탱크를 나타낸 것으로, 외형 치수 $\phi 400\text{mm} \times$ 높이 600mm 의 스테인레스제 원형 탱크로 되어 있다. 흡수기의 아래에 설치되어 있으며, 흡수기에서 냉매 증기를 흡수하여 회석된 흡수용액을 저장하는 탱크이다. 희용액 탱크 내의 압력이 흡수기 내의 압력에 영향을 미치지 않도록 하기 위하여 희용액 탱크 상부에 U 트랩을 설치하였으며, 희용액 탱크 내의 용액 수위를 알기 위해 수위계를 설치하였다.

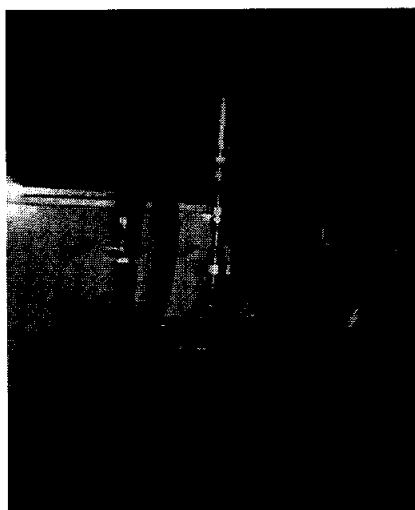


Fig. 3.11 Strong concentration tank

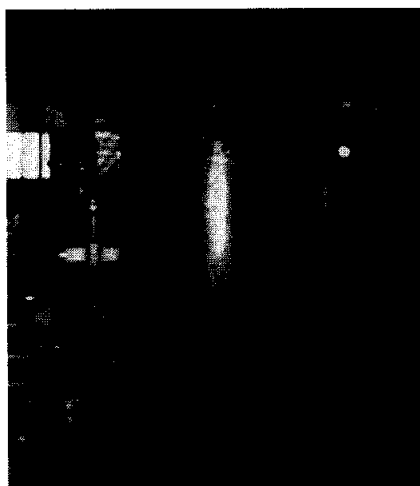
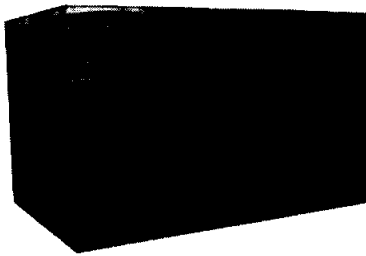


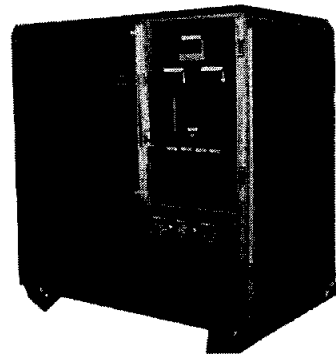
Fig. 3.12 Weak concentration tank

마. 항온 시스템

실험에 사용한 냉각수 및 응축용액의 냉각에 필요한 냉수는 항온조로 항상 일정한 온도의 물을 공급하도록 하였다. 흡수기의 냉각수 공급용 항온조, 증발기 냉수 공급용 항온조를 각각 따로 두어 각각의 설정 온도, 유량으로 공급할 수 있도록 하였다. Fig. 3.13은 냉각수 및 냉수용 항온시스템을 나타낸 것이다.



(a) Constant temperature bath for cooling water



(b) Constant temperature bath for chilled water

Fig. 3.13 Constant temperature bath

바. 측정 시스템의 구성

(1) 온도 측정

본 연구로의 온도 측정 대상은 비교적 저온이고 고속의 응답성을 특별히 필요로 하지 않기 때문에 온도 측정용 센서로는 지름 1.6mm의 K형 열전대를 사용하였다.

플레이트형 흡수기의 용액 유하 액막의 온도 분포를 알기 위해 흡수기/증발기 셀의 측면에서 온도 센스를 심어 플레이트 표면 위에 온도 센서를 설치하였다. 온도 센서는 흡수기 및 증발기 플레이트의 중앙부분에 위에서 아래로 10cm 간격으로 5부위씩 측정을 하였다. 측정된 온도 데이터는 데이터로거를 통하여 컴퓨터로 기록되도록 하였다. 또한 각 열교환기의 입출구에도 온도센스를 설치하여 유체의 입출구 온도를 측정함으로써 열교환기 내에서의 열교환량을 계산 가능하도록 하였다.

Fig. 3.14는 K타입 열전대를, Fig. 3.15는 열전대 부착모습을 나타낸 것이다.

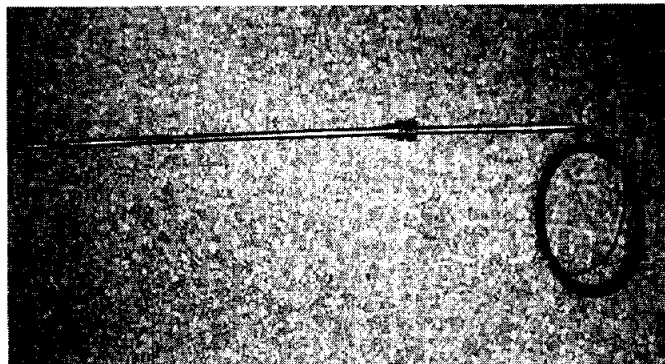
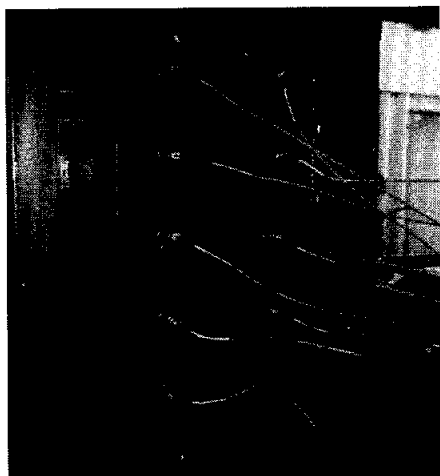
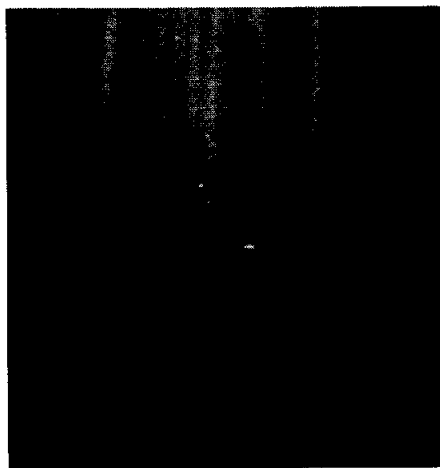


Fig. 3.14 K-type thermocouple



(a) Adhesion of thermocouple for absorber/evaporator shell



(b) Sensor for temperature of plate solution

Fig. 3.15 Adhesion of temperature sensor

(2) 농도 측정

농도 측정은 샘플링 밸브를 이용하여 샘플링 된 용액을 굴절율계 및 비중계를 이용하여 측정하였다. 샘플링 밸브는 흡수기 입구 및 출구에 두어 실험 중 수시로 농도 측정이 가능하게 하였다. Fig. 3.16은 농도측정용 굴절율계를, Fig. 3.17은 비중계를 나타낸 것이다.

