

## 열화상카메라를 이용한 Rayleigh-Benard-Marangoni 자연대류 실험 연구

김정배<sup>†</sup>

### Experimental Study on Rayleigh-Benard-Marangoni Natural Convection using IR Camera

Jeongbae Kim

**Key Words:** Natural convection(자연대류), Marangoni flow(마랑고니 유동), Circular container(원형 용기), Electric heating(전기 가열), IR camera(열화상카메라)

#### Abstract

Rayleigh-Benard-Marangoni (RBM) convection have been artificially made for application of various engineering fields. For a relatively larger circular container, natural convection experiments were carried out to reveal and show the flow characteristics with engine oil (SAE30) using IR camera. IR camera has captured the temperature distribution on the free surface. From these experiments, it was confirmed that it was possible to quantitatively analyze the occurrence characteristics of RBM flow clearly from the thermal images taken with IR camera. As the aspect ratio increased, both the number of internal and external cavities increased. And found that the criteria of RBM flow generation proposed through previous experiments performed for small-sized containers are also very effective with the results on larger circular container.

#### 기호설명

A : 에스펙트비 [-]  
D : 용기 직경 [m]  
h : 용기 내 액체 높이 [m]  
g : 중력가속도, 9.805 [m/s<sup>2</sup>]  
Ma : 마랑고니수 [-]  
Ra : 레일리 수 [-]  
T : 온도 [°C]  
 $T_{surf}$  : 자유표면 온도 [°C]  
 $T_{wall}$  : 용기 내부 표면 온도 [°C]  
 $\Delta T = T_{wall} - T_{surf}$  [°C]

$\alpha$  : 열확산계수 [m<sup>2</sup>/s]  
 $\beta$  : 체적팽창계수 [1/K]  
 $\mu$  : 점성계수 [kg/m·s]  
 $\nu$  : 동점성계수 [m<sup>2</sup>/s]  
 $\sigma$  : 표면장력 [N/m]

#### 1. 서 론

하부 수평 가열면을 가진 원형 풀에서 발생하는 Rayleigh-Benard-Marangoni(RBM) 대류는 부력과 중력의 영향으로 규칙적인 흐름 패턴이 발생하는 자연 대류 열전달 현상이다.

이러한 자연대류 열전달 현상은 아주 다양한 공학 과정에 존재하고, 그에 대한 실질적인 중요성이 널리 인식되고 있다.

화공 분야에서의 대표적인 예로는 증류 칼럼이 있다.

(Received: 17 Mar 2021, Received in revised form: 13 Apr 2021, Accepted: 14 Apr 2021)

<sup>†</sup>김정배, 회원, 한국교통대학교 자동차공학전공  
E-mail : jeongbae\_kim@ut.ac.kr  
TEL : (043)841-5282 FAX : (043)841-5280

증류 칼럼 내부에는 표면장력이 강하게 영향을 미치는 경계면을 통해 물질 전달이 발생하는데, RBM 대류 조건이 표면장력의 영향을 크게 받는 유동이 발생함을 보였다.<sup>(12)</sup>

이러한 표면장력이 필름 코팅 공정에서 실리콘 결정의 성장에 매우 중요한 영향을 미치는 것을 확인하였다.<sup>(3)</sup>

이렇게 생각하면 RBM 대류는 자연 증발에 의한 건조 과정에서 매우 중요한 역할을 할 것으로 판단할 수 있다. 이 과정에 관련된 현상을 이해하기 위해 많은 연구들이 진행되었는데, 특히 Machraf et al.<sup>(4)</sup>의 연구들이 있다.

자연대류 열전달에서 열중력과 열모세관 효과가 동시에 반영되는 경우에, Nield<sup>(5)</sup>은 이론 계산을 통해 풀 내부 수직 온도 구배의 영향으로 유체의 열적 층화 상태가 불안정해지는 조건이 존재할 수 있음을 증명하였다. 이러한 이론적 토대를 바탕으로 Koshmeider & Prah<sup>(6)</sup>와 Schatz & Neitzel<sup>(7)</sup>은 대류 세포의 수에 대한 가열 풀의 다양한 기하 조건과 중형비의 영향을 실험으로 제시하였다.

역삼각형 형태의 풀<sup>(8)</sup>과 상부 가로 세로의 특정 조건과 특정 Ra수에서 자연대류 열전달 현상을 계산<sup>(9)</sup>하고 대류 세포의 수를 확인하였다.

