

# 계면활성제를 이용한 흡수식 열펌프 성능향상에 관한 수치 해석 연구

이찬호 · 하종주 · 이재철 · 전병희 · 이기봉 · 김성현<sup>†</sup>

고려대학교 화학공학과

(2001년 8월 23일 접수, 2001년 12월 28일 채택)

## Numerical Study for Performance Enhancement of Absorption Heat Pump by Surfactants

Chan Ho Lee, Jong Joo Ha, Jae-Cheol Lee, Byung Hee Chun, Ki-bong Lee and Sung Hyun Kim<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

(Received 23 August 2001; accepted 28 December 2001)

### 요 약

계면활성제 첨가에 의해 흡수식 열펌프의 성능이 향상되는 것은 이미 알려져 있으며 이러한 현상은 계면활성제에 의한 마란고니 효과가 주된 원인인 것으로 생각되어 지고 있다. 그러나 마란고니 대류가 발생하는 정확한 mechanism은 밝혀지지 않은 상태이다. 본 연구에서는 마란고니 대류에 의한 동적 박막 흡수기 내에서 일어나는 열 및 물질전달 성능 향상에 관한 연구를 수학적 모델링 및 수치모사를 이용하여 수행하였다. 기존의 정적 액막을 대상으로 한 수학적 모델 보다 개선된 동적 박막을 대상으로 하는 모델을 개발하였으며 개발된 수학적 모델은 동적 박막내부에서의 속도분포, 온도 분포 및 용질의 농도 분포를 예측할 수 있음을 확인하였다. 그리고 이 모델을 적용한 수치모사를 통해 마란고니 대류가 흡수기내의 열 및 물질전달에 미치는 영향을 분석하였다. 연구 결과로부터 계면활성제에 의해 마란고니 대류가 일어나는 경우 흡수기내의 열 및 물질전달 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 흡수기의 운전 조건인 초기 용액의 온도, 농도 등이 마란고니 대류 생성에 미치는 영향을 분석하기 위해 각각의 운전 조건에서 임계 마란고니 수를 구했으며 그 결과로부터 초기 용액의 온도와 농도가 낮을수록 임계 마란고니 수가 작아지고 따라서 이러한 조건에서 대류가 쉽게 유발되는 것을 알 수 있었다.

**Abstract** – In absorption refrigeration system, it is well known that water vapor absorption into aqueous lithium bromide (LiBr) solution is enhanced by addition of surfactants. The Marangoni effect plays a role but its mechanism is not clearly understood yet. In the present study, the enhancement of heat and mass transfer due to Marangoni effect was investigated using mathematical modeling and numerical simulation in the falling film type absorber. We have developed an advanced Marangoni convection model which is able to predict the velocity, temperature and composition distribution in the falling film type absorber. Based on the model, the effects of Marangoni convection on the heat and mass transfer in the absorber have been examined. As results, the efficiency of heat and mass transfer has been increased due to Marangoni effect. And the sensitivity analysis of different operating conditions for Critical Marangoni Number has been carried out. The Critical Marangoni Number has decreased as the inlet temperature and composition of the water/LiBr solution has decreased. In other word, these conditions of solution can favor instability of the falling film.

Key words: Falling Film Type Absorber, Numerical Simulation, Surfactants, Marangoni Convection

### 1. 서 론

오존층 문제에 대한 대안으로 제시된 몬트리얼 의정서(1987)와 지구 온난화 문제의 대안으로 제시된 교토 의정서(1997) 등에 의해 자연냉매인 물, 암모니아 등을 사용하는 흡수식 열펌프에 대한 관심이 높아졌다. 대부분의 에너지 변환 장치들은 사용되지 못하고 버려지는 에너지를 다시 회수하여 사용할 수 없으므로 에너지를 효율적으로 사용하는 데 한