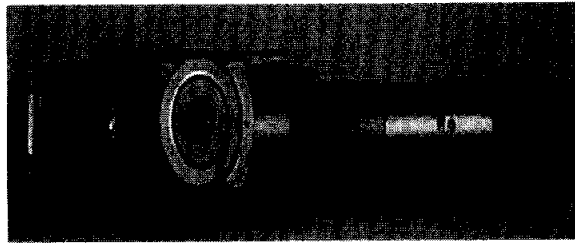


Fig. 3.16 Refractor

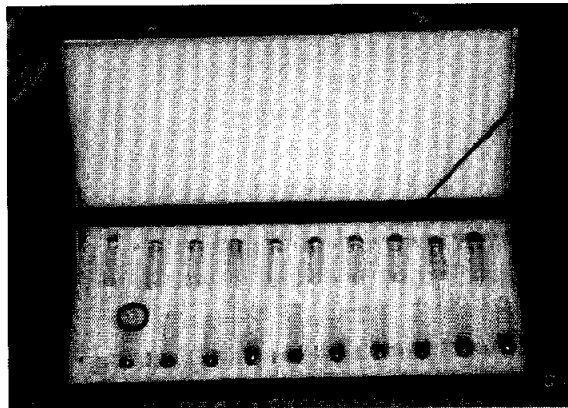


Fig. 3.17 Specific gravity meter

(3) 유량 측정

특별히 정밀도를 필요로 하는 용액 및 냉매의 측정에는 Fig. 3.18과 같은 전자 유량계를, 나머지 유량은 플로우트식 유량계를 이용하여 측정하였다.

이 전자 유량계는, 유체의 도전율이 $3\mu\text{S/cm}$ 이상이라면, 그 성질과 상태에 관계없이 체적 유량을 측정할 수 있는 것이다. 유체의 흐름 방향과 수직에 자장을 가하고 있는 측정관에 도전성 유체가 흐르면, 전자 유도의 법칙에 의하여 평균 유속에 비례한 신호 기전력이 액체 중에 유도되기 때문에, 이 기전력을 검출하고, 증폭, 연산하여 체적 유량을 측정한다. 이 전자 유량계를 용액 및 냉매 유입부에 설치하고, 유량을 측정하면서, 밸브의 개폐로 각각의 유량 설정을 하였다.

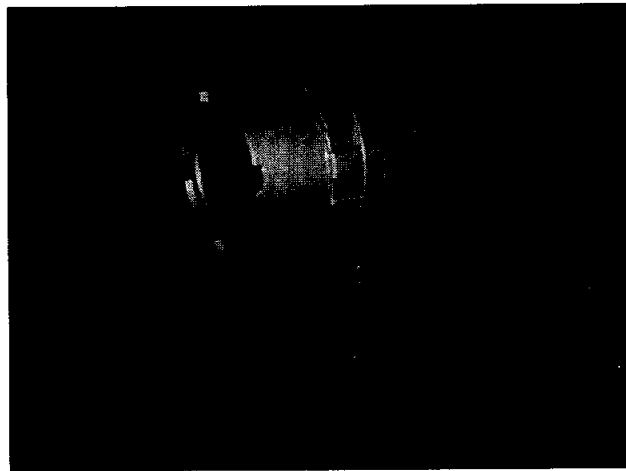


Fig. 3.18 Magnetic flow meter

3.2 실험방법

실험조건이 안정된 상태에서 실험을 수행할 수 있게 하기 위하여 실험 조건 설정과정과 성능 측정과정, 용액 재생과정으로 나누어 단속형(batch type)으로 진행하였다.

3.2.1 흡수 실험 순서

가. 재생 과정

먼저 실험의 준비 단계로서, LiBr 수용액의 농도를 실험 조건으로 설정할 필요가 있다. 먼저 가열 모드로서, 농용액 탱크 내에서 LiBr 수용액을 순환시키면서 전기 히터로 가열하고 비등시킨다. 이때 탱크 상부의 밸브를 열고, 증발기와의 증기를 개방해 둔다. 가열에 의해 발생한 냉매 증기는 증발기 내의 냉각수에 의해 응축되고, 냉매 탱크로 회수된다. 이처럼 하여 소정의 농도가 될 때까지 가열을 계속한다. 농용액이 소정의 농도까지 농축되었으면, 밸브를 닫고, 흡수기에 냉각수를 흐르게 하여 농용액 탱크 내의 농용액을 증기 흡수과정 없이 흡수기에 공급하여 소정의 온도까지 냉각시킨다.

실험의 준비 단계에 있어서 필요 사항으로 추가 작업이 있다. 실험 장치 내부에 불응축성 가스가 존재하면, 그것이 유동 저항으로 되고 흡수 현상에 크게 영향을 미친다. 따라서 정확한 냉동능력을 측정하기 위해, 충분한 추가 작업을 하지 않으면 안된다. 본 실험 장치에서는 회용액 탱크에 추가용의 배관을 설치하고 있고, 여기에서 진공 펌프로 추가를 하였다.

나. 흡수 과정

먼저 냉매 펌프로 냉매를 증발기로 충분히 순환시키면서 증발기 플레이트 열교환기 내로 항온조에서 일정 온도로 설정된 냉수를 공급하여,

증발기 플레이트 위를 유하하는 냉매는 냉수로부터 열부하를 얻어 증발된다. 이 것과 동시에 밸브조절에 의해 일정 유량의 흡수용액을 흡수기에 공급한다. 흡수 용액은 냉각수와 열교환에 의해 냉각되고, 동시에 냉매를 흡수하기 시작하기 때문에, 점점 증발된 냉매 온도는 내려간다. 흡수기로 흡수된 열량과 증발하고 있는 냉매 증기의 잠열량과의 밸런스가 평형을 이루면, 냉매 온도, 용액 온도, 냉각수 온도가 일정하게 유지된다.

