

## 수평 다채널에서의 압력강하에 관한 새로운 상관식

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

### A New Correlation on Pressure Drop in Horizontal Multi Channels

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

#### Abstract

Flow boiling pressure drop in multi channels was experimently investigated. The multi channel has a width and depth of 0.45 and 0.2mm respectively, and comprises 15 parallel channels. The measured total pressure drop is expressed by the sum of the frictional pressure drop and acceleration pressure drop. In order to predict the total pressure drop, it is required to obtain the correct frictional pressure drop. The existing correlations to predict the frictional pressure were compared with measured frictional pressure drop. The new correlation was developed in the form of the Chisholm correlation. It was related to Chisholm Constant B as a function of Martinelli parameter. The new correlation predicted the experimental data within a mean absolute error of 5.5%.

**Key words :** Boiling, FC-72, Multi channels, Pressure drop, Two-phase flow

#### I. 서론

마이크로 채널 내부 유동에 관한 연구는 이미 오랜 기간 동안 진행되고 있으며, 그 이점 또한 널리 알려져 있다(Choi et al., 2015). 마이크로 채널 유동에 대한 연구는 주로 열전달 특성을 파악하는데 집중되고 있다. 하지만 마이크로 채널을 이용한 히트싱크를 적용하여 냉각 시스템을 구성할 경우 가장 먼저 확인해야 할 사항 중 하나가 입력 동력을 결정하는 것이다. 입력 동력은 냉각 시스템 내부의 작동유체를 순환시키기 위한 펌프 동력을 뜻하며, 이때 작동유체의 유량과 압력을 예측하여 시스템을 설계하여야 한다. 열 소산에 필요한 유량을 결정짓기 위해서는 열전달 계수를 확인하여야 하며, 압력을 결정짓기 위해서는 시

스템 내부의 설계 압력과 각종 압력 손실 등을 미리 계산하는 과정이 필수적이다. 일반 파이프나 매크로 관에서의 압력강하를 계산하는 경우 이미 잘 정립된 방법 및 상관식을 통해서 적절한 값을 예측할 수 있다. 하지만 마이크로 채널의 압력강하를 계산할 경우 매크로 관에서 개발된 상관식을 사용하게 되면 많은 오차가 발생하는 것이 보고되었다(Choi et al., 2014b; Lim et al., 2013).

압력강하를 예측하기 위한 방법은 균질류 모델(homogeneous model)과 분리류 모델(separated flow model)로 크게 두가지 방법에 의해 이루어진다. 분리류 모델은 Lockhart & Martinelli(1949)에 의해 제안되었으며, 마이크로 채널에서의 압력강하를 예측하기 위해 개발된 대부분의 상관식

<sup>†</sup> Corresponding author : 051-410-4256, kyunlim@kmou.ac.kr

이 분리류 모델을 사용하며, Lockhart & Martinelli의 상관식을 일부 수정하여 제안되었다.

Mishima & Hibiki(1996)은 직경 1.4 mm의 튜브에서 공기와 물의 2상 유동에 관한 실험을 통해서 압력강하를 비롯하여 미니채널에서의 유동특성을 분석하였다. 분석결과 채널직경이 줄어들수록 매크로 채널과 비교하여 표면장력이 유동에 미치는 영향이 증가한다고 밝혔으며, 그에 따라서 압력강하를 예측하기 위해서 관직경의 영향을 고려해주었다. Mishima & Hibiki(1996)의 상관식은 현재까지도 미니/마이크로 채널에서 압력강하를 예측하기 위해서 종종 사용되는 상관식 중 하나이다. 그 후 몇몇의 연구자들(Qu & Mudawar, 2003; Sun & Mishima, 2009; Zhang et al., 2010)은 Mishima and Hibiki의 상관식을 토대로 새로운 상관식을 제안하였다.

Megahed & Hassan(2009)은 폭과 깊이가 각각 0.276 mm × 0.225 mm, 채널의 개수가 45개인 다채널에서 FC-72의 유동 비등 압력강하 실험과 유동 가시화에 관한 실험을 수행하였다. 실험결과에 따르면 압력강하는 증기건도와 질량유속에 강하게 의존하는 것으로 나타났으며, Chisholm 상수  $C$ 를 Reynolds number, confinement number 그리고 Martinelli parameter에 관한 함수로서 표현되는 상관식을 제안하였다.

