

## 수평 사각 채널에서의 2상 압력 강하

임태우 · 유삼상<sup>†</sup> · 김환성  
(한국해양대학교)

### Two-phase Pressure Drop in Horizontal Rectangular Channel

Tae-Woo LIM · <sup>†</sup>Sam-Sang YOU · Hwan-Seong KIM  
(Korea Maritime University)

#### Abstract

Two-phase pressure drop experiments were performed during flow boiling to deionized water in a microchannel having a hydraulic diameter of 500  $\mu\text{m}$ . Tests were made in the ranges of heat fluxes from 100 to 400  $\text{kW/m}^2$ , vapor qualities from 0 to 0.2 and mass fluxes of 200, 400 and 600  $\text{kg/m}^2\text{s}$ . The frictional pressure drop during flow boiling is predicted by using two models; the homogeneous model that assumes equal phase velocity and the separate flow model that allows a slip velocity between two phases. From the experimental results, it is found that the two phase multiplier decreases with an increase in mass flux. Measured data of pressure drop are compared to a few available correlations proposed for macroscale and mini/microscale. Among the separated flow models, the correlation model suggested by Lee and Garimella predicted the frictional pressure drop within MAE of 47.2%, which is better than other correlations.

*Key words : Homogeneous Flow Model, Separated Flow Model, Two-phase Flow, Frictional Multiplier, Vapor Quality*

#### I. 서론

상변화를 동반하는 유동 시스템에서 압력 강하 예측은 증기 동력, 냉동 및 공기 조화 시스템, 자동차 그리고 연료전지 시스템 등을 설계하는데 있어 매우 중요한 요소 중에 하나이다. 이상류 마찰 특성에 관한 정보는 열시스템 설계의 정확성을 향상시킬 수 있기 때문에 대단히 중요하다 할 수 있다. 특히 소형화된 열시스템은 열전달을 크게 향상시킬 뿐만 아니라 표면적에 대한 유동 단면적의 비가 상당히 크기 때문에 훌륭한 열전달 기구로 각광받고 있다(You et al., 2007;

Lim & You, 2008).

미니/마이크로 채널에서의 압력 강하 특성은 관경이 감소함에 따라 증가하는 것으로 예측할 수 있기 때문에 기존의 매크로 관에서 개발된 상관식으로는 예측하기 어려운 것으로 보고되고 있다. Mishima & Hibiki (1996)는 내경이 1-4mm 인 모세관에서 공기-물의 2상 유동에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 그들은 Chisholm의 상관식에서 변수 C를 관직경의 함수로 새롭게 개발함으로써 2상 마찰 압력 손실을 상관하였다. Tran 등 (2000)은 하나의 사각 채널( $4.06 \times 1.7\text{mm}$ )과 2개의 미소 관(2.46 그리고

<sup>†</sup> Corresponding author : 051-410-4366, ssyou@hhu.ac.kr

2.92mm)에서 3개의 냉매를 가지고 유동 비등시 2상 유동 압력 강하를 해석하였다. 실험 결과를 매크로 스케일에서 얻어진 상관식과 비교하였으나, 기존의 상관식에 비해 높게 나타났다. 이러한 차이는 미소 채널에서 존재할 수 있는 유동 양식의 차이 때문이라 할 수 있다.

Lee & Garimella (2008)는 102–997  $\mu\text{m}$  범위의 폭에 대한 각 경우에 채널 깊이가 400  $\mu\text{m}$  인 마이크로채널에서 물을 사용하여 실험을 수행하였다. 마이크로채널을 가로지르는 압력 강하는 초기 열유속(핵비등의 시작, ONB)을 초과했을 때 열유속에 따라 급격히 증가하였다. 그들은 마찰 압력 강하를 예측하기 위해 Mishima & Hibiki (1996)의 모델을 토대로 새로운 압력 강하 상관식을 개발하였다. 가속에 의한 압력 성분을 평가하기 위해서는 Zivi의 기공률 상관식을 이용하였다. 마찰 압력 강하에 대한 실험결과와 비교했을 때 잘 일치하였다.

