

마랑고니 대류에 미치는 불응축성가스의 영향

Noncondensable Gas Effects on the Marangoni Convection

이 등 호*
D. H. Rie

Key words : Marangoni convection(마랑고니대류), Noncondensable gas(불응축성가스), Vapor absorption(증기흡수), Surfactant(계면활성제), Heat pump(열펌프)

Abstract

The study presents experimental and theoretical analysis focusing on the influence of a noncondensable gas upon the absorption enhancement that is obtained by Marangoni convection generated by the addition of the surfactant. The shadowgraph method is adopted in this visualization. As a result of absorption phenomena with shadowgraph photos, the different patterns of Marangoni convection cells are observed in accordance with the various amounts of noncondensable gas. Furthermore, nondimensional number $K(Ma/Ra)$ is introduced to calculate the value of surface tension difference theoretically for the comparison with the various amount of noncondensable gas in absorber.

기호 설명

AR : Aspect Ratio, 액막두께/폭 [—]
C : 농도 [mass%]
d : 흡수액막두께 [m]
D : 물질확산계수 [m^2/s]
g : 중력가속도 [m/s^2]
Fo : Fourier 수 [$\alpha \cdot t/l^2$]
Le : Lewis 수 [α/D]
Ma : Marangoni 수 [$\Delta\sigma \cdot d/\mu \cdot D$]
T : 온도 [K]
t : 시간 [s]

Ra : Rayleigh 수 [$g \cdot \Delta\rho \cdot d^3/\mu \cdot \alpha$]
 α : 온도전도율 [m^2/s]
 σ : 표면장력 [N/m]
K : Ma/Ra비 [$\Delta\sigma Le/g\Delta\rho(t)d^2$]
 μ : 점성계수 [$N \cdot s/m^2$]
 ρ : 밀도 [kg/m^3]
a,b,c,d,e,f : 계수

1. 서론

흡수식 열펌프는 태양열, 지열, 배열등을 직접 구동원으로 이용가능한 비프론계 공조기로서 지구환경 보존 측면에서 그 활용도가 주목되고 있으며, 특히 $H_2O/LiBr$ 계 흡수기를 대상으로 열 및 물

* 정회원, 인천대학교 산업안전공학과

질이동현상의 축진을 피하기 위한 수단으로 계면활성제(n-octanol)가 첨가되고 있다⁽¹⁾.

흡수기 내에서 냉매증기가 흡수용인 LiBr 수용액으로 흡수시 미리 첨가된 계면활성제와 흡수용액의 표면장력 차에 의한 마랑고니대류(Marangoni convection)가 발생되며, 흡수용액표면 전반에 걸쳐 계면교란현상(interfacial disturbance)을 야기 시킴으로 열펌프의 성능을 좌우하는 흡수기 효율 향상에 효과적인 방법으로 알려져있다⁽²⁾.

흡수기내의 흡수과정은 흡수용액표면에서의 열 및 물질이동이 동시에 발생하며 물질확산계수가 열 확산계수보다 현저히 작은 값($Le=D/\alpha=0.01$)을 나타내기 때문에 흡수표면에서의 냉매증기(H_2O) 흡수로 인한 농도저하 및 흡수열의 방출로 인한 표면온도상승에 따른 포화증기압의 상승으로 증기흡수능력이 저하된다. 이러한 현상을 개선하기 위해 흡수용액에 계면 활성제를 첨가시켜 증기흡수시 흡수용액과 계면활성제 사이의 표면장력 차에 의한 계면교란 효과(the effective of interfacial disturbance)가 흡수축진방법으로 이용되고 있으며 이때 발생하는 마랑고니대류는 흡수기내의 흡수표면을 교란시킴으로서 흡수용액 내부로 열 및 물질이동을 촉진시킨다.

이러한 계면교란 현상은 흡수기내의 불응축성가스(noncondensable gas) 영향을 받지 않는 조건에서의 현상이며, 흡수기내부에 불응축성 가스의 존재로 인하여 열 및 물질이동 저하 현상이 발생된다⁽³⁾.

본 연구는 계면활성제로서 n-octanol을 첨가한 $H_2O/LiBr$ 흡수용액 액막으로 증기흡수시 불응축성가스가 마랑고니대류 발생 및 증기흡수에 미치는 영향을 규명하고자 흡수액막에서 발생하는 계면교란의 거동을 샤도우그래프(shadowgraph)법을 이용하여 가시화 함과 아울러 흡수기내의 불응축성가스의 존재량을 변화시켜 흡수액막내의 계면교란의 상이점을 불응축성가스가 존재하지 않는 조건의 마랑고니수(marangoni number)와 레이리수(rayleigh number)와의 비를 기준으로 불응축성 가스 존재시 계면교란의 원동력인 표면장력차의 변화를 예측하였다.