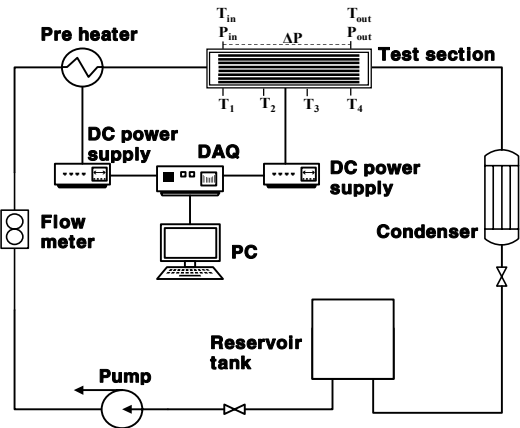
Gan et al.(2015)는 수력직경이 0.155 mm이며, 채널의 개수가 10개인 삼각형 모양의 다채널에서 아세톤의 유동 비등 압력강하에 관한 실험을 수행하였다. 그들은 2상 유동 비등 압력강하는 유동패턴에 의존한다고 주장하였으며, 실험 데이터를 기존의 상관식들과 비교한 결과, 환상류(annular flow)에서 개발된 상관식은 그들의 실험 결과를 잘 예측하지 못하였다. 따라서 실험에서 얻는 자료를 토대로 Chisholm(1983)의 상관식을 수정하여 압력강하를 예측하는 상관식을 제안하였다.

본 연구에서는 FC-72(Perfluorohexane, C6F14)를 작동 유체로 사용하여 마이크로 채널에서의 2상

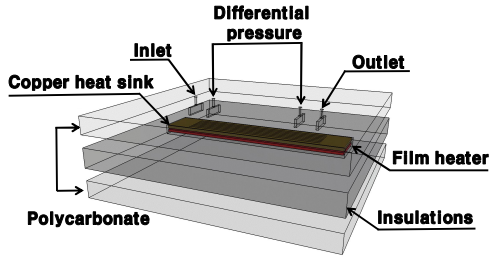
유동 비등 압력강하 실험을 수행하였다. FC-72는 물에 비해 낮은 비등점을 가지며, 높은 유전상수 값을 가지므로 전자 장비의 냉각 시스템의 냉매로서 주로 사용된다. 또한 불연성, 무독성이며 열적, 화학적으로 안정하다는 장점을 가지는 냉매이다. 실험을 통해 측정된 압력강하는 분리류 모델에 의해 분석되었으며, 균질류 모델을 포함하여 기존의 여러 상관식들과 비교하였다. 그리고 실험 결과를 토대로 마이크로 채널에서 압력강하를 예측하는 새로운 상관식을 제안하였다.

## II. 실험장치 및 방법

실험장치의 개략도는 [Fig. 1]에 나타내었다. 실험장치는 크게 저장탱크, 기어펌프, 예열기, 시험부 그리고 응축기로 구성되어 있다. 작동 유체는 저장탱크에서 기어펌프를 통해 예열기를 거치며 일정 온도까지 상승된 후, 시험부를 통과하면서 시험부의 필름히터에 의해 비등하게 된다. 그 후 응축기를 거쳐 응축된 후 다시 저장탱크로 유입된다. 작동유체인 FC-72는 공기 용해도가 높아서 실험전 가스제거 작업이 필수적으로 진행되어야 한다(Megahed & Hassan, 2009). 따라서 실험 시작 전 약 1시간동안 시스템내부의 작동유체를 순환시키며 작동유체내의 가스제거 작업을 수행하였다.



[Fig. 1] Schematic Diagram of Experimental Setup



[Fig. 2] Test Section

[Fig. 2]는 시험부를 나타낸다(Choi et al., 2015). 마이크로 채널은 동판에 가공되었으며, 폭과 깊이가 0.45 mm × 0.20 mm인 사각 채널이며, 채널의 개수는 총 15개인 다채널로 구성되었다. 총 길이 60 mm 중 40 mm 구간에 대한 차압을 측정하였다. 마이크로 채널의 하부에는 필름히터를 부착하여 일정한 열량을 공급하도록 하였으며, 필름히터에 연결된 직류 전원 공급장치는 23-61V, 0.22-0.55A 범위에서 전압과 전류를 공급한다. 이때 인가되는 전압과 전류를 측정하여 시험부에 전달되는 열유속을 계산하였다. 마이크로 채널의 상부에는 폴리카보네이트 재질로 제작된 투명한 커버를 부착하였으며, 이 커버 내부에 매니폴드를 가공하여 각 채널로 균일한 유동분배가 이루어질 수 있도록 하였다. 다채널의 매니폴드에서의 유동은 지난 연구에서 수치해석을 통해 확인하였다(Choi et al., 2013; Choi et al., 2014a).