그러나 높은 Pr수를 가진 유체가 있는 원통형 용기에서 Pasquetti et al.<sup>(10)</sup>과 Kim et al.<sup>(11)</sup>는 RBM은 부력 효과가 더 중요한 인자임을 설명하였다. Rahal et al.<sup>(9)</sup>는 작은 원통형 용기의 대류에서 Biot, Prandtl 및 Marangoni 수의 영향을 실험 연구를 수행하기도 하였다.

이러한 자연대류 열전달에 있어서 자연대류에 의한 유동 현상을 효과적으로 이해하기 위하여 다양한 수치 이론계산 연구들이 수행되었는데, 혼합된 열부력 및 열모세관 대류의 이론 계산 결과를 실험 결과와 비교한<sup>(12)</sup>과 작은 중형비 용기에서 열모세관 및 부력 대류를 계산하였다<sup>(13)</sup>.

앞서의 연구들의 결과로부터 RBM 대류는 풀의 다양한 형상과 경계 조건에 따라 변화하게 되는데, 바닥에서 불균일 열유속 조건에서 실험을 수행하였다.<sup>(14-18)</sup>

특히 Kuhlmann & Schoisswohl<sup>(16)</sup>은 포물선 방사형 프로파일을 가진 히터로 다양한 열유속 조건에서 액체 풀을 가열하는 실험을, 이번 연구와 유사한 기하학 구조를 가진 오픈 원형 용기풀에서 불균일 열유속 조건에서 다양한 자연대류 실험<sup>(18)</sup>을 수행하였다.

이를 통해 RBM 대류 세포의 흐름 패턴은 수직 또는 수평 온도 구배의 경우 모두에 대해 얻을 수 있음을 확인하였다.

수평 온도 구배에 의해 구동되는 열모세관 대류에 대해서는 원형 풀<sup>(19,20)</sup>과 직사각형 풀<sup>(21)</sup>에 대한 수치 해석 연구를 수행하기도 하였다.

이러한 다양한 조건들에 대한 연구들이 진행되었는데, RBM 유동이 발생하는 조건을 확인하기 위해서는 대류 세포(캐비티)의 분포를 명확하게 제시하여야 하였다. 이를 위해 유체 내부 흐름의 가시화를 위한 다양한 종류의 파우더를 혼합하거나, 파우더를 사용하지 않더라도 Interferometry(간섭계)와 같은 복잡한 형태의 가시화 방법을 적용할 수밖에 없었다.

이와 함께 다양한 용기에서 RBM 유동의 발생 조건을 용기 직경(D)/액체 높이(h)로 표시되는 에스펙트비(A, 0~20)를 독립 변수로 하는 Ma(Ma-rangoni number) 수의 범위를 제시하기도 하였다. 다양한 용기라고는 하지만 대체적으로 작은 크기의 용기로 직경 25 mm 이하의 용기들로 실험하여 얻은 결과들이었다.<sup>(6)</sup>

본 연구에서는 기존의 연구들에서 주로 실험한 유체인 실리콘 오일 대신에 사용하지 않은 엔진오일(SAE30)을 이용하였고, 자유계면에서의 유동 특성을 측정하기 위해 복잡한 유동 가시화 장치 대신에 유동 속도와 상사되는 자유표면의 온도를 측정하기 위해 열화상카메라를 이용하였다. 이러한 자연대류 실험을 위하여 직경 70 mm의 원형 용기에 오일을 담고 하부면을 가열하기 위한 핫플레이트 히터를 이용하였다.

이전의 RBM 실험에서 주로 활용한 실리콘 오일에 비해 표면장력이 상대적으로 큰 엔진 오일과 이전의 실험들에서 적용한 용기의 크기에 비하여 두배 이상 큰 용기를 이용하여 자연대류 실험을 수행하여, 열화상카메라로 촬영된 자유표면의 온도 분포로 RBM 유동의 측정 가능성을 제시할 수 있는지, 주로 30 mm 직경 이하의 용기 실험에서 얻어진 이전 연구결과들에 비하여 상대적으로 2배 이상 큰 용기에서 RBM 유동 특성을 실험하고 분석 가능한지를 제시하고자 한다. 그리고 이러한 실험 조건들에서의 RBM 유동 발생 범위가 이전에 제시된 RBM 유동 발생 한계들과는 어떤 차이가 있는지를 확인하고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 다양한 에스펙트비와 가열면 온도 조건에서 자연대류 실험을 수행하였다.