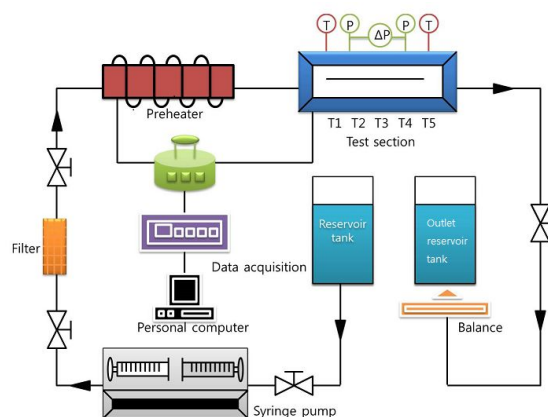
Lee & Mudawar (2003)는 냉동 사이클에서 증발기 역할을 하는 마이크로 히트 싱크(231  $\mu\text{m}$  wide  $\times$  713  $\mu\text{m}$  deep)에 대해 냉매 R134a를 사용하여 2상 압력 강하를 측정하였다. 그들은 Reynolds and Weber 수에 액체 물성치를 사용함으로써 액체 증기 유동 영역에 대하여 새로운 Chisholm 변수 C를 상관하였다.

본 연구는 수평 사각 채널내(500  $\mu\text{m}$ )에서 작동 유체의 유동 비등시 마찰 압력 강하에 대한 특성을 밝히는 것이며, 실험을 통해 얻어진 2상 마찰 압력 강하는 기존의 매크로 관과 미니/마이크로 관에서 얻어진 여러 상관식들과 비교·분석하였다.

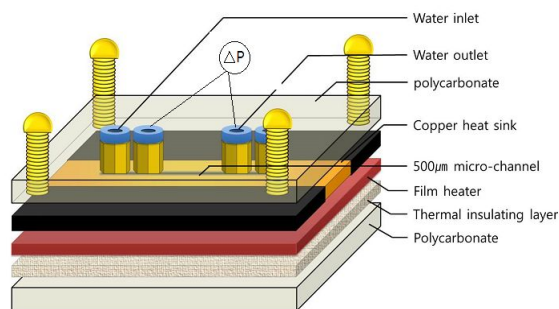
## II. 실험 장치 및 방법

[Fig. 1]은 유동 비등 열전달과 압력강하 측정을 위한 실험장치의 개략도를 나타낸다. 본 시스템은 입구 저장탱크, 시린지 펌프, 필터, 예열기,

시험구간, 출구 저장탱크 그리고 전자저울로 구성되어 있다. 모든 실험에서 작동유체(de-ionised water)는 핫플레이트에서 일정온도로 가열된 후 시린지 펌프에 의해 필터를 거쳐 예열기로 공급되며, 예열기에서 시험구간 입구의 주어진 엔탈피까지 예열된 후 시험구간으로 들어가 다시 가열되게 되어 있다. 그리고 시험부의 상부는 유동 양식을 관찰할 수 있도록 투명판으로 덮여있다. 이 투명판은 또한 입·출구의 작동 유체온도와 압력강하 측정을 위해 사용된다.



[Fig. 1] Experimental apparatus



[Fig. 2] Test section

[Fig. 2]는 시험부를 나타내며, 마이크로채널은 동판의 상부 표면에 와이어 커팅법을 이용하여 깊이와 폭이 각각 0.5 mm인 사각 채널로 가

공된다. 채널 길이는 40 mm의 가열길이를 포함하여 약 80 mm이다. 동관의 하부에는 시간에 따라 일정한 열을 공급하기 위해 필름히터가 부착되며, 이 히터는 0-50 V와 0-3 A의 범위에서 조절되는 DC power supply에 의해 원하는 전류를 공급받는다. 또한 동관의 하부 표면에 100 mm 간격으로 5개의 T-type 열전대가 부착된다. 마지막으로 열손실을 방지하기 위해 필름히터 아래 단열층을 둔다.

실험을 시작하기 전에 저장조의 작동유체를 약 1시간 동안 가열시켜 증발시킴으로써 가스제거 작업을 수행한다. 그리고 시린지 펌프로 물을 순환시켜 전자저울로 유량을 측정하여 원하는 값으로 시린지 펌프를 조절하였다. 마이크로 채널내의 유동 비등 실험은 일정한 유량에서 열유속을 증가시킴으로써 수행되었다. 본 연구에서 작동유체의 유량은 2.35~7 ml/min이며, 열유속은 100~400 kW/m<sup>2</sup>으로 Table 1에 나타내었다.

작동유체의 입·출구 온도는 입구와 출구에 절대 압력계와 T-type 열전대를 설치하여 측정하였으며, 시험부 입·출구의 압력 강하는 차압계를 사용하여 측정하였다.