본 연구의 실험 범위는 <Table 1>과 같다. 시험부의 입·출구에서 작동유체의 온도는 T-type 열전대를 사용하여 측정하였으며 압력강하는 차압계를 사용하여 측정하였다. 측정된 값들은 데이터 수집장치를 이용하여 수집, 분석하였다. 측정된 값들의 불확실성은 유량과 온도 각각 ±3%, ±0.3°C이며, 차압계의 정확도는 풀 스케일(full scale)에서 ±0.25%이다. 열유속의 불확실성은 Holman(1989)의 해석법을 이용하여 계산하였으며, 2-4% 범위에 있었다.

<Table 1> Experimental conditions

Parameter	Value
inlet pressure	105 - 110 [kPa]
heat flux	5.6 - 37.2 [kW/m <sup>2</sup> ]
mass flux	152.9 - 353.9 [kg/m <sup>2</sup> s]

### Ⅲ. 결과 및 고찰

#### 1. 분석 방법 및 분석 모델

수평 채널에서 식 (1)과 같이 총 압력강하  $(dp/dz)_t$ 는 마찰 압력강하  $(dp/dz)_f$ 와 가속 압력강하  $(dp/dz)_a$ 의 합으로 나타난다.

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_t = \left(\frac{dp}{dz}\right)_f + \left(\frac{dp}{dz}\right)_a \quad (1)$$

마찰 압력강하와 가속 압력강하는 직접 측정할 수 없으나, 가속 압력강하의 경우 운동량 유속의 측정을 통해 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_a = G^2 \frac{d}{dz} \left[ \frac{x^2}{\alpha \rho_v} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)\rho_l} \right] \quad (2)$$

여기서  $G$ 는 질량유속,  $x$ 는 건도,  $\alpha$ 는 기공률,  $\rho$ 는 밀도를 나타내며, 하첨자  $v$ 와  $l$ 은 각각 기상과 액상을 뜻한다. 기공률은 식 (3)으로 정의되는 Zivi(1964)의 상관식을 사용하여 계산하였다.

$$\alpha = \left[ 1 + \frac{(1-x)}{x} \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{-1} \quad (3)$$

출구의 증기 건도  $x$ 는 에너지 평형으로부터 식 (4)와 같이 계산된다.

$$x = \frac{1}{h_{fg}} \left[ \frac{q}{\dot{m}} - c_p (T_{sat} - T_{in}) \right] \quad (4)$$

식 (4)에서  $h_{fg}$ 는 잠열,  $q$ 는 열량,  $\dot{m}$ 은 질량 유량,  $c_p$ 는 정압비열,  $T_{sat}$ 은 포화온도 그리고  $T_{in}$ 은 입구온도를 나타낸다.

실험을 통해서 측정된 압력강하는 총 압력강하

이며, 이 값에서 식 (2)에 의해 얻어진 가속 압력 강하를 빼면 마찰 압력강하를 구할 수 있다. 마찰 압력강하를 구하기 위한 모델로는 크게 두가지가 있다. 균질류 모델과 분리류 모델이다. 균질류 모델은 액상, 기상 두 개의 상이 혼합되어 평균 물성치를 가지는 단상(single phase) 유동으로 간주한다. 분리류 모델은 Lockhart and Martinelli(1949)에 의해 식 (5)과 같이 제안되었으며, 2상 마찰승수( $\phi^2$ )의 개념을 도입하였다. 2상 마찰승수는 Chisholm 상수( $C$ )와 Martinelli 변수( $X$ )에 관한 함수로서 정의하였다.