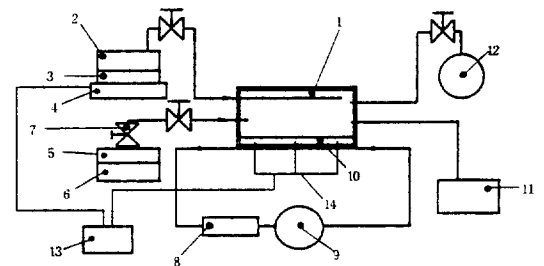
2. 실험장치 및 방법

흡수시험장치 및 증기흡수 시험부(횡×종:100mm×50mm)의 개략도를 Fig.1에 나타내었다. 흡수용액액막 두께는 $AR=0.01$ ($AR=$ 액막두께/액막폭)에 대해 실험을 행하였다. 흡수시험부는 증기흡수에 의한 흡수열을 제거하기 위하여 시험부 하부에 냉각실을 설치하였으며, 항상 일정한 냉각조건을 만족하도록 항온조(resorver)의 냉각수를 펌프로 순환시켰다.

보일러에서 생성된 냉매증기는 마이크로밸브 작동에 따라 흡수기내로 유입된다. 본 연구에서는 불응축성가스로 외기의 공기를 대상으로 삼았으며, 주입 방법으로 실리카겔로 충분히 건조시킨 후, 불응축성가스 용기와 흡수기사이의 마이크로밸브를 미세 조정하여 불응축성가스를 흡수기내로 유도한 후, 흡수실험 및 가시화 실험을 실시하였다.

흡수시험장치는 정지상태하의 흡수액막상에서 마랑고니대류 발생의 관찰이 가능한 구조로 설계하기 위해 흡수부 상, 하면은 광학용 유리를 이용하여 레이저 광선이 통과할 수 있도록 제작하였다.

마랑고니 대류의 가시화법은 Shadowgraph을 이용하였다. Shadowgraph법은 액체내의 밀도 변화에 의한 빛의 명암을 스크린 또는 필름상에 투영하여 관찰 가능한 방법으로 얻어진 가시화 사진 명암부는 밀도 변화의 2계 미분, 즉 밀도구배 변화에



1. Absorber(testsection) 2. Boiler 3. Distille dwter
4. Electronic balance 5. Noncondensable gas 6. Silica gel
7. Micro-control valve 8. Resorver 9. Circulation pump
10. Absorbent solution 11. Semiconductor pressure gauge
12. Vacuum pump 13. Personal computer 14. Themocouple

Fig.1 Experimental apparatus of absorption

비례하는 특징을 나타낸다. 따라서, 계면교란을 동반하며 열 및 물질이동이 동시에 발생하는 본 실험에 Shadowgraph법을 적용하였다. Fig.2는 가시화 실험에 사용된 Shadowgraph 광학계의 개략도를 나타내며 흡수실험 및 가시화 실험은 불용축성가스의 유무에 따라 다음 순서에 입각하여 실시하였다.

(1) 불용축성가스가 존재하지 않는 경우:

① 증기흡수부 및 냉매증발기내의 불용축성가스를 제거하기 위해 흡수시험부 용기 및 냉매증기 보일러내의 압력을 실온의 포화증기압 0.666kPa 까지 낮추어 불용축성가스가 존재하지 않는 진공상태를 유지한다.

② 흡수용액의 안정상태(온도 및 압력)를 확인한 후, 증발기의 밸브를 열어 증기흡수를 개시함과 동시에 흡수용액내의 온도 변화 및 증발기의 중량 변화 데이터를 마이크로 컴퓨터에 저장한다.

③ Shadowgraph를 이용한 가시화 실험은 흡수실험과 병행하여 냉매증기 흡수개시 직후 발생하는 마랑고니대류를 연속 촬영한다.

④ 실험시간 종료와 동시에 냉매증발기의 밸브를 닫는다.

(2) 불용축성가스 존재시

① 증기흡수부 및 냉매증발기내의 불용축성가스를 제거하기 위해 흡수시험부 용기 및 냉매증기 보일러내의 압력을 실온(294K)의 포화증기압 0.666kPa까지 낮추어 불용축성가스가 존재하지 않는 진공상태로 만든다.

② 건조실에서 건조시킨 불용축성가스(실온의 공기)를 microcontrol valve로 미세 조정하여 흡수기내로 주입한다. 불용축성가스의 주입량은 실험 조건 값에 맞추어 흡수내의 초기압과의 압력차로 환산하여 실험조건을 만족시켜 실험을 행하였다. 증발기의 밸브를 열어 증기흡수를 개시함과 동시에 흡수용액내의 온도 변화 및 증발기의 중량 변화 데이터를 마이크로 컴퓨터에 저장한다.

