

온도차 마랑고니 대류에 의한 열전달 촉진에 관한 연구

김 종 윤[†], 이 동 호^{*}, 박 종 화^{**}, 최 국 광^{***}

인하대학교 기계공학과 대학원, ^{*}인천대학교 안전공학과, ^{**}인천대학교 안전공학과 대학원, ^{***}인천대학교 기계공학과

A study of Heat Transfer Enhancement by Temperature Driven Marangoni Convection

Jong Yoon Kim[†], Dong Ho Rie^{*}, Jong Hwa Park^{**}, Guk Kwang Choi^{***}

Graduate School of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

^{}Department of Safety Engineering, University of Incheon, Incheon 402-749, Korea*

*^{**}Graduate School of Safety Engineering, University of Incheon, Incheon 402-749, Korea*

*^{***}Department of Mechanical Engineering, University of Incheon, Incheon 402-749, Korea*

(Received June 7, 2002; revision received August 13, 2003)

ABSTRACT: The primary object of this study is to obtain a basic knowledge of heat transfer enhancement mechanism as affected by temperature driven Marangoni convection.

Experiments is achieved to visualize the enhanced heat transfer phenomena by the effect of Marangoni convection through the laser holographic interferometry. Also Nusselt Number is introduced for the relation of Marangoni Number.

Key words: Marangoni convection(마랑고니 대류), Holography interferometry(홀로그래피 간섭계), Heat transfer enhancement(열전달 촉진)

기 호 설 명

<p>A : 표면장력온도계수 [N/m²°C]</p> <p>d : 열판의 크기 [m]</p> <p>dn/dT : 굴절률의 변화</p> <p>F_0 : Fourier 수</p> <p>k : 열전도율 [W/m°C]</p> <p>L : 길이 [m]</p> <p>l : 대상물체의 길이 [m]</p> <p>Ma : Marangoni 수</p> <p>Ma_c : 임계 Marangoni 수</p> <p>Nu : Nusselt 수</p>	<p>n_0 : 굴절률</p> <p>n_∞ : 기준온도에서 굴절률</p> <p>q : 열유속 [W/m²]</p> <p>S : 간섭무늬의 차수</p> <p>T_H : 열판의 온도 [°C]</p> <p>T_W : 벽온도 [°C]</p> <p>T_0 : 초기온도 [°C]</p> <p>T_∞ : 기준온도 [°C]</p> <p>X, Y : 직교좌표계 [m]</p>
그리스 문자	
<p>\dagger Corresponding author</p> <p>Tel.: +82-32-862-7313; fax: +82-32-868-1716</p> <p>E-mail address: sweat100@hanmail.net</p>	<p>α : 열확산율, $k/\rho c_p$ [m²/s]</p> <p>λ : 광원의 파장 [m]</p> <p>δ : 실리콘 오일의 두께 [m]</p> <p>μ : 점성계수 [N·s/m²]</p>

1. 서 론

최근 마랑고니 대류는 우주공간과 같은 미소중력 하에 있어서 단결정생성, 합금제조, 신재료 제조와 관련하여 주목을 받고 있다.

또한 마랑고니 대류는 흡수식 열펌프 및 냉동기의 흡수기 성능 향상을 위하여 열 및 물질 전달촉진의 일환으로 응용되고 있다. 주로 마랑고니 대류의 발생을 크게 하기 위한 방안으로 용액의 농도의 변화에 의한 최적의 조건을 구하거나 첨가제의 종류, 즉 n-Octanol, n-Decanol, 2-ethyl-1-hexanol 등의 변화에 의한 최적의 조건을 구하는 연구가 행해져 왔다.

본 연구는 국부적 표면온도의 변화에 따라 마랑고니 대류를 발생시키고 이에 따른 열전달촉진 현상을 규명하기 위해 비접촉 계측방식인 홀로그래피 간섭계를 이용하여 유체의 온도분포를 측정하였다. 또한 가시화로 얻어진 간섭무늬 해석으로부터 온도분포장을 정량적으로 해석하였다. 본 연구는 온도차 마랑고니 대류의 열전달현상을 규명하기 위하여 마랑고니 수(Marangoni number : Ma)에 따른 표면장력 구동대류의 강도를 도입하여 열전달 실험식을 도출하였다.