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_f = \phi_l^2 \left(\frac{dp}{dz}\right)_l \quad (5)$$

$$\phi_l^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}$$

Lockhart and Martinelli의 상관식에서 Chisholm 상수( $C$ )는 액상과 기상의 유동영역에 따라 다음과 같이 정의되었다.

$$C_{tt} = 20 \text{ (액상 : 난류 / 기상 : 난류)}$$

$$C_{vt} = 12 \text{ (액상 : 층류 / 기상 : 난류)}$$

$$C_{tv} = 10 \text{ (액상 : 난류 / 기상 : 층류)}$$

$$C_{vv} = 5 \text{ (액상 : 층류 / 기상 : 층류)}$$

Chisholm(1983)은 2상 마찰승수를 Chisholm 상수( $B$ ), 증기건도 그리고 작동유체의 물성치에 관한 함수로서 표현하였으며, 식 (6)과 같이 계산된다.

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_f = \phi_{lo}^2 \left(\frac{dp}{dz}\right)_{lo} \quad (6)$$

$$\phi_{lo}^2 = 1 + (\Gamma^2 - 1) [Bx^{0.5}(1-x)^{0.5} + x]$$

$$\Gamma^2 = \left(\frac{v_v}{v_l}\right) \left(\frac{\mu_v}{\mu_l}\right)$$

하침자  $lo$ 는 liquid-only를 의미한다. 즉, 채널내부를 액체만 유동한다고 가정한다는 것을 뜻한다. Chisholm 상수  $B$ 는 무차원 물성치 계수인  $\Gamma$ 와 질량유속의 범위에 따라 정해지며,  $\Gamma \leq 9.5$  이

며,  $G \leq 500$  일 때 4.8로 정해진다.

Mishima and Hibiki(1996)는 Lockhart and Martinelli(1949)의 상관식을 사용하였으며, Chisholm 상수  $C$ 를 식 (7)과 같이 수력직경에 관한 함수로 정의하였다.

$$C = 21(1 - e^{-0.319D_h}) \quad (7)$$

Megahed and Hassan(2009)는 액상의 층류에 대해서 기상의 층류와 난류에 따른 상관식을 제안하였는데, Chisholm 상수  $C$ 를 식 (8)과 같이 Reynolds number( $Re$ )와 confinement number( $Co$ ) 그리고 Martinelli 변수( $X$ )와 같은 무차원수에 관한 함수로서 표현하였다.

$$C_{vv} = \frac{0.0053 Re_{lo}^{0.934}}{Co^{0.73} (X^2)^{0.175}} \quad (8)$$

$$C_{vt} = \frac{0.0002 Re_{lo}^{1.7}}{Co^{0.7} (X^2)^{1.24}}$$

Gan et al.(2015)는 Chisholm(1983)의 상관식에서 Chisholm 상수  $B$ 를 식 (9)와 같이 질량유속에 관한 함수로서 제안하였다.

$$B = 169.6258 G^{-0.5747} \quad (9)$$

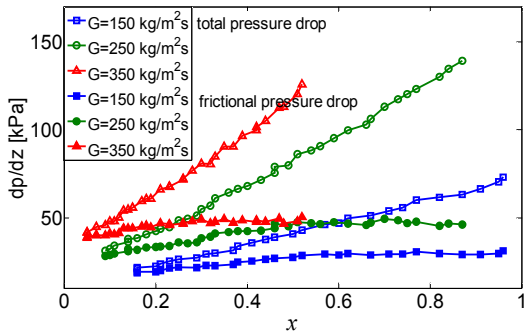
본 연구에서는 Gan et al.(2015)과 마찬가지로 분리류 모델을 기반으로 하는 Chisholm(1983)의 상관식을 수정하였으며, Chisholm 상수  $B$ 를 Martinelli 변수에 관한 함수로 상관시켜 식 (10)과 같이 나타내었다.

$$B = 1.12 X^{-2.31} \quad (10)$$

## 2. 결과분석

[Fig. 3]은 각 질량유속별로 증기건도에 대한 총 압력강와 마찰 압력강하를 나타낸 것이다. 실험에서 얻어진 총 압력강하는 증기건도가 증가할수록 거의 선형적으로 증가하였으나, 마찰 압력강하는 증기건도가 증가할수록 증가폭은 감소하며, 높은 건도 영역에서는 거의 일정하게 유지되었다. 이것은 증기건도가 증가할수록 총 압력강

하에서 가속 압력강하가 차지하는 비중이 증가하기 때문이다.