③ Shadowgraph를 이용한 가시화 실험은 흡수실험과 병행하여 냉매증기 흡수개시 직후 발생하는 마랑고니대류를 연속 촬영한다.

④ 실험시간 종료와 동시에 냉매증발기의 밸브를 닫는다.

실험은 위에서 언급한 순서에 입각하여 불용축성가스 유무 상태로 구별하여 불용축성 가스양을 파파메터로 변화시켜 증기흡수시간 90초로 동일하게 실험을 행하였다.

Table 1은 가시화 실험 흡수실험의 조건을 나타낸다.

3. 실험결과

3.1 흡수액막에서 계면교란의 거동

가시화 실험은 증기흡수와 동시에 실시간법(real time method)으로 계면교란을 촬영하여 불용축가스양에 따른 발생메커니즘의 차이점을 비교 검토하였다.

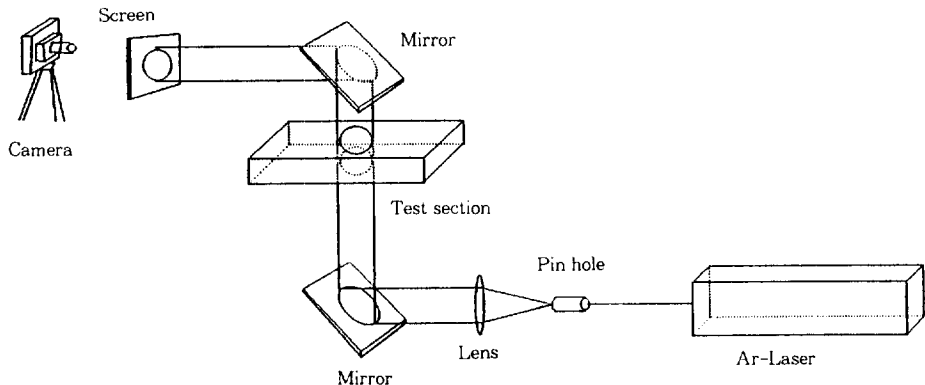


Fig.2 Shadowgraph method and direction of a light route

Table 1 Experimental condition

Article	Condition
Concentration of aqueous solution of LiBr	50 [mass %]
Concentration of adding surfactant	0.6 [mass %]
Thickness of absorbent solution	1×10^3 [m]
Initial temp. of absorbent solution	294 [K]
Temp. of refrigerant vapor	289 [K]
Cooling water temp.	294 [K]
Vapor absorption time	90 [s]
Noncondensable gas amount	0~1.08 [volume%]
Vapor absorption area	0.5×10^{-2} [m ²]
Visualization method	shadowgraph (by using Ar ⁺ laser)

사진촬영은 흡수개시로부터 5초사이는 연속 촬영 후, 10초 이후부터 90초까지는 10초 간격으로 film 상에 기록하였다.

Fig.3-(a)는 불응축성가스가 존재하지 않는 조건에서 계면교란의 가시화 결과를 나타낸다.

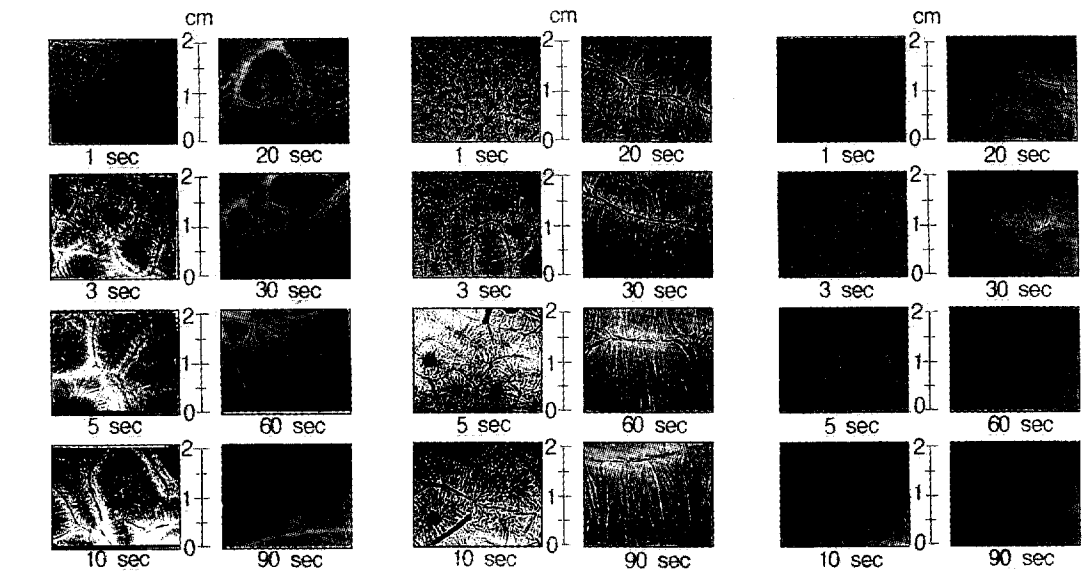
증기흡수개시 직후부터 1초 사이는 액막 표면에 미세한 마랑고니 셀(marangoni cell)에 의한 교란이 발생한다.