## 2. 실험 방법 및 조건

다양한 조건에서 자연대류 실험을 수행하기 위하여

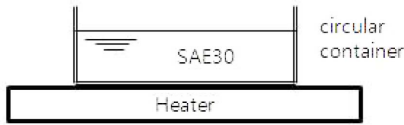


Fig. 1 Experimental apparatus

Fig. 1과 같은 간단한 실험 장치를 활용하였다. 유체로는 사용하지 않은 엔진오일 SAE30을 이용하였고, 가열은 미성과학의 HP12 모델의 핫플레이트를 이용하였는데 온도 조절 범위는 0°C~380°C이고 온도 조절 성능은 ±1°C이다.

자유표면의 온도 측정은 FLIR사의 측정 오차 ±2°C 성능을 가진 T250 열화상카메라를 사용하였는데, 원형 용기 내 SAE30 오일의 자유표면 방사율은 0.95로 고정하여 촬영하였다. 열화상카메라의 교정은 주기적으로 2년에 1회 정도 교정기관에서 진행하였고, 실험 전에 카메라 제작사가 추천하는 방법으로 검교정을 실시하였다.  $T_{surf}$ 는 촬영된 열화상이미지로부터 전체 자유표면의 평균온도를 계산하여 얻었다. 자유표면 온도의 측정 불확도는 ±0.62°C로 분석되었다.

그리고 용기 내의 바닥면 온도  $T_{wall}$ 를 측정하기 위하여 0.1 mm 직경을 가진 T-type 열전대 3개를 이용하였다.

다양한 애스펙트비의 변화 실험은 70 mm 직경을 가진 원형 용기에 엔진오일의 높이를 2.1 mm~24.7 mm까지 변화시켜(A : 2.83~33.33)까지 수행하였다.

$$A = \frac{D}{h} \quad (1)$$

그리고 RBM 유동의 특성을 결정하는 부력의 영향이 지배적인 애스펙트비 5이하( $A < 0.5$ )인 경우와 부력의 영향을 무시할 수 있는 애스펙트비 5이상( $A > 0.5$ )의 조건을 모두 고려할 수 있도록  $h=7(A=10)$ ,  $9(A=7.78)$ ,  $15(A=4.67)$ ,  $25(A=2.8)$  mm의 높이별로 다양한 가열면

온도에서 실험을 수행하였다.

실험 조건의 데이터 분석을 위한 Ra수와 Ma수의 계산은 아래의 식 (2)와 식 (3)을 이용하였다.

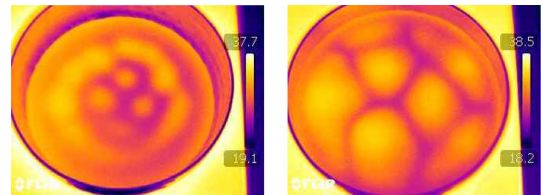
$$Ma = \frac{h\Delta T d\sigma}{\mu\alpha dT} \quad (2)$$

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T h^3}{\nu\alpha} \quad (3)$$

### 3. 실험 결과 및 토의

핫플레이트의 온도를 거의 일정하게 유지하면서 액체의 높이를 변화시키면서 실험한 결과, 열화상카메라로 촬영된 자유표면의 온도 분포인 Fig. 2와 같이 명확하게 RBM 유동이 나타나는 액체 높이와 나타나지 않는 높이에서의 온도 분포를 확인할 수 있었다. 실험의 액체 높이 모두에 대하여 용기 바닥의 온도는 평균 36.4°C이었으며, 표준편차는 ±0.54°C로 조절되었다.