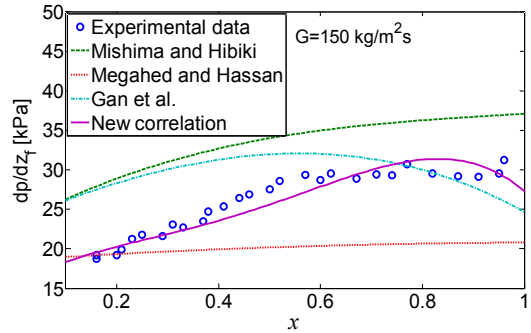
[Fig. 3] Variation of Pressure Drop with Respect to Vapor Quality

[Fig. 4] 실험에서 얻어진 마찰 압력강하와 기존의 상관식 및 새로운 상관식에 의해 예측된 마찰 압력강하를 비교하여 나타내었다. Mishima and Hibiki(1996)의 상관식은 실험값에 대해서 전체적으로 마찰 마찰압력강하를 높게 예측하였으나, 증기 건도에 대한 마찰 압력강하의 변화 경향을 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 반면에 Megahed and Hassan(2009)의 상관식은 마찰 압력강하를 실험값에 대해서 대부분 낮게 예측하였으며, 증기건도에 대한 마찰 압력강하의 증가 추세를 잘 예측하지 못하였다. 하지만 질량유속 350kg/m<sup>2</sup>s일 때는 마찰 압력강하의 평균적인 값을 가장 잘 예측하였다. Gan et al.(2015)의 상관식에 의한 마찰 압력강하는 증기건도 0-0.6 영역에서는 증가하다가 증기건도 약 0.6 이상의 영역에서는 감소하는 경향이 나타났다.

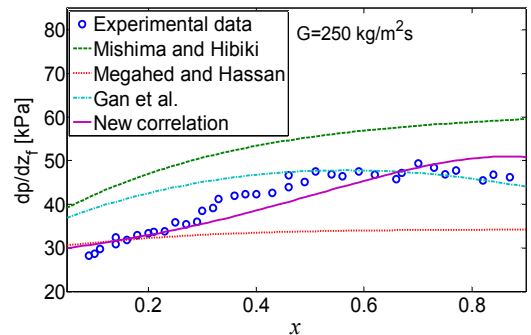
본 연구에서 제안한 상관식은 실험값과 유사하게 증기건도가 증가할수록 마찰압력강하가 증가하는 것으로 예측하였으며, 질량유속 150kg/m<sup>2</sup>s 일 때, 0.8 이상의 증기건도 높은 건도에서는 마찰압력강하가 감소하는 것으로 예측하였다.

<Table 2>는 실험에서 얻어진 마찰 압력강하와 여러 상관식들과의 mean absolute error(MAE)를 나타낸 것이다. 기존의 상관식들 중에서는

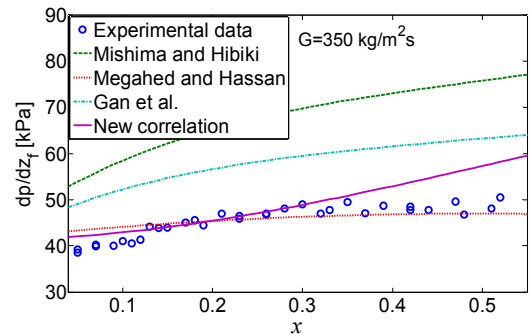
Megahed and Hassan의 상관식이 MAE 14.2%내에서 실험결과를 비교적 잘 예측하였으며, 본 논문에서 제안하는 새로운 상관식은 [Fig. 5]와 같이 MAE 5.5%내에서 실험결과를 가장 정확하게 예측하였다.



(a) G=150kg/m<sup>2</sup>s



(b) G=250kg/m<sup>2</sup>s

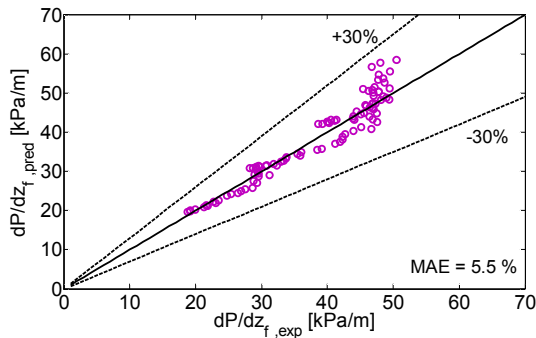


(c) G=350kg/m<sup>2</sup>s

[Fig. 4] Comparison of experimental data and existing correlation predictions

<Table 2> Mean Absolute Error

Correlation	MAE(%)
Mishima and Hibiki	35.4
Megahed and Hassan	14.2
Gan et al.	20.0
New correlation	5.5



[Fig. 5] Comparison between the Experimental data and New Correlation

#### IV. 결론

본 연구에서는 마이크로 수평 다채널에서 FC-72의 비등 압력강하에 관한 실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 증기건도가 증가함에 따라서 총 압력강하는 선형적으로 증가하는데 비해서 마찰 압력강하는 증기건도의 증가에 따라서 증가폭이 감소하며, 높은 건도에서는 거의 일정하게 유지되었다.