2. 기초이론

2.1 마랑고니 대류

액체의 표면장력은 일반적으로 그 온도 및 농도에 의존하고 있다. 따라서 액체 표면에 온도 또는 농도의 불균일이 발생하면 표면장력의 불균형으로 점성유동이 일어난다. 이와 같이 액체와 액체 사이 또는 액체와 기체 사이에서 표면장력 변화에 의해 발생하는 액체의 운동을 발견자의 이름을 따서 마랑고니 대류(Marangoni convection)⁽¹⁾라고 부른다. 이 마랑고니 대류는 용액의 깊이 방향으로 열전달 또는 물질전달을 촉진하는 형태로 작용하며 다시 부력의 영향에 의해 상승하게 된다. 보통 Benard · Rayleigh^(2,3,4) 대류 자유 표면을 갖는 계에 있어서 자연대류에서는 부력과 표면장력이 함께 대류를 구동하는 힘으로 되어 있지만, 보통 표면장력의 영향은 부력의 영향과 비교해서 작다. 그러나 매우 얇은 액층(약 0.1~수 mm 정도)에서의 Benard · Rayleigh 대류

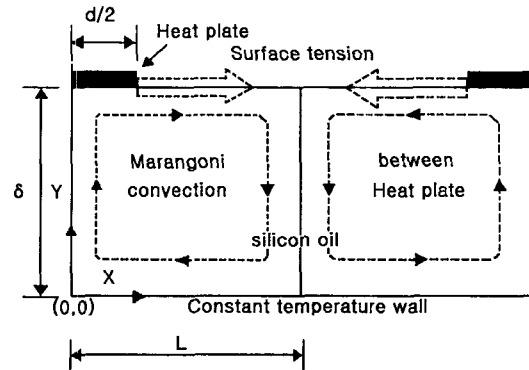


Fig. 1 Model of the mechanism generating Marangoni convection.

와 미소중력 하의 대류현상에서는 표면장력의 영향이 지배적이다. Pearson⁽⁵⁾이 Benard cell에 있어서 계면상의 표면장력 분포를 고려하여 Rayleigh 효과를 무시한 선형안정이론으로 해석을 행한 이래 하부로부터 가열되는 얇은 유체층에 있어서는 Nield⁽⁶⁾의 해석과 Berg⁽⁷⁾의 실험 등의 연구가 행해져 왔다.

Fig. 1은 본 연구에 있어서 마랑고니 대류 발생 메카니즘의 2차원 모델을 나타낸다. 본 연구에서는 유체의 하부가 아닌 상부 표면을 부분적으로 가열함으로써 표면장력의 불균일을 형성하여 마랑고니 대류를 발생시켰다. 작동유체로는 Shin-Etsu 사의 KF96-10cs 실리콘오일을 사용하였다.

2.2 홀로그래피의 원리

본 가시화 실험에 적용한 홀로그래피의 원리^(8,9)를 Fig. 2에 나타낸다. 간섭성 및 수축성이 뛰어난 He-Ne 레이저 광(또는 위상에 따라 간섭무늬를 발생시킬 수 있는 광)을 광원으로 하여 구면파인 물체파(object wave)와 평면파인 참조파(reference wave)를 각각 다른 방향으로부터 홀로그램용의 미립자 건판(기록재)에 중첩시켜 조명하게 되면 Fig. 2(a)와 같은 간섭무늬(interference fringe)가 기록된다. 이 건판을 현상함으로써 회절격자(diffraction grating)가 생성되며, 홀로그램(hologram)을 얻을 수 있다. 이 홀로그램에 간섭무늬가 기록된 방향으로부터 간섭광(coherent light)을 재조명하게 되면 참조파는 현상된 건판(회절격자)에서 회절하게 된다.

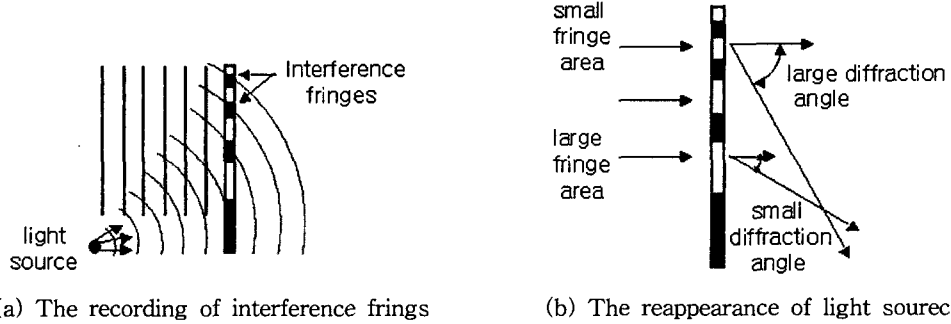


Fig. 2 Principle of holography.