실험 장치 내부가 평형 상태가 된 후, 각 부분의 온도, 농도, 유량 데이터를 기록한다. 열전대에 의한 온도 데이터는 데이터로그를 통하여 개인용 컴퓨터로 기록하였다. 또한, 이러한 데이터 획득은 각 부분 온도에 시간적인 변동이 없었던 것을 충분히 확인한 다음 하였다.

3.2.2. 흡수 열교환기의 성능 평가 방법

흡수 열교환기는 일반적인 열교환기와는 다르고, 흡수 냉동기의 흡수기내로는 냉매 증기의 흡수라는 물질 이동이 수반하고, 열 이동이 생기기 때문에 전열 현상이 복잡하게 되고, 그 해석 방법도 확립되어 있지 않다. 따라서 흡수 냉동기 실험 장치의 흡수기와 증발기를 모델화하여 그 내부에서의 열·물질 수지로부터 냉동능력을 정의하고 열교환기로서의 흡수기의 성능가능성을 살펴보고자 한다.

Fig. 3.19은 증발기와 흡수기에서의 열평형을 나타내고 있으며, Fig. 3.20은 용액과 냉매의 유체의 유동을 고려한 증발기와 흡수기의 히트밸런스를 나타내고 있다.

가. 열평형 계산

흡수기에 있어서 입·출구에서의 LiBr 질량이 변화하지 않으므로 아

래와 같은 식이 성립된다.

$$(G_s - D)\xi_{si} = G_s \xi_{so} \quad (3.1)$$

여기서, $a = G_s/D$ 로 두고 이 식을 정리하면

$$a = \frac{G_s}{D} = \frac{\xi_{si}}{\xi_{si} - \xi_{so}} \quad (3.2)$$

로 되고, 이것은 냉매 증기 단위 유량당의 용액 순환비를 나타내고 있다.

(1) 흡수기 열평형

먼저, 냉각수와의 교환 열량 Q_w 는

$$Q_w = G_w c_{pw} (T_{wo} - T_{wi}) \quad (3.3)$$

로 된다. 한편, 흡수기의 입구/출구에 있어서 엔탈피 차이에 의한 흡수 용액의 방열량 Q_s 는

$$Q_s = (G_s - D)h_{si} - G_s h_{so} \quad (3.4)$$

$$= D[(a - 1)h_{si} - ah_{so}] \quad (3.5)$$

로 된다. 여기에서, 용액 엔탈피는

$$h_{si} = h(T_{si}, \xi_{si}) \quad (3.6)$$

$$h_{so} = h(T_{so}, \xi_{so}) \quad (3.7)$$

로 된다.

따라서 흡수한 수증기가 방출한 잠열량을 $Q_{r'}$ 이라고 한다면 흡수기 내의 열평형은

$$Q_w = Q_{r'} + Q_s \quad (3.8)$$

로 된다. 여기에서 냉매 증기의 엔탈피를 $h_{r'}$ 라고 한다면 $Q_{r'}$ 는 다음과 같다.

$$Q_{r'} = D h_{r'} \quad (3.9)$$

(2) 증발기 열평형

항온조에서 공급되는 냉수는 증발기 플레이트 내에서 냉매에 열을 빼앗기고 냉각된다. 이때 냉매에 가해진 공급열량 Q_E 는

$$Q_E = G_r C_{pr} \Delta T_H \quad (3.10)$$

평형 상태에서 이 열량은 전부 흡수기에 방출된 냉매증기의 증발잠열로 되기 때문에

$$Q_E = D h'_r \quad (3.11)$$

로 된다. 여기에서 , 냉매증기의 엔탈피는

$$h'_r = h'_r(T_r) \quad (3.12)$$

로 얻어진다.

(3) 냉동 능력(Q_r)

앞에서 흡수기와 증발기의 열평형을 살펴보았지만 실험장치의 냉동능력이라는 점에서 생각하면 정상상태에 있어 흡수기가 증발기로부터 얼마만큼의 열량을 빼앗고 있는지가 포인트가 된다. 따라서 냉동능력 Q_r 은 정상상태에 있어서 흡수기로의 이동 열량 Q_r' 로, 다음 두 개의 식으로 나타낼 수 있다.

$$Q_{r1} = Q_w - Q_s \quad (3.13)$$

$$Q_{r2} = D h'_r \quad (3.14)$$

나. 열통과율 계산(K)

흡수기의 열통과율 K 는 냉각 수수열량 Q_w 와 전열면적 A 를 이용하고 식 (3.15)로 정의된다.

$$K = \frac{Q_w}{A \Delta T} \quad (3.15)$$

여기에서 ΔT 는 흡수 용액의 입구 온도와 출구 온도, 냉각수의 입구 온도와 출구 온도를 이용하여 정의한 대수 평균 온도차로서 다음과 같이 나타낸다.

$$\Delta T = \frac{T_1 - T_2}{\ln(T_1/T_2)} \quad (3.16)$$

$$T_1 = T_{sei} - T_{wo} \quad (3.17)$$

$$T_2 = T_{seo} - T_{wi} \quad (3.18)$$

여기서, T_{sei} 와 T_{seo} 는 각각 흡수기 입구, 출구에 있어서 용액 농도에 대한 평형 온도이다. 이와 같은 정의로 대수 평균 온도차를 이용하면, 흡수기내의 온도는 기액 평형의 이상 상태를 취하지 않으면 안 된다. 그러나, 흡수기내에 있어 ΔT 는 반드시 대수 평균 온도차와 일치하는 것은 아니다.