2. 실험에서 얻어진 마찰 압력강하를 예측하기 위해서 미니/마이크로 채널에서 개발된 상관식들과 비교하였으며, 기존의 상관식들중에서는 Megahed and Hassan(2009)의 상관식이 MAE 14.2%내에서 비교적 잘 예측하였다. 하지만 전반적으로 실험값에 비해서 낮게 예측하였다.

3. 본 실험결과를 토대로 Chisholm(1983)의 상관식을 수정하여 새로운 상관식을 제안하였다. 이 상관식은 Chisholm 상수 $B$ 를 Martinelli 변수에

관해서 상관하였으며, 새로운 상관식은 MAE 5.5%내에서 실험결과를 잘 예측하였다.

#### References

Chisholm, D.(1983). Two-Phase Flow in Pipelines and Heat Exchanger, Longman: New York.

Choi, Yong seok & Lim, Tae woo(2015). Study on characteristics of flow boiling heat transfer in multi channel, The Journal of Fisheries and Marine Sciences Education, 27(5), 1310~1317.

Choi, Yong seok · Lim, Tae woo & You, Sam sang(2014). Prediction methods for two-phase flow frictional pressure drop of FC-72 in parallel micro-channels, Journal of the Korean Society of Marine Engineering 38(7), 821~827.

Choi, Yong seok · Lim, Tae woo · Kim, You taek & Kim, Do yeop(2013). CFD analysis on the channel shpapes of parallel micro-channels, The Journal of Fisheries and Marine Sciences Education, 25(5), 1102~1109.

Choi, Yong seok · Lim, Tae woo · You, Sam sang · Choi, Hyeung sik & Kim, Hwan seong(2014). Experimental and numerical analysis for single-phase flow pressure drop in parallel micro-channels, The Journal of Fisheries and Marine Sciences Education, 26(5), 1090~1095.

Gan, Y. · Xu, J. & Yan, Y.(2015). An experimental study of two-phase pressure drop of acetone in triangular silicon micro-channels, Applied Thermal Engineering, 80, 76~86.

Holman, J. P.(1989). Experimental Methods for Engineering, McGraw-Hill :Singapore.

Lim, Tae woo · You, Sam sang & Kim Hwang seong(2013). Two-phase pressure drop in horizontal rectangular channel, The Journal of Fisheries and Marine Sciences Education, 25(3), 625~631.

Lockhart, R. W. & Martinelli, R. C.(1949). Proposed correlation of data for isothermal two-component flow in pipes, Chemical Engineering Progress, 45, 39~48.

Megahed, A. & Hassan, I.(2009). Two-phase pressure drop and flow visualization of FC-72 in a silicon microchannel heat sink, International Journal of Heat and Fluid Flow, 30, 1171~1182.

- Mishima, K. & Hibiki, T.(1996). Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes, *International Journal of Multiphase Flow*, 22(4), 703~712.
- Qu, M. & Mudawar, I.(2003). Measurement and prediction of pressure drop in two-phase micro-channel heat sinks, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, 2737~2753.
- Sun, L. & Mishima, K.(2009). Evaluation analysis of prediction methods for two-phase flow pressure drop in micro-channels, *International Journal of Multiphase Flow*, 35, 47~54.
- Zhang, W. · Hibiki, T. & Mishima, K.(2010), Correlations of two-phase frictional pressure drop and void fraction in mini-channel. *International Jour of Heat and Mass Transfer*, 53, 453~465.
- Zivi, S. M.(1964). Estimation of steady-state steam void-fraction by means of the principle of minimum entropy production, *Journal of Heat Transfer*, 86, 247~251.
- 
- Received : 30 June, 2016
  - Revised : 12 July, 2016
  - Accepted : 18 July, 2016