교란 형태는 불규칙한 타원형 및 원형이며, 셀의 크기는 직경 0.5mm 이하로 관찰되었다.

3~5초 사이의 마랑고니 대류에 의한 셀의 형태는 원형으로 발달하여 시간 경과에 따라 성장이 지속된다. 20초 이상 경과후 흡수액막 표면은 전반적으로 1~2부분의 흐름장으로 발달하며 이러한 흐름장은 본 흡수실험 조건인 90초까지 지속적으로 관찰되었다.

3.2 불응축성 가스 존재시의 계면교란 거동

흡수부에 불응축성가스가 존재하는 경우의 계면교란을 파악하기 위해 미리 건조실에서 건조시킨



(a) without noncondensable gas

(b) noncondensable gas amount, 0.12 volume%

(c) noncondensable gas amount, 0.24 volume%

Fig.3 Visualization of interfacial disturbance

불응축성 가스를 마이크로 콘트롤 밸브(micro-control valve)로 미세 조정하여 불응축성 가스량을 파라메타로 변화(0.21~1.09 volume%)시켜 3.1절에서 실시한 동일 촬영조건하에서의 가시화 실험을 행하였다. Fig.3-(b), (c)는 각각 불응축성 가스량 0.21, 0.24volume% 조건의 계면교란을 나타낸다.

마랑고니대류에 기인한 켈의 성장 및 액막 전체로 발달하는 흐름장으로서의 형성시간은 불응축성 가스가 존재하지 않은 3.1절 결과와 비교하여 불응축성 가스량 증가에 따라 늦어짐이 명확히 관찰되었다.

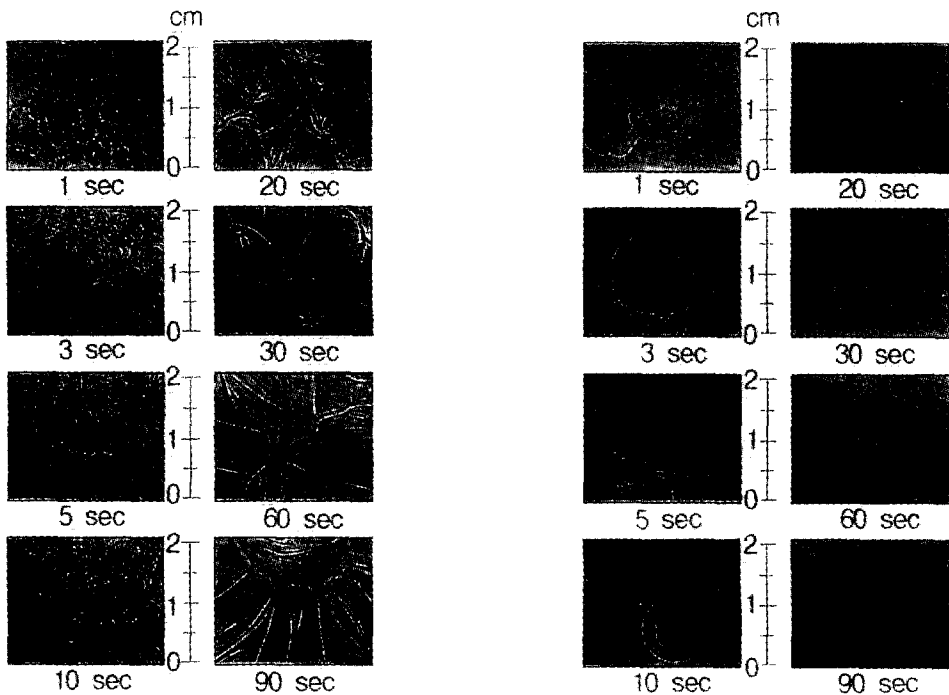
마랑고니 켈의 발생은 불응축성 가스 0.12volume% 경우, 증기흡수 개시 후 5~10초 사이에 소멸된 반면, 0.24volume%의 경우는 10초 근방까지 연속적으로 관찰 가능하였다. 이러한 결과로부터 불응축성가스량의 증가에 따라 냉매흡수시 계면활성제와 흡수용액사이의 표면장력 차에 기인된 부

정형의 마랑고니 켈이 흡수용액에서 지속적으로 유지됨을 알 수 있다.