다. 물질전달률 계산

물질전달률 β 는 다음과 같이 정의한다.

$$\beta = \frac{D}{A \Delta C} \quad (3.19)$$

여기에서, ΔC 는 용액의 농도 C 에 의한 대수 평균 농도차이고, 흡수기 입구 및 출구에 있어서 용액 온도와 흡수기 내 압력에 대한 용액중의 평형 농도 C_{sei} , C_{seo} 와 용액의 농도 C_{si} , C_{so} 라는 차이를 이용하여 아래와 같이 정의된다.

$$\Delta C = \frac{C_1 - C_2}{\ln(C_1/C_2)} \quad (3.20)$$

$$C_1 = C_{sei} - C_{si} \quad (3.21)$$

$$C_2 = C_{seo} - C_{so} \quad (3.22)$$

3.2.3 실험조건 및 시스템 열평형

Table 3.2에 표준 실험 조건을 나타내었다. 또 실험은 표준 실험 조건 하에서 용액 유량 및 냉각수 유량을 변화시키고 여기에 계면활성제를 변화시키면서 반복실험 하였다.

실험 데이터는 정상상태에서 해석하여야 한다. 따라서 식 (3.13) 및 (3.14)에 나타낸 열평형을 이용하여 실험장치의 및 열 물질평형을 검정하여 실험장치의 신뢰성을 검정하였으며, 이때 실험장치로부터 획득한 온도 값들은 Fig. 3.22와 같이 정상상태의 값을 이용하였다.

Fig. 3.21에서 보면 실험 장치의 신뢰성 검정 결과 $\pm 15\%$ 내에서 열평형이 이루어지는 것을 알 수 있었다. 이 것은 실험장치가 단열 되어 있다고는 하나 배관 내에서의 방열과 실험장치 본체의 열용량 및 방열, 냉매의 오염 등에 의한 것이라고 생각된다.

Table 3.2 Standard experimental conditions

Absorber	Pressure, P , [kPa]	1.2
LiBr solution	Inlet temperature, T_{si} , [$^{\circ}\text{C}$]	49
	Inlet concentration, ξ_{si} , [wt%]	60
	Film Reynolds No., Re_f	6 ~ 35
Cooling water	Inlet temperature, T_{wi} , [$^{\circ}\text{C}$]	32
	Flow rate, G_w , [kg/s]	0.17~0.3
Surfactant	Concentration, [ppm]	0~4000

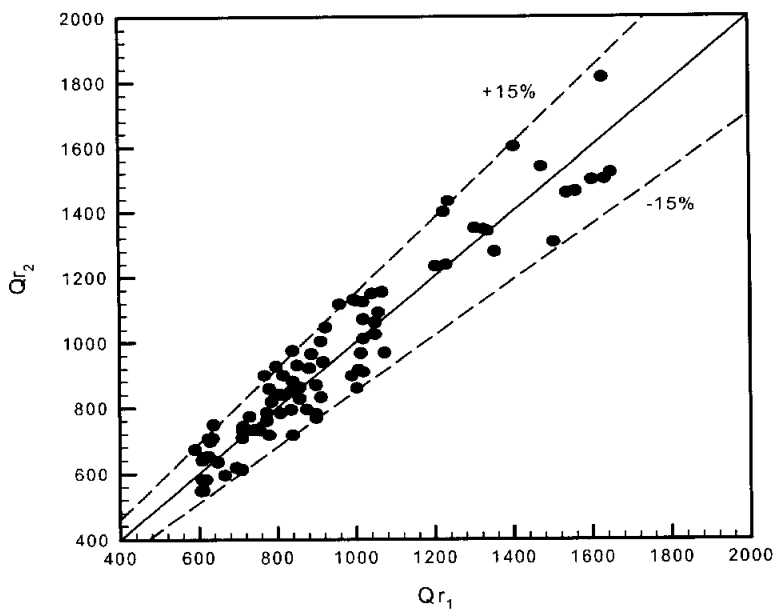


Fig. 3.21 Heat balance of experimental apparatus

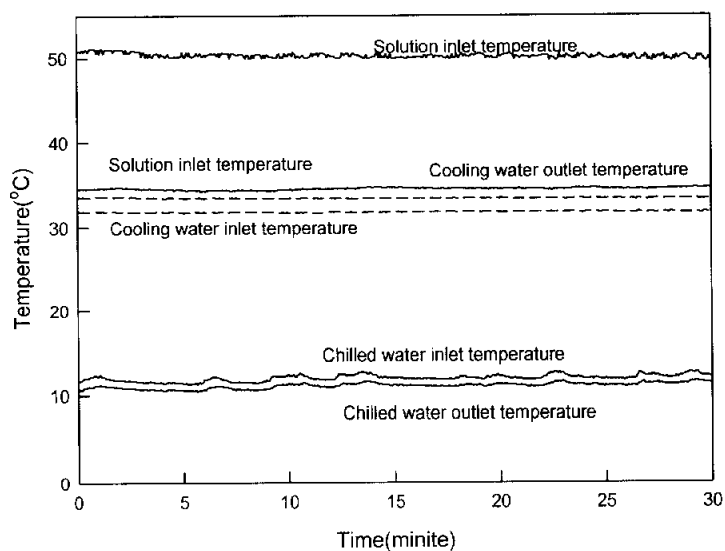


Fig. 3.22 Experimental temperature distribution of steady state

제 4 장 실험결과 및 고찰

흡수기에서의 열 및 물질전달 특성에 관한 평가는 실험장치 각 부분의 온도, 농도 및 유량이 정상상태가 되었을 때의 데이터 값만을 유효 실험치로 선정하여 계산하도록 하였다.

4.1 계면활성제에 의한 열 및 물질전달 촉진

4.1.1 계면활성제 농도에 따른 흡수기의 열 및 물질전달 특성

Fig. 4.1는 계면활성제 농도에 따른 흡수기의 열유속을 나타낸 것이다. 계면활성제의 농도가 증가할수록 급격하게 열유속이 증가하고 있는 것을 보여준다. Fig. 4.2는 계면활성제 첨가 농도에 따른 덤플 플레이트와 기본 플레이트의 냉동능력을 나타낸 것이다. 계면활성제 1000ppm 첨가시 냉동능력은 급격히 증가하고 있으며 4000ppm까지 계속 냉동능력이 증가하고 있는 것을 보여준다. 그러나 3000ppm 이상에서 냉동능력 증가의 비율이 감소하고 있다.

덤플 플레이트의 경우 기본 플레이트에 비해 계면활성제 미첨가시에는 약 50% 높은 냉동능력을 보여 주었지만 계면활성제 첨가시 덤플 플레이트의 냉동능력은 기본 플레이트에 비해 10% 정도 향상되는 것을 보여 주었다.