본 실험에서 직접 측정된 양은 유량, 압력 강하, 입·출구 압력, 그리고 열 유속 등이다. 이들 측정량의 불확실성은 유량의 경우 ±3~5%였으며, 압력 강하 측정은 풀 스케일에서 0.25%의 정확성을 가지는 차압계를 사용하였다. 온도 측정의 불확실성은 T 타입 열전대에서 ±0.3 °C였다. 그리고 열유속은 전압과 전류계로 계산하였고, 그 때의 불확실성은 2~4%의 범위에 있었다. 열전달계수에서의 불확실성은 마이크로채널로 일어나는 열전달률을 결정할 때의 불확실성과 벽면온도 측정으로부터 유발되며, 본 연구에서는 6~12%의 범위에 있는 것으로 평가되었으며, 그보다 더 큰 불확실성은 낮은 열유속에서 일어났다.

### III. 압력 강하 상관식

마찰 압력 강하는 예측하기에 가장 어려운 성분이며, 총 압력 강하에 가장 중요한 기여를 한다. 반면, 가속으로 인한 압력 강하는 일반적으로 마찰 압력 강하와 비교해서 작은 값을 가진다. 더욱이 가속으로 인한 압력 강하는 관의 치수가 작아짐에 따라 더욱 감소할 것으로 예측된다. 따라서 마찰 압력 강하는 다음과 같다.

(1) 균질 모델(homogeneous model)

이상 유체를 균질 물성치를 가진 단상 유체처럼 간주하며, 다음과 같이 정의한다.

$$\Delta P_{TP} = \frac{2f_{TP}G^2L}{d_h\rho_{TP}} \dots\dots\dots (1)$$

$$f_{TP} = \frac{16}{Re_{TP}} \text{ for } Re_{TP} < 2000, \dots\dots\dots (2)$$

$$f_{TP} = 0.079 \times Re_{TP}^{-0.25} \text{ for } Re_{TP} > 2000, \dots\dots\dots (3)$$

$$Re_{TP} = \frac{Gd_h}{\mu_{TP}} \dots\dots\dots (4)$$

여기서 첨자 TP는 이상(two-phase)를 나타내며, 이상 밀도와 점성계수는 각각 다음과 같다.

$$\rho_{TP} = \left( \frac{x}{\rho_g} + \frac{1-x}{\rho_l} \right)^{-1} \dots\dots\dots (5)$$

$$\mu_{TP} = \left( \frac{x}{\mu_g} + \frac{(1-x)}{\mu_l} \right)^{-1}, \text{ McAdams(1954)} \dots\dots (6)$$

$$\mu_{TP} = x\mu_g + (1-x)\mu_l, \text{ Cicchitti 등 (1960)} \dots\dots (7)$$

$$\mu_{TP} = \mu_l(1-\beta) + \mu_g\beta, \text{ Dukler 등 (1964)} \dots\dots (8)$$

$$\beta = \frac{\rho_l^x}{\rho_l^x + \rho_g(1-x)}$$

$$\mu_{TP} = \mu_g\beta + \mu_l(1-\beta)(1+2.5\beta), \text{ Beattie and Whalley (1982)} \dots\dots\dots (9)$$

(2) 분리류 모델(separated flow model)

매크로 스케일에서 얻어진 상관식들은 잘 알려져 있기 때문에 본 연구에서는 미니/마이크로 스케일에서 얻어진 상관식들에 관하여 언급할 것이며, 다음과 같다.

1) Lee & Mudawar 상관식 (2005)

Chisholm 변수 C에 대하여 2개의 다른 상관식이 액체 물성치를 사용하여 다음과 같이 유도되었다.

- 층류 액체와 층류 증기 유동의 경우

$$C = 2.16 Re_{lo}^{0.047} We_{lo}^{0.23} \dots\dots\dots (10)$$

- 층류 액체와 난류 증기 유동의 경우

$$C = 1.45 Re_{lo}^{0.25} We_{lo}^{0.23} \dots\dots\dots (11)$$

3) Lee & Garimella 상관식 (2008)

층류 액체와 층류 증기 유동에 대하여 Mishima and Hibiki 상관식을 토대로 다음과 같은 Chisholm 변수 C를 제시하였다.

$$C = 2566 G^{0.5466} d_h^{0.8819} (1 - e^{-319d_h}) \dots\dots (12)$$

5) Qu & Mudawar 상관식 (2008)

채널 크기와 질량 유량의 영향을 고려하여 다음과 같은 Chisholm 변수 C를 제안하였다.