이러한 가시적인 결과로부터 액체 높이에 대한 애스펙트비와 Ma수의 실험 영역을 표시하면 아래의 Fig. 3



(a)  $h=6.8\text{mm}$  ( $A=10.29$ ) (b)  $h=17.6\text{mm}$  ( $A=3.98$ )

Fig. 2 Free surface temperature distribution

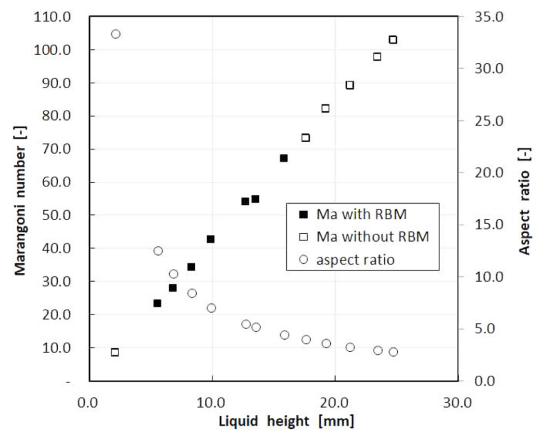


Fig. 3 Ma and aspect ratio with various  $h_i$

Table 1 Experimental conditions with RBM cavity

h [mm]	A [-]	# of inner cavity [-]	# of outer cavity [-]
5.60	12.50	4	12
6.80	10.29	4	12
8.30	8.43	3	10
9.90	7.07	2	8
12.70	5.51	1	8
13.50	5.19	1	8
15.85	4.42	1	8

과 같았다. 액체 높이별 실험 범위는 2.1 mm~24.7 mm 이었고, 실험 조건에 대하여 각각 계산된 Ma수는 8.5~102.9로, A는 33.33~2.83의 영역이었다. Fig. 3에서와 같이 RBM 유동이 발생하는 높이는 5.6 mm~15.85 mm로 에스펙트비는 12.5~4.42이었다.

그리고 RBM 유동이 발생하는 경우에 Fig. 1의 이미지에서 중심부에 위치하는 독립된 흐름의 캐비티를 내부 캐비티로, 내부 캐비티 주변에 발생하는 것을 외부 캐비티로 정의하여 표시하면 아래의 Table 1과 같이 얻어진다. 액체의 높이가 높아질수록 내부 캐비티의 숫자는 줄어들었고, 이와 함께 외부 캐비티의 수도 감소하는 경향을 나타내었다.

다양한 액체 높이별 실험을 통해 열화상카메라를 이용하여 RBM 유동의 분석이 충분히 가능함을 확인하였다. 그렇다면 직경 3 mm 이하의 용기에서의 자연대류 실험으로부터 RBM 유동이 발생하는 Ma 수의 한계를 결정하였던 Koshmeider & Prah(6)의 실험결과와의 비교를 위하여 다양한 높이별로 핫플레이트의 가열 온도를 변화시키면서 자연대류 실험을 수행하였다.

높이별로의 실험에서 얻어진 열화상 이미지는 Fig. 4~7과 같았다. RBM 캐비티가 발생하는 조건과 발생하

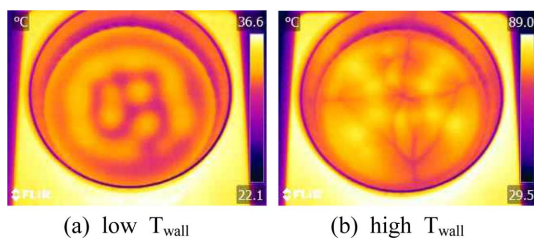


Fig. 4 Free surface temperature for h=7 mm

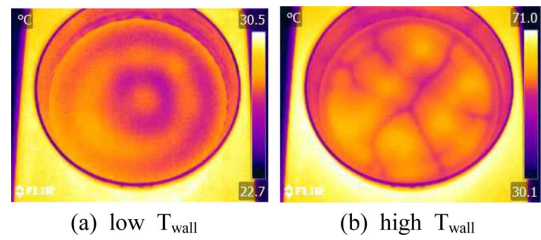


Fig. 5 Free surface temperature for h=9 mm

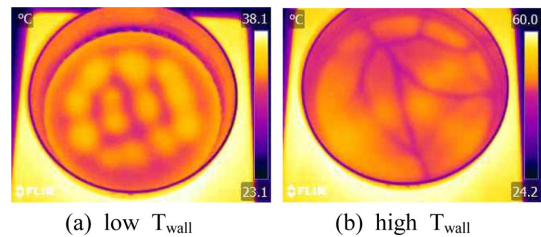


Fig. 6 Free surface temperature for h=15 mm

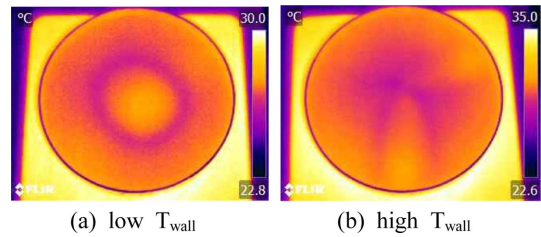


Fig. 7 Free surface temperature for h=25 mm

지 않는 조건을 명확하게 열화상이미지가 보여주고 있음을 먼저 알 수 있다.