이것은 계면활성제 미첨가시에 용액의 플레이트 표면 접촉율이 기본 플레이트에 비해 덤플형 플레이트가 높고 냉각수의 냉각수 교란 및 용액의 교란에 의해서 덤플형이 50% 정도 높은 냉동능력을 보여 주었지만,

계면활성제 첨가시 표면접수가 완전히 되며, 기본 플레이트도 용액의 교란이 발생하므로 덤플효과가 상쇄되기 때문에 냉동능력의 증가가 감소하는 것이라 생각된다. 실험 조건에서 계면활성제 3000ppm의 경우 기본 플레이트의 냉동능력은 3800kcal/h를 보여주고 있다.

Fig. 4.3은 플레이트 흡수기의 총괄 열전달계수를 계면활성제 투입 농도에 따라 나타내었다. 계면활성제 미첨가시 약 $500\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 정도의 총괄열전달계수가 계면활성제 3000ppm 첨가시 $1000\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 정도로 약 2배 이상 증가하고 있다. 계면활성제 미첨가시 약 30%의 증가율을 보여 주고 있으나 계면활성제 첨가에 의해 6%정도 총괄 열전달계수의 증가를 보여주었다. 계면활성제 첨가율 3000ppm 이상에서 총괄 열전달계수의 증가율은 거의 없는 것을 알 수 있다.

Fig. 4.4와 4.5는 플레이트 흡수기의 물질전달률과 냉매증기 흡수질량 유속을 나타낸 것이다. 계면활성제 첨가시 물질전달률은 급격히 증가하는 추세를 보이며 미첨가시에 비해 약 7배 정도 증가하였다.