한편 켈상의 교란이 소멸되어 흡수액막이 전체로 발달된 흐름장으로 이동하는 시간 또한 불응축성 가스량의 증가와 더불어 늦어짐을 알 수 있다.

본 실험에 사용된 Shadowgraph법의 특성으로부터 흡수초기에 있어서 흡수용액표면에서 발생된 계면교란의 명암으로 액막 내에 증기흡수촉진을 판단할 수 있다. 증기흡수에 의해 나타난 명암부는 밀도구배의 변화에 비례관계가 성립하므로 불응축성가스 존재유무에 따라 마랑고니 켈상 대류 주위 명암도의 차이로 계면교란에 의한 액막 내에 물질 이동 정도를 비교 파악할 수 있다.

Fig.4-(a), (b)는 불응축성가스량 0.60, 0.84volume% 조건 하에서 가시화 결과를 나타낸다. 가스량이 증가할수록 액막내 명암도 차이가 명확하게 나타나지 않고 있으며 흡수액막내의 교란은 매우 미약하여 켈상의 국부적인 액막 표면근방의 대류형



(a) noncondensable gas amount, 0.60 volume%

(b) noncondensable gas amount, 0.84 volume%

Fig.4 Visualization of interfacial disturbance

태로 됨을 알 수 있다. 이상의 가시화 결과를 토대로 불용축성 가스가 존재하지 않는 정상상태와 불용축성 가스 존재시의 계면교란 발생의 차이점을 Fig.5에 나타내었으며, 불용축성가스는 증기흡수시 마랑고니대류 발생을 억지시키는 요인으로 작용함을 알 수 있다.

4. 흡수액막의 온도 및 농도 변화

가시화 실험과 병행하여 증기흡수시간 90초까지 흡수액막의 평균온도 및 증기흡수량을 측정하여 흡수액막으로의 열 및 물질이동 특성에 관하여 고찰하였다. 흡수용액 온도는 흡수기내에 설치된 3분의 열전대로 측정하였으며 물질이동 특성에 대해서는 시간 경과별 증발기의 중량을 측정하여 시간 경과별 증발기의 초기 중량과의 차로 증기흡수량을 산출하였다. 불용축성 가스양을 파라메타로 흡수시간에 따른 흡수액막의 평균온도 및 평균농도를 Table 2, 3에 나타내었다. Fig.6은 불용축성가스가 존재하지 않는 조건을 기준으로 불용축성가스양의 변화

Table 2 Invariables of temperature

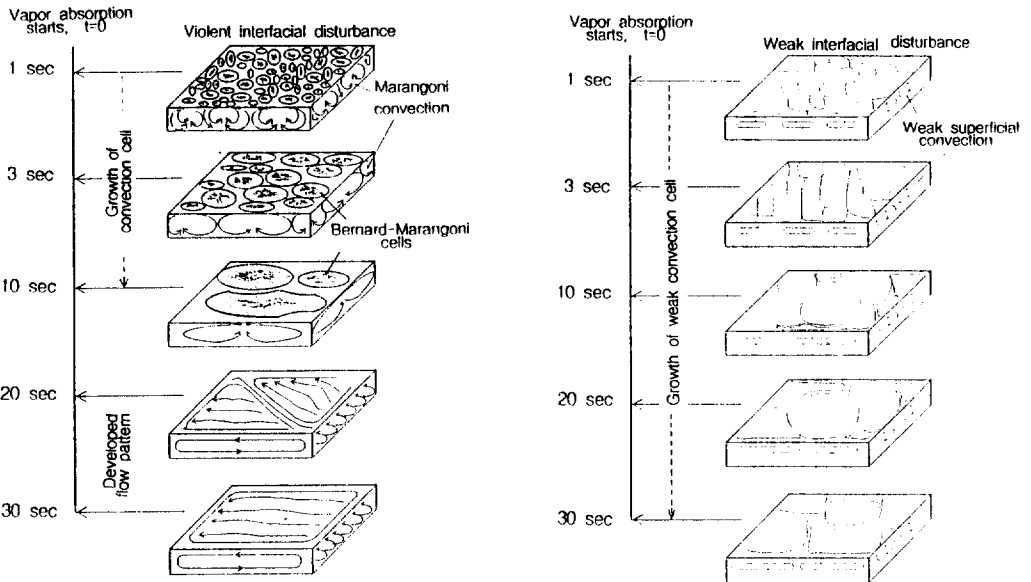
$$T(t) = a(\log_{10}t)^2 + b(\log_{10}t) + c [K]$$

volume %	a	b	c
0	0.536	1.910	294.02
0.12	0.382	1.420	294.15
0.24	0.909	-0.079	294.08
0.36	0.396	0.345	294.10

