

수평 다채널에서의 열전달 계수에 관한 새로운 상관식

최용석 · 임태우[†]
(한국해양대학교)

A New Correlation on Heat Transfer Coefficient in Horizontal Multi Channels

Yong-Seok CHOI · Tae-Woo LIM[†]
(Korea Maritime and Ocean University)

Abstract

This paper presents a experimental study of two-phase flow boiling of FC-72 in multi channels. Flow boiling heat transfer coefficients are obtained with mass flux ranging from 152.9 to 353.9 kg/m²s and heat flux from 5.6 to 46.1 kW/m². The experimental results show that the heat transfer is governed by nucleate boiling mechanism in the low heat flux region. However, it is found that the effects of nucleate boiling and forced convection boiling are combined as the heat flux increases. A new correlation to predict the heat transfer coefficient is developed by using the dimensionless number such as Reynolds number, Weber number, boiling number. This correlation shows good predictive accuracy against the measured data.

Key words : Boiling, FC-72, Heat transfer coefficient, Multi channels, Two-phase flow

I. 서론

2상 유동 비등 열전달 계수는 단상 유동에 비해서 높은 열전달 계수를 가지며, 특히 마이크로 채널에서 더 높은 값을 가진다. 이러한 특징으로 인해서 2상 유동 마이크로 히트싱크는 냉각 시스템에 적용되어 활용되고 있다(Mudawar, 2011; Lim et al., 2013). 하지만 마이크로 채널 유동에서의 2상 유동 열전달 특성은 현재까지도 명확하게 규정되지 않고 있다. 마이크로 채널 유동에서의 열전달 특성을 확인하기 위해서는 마이크로 채널에서의 비등 열전달 메커니즘을 기반으로 열전달 계수를 예측하는 모델을 분석하고 개발하는 것이 요구된다.

채널 유동에서의 비등은 크게 두 가지 메커니즘, 핵비등(nucleate boiling)과 강제 대류 비등

(forced convection boiling)에 의해서 이루어진다. 유동 형태 및 유동 패턴에 따라서 주로 두 가지 메커니즘 중에서 한 가지 메커니즘이 유동을 지배하는 메커니즘으로 나타나기도 하지만, 두 가지 메커니즘이 복합적으로 나타나기도 한다. 핵비등에 의한 열전달이 이루어지는 경우 열전달 계수는 열유속(heat flux)에 의존하며, 질량유속(mass flux)과 증기 건도에는 무관하게 나타나지만, 강제 대류 비등에 의한 열전달이 이루어지는 경우 열전달 계수는 질량유속과 증기 건도에 의존하며 열유속에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타난다.

Kandlikar(1991)은 소형 열교환기에서의 열전달 계수를 구하기 위해서 이전 연구(Kandlikar, 1990)에서 제안한 상관식을 일부 수정하여 제안하였으며, 이 상관식은 채널에서의 유동 비등 현상을

[†] Corresponding author : 051-410-4256, kyunlim@kmou.ac.kr

잘 예측하였다.

Warrier et al.(2002)는 수력직경 0.75mm의 마이크로 채널에서 FC-84를 작동 유체로 사용하여 2상 유동 비등 열전달 및 압력강하에 관한 실험을 수행하였다. 포화 비등시 열전달 계수를 비등수(boiling number)에 관한 함수로서 정의한 상관식을 제안하였다.

Kaew-On and Wongwises(2009)는 수력직경 3.48mm의 수평 사각 미니 채널에서 R-410A를 작동 유체로 사용하여 비등 열전달과 압력강하에 관한 실험을 수행하였다. 실험결과에 따르면 일정한 열유속 조건에서 열전달 계수는 최대값까지는 증기 건도가 증가할수록 증가하다가 최대값 이후 감소하는 경향이 나타났다.

Megahed(2012)는 FC-72를 작동 유체로 사용하여 폭과 깊이가 각각 0.225 mm, 0.276 mm인 사각 채널에서 비등 실험을 수행하였다. 실험결과에 따르면 0.2 이하의 낮은 증기 건도 영역에서는 핵비등에 의한 열전달이 주요 메커니즘으로 작용하며, 0.2 이상의 증기 건도 영역에서는 핵비등과 강제 대류 비등에 의한 열전달이 복합적으로 발생하였다.