계가 있는 반면 열펌프의 경우 버려지는 에너지를 회수하여 재활용하는 것이 가능하므로 에너지를 효율적으로 사용할 수 있다. 흡수식 열펌프는 Fig. 1의 (b)와 같이 응축기와 증발기 그리고 흡수기와 발생기로 구성되어 있으며 냉매는 저압의 증발기에서 증발하고 고압의 응축기에서 응축한다. 그러나 Fig. 1의 (a)와 같은 압축식 열펌프에서 전기에너지로 구동되는 압축기에 의해 냉매기체가 압축되는 반면 흡수식 열펌프의 경우 냉매기체를 흡수기에서 용매에 흡수시킨 후 이 용액을 펌프를 이용하여 고압의 분리기로 보내 이곳에서 기체 냉매를 분리해냄으로써 고압의 냉매 기체를 얻는다. 이때 흡수기에서는 흡수열( $Q_a$ )이 발생하고 발생기에는 외부로부터 열량( $Q_g$ )이 공급되어야 한다. 고압의 냉

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: kimsh@korea.ac.kr

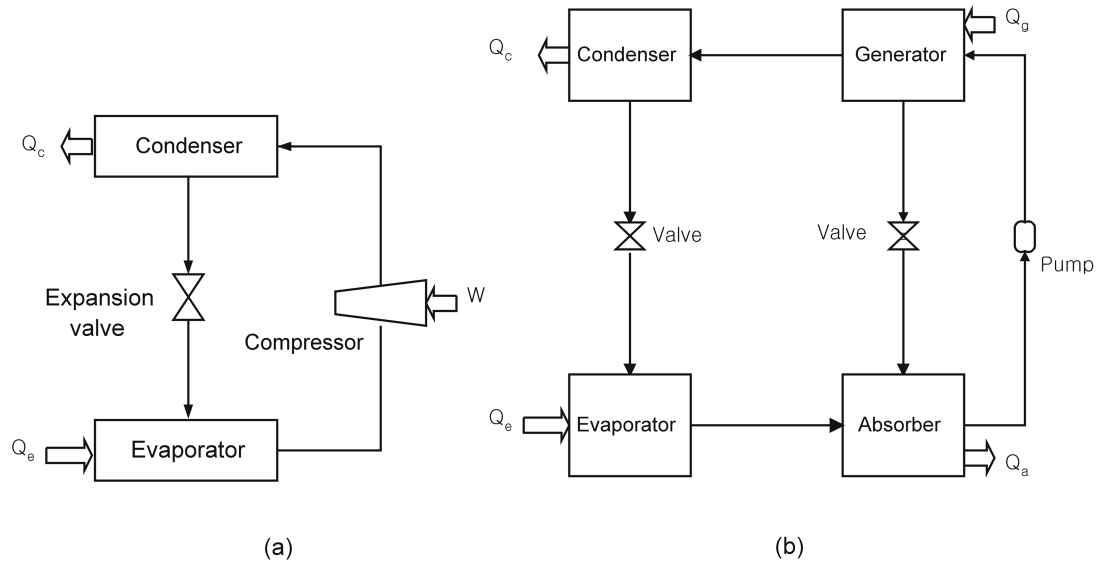


Fig. 1. Comparison of (a) vapor compression heat pumps and (b) absorption heat pumps.