Table 3 Invariables of concentration

$$C(t) = d \cdot t^2 + e \cdot t + f [\text{mass \%}]$$

volume %	d	e	f
0	9.75×10^{-5}	-2.52×10^{-2}	50.00
0.12	5.34×10^{-5}	-1.92×10^{-2}	50.00
0.24	6.55×10^{-5}	-1.86×10^{-2}	50.00
0.36	7.32×10^{-5}	-1.62×10^{-2}	50.00



(a) without noncondensable gas

(b) noncondensable gas amount 0.6 volume%

Fig.5 Interfacial disturbance patterns

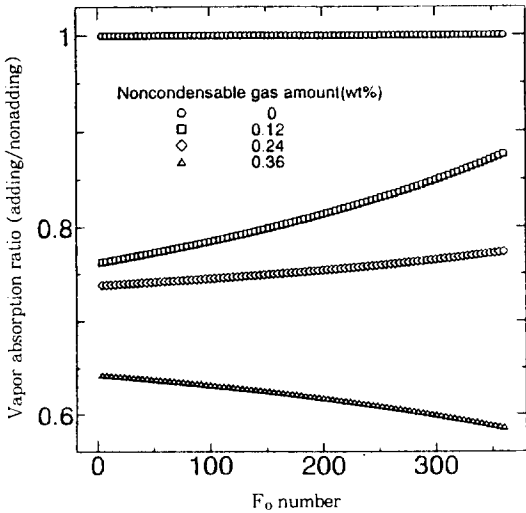


Fig. 6 Vapor absorption ratio

에 따른 증기흡수율을 나타낸다. 정상적으로 마랑고니대류가 발생하는 경우와 비교해 전반적으로 70%이하의 낮은 값을 나타냈다.

본 연구에서는 급격한 액막내 교란을 동반하는 마랑고니대류 발생을 대상으로 하므로 흡수용액 액막 1mm 깊이 변화에 따른 농도 및 온도분포는 고려 대상이 되지 않으며 마랑고니대류의 영향으로 액막의 온도 및 농도는 변화된 흡수용액의 평균값으로 표기될 수 있다. 따라서, 본 실험에서는 흡수용액 액막 내 3곳의 평균 온도값을 실시간 흡수용액 액막의 온도로 설정하였다. 증발기 중량변화에 따라 환산된 흡수용액의 농도 또한 급격한 마랑고니 대류 작용으로 평균 농도로 설정하였다. 한편, 마랑고니대류의 발생은 증기흡수시 흡수용액의 농도변화 즉, 표면농도에 따른 마랑고니수에 좌우되므로 마랑고니대류가 얼마나 활발히 흡수표면을 갱신하였는가를 파악하는 기준이 될 수 있다. 마랑고니대류에 의한 표면갱신이 흡수촉진의 기준이 될 수 있는 이유로 대류발생이 존재하지 않는다면 흡수용액표면의 농도저하 및 온도상승에 기인하여 포화압력이 상승함에 따라 흡수는 저하하게 된다.

흡수용액내에 계면활성제 첨가에 의한 계면교란 발생시는 증기흡수에 의한 농도저하에 기인하여 계

면활성제와 흡수용액 사이의 표면장력 차에 의한 마랑고니대류가 발생하게 된다. 갱신되는 흡수액막 표면의 온도 및 농도는 마랑고니대류에 의해 직접적으로 지배받게 되므로 실험에 의해 얻어진 온도 및 농도의 변화가 내포된 흡수액막의 밀도 변화를 동반한 대류가 액막내에서 발생된다.

마랑고니대류 발생시는 흡수표면의 저농도를 용액 깊이방향의 고농도로 바꾸어주는 물질이동축진과 아울러 표면의 흡수열을 마랑고니대류가 흡수기 하부의 열교환기로 열의 이동을 촉진시킨다. 본 연구에서는 마랑고니대류 발생에 불용축성가스가 어떠한 영향을 미치는가에 대한 기초 연구로서 마랑고니대류 발생하는 한도내를 대상으로 삼았다. 본 연구는 불용축성 가스가 존재하여도 마랑고니대류는 발생하는 것이 가시화 결과 확인되었으므로 흡수촉진의 관건이라 할 수 있는 마랑고니대류의 구동원인 표면장력의 변화추이를 밝히는 것으로 귀결된다.