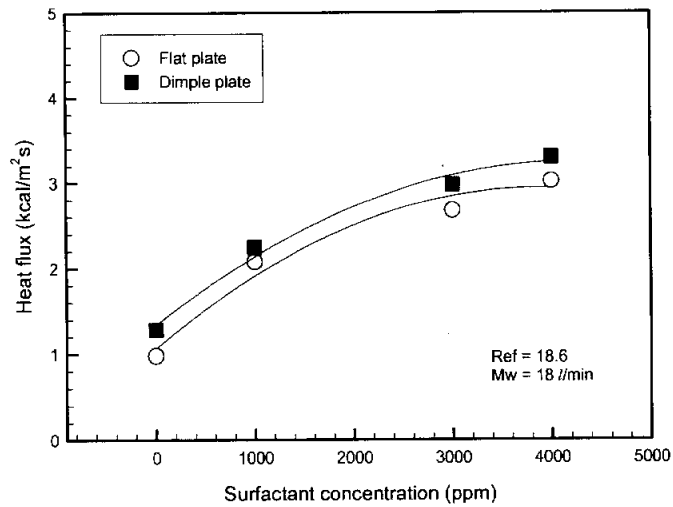


Fig. 4.1 Absorption heat flux of plate absorber

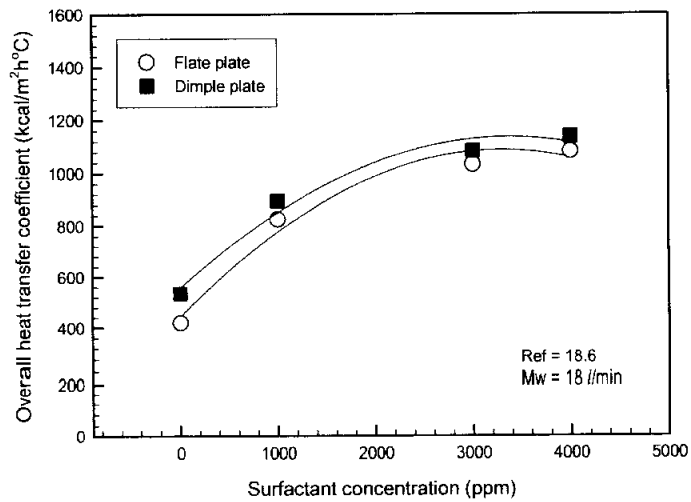


Fig. 4.2 Overall heat transfer coefficient of plate absorber

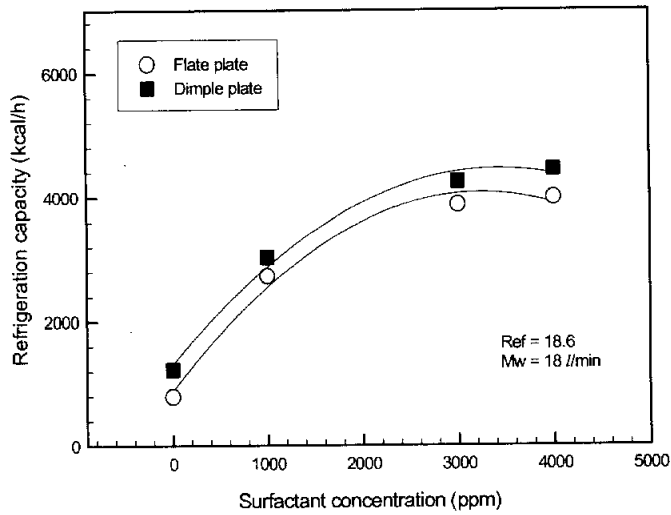


Fig. 4.3 Refrigeration capacity of plate absorber

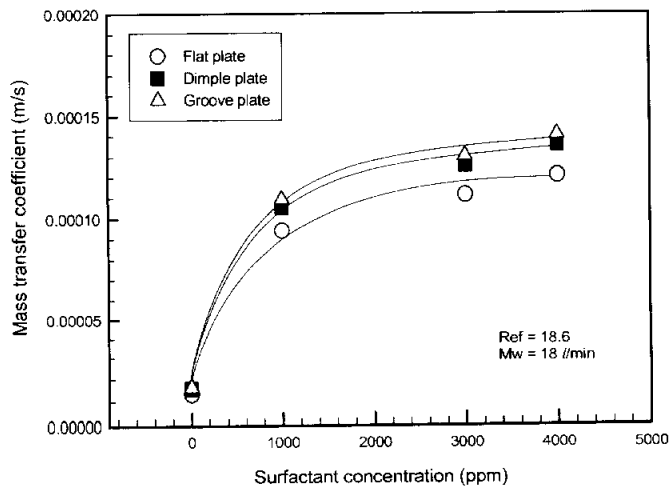


Fig. 4.4 Mass transfer coefficient of plate absorber

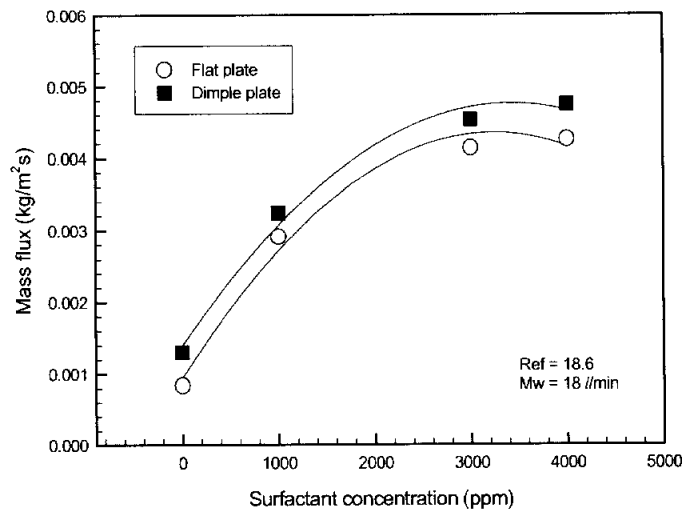


Fig. 4.5 Mass flux of plate absorber

4.1.2 용액유량에 따른 계면활성제의 영향

Fig. 4.6은 냉각수 유량 18 l/min의 경우에 대하여 계면활성제 농도 3000ppm에 대해 용액 유량에 따른 흡수기의 열유속을 나타내고 있다. 용액유량이 증가할수록 흡수기내의 냉각수와 교환하는 열량은 실험범위 내에서 계속 증가하고 있는 것을 보여준다.

Fig. 4.7과 같이 냉동능력은 또한 증가하고 있으며 용액 유량 증가에 따라 냉동능력의 증가율은 감소하고 있다. 계면활성제 3000ppm 첨가시에 덤플형 흡수기가 기본플레이트 흡수기에 비해 8%정도 높은 냉동능력을 나타내고 있다. 이것은 냉각수 측의 열전달률 증가와 덤플에 의한 전 열면적의 증가 때문이라고 생각된다.

총괄 열전달계수는 Fig. 4.8과 같이 낮은 용액유량에서는 덤플형 플레이트와 기본 플레이트가 차이가 미소하지만 용액 유량 증가에 따라 차이가 많이 증가하고 있다. 덤플 플레이트가 기본플레이트에 비해 약 4%정도 높은 총괄 열전달계수를 나타내고 있다.

Fig. 4.9와 10은 물질전달계수와 냉매흡수질량유속을 나타내고 있다. 물질전달계수는 용액유량증가에 따라 증가하고 있으며, 덤플 플레이트가 기본 플레이트에 비해 용액유량에 상관없이 그의 일정하게 높게 나타나고 있다는 것을 보여준다. 덤플 플레이트가 기본 플레이트에 비해 약 15%의 물질전달 향상을 보여주었다.

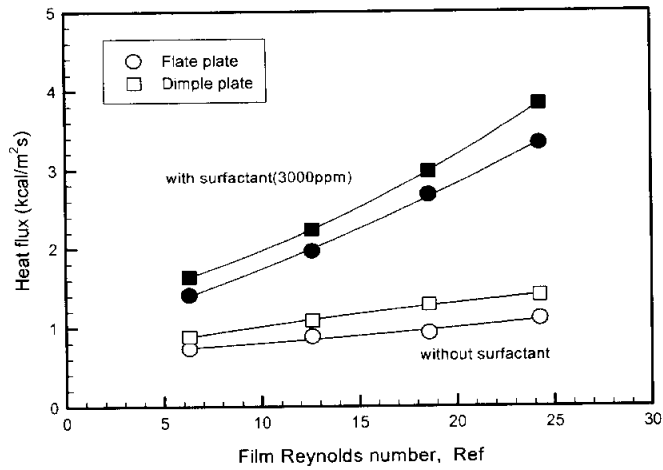


Fig. 4.6 Absorption heat flux of plate absorber on solution flow rate

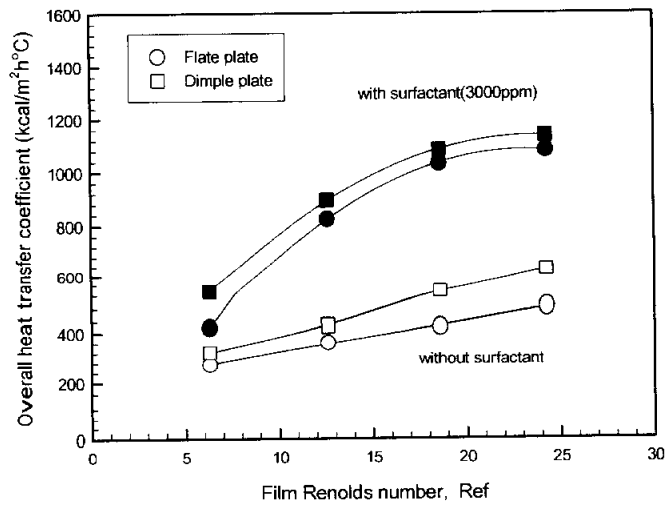


Fig. 4.7 Overall heat transfer coefficient of plate absorber on solution flow rate