매 기체가 응축되면 응축열( $Q_c$ )이 발생하게 되는 데 이 열을 활용하는 경우가 열펌프이고 반대로 저압 상태의 증발기에서 냉매가 증발하면서 외부의 열( $Q_e$ )을 흡수하는 것을 활용하는 경우가 흡수식 냉동기이다. 흡수식 열펌프의 성능 향상을 위해 많은 연구가 다양한 방법으로 진행되어 왔다. 그 중에서도 특히 6-methyl-2-heptanol, 2-heptanol과 같은 계면활성제를 소량 첨가하였을 때 장치의 성능이 13.4-31.7% 증가하는 것이 보고된 이후 이와 같은 계면활성제를 이용한 흡수식 열펌프의 성능향상에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1]. 기존의 연구 결과로부터 계면활성제에 의한 흡수식 열펌프의 성능향상은 흡수기내에서 일어나는 마란고니(Marangoni) 대류에 의한 열 및 물질전달 향상이 그 원인인 것으로 밝혀졌으나 이러한 대류 생성에 대한 정확한 메커니즘과 성능향상을 극대화 할 수 있는 계면활성제의 종류 그리고 첨가해야 하는 계면활성제의 최적 양이 얼마인지 등은 알려지지 않았고 이에 관한 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 계면활성제에 의한 마란고니 대류가 일어나는 경우 유체의 유동은 대류에 의해 복잡해지고 이로 인해 열 및 물질전달 거동 또한 매우 복잡해지는 것으로 알려져 있다. 따라서 이러한 유동 및 전달현상에 대한 정교한 수학적 모델개발 및 수치모사를 통한 특성분석은 실험적 연구와 함께 수행되어야 한다. 지금까지 몇몇 연구자들에 의해 마란고니 대류에 대한 수학적 모델링과 수치모사가 수행되었으나 기존 연구의 경우 실제 흡수식 열펌프의 흡수기내에서는 일어나는 동적 액막(dynamic film or falling film)-중력에 의해 용액이 열교환기 평판을 흘러내리면서 형성되는 액막-을 대상으로 하지 않고 계산의 편리성을 위해 정적 액막(static film)-흡수가 일어나는 면만 외부에 노출되어 있고 나머지 경계는 벽으로 둘러싸여 흐름이 없이 형성되는 액막-을 대상으로 연구를 수행하였으며 대표적인 예로 Hozawa[2], Daiguji[3], Grossman[7] 등이 정적 액막을 대상으로 마란고니 대류에 대한 수치모사 연구와 실험적 연구를 수행한 바 있다. 동적 액막을 대상으로는 Kim[6]과 Ji[4] 등이 마란고니 대류에 대한 연구를 수행하였으나 전자의 경우 실험적 연구에 그쳤고 후자의 경우 선형안정성 분석 연구에 그치는 등의 제한된 결과를 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 기존 모델을 바탕으로 동적 액막 내에서 일어나는 마란고니 대류를 모사하기 위한 수학적 모델을 개발하였고 이 모델을 이용하여 흡수기의 열 및 물질전달에 마란고니 대류가 미치는 영향을 분석하였다. 뿐만 아니라 실제 시스템에 포함된 흡수기의 경우 다양한 조건으로 운전하는 것이 가능하다. 따라서 마란고

니 대류에 의한 흡수기 성능향상을 최대로 하기 위해서는 흡수기 조건을 대류가 생성되기에 가장 적합한 최적조건으로 유지하여야 한다. 본 연구에서는 이를 위한 기초 연구로 흡수기 각 운전조건에서의 임계 마란고니수를 구함으로써 운전조건이 마란고니 대류 생성에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 이 론

### 2-1. 지배방정식 및 경계조건

본 연구에서는 마란고니 대류를 모델링하기 위해 흡수기에서 생성되는 유하 액막의 개략도를 Fig. 2와 같이 정의하였다. 용액은 평판형 열교환기에 얇은 막을 형성하며 y 방향으로 충분한 속도를 가지고 흘러내리게 되므로 평판형 열교환기의 너비 방향인 z 방향으로의 흐름은 없다고 가정하고 열 및 물질전달은 기-액 경계면에 수직인 x 방향으로 지배적으로 일어나므로 마란가지로 z 방향으로의 열 및 물질전달은 무시할 수 있다고 가정하여 2차원 수치모델을 대상으로 연구를 수행하였다. 그리고 이러한 비정상상태 2차원에서의 일반적인 연속식과 운동방정식 그리고 에너지 및 물질수지식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho g_x \quad (2)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g_y \quad (3)$$

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} = D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

본 연구에서 대상으로 하는 시스템을 모델링하기 위해 가정을 아래와 같이 도입하였다[2].