Charnay et al.(2015)는 R-245fa를 작동 유체로 사용하여 3mm 미니튜브에서의 2상 유동 비등 열전달 실험을 수행하였다. 실험결과를 토대로 유동 패턴을 intermittent flow, annular flow, dryout flow 그리고 mist flow 4가지로 구분하였으며, 유동 패턴에 따라서 열전달 메커니즘이 다르게 나타난다고 보고하였다.

Choi & Lim(2015a, 2015b)는 2상 유동 비등 실험을 통해서 마이크로 채널에서의 유동 비등 메커니즘을 분석하였다. 실험 결과에 낮은 증기 건도 영역에서는 핵비등에 의한 열전달이 주로 발생하지만, 증기 건도가 증가함에 따라서 핵비등의 영향은 점차 감소하는 동시에 강제 대류 비등에 의한 열전달이 이루어진다고 보고하였다.

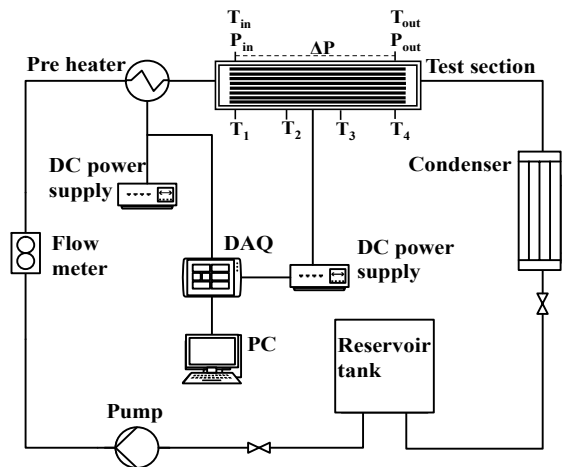
최근의 연구(Kandlikar, 2010; Bigham & Moghaddam, 2015)에서는 마이크로 채널에서의

열전달 메커니즘은 전술한 두가지 메커니즘 외에 풀비등(pool boiling) 메커니즘과 유사하게 나타난다고 보고하기도 하였다.

본 연구에서는 FC-72를 작동 유체로 사용하여 2상 유동 비등 실험을 수행하였다. 실험 결과를 바탕으로 열전달 특성을 분석하였으며, 이를 토대로 마이크로 채널에서 열전달 계수를 예측하는 새로운 상관식을 제안하였다.

II. 실험장치 및 방법

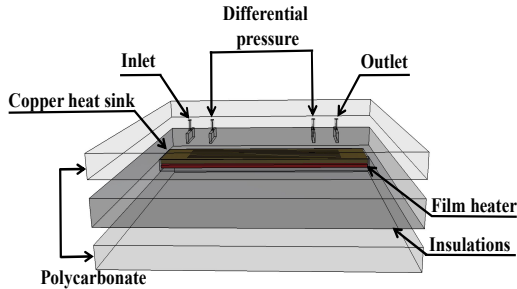
본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도는 [Fig. 1]에 나타내었다. 실험장치는 저장탱크, 기어펌프, 예열기, 시험부 그리고 응축기로 구성되어 있으며, 작동 유체는 FC-72를 사용하였다. FC-72는 공기 용해도가 높기 때문에 가스제거 작업이 필수적으로 진행되어야 한다(Megahed, 2012). 따라서 본 연구에서도 실험 전 약 1시간에 걸쳐 FC-72를 가열하여 증발시킴으로써 가스제거 작업을 수행하였다.



[Fig. 1] Schematic Diagram of Experimental Setup

작동 유체는 저장탱크에서 기어펌프를 통해 예열기를 거쳐 시험부를 지나면서 2상 유동 상태에 이른다. 시험부를 지난 증기는 응축기에서 응축되어 다시 저장탱크에 저장된다.

본 연구에 사용된 시험부의 개략도는 [Fig. 2]에 나타내었다.



[Fig. 2] Test Section

마이크로 채널은 15개의 병렬 채널로 이루어져 있으며 각 채널의 폭과 깊이는 각각 0.45 mm, 0.20 mm으로 제작되었다. 채널의 총길이는 60 mm이다. 마이크로 채널이 가공된 동판의 하부에는 필름히터가 부착되며, 필름히터는 직류 전원 공급장치에 의해 전압과 전류를 공급한다. 이때 필름히터에 인가되는 전압과 전류를 측정하여 마이크로 채널에 공급되는 유효 열유속을 계산하였다. 동판과 필름히터 사이에 4개의 T-type 열전대를 부착하여 온도를 측정하였으며, 여기서 측정된 온도를 기반으로 채널 벽면 온도를 계산하였다(Choi & Lim, 2015a). 마이크로 채널이 가공된 동판의 상부에는 폴리카보네이트 재질의 커버를 부착하였으며, 폴리카보네이트 커버 내부에 각 채널로 균일한 유동분배를 위한 매니폴더를 가공하였다(Choi et al., 2013; Choi et al., 2014).