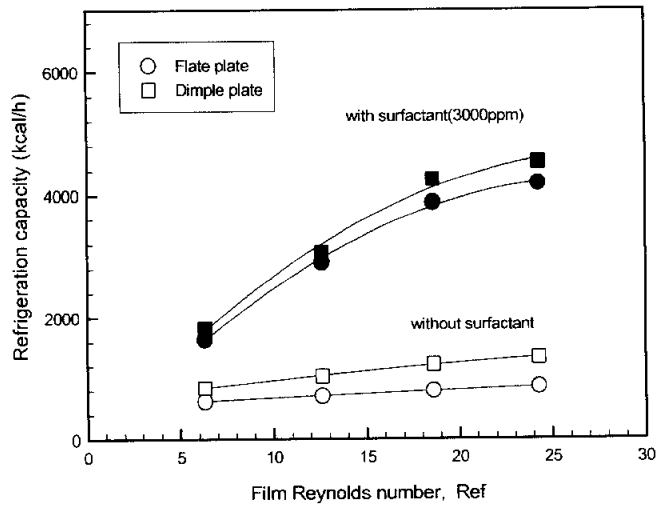


Fig. 4.8 Refrigeration capacity of plate absorber on solution flow rate

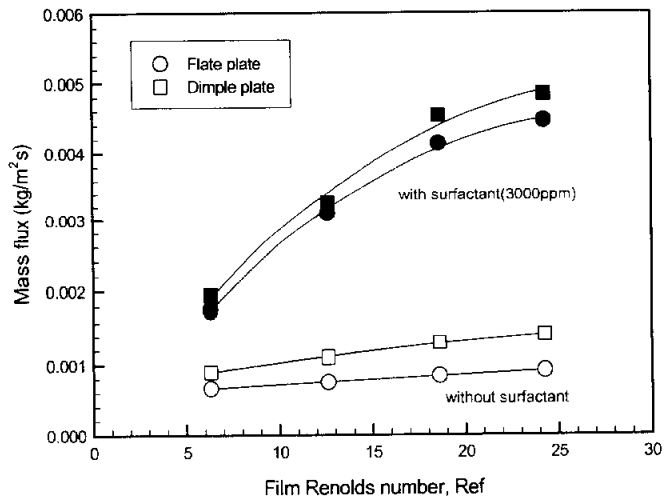


Fig. 4.9 Mass flux of plate absorber on solution flow rate

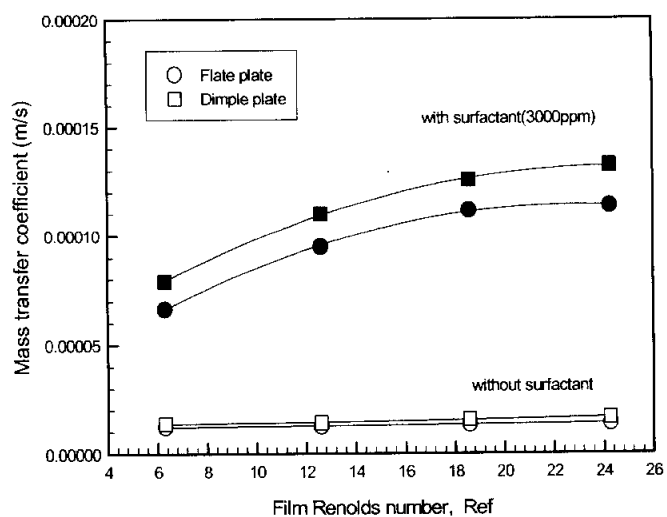


Fig. 4.10 Mass transfer coefficient of plate absorber on solution flow rate

제 5 장 결 론

플레이트 흡수기의 열 및 물질전달 특성 파악을 위한 1RT의 냉동능력을 갖는 배치(batch)식 모델 증발기/흡수기 실험장치를 제작하여, 평탄형 플레이트와 딥플형 플레이트 흡수기에 계면활성제를 첨가하여 열 및 물질전달 특성을 조사한 결과 본 실험 조건 범위에서 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

계면활성제를 첨가하였을 경우, 계면활성제 첨가 농도에 따라 냉동능력을 비롯하여, 열통과율 및 물질전달 계수는 증가하는 경향을 나타내고 있었다. 그러나 계면활성제를 3000ppm이상 첨가를 하였을 경우 증가율이 아주 미미한 것을 알 수 있었다. 기준 용액 유량 및 냉각수유량에서 냉동능력은 최대 4000~4600kcal/h를 나타내었다. 그러나 계면활성제 첨가시 평탄형 플레이트 흡수기와 딥플형 플레이트 흡수기와의 냉동능력 차는 15%정도로 큰 차이를 보여주지 않았다.

계면활성제를 첨가하지 않았을 때의 성능은 기존의 수평 평활관의 성능과 비교하여 높지는 않지만 계면활성제를 첨가하였을 때의 플레이트 타입의 성능은 기존의 흡수기보다 높은 것으로 나타났다. 또한 체적적인 문제에서도 큰 효과를 볼 수 있으므로 공간의 활용을 보다 효율적으로 할 수 있을 것이다. 본 실험에서 보다 적합한 트레이를 사용하여 플레이트에 접수가 확실하게 되었다면 보다 높은 효과를 볼 수 있었으리라 생각이 든다.

참 고 문 헌

- [1] J. I. Yoon, H. K. Oh and T. Kashiwagi, "Characteristics of heat and mass transfer for a falling film type absorber with insert spring tubes", Transaction of the KSME, Vol. 19, No. 6, pp 1501~1509, 1995
- [2] J. I. Yoon and T. Kashiwagi, "Computer simulation of triple absorption cycles", Transaction of the JSME, B, Vol. 60, No. 578, pp 304~309, 1994
- [3] J. I. Yoon, H. K. Oh and T. Kashiwagi, "Characteristic simulation of the waste-heat utilization absorption cycles", Trans. of the JAR, Vol. 12, No. 1, pp 43~52, 1995
- [4] O. K. Kwon, J. K. Lim, and J. I. Yoon, "Characteristic of heat and mass transfer on helical absorber using new working fluid", Trans. of the KSME, B, pp. 228~233, 2000
- [5] C. G. Moon, E. P. Kim and J. I. Yoon, "Analysis of performance in plate absorber", Winter trans. of Sarek, pp 483~488, 2000
- [6] O. K. Kwon and J. I. Yoon, " Heat and mass transfer of helical absorber on household absorption chiller/heater", Trans. of the Sarek, Vol. 11, No. 5, pp 570~578, 1999
- [7] J. I. Yoon, O. K. Kwon and C. G. Moon, "Influence of surfactant on heat transfer of air-cooled vertical absorber", Trans. of the Sarek, Vol. 11, No. 6, pp 740~748, 1999
- [8] J. I. Yoon, O. K. Kwon and C. G. Moon, "Experimental study

- of heat and mass transfer on an absorber with several enhancement tubes", Heat transfer-asian research, Vol. 28, No. 8, 1999
- [9] J. I. Yoon, O. K. Kwon and C. G. Moon, "Experimental Investigation of heat and mass transfer in absorber with enhanced tubes", KSME International journal, Vol. 13, No. 9, pp 640~646, 1999
- [10] H. Becker and C.H.M. Machielsen, "Performance of a compact heat and mass transfer of the plate type as an absorber", XVIIth International Congress of Refrigeration, Proceeding, Wien87, Vol. B, pp 144~109, 1987.
- [11] G. Grossman, Simultaneous heat and mass transfer in film absorption under laminar flow , Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 26, No.3, pp 357~371, 1983.
- [12] G. Grossman, M.T. Heath, Simultaneous heat and mass transfer in absorption of gases in turbulent liquid films , Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 27, No.12, pp 2365~2376, 1987.
- [13] G. Grossman, Analysis of interdiffusion in film absorption , Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 30, No.1, pp 205~208, 1987.
- [14] R.H. Wassenaar, J.I.W. Westra, Dynamic model of a film absorber with coupled heat and mass transfer , Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 35, No.1, pp 87~99, 1992.
- [15] A. Jernqvist, H. Kockum, Simulation of falling film absorbers and generators , International Absorption Heat