로 잘 알려진 Patankar가 제시한 SIMPLE 알고리즘[5]을 적용하여 수치 모사하였고, 다음으로 온도 및 농도 장을 구하기 위해서는 다음의 순서에 따라 계산하였다[8].

- (1) 용액의 초기온도  $T_0$  일 때의 평형조성  $w_e$ 를 평형관계[식(16)]로부터 구한다.
- (2) 기-액 계면에서의 에너지 수치 관계[식(17)]을 이용하여 평형 온도  $T_e$ 를 구한다.
- (3) 온도  $T_e$  일 때의 평형조성  $w_e$ 를 평형관계[식(16)]로부터 구한다.
- (4) 평형 온도  $T_e$ 와 평형조성  $w_e$ 가 수렴할 때까지 (1)-(3) 과정을 반복 계산한다.
- (5) 흡수기 길이방향(y 방향)으로 one step 전진하여 (1)-(4) 과정을 반복 계산한다.

본 연구의 수치모사에서는  $20 \times 500$ 의 일정한 간격의 격자를 사용하였고 기준상태 계산을 위해 사용한 물성값과 무차원수를 Table 1에 정리하였다[3].

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 수치모사에 의한 마란고니 대류 가시화

먼저 마란고니 대류의 발생 여부를 확인하기 위해 마란고니수가 0 일 때와 10일 때 그리고 마지막으로 100일 때의 흡수기내의 유하 액막의 속도장을 계산하여 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 먼저 마란고니수가 0 일 때는 계면활성제가 첨가되지 않은 경우로 이것은 일반적으로 알려진 흡수기내의 용액의 흐름이 형성되는 경우이다. 그림에서 이 경우는

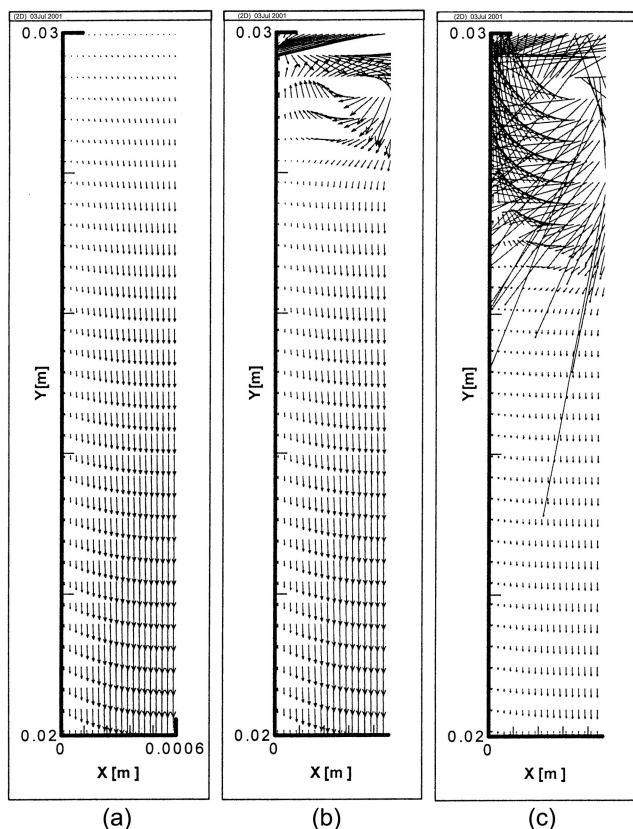


Fig. 3. Flow pattern: (a)  $Ma_T=0$  and  $Ma_w=0$ , (b)  $Ma_T=10$  and  $Ma_w=10$ , (c)  $Ma_T=100$  and  $Ma_w=100$ .