흡수액막 표면의 밀도는 온도상승 및 농도저하에 의해 액막내의 밀도보다 낮은 값을 나타내므로 흡수액막에서 발생하는 대류의 강도를 Table 2, 3에서 실험적으로 산출된 온도 및 농도식을 기초로 Marangoni 수 (1)을 계산하였으며, 밀도 변화에 기인한 대류의 강도를 Rayleigh 수 (2)로 계산하여 불용축성가스 존재시의 표면갱신율의 변화를 비교 검토하였다⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾.

$$Ma = \Delta\sigma \cdot d / \mu \cdot D \tag{1}$$

$$Ra = g \cdot \Delta\rho \cdot d^3 / \mu \cdot \alpha \tag{2}$$

본 해석에서는 표면장력 차에 기인하는 마랑고니수와 밀도 변화에 기인하는 레이리수를 도입하여 마랑고니대류의 실제 강도로 표기할 수 있는 무차원수 K(Kapa)로 나타내었다. 식 (3)에서 흡수용액의 표면과 흡수용액 시간 변화에 따른 평균 밀도와의 밀도 차는 실험에서 얻어진 흡수시간에 따른 온도 및 농도의 실험식(table 2&3의 noncondensable gas amount=0)으로부터 산출가능하며, 계면활성제와 흡수용액 간의 표면장력 차는 불용축성가스가 존재하지 않는 마랑고니대류 발생시의 초기값(20dyne/cm)⁽⁸⁾으로 계산하여 불용축성가스 존

재시 증기 흡수와 마랑고니대류 발생기동력인 표면장력 차의 변화를 산출하고자 한다. 따라서, 식 (3)은 불응축성가스가 존재하지 않는 조건하에서 시간 변화에 따른 K의 계산 식을 나타낸다.

$$K(t) = \Delta\sigma Le / g \Delta\rho(t) d^2 \quad (3)$$

식 (3)에서 $\Delta\rho(t)$ 는 불응축성가스가 존재하지 않는 조건하에서 흡수된 흡수용액의 평균농도 및 평균온도를 기준으로 시간변화에 따른 흡수용액의 밀도차로 환산하여 구한다. 비정상상태하에서 변동되는 표면장력값은 아직 보고되어 있지 않으므로, 우선적으로 본 해석에서는 불응축성가스가 존재하지 않는 비정상상태하에서의 K값을 식 (3)으로 구하였다.

Fig.7은 식 (3)을 이용하여 불응축성가스가 존재하지 않는 상태 (불응축성가스량 = 0 volume% 조건)의 흡수실험에서 얻어진 실시간 농도 및 온도 변화를 고려한 계산 결과를 Fo의 변화에 따라 나타낸 그래프이며, 이 K값은 실시간 t를 변수로 다음에서 제시하는 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$K(t) \cong 10^a,$$

$$a = 0.18724(\log t)^2 - 1.29905(\log t) + 1.70559 \quad (4)$$

본 계산으로부터 불응축성가스가 존재하지 않는 조건에서 K의 범위는 0.27~50.03이 되며 가시화 실험을 통하여 이 범위에서는 정상적인 마랑고니대류가 발생함을 알 수 있다.

또한, 비정상 상태 하에서 불응축성 가스 존재시 마랑고니대류의 구동력인 표면장력 차의 평균값은 식 (3)으로부터 식 (5)로 표기하여 이미 계산된 불응축성가스가 존재하지 않은 상태의 마랑고니대류 발생 패턴은 동일하다는 가정 하에서 불응축성 가스가 존재하는 실험조건에서 밀도변화를 기준으로 표면장력 차의 값을 추정계산하였다.

$$\Delta\sigma \cong 1/t \left[\int_0^t K(t) \cdot \Delta\rho(t) dt \right] g \cdot d^2 / Le \quad (5)$$

Fig.8은 식 (5)로 계산된 결과를 나타내며 불응축성 가스량의 변화에 따라 마랑고니 대류의 발생 구동원이 표면장력 차는 가스량의 증가와 더불어 감소하며, 증기흡수를 동반한 마랑고니 대류의 효과적인 발생은 기대하기 어렵게 됨을 알 수 있다.