- Pump Conference, Proceeding, Montreal, Quebec, Canada, Vol.1, pp 311~318, 1996.
- [16] N. Kawae, T. Shigechi, K. Kanemaru, T. Yamada, Water vapor absorption into laminar film flow of a lithium bromide-water solution (Influence of variable properties and inlet film thickness on the absorption mass transfer rate) , Scripta Technica, Inc., pp 58~70, 1989.
- [17] S.C. Kim, M.D. Oh, J.H. Lee, A numerical study on heat and mass transfer in a falling film of vertical plate absorber cooled by air , Transaction of the KSME, Vol. 19, No. 4, pp 1071~1082, 1995.
- [18] E.S. Jeong, One-dimensional model of the absorption process in an air-cooled vertical plate absorber , Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 3, pp 31~41, 1995.
- [19] R. Homma, S. Fujimaki, Numerical simulation of plate absorber (Part 1: Analysis by the basic laminar model) , Tokyo Research Center, Vol. 7, pp 95~98, 1997.
- [20] I. Morioka, M. Kiyota, Absorption of water vapor into a lithium bromide water solution film falling along a vertical plate , Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineering, Vol.53, No. 485, pp 236~240, 1987.
- [21] J.H. Seo, K.N. Cho, J.K. Kim, Absorbing characteristics in a vertical falling film type absorber , 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference, Kobe, Japan, 2000.
- [22] U. Strenger, F. Setterwall, Investigations on lamellar in an absorption heat pump , Proceeding of the International

- Absorption Heat Pump Conference ASME, AES-Vol.31, pp 149~153, 1993.
- [23] H. Becker, C.H.M. Machielsen, Performance of a Compact heat and mass transfer of the plate type as an absorber , XVIIth International Congress of Refrigeration, Proceeding, Wien87, Vol. B, pp 144~109, 1987.
- [24] A. Shitara, M. Oka, M. Edera, Study on compact absorption chiller/heater (Part2: Study on compact absorber) , TOKYO GAS Co., Ltd., Energy and Environmental Technology Laboratory, Annual Technical Report Digest, Vol. 10, 2000.
- [25] Kashiwagi, T. 1985, "The activity of surfactant in high-performance absorber and absorption enhancement", Refrigeration, Vol. 60, No. 687, pp 72~79.
- [26] Hozawa, M., Inoue, M., Sato, J., Tsukada, T., and Imaishi, N., 1991, "Marangoni convection during steam absorption into aqueous LiBr solution with surfactant", J. Chem. Eng. Jpn. Vol.24, pp 209~214.
- [27] F. Setterwall, W. Yao, W. Ji, H. bjurstrom, 1991, "Heat transfer Additives in Absorption Heat pump", Proc. Absorption Heat pump Conf., '91. pp 73~78
- [28] Takahara T., Hayashida A., Yabase H., Hihara E., Saito T., 1992, " Absorption of Water Vapor into Aqueous of Lithium Bromide", Trans of JAR, Vol. 9 No 3, pp 235~245
- [29] Jung, S. H., Sgamboti, C., and Perez-Blanco, H., 1993, "An experimental study of the effect of some additives on falling film absorption", Proc. Int. Absorption Heat Pump Conf. Vol.

31, pp 49~55.

- [30] Hoffmann, L, I. Greiter, A. Wagner, V. Weiss and G. Alefeld, 1996, "Experimental investigation of heat transfer in a horizontal tube falling film absorber with aqueous solutions of LiBr with and without surfactants", Int J. Refrig. Vol. 19, No. 5, pp 331-341.
- [31] 박문수, 진성민, 박찬우, 정종수, 정봉철, "흡수식 냉동기용 흡수기의 LiBr 농도특성 측정", 공기조화냉동공학회 '99동계학술발표논문집, pp 439~444
- [32] T. Kashiwagi, Y. Kurosaki and I. Nikai, "Heat and mass diffusions in the absorption of water vapor by aqueous solution lithium bromide", Transaction of the JAR, Vol. 1, No.1, pp 89~98, 1984.
- [33] E.S. Jeong, "Approximate solution of absorption process in an air-cooled vertical plate absorber", Trans. of the Sarek, Vol.6, No. 4, pp 453~462, 1994.
- [34] T. Kashiwagi, Y. Kurosaki and H. Shishido, 1985, "Enhancement of vapor absorption into a solution using Marangoni effect", Trans. JSME B51, 1002 1009
- [35] M. Hozawa, M. Inoue, J. Sato, T. Tsukada and N. Imaishi, 1991, "Marangoni convection during steam absorption into aqueous LiBr solution with surfactant", J. Chem. Engng Japan 24, 209 214

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to express my gratitude and respect to Professor Jung-In Yoon under whose supervision this research was performed. Although extremely busy, the professor always found the time for professional discussions, continued encouragement and support. I also thank Prof. Jong-Soo Kum, Prof. Hoo-kyu Oh, Prof. Jong-Soo Kim, Prof. Kwang-Hwan Choi, Prof. Young-Soo Kim, Prof. Eun-Pil Kim, Prof. Seok-Kwon Jeong Kim of Department of Refrigeration and Air-Conditioning, Pukyong National University and Prof. Jae-Dol Kim of Dongmyong College.

Especially, I thank Mr. Choon-Geun Moon, Ho-Saeng Lee and Sung-Ho Song for their help and support. And I also thank Mr. Md. Manirul Alam Sarker, Seung-Moon Baek, Thanh-Tong Phan, Dong-An Cha, Byung-Jin Kim, Dong-Hwi Kim, Kyung-Hyun Min, Kuen-Tae Lee and Dong-Hoon Lee for giving sincere help, encouragement and valuable advices wherever I have got trouble.

I deeply appreciate my parents, sisters and brothers for their support and encouragement.

Ki-Suk Bang