대류가 관찰되지 않고 대신 벽면에서의 속도가 0이고 기-액 계면에서 유속이 가장 빠른 포물선 형태의 속도 분포가 얻어지는 것을 알 수 있었다. 그러나 이와 달리 마란고니수가 0이 아닐 때( $Ma_T=10$  and  $Ma_w=10$ )는 유하 액막 상부에 대류가 발생하는 것을 관찰할 수 있었으며 마란고니수가 커지면( $Ma_T=100$  and  $Ma_w=100$ ) 더 급격한 대류가 발생하는 것을 볼 수 있었다. 이와 같은 대류가 발생하는 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다. 계면활성제가 없는 경우에는 기-액 계면에서 기체 상에 의한 유하 액막으로의 운동량 전달은 무시할 수 있을 정도로 작지만 계면활성제를 주입하는 경우 기-액 계면에서 온도 및 농도 차로 인해 표면 장력 구배가 생기게 되고 이로 인해 전달되는 운동량은 무시할 수 없을 정도로 커지게 된다. 따라서 유동장의 경계조건이 바뀌게 되고 중력 등의 영향이 작은 유하 액막 상부에서는 대류가 형성되게 되는 것이다. 특히 유하 액막에서의 마란고니 대류는 중력 등의 다른 영향에 의해 상부에서 발생하는 대류가 지속되지 못하고 빠르게 소멸된다는 실

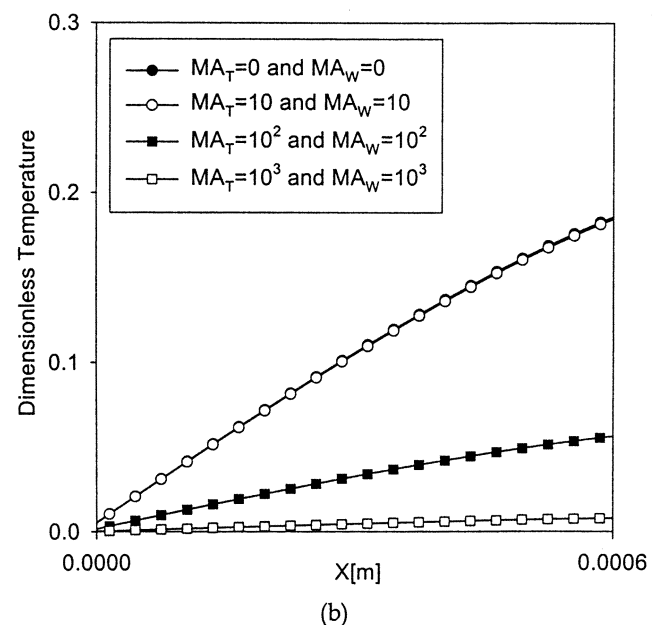
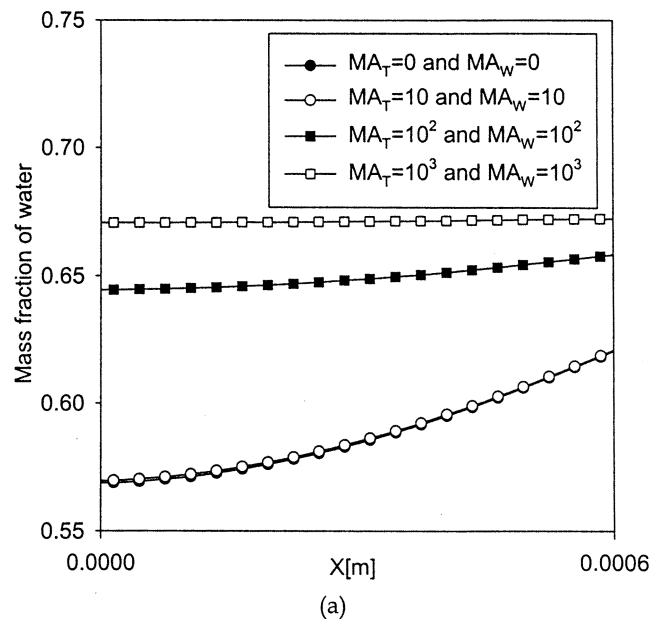


Fig. 4. Profiles of mass fraction of water(a) and temperature(b) at the exit of absorber.