$$C = 21 [1 - \exp(-0.319 \times 10^3 d_h)] \dots\dots (13)$$

$$(0.00418G + 0.0613)$$

### IV. 결과 및 고찰

일반적으로, 측정된 마찰 압력 강하는 이상 마찰 계수를 사용하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

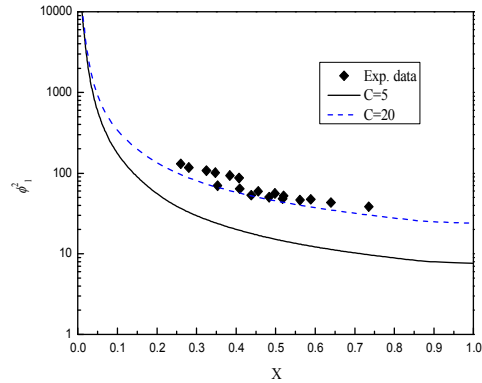
$$\phi_l^2 = \frac{\Delta P_{tp,f}}{\Delta P_l} \dots\dots\dots (14)$$

여기서,  $\Delta P_{tp,f}$ 는 이상 마찰 압력 강하이며,  $\Delta P_l$ 는 이상 유동이 액체 단상으로 흐른다고 가정했을 때의 단상 마찰 압력 강하를 나타내는 것으로 다음과 같다.

$$\Delta P_l = \frac{2f_l G^2 (1-x)^2 L}{d_h \rho_l} \dots\dots\dots (15)$$

[Fig. 3]은 측정된 마찰 압력 강하로부터 계산된 이상 마찰 계수와 Chisholm 변수 C가 각각 5와 20을 가지는 Lockhart and Martinelli 상관

식에 의해 예측된 값과의 비교를 나타내고 있다. 그림으로부터 알 수 있듯이 본 실험 결과는 Chisholm 변수 C가 20인 곡선보다 약간 높은 값을 나타내었다.

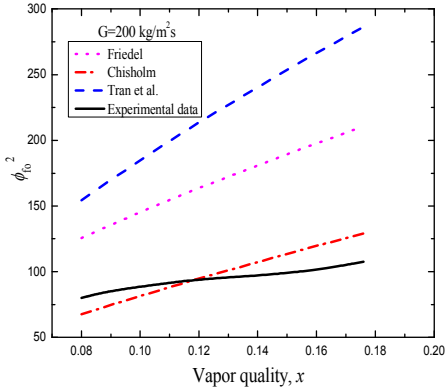


[Fig. 3] Measured two-phase multiplier

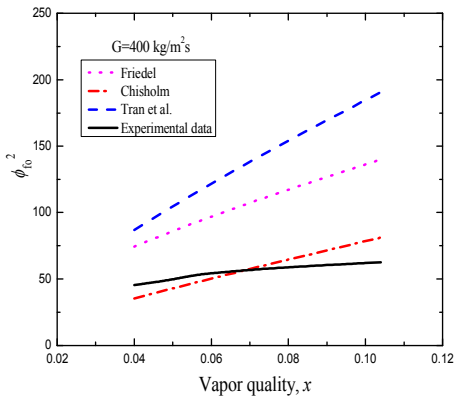
[Fig. 4]는 전체(총) 흐름을 액체로 가정했을 때의 2상 마찰 계수를 Friedel 상관식(1979), Chisholm 상관식(1983) 그리고 Tran et al. (2000)의 상관식과의 비교를 나타낸 것이다. 전체 흐름을 액체로 가정했을 때의 2상 마찰 계수는 Chisholm 상관식에 의해 잘 예측되고 있으며, Friedel 상관식과 Tran 등의 상관식은 현 데이터를 높게 예측하였다.

[Fig. 5]는 현 실험 결과를 Figs. (6)~(9)에 주어진 평균 2상 점성계수를 사용하여 예측된 균질 모델과의 비교를 나타낸다. Beattie & Whalley 모델과 Dukler 등의 모델은 현 실험 데이터를 아주 낮게 예측하였으며, Cicchitti 등의 모델은 그림에서와 같이 현 실험 결과를 다소 높게 예측하였다. 그러나 McAdams 모델은 저 질량 유속 영역을 제외한 영역에서는 현 실험 결과를 잘 예측하고 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 McAdams의 평균 2상 점성계수를 이용하여 균질 유동 모델을 예측하였다.