회절광은 Fig.2(b)에서 알 수 있는 바와 같이 회절격자의 간격이 좁은 곳에서는 큰 회절각으로 간격이 넓은 곳에서는 작은 회절각으로 회절하게 되어 결과적으로 전체의 회절광은 원래의 입체상을 재현하게 된다.

이와 같이 간섭성을 갖는 광으로 물체를 조사시켜 물체의 위상변조와 강도변조를 받은 물체파와 변조되지 않은 다른 간섭성의 참조파를 동시에 진판상에 겹쳐서 간섭광을 만들고 간섭무늬의 형태로 공간정보를 기록된다.

본 연구에서는 용액 내의 온도변화를 가시화 하기 위한 방법으로 홀로그래피를 이용하여 간섭무늬를 발생시켰으며 이 간섭무늬를 상대적으로 비교하여 각 부분에 대한 온도계측을 실시하였다.

2.3 간섭무늬 해석

홀로그래피에서 유체의 온도변화에 따른 굴절률의 변화는 광의 파면 왜곡을 일으켜 등온선을 나타내는 간섭무늬를 만들게 된다. 따라서 이 간섭무늬의 해석을 통하여 유체 내부의 공간적인 온도분포를 구하였다.

이상적인 간섭계에서 간섭무늬 차수와 굴절률은 다음의 관계가 성립한다.^(12,13)

$$S\lambda = l(n_\infty - n_0) \quad (1)$$

또한, 온도의 변화(ΔT)와 굴절률의 변화($\frac{dn}{dT}$)는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta T = \frac{\lambda}{l} \cdot \frac{dT}{dn} \cdot S \quad (2)$$

위 식에서 굴절률의 변화는 온도에 대한 함수이므로 식(2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dS}{dT} = \frac{l}{\lambda} \cdot \frac{dn}{dT} \quad (3)$$

$$S = \frac{l}{\lambda} \int_{T_0}^{T_\infty} \frac{dn}{dT} dT = \frac{l}{\lambda} [n(T_\infty) - n(T_0)] \quad (4)$$

온도의 함수로 식을 최종 정리하면 다음과 같다.

$$n(T_0) = n(T_\infty) - \frac{\lambda}{l} \cdot S \quad (5)$$

2.4 열전달 해석

마랑고니 대류에 의한 열전달 촉진 현상을 해석하기 위하여 표면장력 구동대류의 강도를 나타내는 마랑고니 수 Ma 를 계산한다. 또한 Ma 수와 Nu 수와의 관계를 나타냄으로써 대류 열전달의 정량적 해석을 실시한다.

온도차 마랑고니 수 Ma 는 다음과 같이 정의하였다.⁽¹⁴⁾

$$Ma = \frac{A\delta\Delta T}{\mu\alpha} \quad (6)$$

위 식에서 온도계수 A 는 용액온도 25°C 기준 표면장력값인 $3.71 \times 10^5 \text{ N/m}^\circ\text{C}$ 을 사용하였다.

식(6)에서 대표온도차 ΔT 는 가해지는 열유속 q 를 이용하여 식(7)로 정의하였다.

$$\Delta T = \frac{q\delta}{k} \quad (7)$$

또 대류 열전달의 물리적 의미를 고려하여 Nu는 다음과 같이 정의하였다.

$$Nu = \frac{q}{k \frac{\Delta T}{\delta}} \quad (8)$$

식(8)의 분자는 실험에 가해지는 가열원의 열유속이며 분모는 실험에서 발생되는 온도차($\Delta T = T_H - T_W$)에 의해 열전도로 공급되는 열유속을 나타낸다.

3. 실험

홀로그래피 간섭계(holography interferometry)에 의한 유체 내부의 온도분포 측정을 위해 기초 실험과 본 실험으로 나누어 실험을 실시하였다.

홀로그래피 간섭계는 열 및 유체의 흐름에 영향을 주지 않는 비접촉 측정방식으로서 3차원 공간에 대한 정보값을 실시간으로 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다.

Fig. 3은 홀로그래피 간섭계의 광학배치를 나타낸다. 광원은 30 mW의 He-Ne laser이며 파장은 632.8 nm이다. Laser에서 발진된 빔은 선속 분할기(beam splitter)를 지나면서 물체파와 참조파로 분리된다. 물체파와 참조파의 광경로 길이는 동일하게 배치하였으며 농도조절기(N/D filter)를 이용하여 광 강도를 조절하였다.