험적 사실을 Kim 등이 보고하였는데 본 연구에서 수행한 수치모사의 결과도 이러한 유하 액막에서의 마란고니 대류의 특성을 잘 나타내는 것을 확인할 수 있었다[6].

### 3.2. 마란고니 대류가 열 및 물질전달에 미치는 영향

계면활성제에 의한 마란고니 대류가 흡수기내의 열 및 물질전달에 미치는 영향을 분석하기 위해 개발한 수학적 모델을 이용하여 흡수기 내부에 대한 수치모사를 수행하였다. 3-1에서 언급하였듯이 유하 액막 상부에서 대류가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 대류가 발생할 경우 유하 액막 내부로의 열 및 물질전달이 확산에 의해 지배적으로 일어나는 것이 아니라 대류에 의해 지배적으로 일어날 것으로 예상하였고 이럴 경우 대류가 발생하지 않아 확산에 의해 지배적으로 일어나는 경우보다 열 및 물질전달이 활발하게 일어날 것으로 예상하였다. 이것을 확인하기 위해 마란고니수에 따른 흡수기 출구에서의 농도 및 온도 분포를 수치모사를 통해 구하였고 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4를 통해 알 수 있듯이 마란고니수가 0-10일 때는 대류가 전혀 발생하지 않거나 발생하더라도 그 효과가 미미하여 유하 액막 내부에서 형성되는 온도 및 농도 장이 확산에 의해 지배적으로 일어난 열 및 물질전달 과정을 통해 결정되었다. 그러나 마란고니수가 10-10<sup>2</sup> 일 때는 급격한 대류가 발생하게 되고 이로 인해 대류에 의해 지배적인 열 및 물질전달이 일어나 흡수기 출구에서는 거의 균일하고 높은 온도 및 농도 장이 형성되는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과로부터 계면활성제에 의해 일어나는 마란고니 대류는 흡수기 내의 열 및 물질전달 성능을 향상시키는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.3. 흡수기 조건이 마란고니 대류 생성에 미치는 영향

3-2의 결과로부터 마란고니 대류가 발생하는 경우의 흡수기내 열 및 물질전달 성능이 대류가 발생하지 않을 때보다 우수함을 알 수 있었다. 따라서 계면활성제를 주입함으로써 흡수식 열펌프의 성능향상이 가능할 것으로 기대된다. 그러나 계면활성제 주입에 의한 흡수식 열펌프의 성능향상을 극대화하기 위해서는 흡수식 열펌프 특히 흡수기의 운전조건을 성능 향상 효과가 극대화 될 수 있도록 최적화 해주어야 할 필요가 있다. 이를 위해 본 연구에서는 먼저 흡수기의 초기 온도 및 초기 농도가 마란고니 대류 생성에 미치는 영향을 분석하였다. 수치모사를 통해 각각의 운전조건에서 마란고니수를 변화시켜가면서 흡수기 출구에서의 온도 및 농도 장을 구하여 그 거동이 현저하게 달라지는 지점을 찾아 그 때의 마란고니수를 임계 마란고니수로 정하였고 운전조건의 변화에 따라 이 값이 어떻게 변하는 지를 구하여 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 초기 농도와 온도가 낮아질수록 임계 마란고니수가 작아지는 것을 알 수 있는데 임계 마란고니수가 작아지면 그만큼 시스템이 불안정해지게 되고 대류가 쉽게 유발되는 것을 의미한다. 따라서 초기 온도와 농도 모두 낮을수록 대류가 쉽게 유발되는 것을 알 수 있었고 이러한 결과를 통해 흡수가 활발하게 일어나는 조건일수록 대류가 유발되기도 쉽다는 것을 알 수 있었으며 그 이유는 흡수가 잘 일어나는 조건일수록 계면에서의 농도와 온도변화가 크기 때문에 표면 장력 구배에 의한 응력이 커지기 때문인 것으로 생각된다.