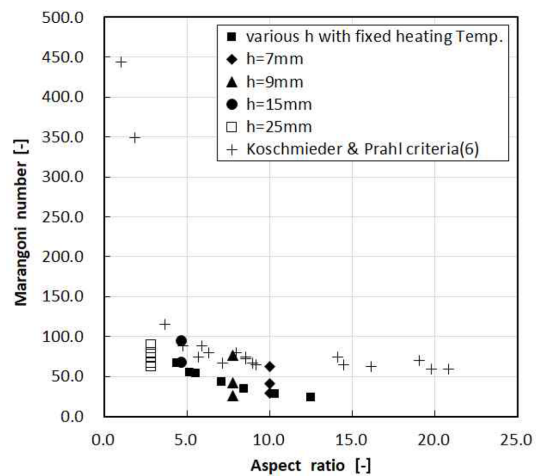


Fig. 8 RGM cavity criteria for various A

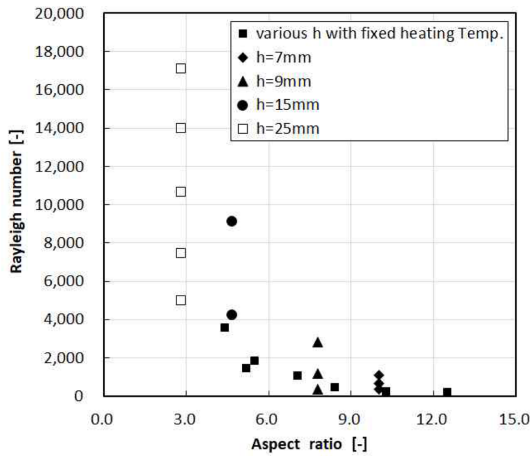


Fig. 9 Rayleigh number with RBM for various A

Fig. 8에 RBM 유동이 명확하게 발생하는 실험의 범위를 Koshmeider & Prahli가 제시한 범위 표시(+)와 함께 다양한 에스펙트비에 대한 Ma수의 관계로 나타내었다. 그림에서와 같이 큰 직경의 원형 용기에서도 이전의 연구결과와 동일한 범위 내에서 RBM 유동이 발생함을 확인하였다. 이로부터 열화상카메라를 이용하여 RBM 유동을 측정하는 다양한 자연대류 실험이 명확하게 가능함을 다시 확인할 수 있었다.

또한, Fig. 9에는 RBM 유동이 발생하는 본 연구의 실험 범위에서의 Ra수를 다양한 에스펙트비에 대하여 나타내었다. 이전의 연구결과들과 동일하게 큰 직경의 원형 용기에서도 에스펙트비가 5보다 큰 경우에 비하여 5보다 작은 경우에는 Ra수가 약 4천 이상으로 부력이 RBM 유동 발생에 지배적인 인자임을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

하부 가열 조건을 가진 상대적으로 큰 직경의 원형 용기에 담긴 액체에서 발생하는 자연대류 현상을 열화상카메라를 이용하여 측정한 자유표면 온도 분포를 이용하여 정량적으로 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 열화상카메라로 촬영된 열화상 이미지로부터 명확하게 RBM 유동의 발생 특성을 정량적으로 분석 가능함을 확인하였다.
- (2) 에스펙트비가 증가할수록 내부와 외부 캐비티의 수는 모두 증가하였고, 특정 범위 이상에서는 내부 캐비

티와 외부 캐비티가 혼합되면서 더 이상 RBM 유동은 발생하지 않음을 알 수 있었다.

- (3) 작은 크기의 용기들에서 실험을 통해 얻어진 RBM 유동 발생의 한계가 사용하지 않은 엔진오일과 큰 용기에서도 유효함을 확인하였다.