물체파는 공간필터(spatial filter)를 이용하여 광을 확산, 안정화시킨 후 대상물체(test section)를 통과하여 건판장착기(liquid gate)에 조사된다.

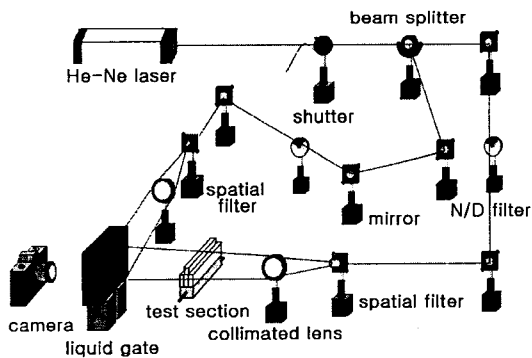


Fig. 3 Optical setup for holographic interferometry.

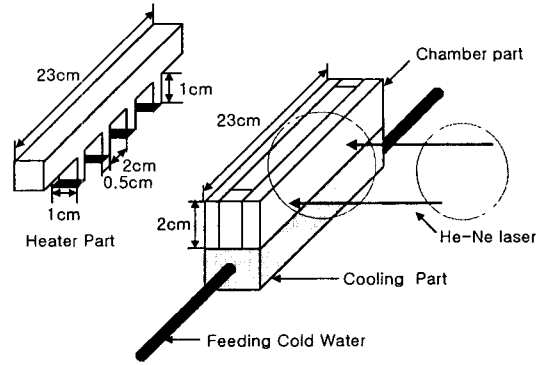


Fig. 4 Test section.

여기서 참조파는 최초 대상물체의 정보값을 홀로그램에 제공하는 역할을 하며 물체파는 현재의 변형된 대상물체의 정보값을 제공하는 역할을 한다. 기초실험은 유체의 굴절률과 온도와의 상관관계를 구하여 간섭무늬 해석식에 적용하기 위하여 실시하였다.

유체의 상부는 표면 전체를 열판으로 균일하게 가열하였고, 하부는 냉각수를 이용하여 냉각시켜 온도를 일정하게 유지하였다. 대상물체 측면에 열전대(thermocouples)를 설치하여 유체의 깊이에 따른 온도를 점계측으로 측정하였으며 이 값을 간섭무늬 해석에 적용하였다.

본 실험에서는 유체의 표면 일부를 열판으로 가열하여 마랑고니 대류를 발생시켰으며 기초 실험을 바탕으로 온도분포 해석을 실시하였다.

또한 Ma를 parameter로 Nu를 계산하여 열전달 해석을 실시하였다.

Fig. 4는 본 실험에 사용된 대상물체를 나타낸다. 열판의 중심간격은 25 mm이며 니크롬선을 사용하여 열판을 가열시켰다. 대상유체는 silicon oil을 사용하였으며 용액 깊이를 10 mm로 하였다. 용액 하부의 경계조건은 등온조건으로, 측면은 단열조건으로 설정하였다.

4. 실험결과

Fig. 5는 홀로그래피 간섭계에 의한 기초실험의 결과를 나타낸다.

그림에서와 같이 용액 표면 전체를 가열하였을 경우 열전도의 형태로서 평행한 간섭무늬가 발생하게 되며 열이 용액 깊이 방향으로 순차적으로 전달되는 것을 알 수 있다. 측면의 온도분포는

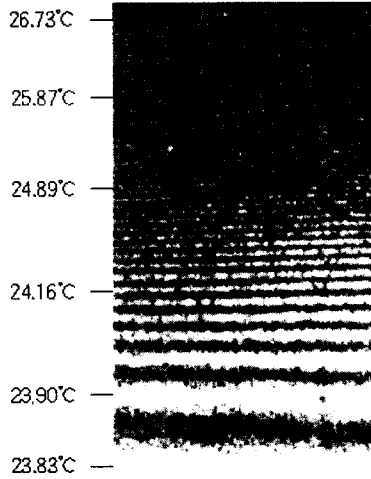


Fig. 5 Temperature profile in silicon oil.