## 4. 결 론

흡수식 열펌프의 흡수기내에서 일어나는 마란고니 대류에 대한 수학적 모델링 및 수치모사연구를 수행하였다. 기존의 연구들이 주로 고정되어 있는 정적 액막을 대상으로 연구를 진행해온 것과 달리 본 연구에서는 실제 흡수식 시스템에 적용되고 있는 동적 액막을 대상으로 마란고니 대류에 대한 모델링 및 수치모사 연구를 수행하였다. 수치모사 연구를 통해 동적 액막에서 발생하는 마란고니 대류에 대한 가시화 결과

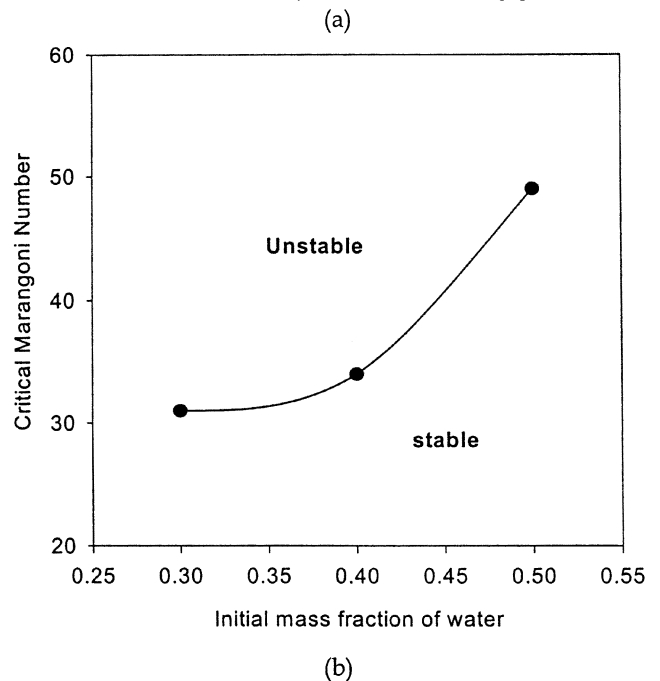
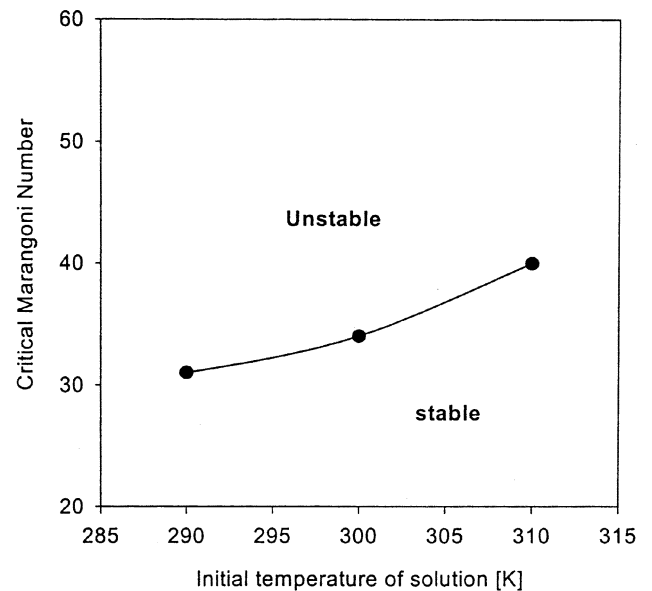


Fig. 5. The effect of initial temperature of solution (a) and mass fraction of water (b) on the critical Marangoni number.