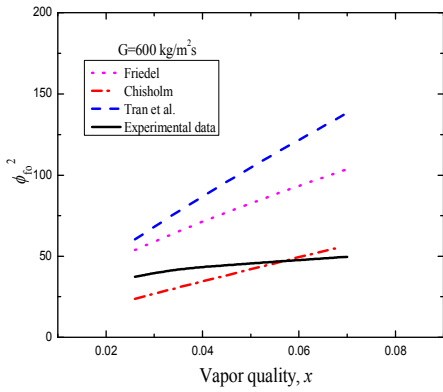
수평 사각 채널에서의 2상 압력 강하



(a) G=200

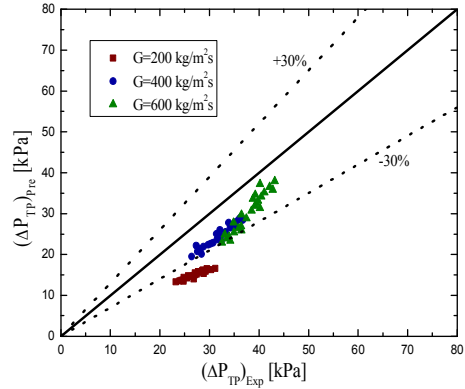


(b) G=400

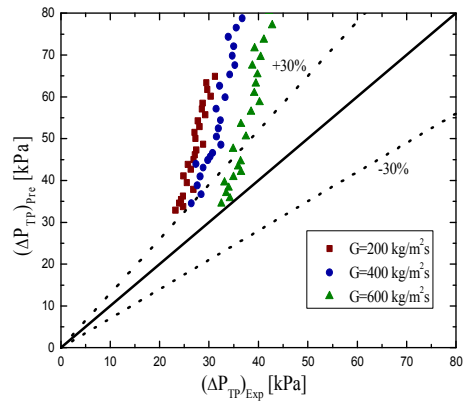


(c) G=600

[Fig. 4] Measured frictional multipliers



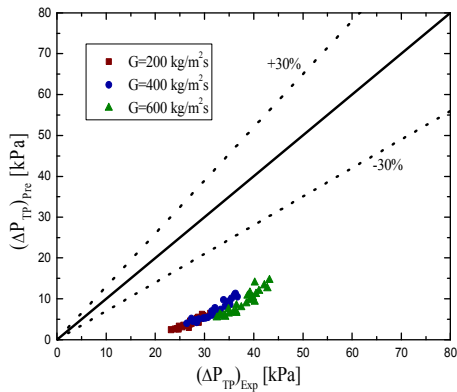
(a) McAdams



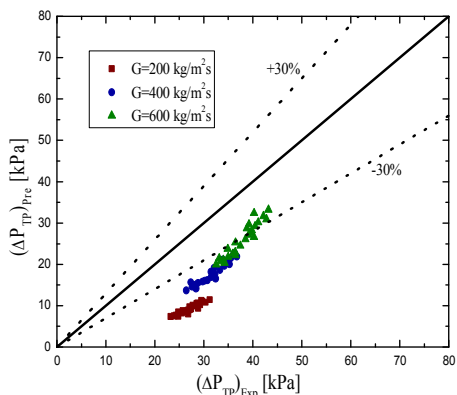
(b) Cicchitti 등

[Fig. 5] Homogeneous models

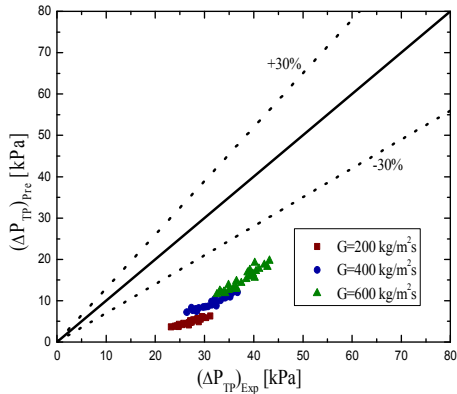
[Fig. 6]은 측정된 마찰 압력 강하를 미니/마이크로 채널에서 개발된 상관식과의 비교를 나타낸 것이다. Lee & Mudawar와 Mishima & Hibiki 상관식은 현 실험 결과를 거의 비슷하게 예측하였으며, 현 데이터를 아주 낮게 예측하였다. Lee & Mudawar는 냉매 R134a를 사용하여 2상 압력 강하를 측정하였으며, Mishima & Hibiki는 공기-물의 2상 유동시 압력 강하에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 따라서 유체 물성치의 차이로 인해 큰 오차가 발생하는 것으로 예측할 수 있다. Lee & Garimella의 상관식은 미니/마이크로 채널에서 개발된 상관식 중에서 47.2%의 MAE내에서 현 실험 결과를 가장 잘 예측하는 것으로 나타났다. 이것은 동일한