#### 참고문헌

- (1) F. Zuiderweg and A. Harmens, "The influence of surface phenomena on the performance of distillation columns", *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 9, 1958, pp. 89-103.
- (2) W. B. Patberg, A. Koers, W. D. E. Steenge and A. A. H. Drinkenburg, "Effectiveness of mass transfer in a packed distillation column in relation to surface tension gradients", *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 38, No. 6, 1983, pp. 917-923.
- (3) P. Calvert, "Inkjet printing for materials and devices", *Chem. Mater.*, Vol. 13, No. 10, 2001, pp. 3299-3305.
- (4) H. Machrafi, A. Rednikov, P. Colinet and P.C. Dauby, "Benard instabilities in a binary-liquid layer evaporating into an inert gas", *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 349, No. 1, 2010, pp. 331-353.
- (5) D. Nield, "Surface tension and buoyancy effects in cellular convection", *J. Fluid Mech.*, Vol. 19, No. 3, 1964, pp. 341-352.
- (6) E. L. Koshmeider and S. A. Prahli, "Surface-tension-driven Benard convection in small containers", *J. Fluid Mech.*, Vol. 215, 1990, pp. 571-583.
- (7) M. F. Schatz and G. P. Neitzel, "Experiments on thermocapillary instabilities", *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 33, No. 1, 2001, pp. 93-127.
- (8) J. Kim, R. J. Park, H. Y. Kim, S. W. Hong, J. H. Song and S. B. Kim, "High Ra number natural convection in a triangular pool with a heat generation", *J. Computational Fluids Engineering*, Vol. 16, No. 3, 2011, pp. 66-74.
- (9) S. Rahal, P. Cerisier and H. Azuma, "Benard-Marangoni convection in a small circular container: influence of the Biot and Prandtl numbers on pattern dynamics and free surface deformation", *Exp. Fluids*, Vol. 43, No. 4, 2007, pp. 547-554.
- (10) R. Pasquetti, P. Cerisier, and C. Le Niliot, "Laboratory and numerical investigations on Benard-Marangoni convection in circular vessels", *Phys. Fluids*, Vol. 14, 2002, pp. 277.

- (11) J. Kim, K. S. Kang, S. B. Kim and H. D. Kim, "Analysis of natural convection heat transfer and solidification of a two-layered pool", *J. Computational Fluids Engineering*, Vol. 6, No. 1, 2001, pp. 1~13.
- (12) H. C. Kuhlmann, "Thermocapillary flows in finite size systems", *Math. Comput. Model.*, Vol. 20, 1994, pp. 145~173.
- (13) H. C. Kuhlmann and U. Schoiswohl, "Flow instabilities in thermocapillary-buoyant liquid pools", *J. Fluid Mech.*, Vol. 644, 2010, pp. 509~535.
- (14) E. L. Koschmieder, "Convection on a non-uniformly heated, rotating plane", *J. Fluid Mech.*, Vol. 33, No. 3, 1968, pp. 515~527.
- (15) A. C. Rapier, "Forced convection heat transfer in a circular tube with nonuniform heat flux around the circumference", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 15, No. 3, 1972, pp. 527~537.
- (16) H. C. Kuhlmann and U. Schoiswohl, "Flow instabilities in thermocapillary-buoyant liquid pools", *J. Fluid Mech.*, Vol. 644, 2010, pp. 509~535.
- (17) T. Gambaryan-Roisman, "Marangoni convection, evaporation and interface deformation in liquid films on heated substrates with non-uniform thermal conductivity", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 53, 2010, pp. 390~402.
- (18) R. E. Sakhy, K. E. Omari, Y. L. Guer and S. Blancher, "Rayleigh-Benard-Marangoni convection in an open cylindrical container heated by a non-uniform flux", *Int. J. Thermal Sci.*, Vol. 86, 2014, pp. 198~209.
- (19) A. Zebib, G. M. Homsy and E. Meiburg, "High Marangoni number convection in a square cavity", *Phys. Fluids*, Vol. 28, 1985, pp. 3467.
- (20) H. Ben Hadid and B. Roux, "Thermocapillary convection in long horizontal layers of low-prandtl-number melts subject to a horizontal temperature gradient", *J. Fluid Mech.*, Vol. 221, 1990, pp. 77~103.
- (21) J. F. Mercier and C. Normand, "Buoyant-thermocapillary instabilities of differentially heated liquid layers", *Phys. Fluids*, Vol. 8, 1996, pp. 1433~1445.