유량은 기어펌프의 RPM을 조정함으로써 조절되며, 유량계를 통해서 측정된다. 본 연구에서는 질량 유속 150, 250, 350 kg/m²s의 범위에서 실험이 이루어 졌다. 각 질량 유속에서 열유속의 가감을 통해서 출구 증기 건도를 조절하였으며, 열유속은 5.6~46.1 kW/m² 범위에서 조절되었으며, 이때 출구 증기 건도는 0.05~0.96 범위에 있었다.

측정 데이터의 불확실성은 유량의 경우 풀 스케일(full scale)에서 ±3%이며, 온도 측정의 불확

실성은 ±0.3℃이다. 열유속과 열전달 계수의 불확실성은 Holman(1989)의 방법을 이용하여 계산하였으며, 열유속의 불확실성은 2-4%, 열전달 계수의 불확실성은 4-11% 범위에 있었다.

III. 분석 방법

유효 열유속 q'' 은 식 (1)과 같이 계산된다 (Mishan, et al., 2007).

$$q'' = \frac{(q_{total} - q_{cond} - q_{loss})}{A} = \phi \frac{VI}{F} \quad (1)$$

$$F = N(2H + W)L$$

여기서 ϕ 는 전체 공급된 열량에서 손실 등을 제외한 열량의 비율을 의미하며, 본 연구에서는 0.8-0.9 범위에 있었다. F , V , I , N , H , W 그리고 L 은 각각 채널의 가열면적, 인가된 전압, 전류, 채널의 개수, 채널의 높이, 채널의 폭 그리고 채널의 길이를 나타낸다.

식 (2)와 같이 전체 공급된 열량 q_{total} 은 채널에서 유체에 전달된 열량 q_{fluid} , 동판으로 통해 전도된 열량 q_{cond} 그리고 열손실 q_{loss} 의 합으로 표현된다.

$$q_{total} = q_{fluid} + q_{cond} + q_{loss} \quad (2)$$

단상 유동에서 유체에 전달되는 열은 식 (3)과 같이 계산된다.

$$q_{fluid} = \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in}) \quad (3)$$

여기서 \dot{m} 은 질량유량, c_p 는 정압비열, T_{out} 과 T_{in} 은 각각 출구와 입구온도를 뜻한다.

국소 열전달 계수 h 는 식 (4)에 의해 계산되며, 벽면온도 T_w 는 동판 하부에서 측정된 온도 T_b 를 이용하여 식 (5)와 같이 1차원 열전도 해석을 통해서 계산된다.

$$h = \frac{q''}{T_w - T_{sat}} \quad (4)$$

$$T_w = T_b - \left(\frac{q'' t_b}{k_c} \right) \quad (5)$$

여기서 t_b 와 k_c 는 각각 동관의 두께와 동관의 열전도 계수를 의미한다.

평균 열전달 계수는 식 (6)에서 계산된 평균 벽면 온도 $T_{w,ave}$ 를 이용하여 계산된다.

$$T_{w,ave} = \frac{T_{w,1} + T_{w,2} + T_{w,3} + T_{w,4}}{4} \quad (6)$$

IV. 결과 및 고찰

1. 열전달 계수 및 열전달 메커니즘

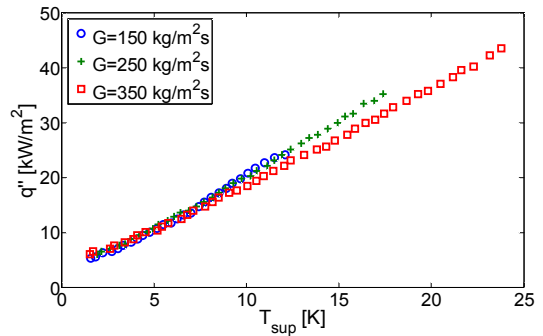
[Fig. 3]은 채널 벽면과 작동 유체의 과열도 T_{sup} 에 대한 열유속의 변화를 나타내었다. 10 K 이하의 낮은 과열도 영역에서는 질량유속과는 무관하게 열유속이 증가함에 따라서 과열도가 증가하였다. 반면에 10 K 이상의 과열도 영역에서는 낮은 질량유속에 비해 높은 질량유속일 경우, 동일한 열유속에 대한 과열도 값이 높게 나타났다. 과열도가 더 높게 나타났다는 것은 마이크로 채널의 열을 작동 유체가 덜 전달받는 것을 의미한다. 즉, 일정 과열도 이상의 영역에서 질량유속이 증가할수록 열전달 계수는 감소한다.