열전대에 의해 측정된 값이며 이 값을 식(5)에 적용함으로써 굴절률과 온도와의 관계를 구할 수 있다. 따라서 측정영역 내에서의 실리콘 오일의 굴절률과 온도와의 관계는 1차 함수로 나타나며 식(5)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_0 = T_\infty - \frac{S\lambda}{al} \quad (a : \frac{\Delta n}{\Delta T}) \quad (9)$$

식(9)는 동일조건에서의 실험에 적용할 수 있

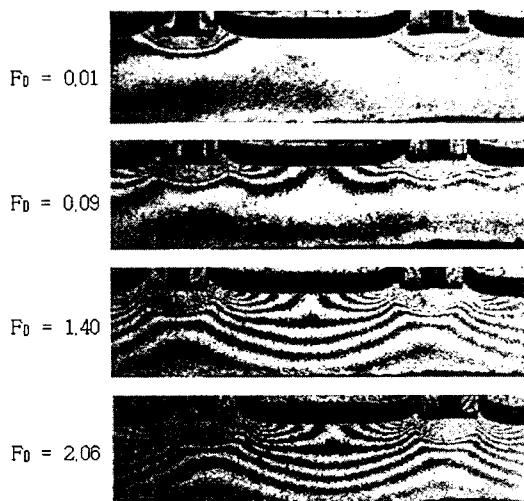


Fig. 6 Heat conduction layer by temperature gradient ($F_0 = kt^2/(2L)^2$, $\delta=10$ mm).

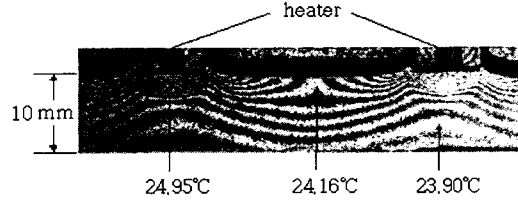


Fig. 7 The result in Marangoni convection.

으므로 본 실험의 온도분포 계산에 적용하였다.

Fig. 6은 마랑고니 대류의 발생에서 정상상태에 이르기까지의 온도장의 가시화를 나타낸다.

실시간 가시화 결과로부터 유체를 가열한 직후부터 시간경과에 따라 용액 깊이 방향으로 대류의 영향에 기인한 온도분포의 발생이 관찰되었다. 열의 이동을 명확히 관찰할 수 있는 대류로 성장한다. 가열부 시간의 경과에 따라 대류는 가열부와 가열부 중심의 용액 깊이 방향으로 발달하는 특성을 나타낸다.

따라서 가열부 사이의 자유 표면 중앙부에서는 가열부보다 빠르게 열전달이 되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 정상상태에 있어서 마랑고니 대류의 온도분포를 분석한 결과를 나타낸다. 각 위치에 대한 온도값은 식(9)를 간섭무늬 차수에 대해 적용하여 계산한 결과이다.

실제로 열전대를 이용하여 온도측정을 한 결과 약 $\pm 0.25^\circ\text{C}$ 정도로 1% 미만의 오차를 보였다.

가시화 결과로부터 얻어진 용액 내의 온도분포를 이용하여 Ma 와 Nu 를 계산함으로써 마랑고니 대류가 열전달 촉진에 미치는 영향에 대한 해석을 실시하였다.

유체층 두께(δ)가 10 mm, 15 mm인 두 조건에 대한 실험을 하였으며, 그 결과를 식(6)과 식(8)에 대입하여 Ma 와 Nu 를 계산하였다. 또한, 두 변수의 관계를 로그 그래프에 1차 식으로 정리하여 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 8과 Fig. 9의 두 그래프에서 나타나는 바와 같이 $\delta=10$ mm일 때보다 $\delta=15$ mm일 때 Nu 가 더 크게 나타남을 알 수 있다.

실험에서 얻어진 1차 식과 $Nu=1$ 과의 교차하는 점의 Ma 를 임계 마랑고니 수(Ma_c)로 정의하였으며, 이 Ma_c 를 이용하여 열전달 실험결과를 Ma/Ma_c 에 대한 Nu 수의 형태로 정리하면 다음과 같은 실험식으로 나타낼 수 있다.

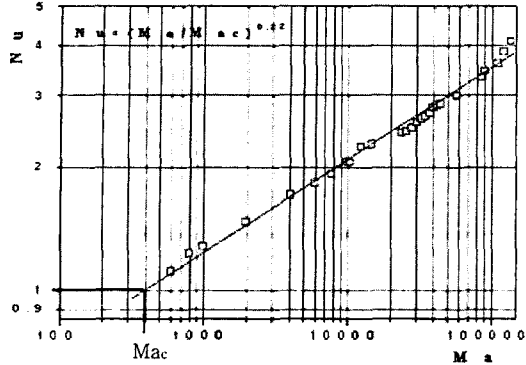


Fig. 8 Result of the heat transfer experiment ($Ma_c=398$, $\delta=10$ mm).