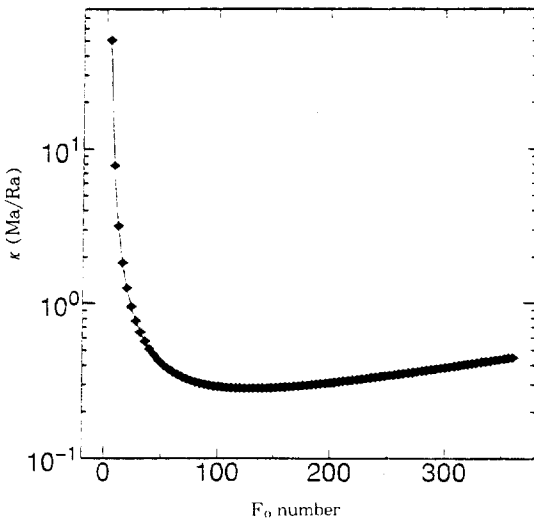


Fig.7 The variation of κ along absorption time, time without noncondensable gas

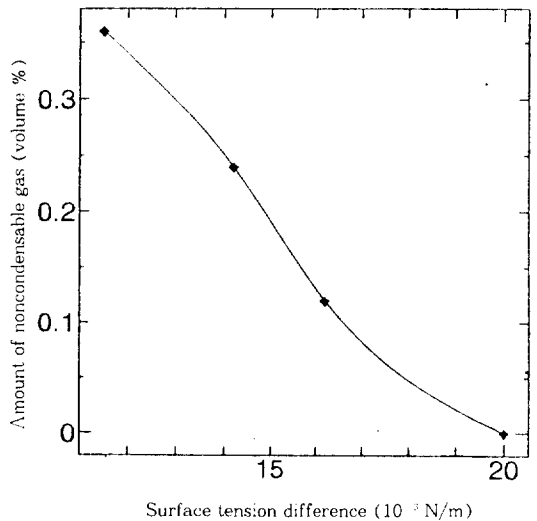


Fig.8 The value of surface tension difference for various amount of noncondensable gas

5. 결 론

흡수식 열펌프의 흡수기내 흡수현상을 파악하기 위해 정지한 흡수용액 액막으로 수증기 흡수과정시 불응축성 가스가 계면교란 현상에 미치는 영향을 파악하기 위해 가시화 실험 및 흡수실험 결과를 다음에 나타낸다.

1) 불응축성가스가 존재하지 않는 조건에서의 계면교란은 증기흡수 개시 직후 부터 미세한 마랑고니셀이 발생하며, 그 형태는 부정형의 타원형 또는 원형이며, 시간경과에 따라 셀 크기는 성장하며 그 수는 감소한다.

2) 불응축성가스 존재시, 흡수초기의 미세한 계면교란은 관찰되지 않으며 마랑고니셀의 성장속도도 늦어지는 경향을 나타낸다.

3) 불응축성 가스가 0.60 volume% 이상이 존재하는 경우, 흡수초기 부터 마랑고니셀을 이룰만한 대류발생은 존재하지 않으며 흡수표면상에서만 매우 미약한 망상형태의 계면교란이 발생한다.

4) 미랑고니 대류의 실질적인 강도를 나타내는 Ma 수와 흡수시 용액의 평균밀도변화에 의한 Ra 수와의 비를 $K(Ma/Ra)$ 로 정의하여 대류의 거동을 종합적인 관점으로 파악한 결과 불응축성가스가 존재하지 않는 조건의 K 값은 0.27~50.03을 나타내었다.

5) 불응축성가스 가스량이 0.12~0.36volume% 조건에서 표면장력 차는 불응축성가스가 존재하지 않는 조건의 표면장력 차와 비교하여 81%~58% 감소 값을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. T. Kashiwagi, 1985, "The activity of surfactant in high-performance absorber and absorption enhancement", J. A. R., Vol. 60, No. 687, pp. 72.
2. D. H. Rie and T. Kashwagi, 1991, "Computer simulation of vapor absorption enhancement into LiBr/H₂O absorbent by Marangoni convection", JSME international journal, Vol. 34, No. 3, pp. 355.
3. 李東浩 外3人, 1992, "蒸氣吸收時 界面活性劑 液滴間에 發生하는 마랑고니 對流舉動의 可視化", 空氣調和 冷凍工學 論文集 4卷2號, pp. 65~71.
4. D. H. Rie and T. Kashiwagi, 1991, "Experimental study of steam absorption in accordance with interfacial turbulence into aqueous solution", JSME international journal, Vol. 34, No. 4, pp. 502.
5. Imaishi, N., 1989, "Interfacial turbulence during the absorption of steam by aqueous solution", FVSJ, Vol. 9, No. 34, pp. 99.
6. P. Cerisier., 1987, "Stability of roll and hexagonal patterns in Benard-Marangoni convection", Phys. Fluid, Vol. 30, No. 4, pp. 954.
7. P. Ceriser., 1987, "Structure disorder in Benard-Marangoni convection", J. Physique, Vol. 48, pp. 569.
8. J. H. Lichtenbelt, 1986, "Marangoni convection and mass transfer from the liquid to the gas phase under microgravity conditions", Naturwissenschaften, Vol. 73, pp. 356.
9. T. Kashiwagi, "Basic Mechanism of Absorption heat and mass transfer enhancement by the Marangoni effect", IEA Newsletter, Vol. 6, Dec. 88, pp. 2~6.

1. T. Kashiwagi, 1985, "The activity of surfactant in high-performance absorber and