를 얻을 수 있었는데 이는 기존 연구에서는 실험적으로만 관측되었던 것으로 본 연구를 통해 얻은 수치모사 결과가 실험으로 알려진 대류의 특성과 잘 일치하는 것을 알 수 있었다[6]. 다음으로 계면활성제에 의한 마란고니 대류가 흡수기내의 열 및 물질전달에 미치는 영향을 살펴보았다. 대류가 발생하지 않을 때 액막 내의 열 및 물질전달은 확산에 의해 지배적으로 일어나는 것을 알 수 있었고 대류가 발생하는 경우에는 대류에 의해 열 및 물질전달이 지배적으로 일어나는 것을 알 수 있었다. 두 경우를 비교하였을 때 대류에 의해 급격한 유동이 발생하는 경우의 열 및 물질전달 성능이 우수함을 알 수 있었다. 또한 계면활성제에 의한 흡수식 열펌프의 성능향상을 극대화하기 위한 기초 연구로 흡수기의 운전조건이 마란고니 대류 발생에 미치는 영향을 살펴보았다. 흡수기 운전조건 변화에 따른 임계 마란고니수의 변화로부터 흡수기로 유입되는 용액의 초기 농도와 온도가 낮을수록 대류가 잘 형성되는 것을

알 수 있었다. 본 연구를 통해 개발된 마란고니 대류에 대한 수학적 모델은 기존의 정적 액막을 대상으로 한 모델들의 제약성을 극복하고 동적 액막을 대상으로 하였다는 장점을 가지고 있는 반면 냉각수의 효과나 계면활성제의 물질전달 효과 등을 고려하지 못한 제약성을 가지고 있다. 따라서 이를 위한 연구 등을 추후에 진행할 예정이며 실험적 연구 또한 병행할 예정이다.

## 감 사

본 연구는 유변공정연구센터(한국과학재단 ERC)의 연구지원에 의해 수행되었으며 이에 깊이 감사드립니다.

## 사용기호

$C_p$	: heat capacity of solution [J/g · °C]
$D$	: diffusivity of solution [m <sup>2</sup> /s]
$g$	: gravitational acceleration [m/s <sup>2</sup> ]
$\Delta H$	: heat of absorption [J/kg]
$k$	: thermal conductivity of solution [J/s · m · °C]
$L_0$	: width of absorber [m]
$p$	: pressure [Pa]
$t$	: time [sec]
$T$	: temperature of liquid [K]
$T_0$	: initial temperature of liquid [K]
$u$	: velocity of liquid in x direction [m/s]
$v$	: velocity of liquid in y direction [m/s]
$w$	: mass fraction of water [kg of water/kg of solution]
$w_0$	: initial mass fraction of water [kg of water/kg of solution]

$x$	: coordinate in the horizontal direction [m]
$y$	: coordinate in the vertical direction [m]

## 그리스 문자

$\mu$	: viscosity of solution [kg/m · s]
$\rho$	: density of solution [kg/m <sup>3</sup> ]
$\delta$	: thickness of falling film [m]
$\sigma$	: surface tension [N/m]

## 참고문헌

1. Chi, C. W., Macriss, R. A. and Rush, W. F.: U. S. Patent, 3609087 (1971).
2. Hozawa, M., Inoue, M., Sato, J., Tsukada, T. and Imaishi, N.: *J. of Chem. Eng. of Japan*, **24**, 209(1991).
3. Daiguji, H., Hihara, E. and Saito, T.: *Int. J. of Heat And Mass Transfer*, **40**, 1743(1997).
4. Ji, W., Bjurström, H. and Setterwall, F.: *Journal of Colloid and Interface Science*, **160**, 127(1993).
5. Patanka, S. V.: "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," McGraw-Hill, New York, NY(1980).
6. Kim, K. J., Berman, N. and Wood, B.: Proc. of the Int. Absorption Heat Pump Conference(IAHPC), 41(1994).
7. Koenig, M. S., Grossman, G. and Gommed, K.: Proc. of the Int. Sorption Heat Pump Conference(IAHPC), 359(1999).
8. Lee, C. H., Kim, S. H. and Hyun, J. C.: *Clean Technology*, **7**(2) 151 (2001).