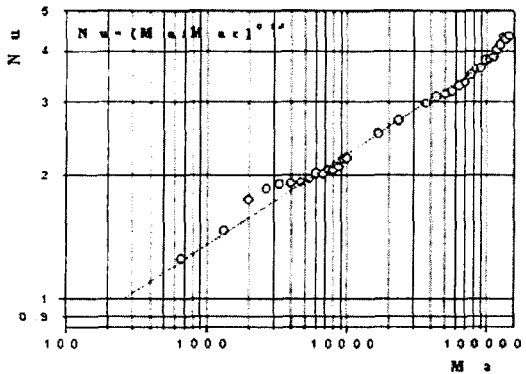


Fig. 9 Result of the heat transfer experiment ($Ma_c=243$, $\delta=15$ mm).

$$Nu = \left(\frac{Ma}{Ma_c} \right)^r \quad (10)$$

위의 계산식으로부터 유체층의 두께가 $\delta=10$ mm일 때 $Ma_c=398$, $r=0.22$ 의 값을 가지며, $\delta=15$ mm일 때 $Ma_c=243$, $r=0.24$ 의 값을 갖는다.

본 실험의 조건으로 얻어진 결과로부터 Nu는 지수 r 값의 변화보다 Ma_c 값의 변화에 지배적임을 알 수 있다. 그리고, Ma_c 값이 작은 쪽의 Nu가 더 큰 값을 가지며 열전달 촉진이 현저함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구로 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 가시화 실험으로부터 마랑고니 대류는 표면 장력의 불균일에 의해 용액 깊이 방향으로 발생되며 셀 모양의 대류 형태를 나타낸다.

(2) 열전달 실험으로부터 임계 마랑고니 수 및 지수를 이용하여 $Nu = (Ma/Ma_c)^r$ 의 실험식으로 정리되며 Ma_c 가 작을수록 열전달이 우수하다.

(3) 가시화 실험 및 열전달 실험을 토대로 온도차에 기인한 마랑고니 대류는 열전달 촉진에 효과적임을 밝혔다.

참고문헌

1. Golovin, A. A., Nepomnyashchy, A. A. and Pismen, L. M., 1997, Nonlinear evolution and secondary instabilities of Marangoni convection in a liquid-gas system with deformable interface, *J. Fluid Mech.*, Vol. 341, pp. 317-341.
2. Scriven, L. E. and Strling, C. V., 1960, *Nature* 187, pp. 186-188.
3. Scriven, L. E. and Strling, C. V., 1964, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 19, pp. 321-352.
4. Kenji Mastsuo and Youichi Murakami, 1999, Linear stability of Benard-Marangoni convection in two-layer system with an undeformable interface, *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. 68, pp. 461-470.
5. Pearson, J. R. A., 1958, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 4, pp. 489-500.
6. Nield, D. A., 1964, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 19, pp. 341-352.
7. Berg, J. C. and Hinkebein, T., 1978, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 21, p. 1241.
8. Rie, D. H., 1991, Mechanism of Steam Absorption Enhancement into the Aqueous Solution of Libr by the Marangoni Effect.
9. Rie, D. H., Choi, K. K., Kashiwagi, T. and Seo, J. Y., 1992, Visualization of Marangoni convection behavior between two surfactant dropwise in the process of steam absorption, *Journal of the SAREK*, Vol. 4, No. 2, pp. 65-71.
10. Goldstein, R. J., 1976, Optical measurement

- of temperature, In Measurements in Heat Transfer, 2nd ed, pp. 241-294.
11. Hecht, E. 1987, Optics Second Edition, Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
 12. Hauf, W. and Grigull, U., 1970, Optical Methods in Heat Transfer, Academic Press, Vol. 6, pp. 133-366.
 13. Seizo Kato, Naoki Maruyama and Sadegh Tabejamaat, 1997, Numerical simulation and laser holographic study on thermal diffusion in counterflow with different temperatures, Elsevier Science Ltd., Energy Convers Mgmt, Vol. 38, pp. 1197-1207.
 14. Saghir, H. Z., 1987, The Marangoni convection on a germanium float zone, ASME HTD, Vol. 83, pp. 63-69.
 15. Daiguji, H., Hihara, E. and Sato, T., 1993, Absorption enhancement by adding surfactant, JSME, No. 930-39, pp. 349-352.