(a) Lee & Mudawar



(b) Lee & Garimella



(c) Qu & Mudawar

[Fig. 6] Comparison between the experimental data and correlations developed in mini/micro channels

유체를 사용하여 유체 물성치가 일치하였기 때문에 생각된다. Qu & Mudawar의 상관식은 Mishima & Hibiki의 상관식에 질량 유속의 영향을 추가하여 개발된 것으로 Mishima & Hibiki의 상관식보다 오차가 줄어든 것으로 나타났다. <Table 1>은 현 실험 결과와 몇몇 미니/마이크로 채널에서 개발된 상관식사이의 mean absolute error(MAE)를 나타내고 있다.

<Table 1> Mean absolute error(MAE)

| 상관식              | MAE(%) |
|------------------|--------|
| Lee & Mudawar    | 79.8   |
| Mishima & Hibiki | 80.2   |
| Lee & Garimella  | 47.2   |
| Qu & Mudawar     | 70.7   |

## V. 결론

수평 사각 채널에서 유동 비등시 마찰 압력 강하에 관한 실험적인 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실험으로부터 얻어진 이상 마찰 승수는 Lockhart and Martinelli 상관식에서 Chisholm 변수 C가 20인 곡선보다 약간 높은 값을 나타내었다.
2. 전체 흐름을 액체로 가정했을 때의 2상 마찰 승수는 Chisholm 상관식에 의해 잘 예측되었다.
3. 미니/마이크로 채널에서 개발된 상관식의 경우 Lee and Garimella 상관식이 47.2%의 MAE내에서 현 실험 결과를 가장 잘 예측하는 것으로 나타났다.

## Reference

Beattie, D.R.H. and Whalley, P.B.(1982). A simple two-phase flow frictional pressure

- drop calculation method, *Int. J. Multiphase Flow*, 8, 83~87.
- Chisholm, D.(1983). Two-phase Flow in Pipelines and Heat Exchangers, Longman, New York.
- Cicchitti, A., Lombardi, C., Silvestri, M., Soldaini, G., and Zavalluilli, R.(1960). Two-phase cooling experiments pressure drop, heat transfer and burnout measurement, *Energia Nucl.* 7, 407~425.
- Dukler, A.E. and Wicks III, M., and Cleveland, R.G.(1964). Pressure drop and hold-up in two-phase flow, *J. AIChE*, 10, 38~51.
- Friedel, L.(1979). Improved Friction Pressure Drop Correlations for Horizontal and Vertical Two-Phase Pipe Flow, Presented at the European Two-phase Flow Group Meeting, Ispra, Italy, Paper E2, June, 18, 485~492.
- Lee, P.S. and Garimella, S.V.(2008). Saturated flow boiling heat transfer and pressure drop in silicon microchannel arrays, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 51, 789~806.
- Lee, J. and Mudawar, I.(2005). Two-phase flow in high-heat-flux micro-channel heat sink for refrigeration cooling applications: Part I -pressure drop characteristics, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 48, 928~940.
- You, S. S. · Lim, T. W. · Jeong, S. K. and Park, J. U.(2007), A Study on the micro-cooling Fin Fabrication Process for Enhancing Boiling Heat Transfer, Korea, *Jour. Fish. Mar. Sci. Edu.*, 19(3), 366~372.
- Lim, T. W. and You, S. S.(2008), Nucleate Boiling Heat Transfer from Micro Finned Surfaces in Subcooled FC-72, Korea, *Jour. Fish. Mar. Sci. Edu.*, 20(3), 410~415.
- McAdams, W.H.(1954). Heat transmission, third ed. McGraw-Hill, New York.
- Mishima, K. and Hibiki, T.(1996). Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes, *Int. J. Multiphase Flow*, 22, 703~712.
- Tran, T.N., Chyu, M.C., Wambsganss, M.W., and France, D.M.(2000). Two-phase pressure drop of refrigerants during flow boiling in small channels: and experimental investigation and correlation development, *Int. J. Multiphase Flow*, 26, 1739~1754.

- 
- 논문접수일 : 2013년 03월 25일
  - 심사완료일 : 1차 - 2013년 05월 28일
  - 게재확정일 : 2013년 05월 31일