[Fig. 4]는 열유속 변화에 따른 열전달 계수의 변화를 나타내었다. [Fig. 3]에서 고찰한 바와 같이 낮은 열유속 영역에서 열전달 계수는 질량유속의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났으며, 높은 열유속 영역에서는 질량유속이 열전달 계수에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이것은 비등이 시작되어 기포류(bubbly flow)와 슬러류(slug flow)가 형성되는 시점에서는 열전달 계수는 질량유속과 증기건도에는 무관하며, 열유속에 의존하는 핵비등에 의한 열전달이 주를 이룬다고 볼 수 있다. 열유속을 증가시켜 슬러류에서 환상류(annular flow)로 천이하게 되면 열전달 계수는 열유속과는 무관하며, 질량유속과 증기건도에 의존하는 강제 대류 비등에 의한 열전달이 이루어진

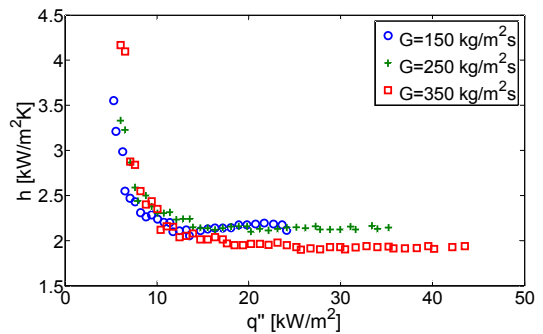
다고 간주된다.

2. 열전달 계수 예측 상관식

Kandlikar(1991)은 핵비등 인자 E 와 강제 대류 비등 인자 S 를 사용하여 식 (7)과 같이 열전달 계수를 예측하는 식을 제안하였다.



[Fig. 3] Variation of Heat Flux with Respect to Superheated Temperature



[Fig. 4] Variation of Heat Transfer Coefficient Respect to Heat Flux

$$h = \max(E, S)h_{sp}$$

$$E = 0.6683Co^{-0.2}(1-x)^{0.8}F_{FI} + 1058Bo^{0.7}(1-x)^{0.8} \quad (7)$$

$$S = 1.136Co^{-0.9}(1-x)^{0.8}F_{FI} + 667.2Bo^{0.7}(1-x)^{0.8}$$

여기서 Co 는 대류수(convection number), Bo 는 비등수(boiling number), x 는 증기 건도를 의미한다. F_{FI} 은 유체표면 파라미터로서 본 연구에서는

1.0이다(Kandlikar, 1990).

Kaew-On & Wongwises(2009)는 열전달 계수를 예측하기 위해서 식 (8)과 같은 식을 제안하였다.

$$h = Sh_{sp}$$

$$S = 1.737 + 0.97(\gamma\phi_l^2)^{0.523}$$

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

$$C = -3.356 + 41.863e^{-69.475\gamma f_l D_h} + 498\gamma f_l D_h$$
(8)

열전달 계수를 계산하기 위해서 추가 인자 S 를 도입하였으며, 추가 인자는 중형비 γ 와 이상 마찰승수 ϕ_l^2 의 함수로 이루어져 있다. 이상 마찰승수는 Lockhart & Martinelli(1949)에 의해 제안되었으며, Martinelli 변수 X 와 Chisholm 상수 C 에 의해 계산된다. Kaew-On & Wongwises(2009)는 Chisholm 상수를 중형비 γ , 액체의 단상 마찰 계수(friction factor) f_l 그리고 수력직경 D_h 에 관한 함수로서 정의하였다.

비등수는 질량유속에 대한 단위 전열면에서 발생하는 증기의 질량을 의미하는 무차원수로서, 식 (9)와 같이 정의된다. Choi et al.(2015b)에 따르면 비등수는 열유속에 일차 비례하며, 높은 증기 건도 영역에서는 비등수가 열전달에 미치는 영향이 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 핵비등이 주요 열전달 메커니즘으로 작용할 때 비등수를 열전달에 관련된 주요 변수로 사용할 수 있음을 의미한다.

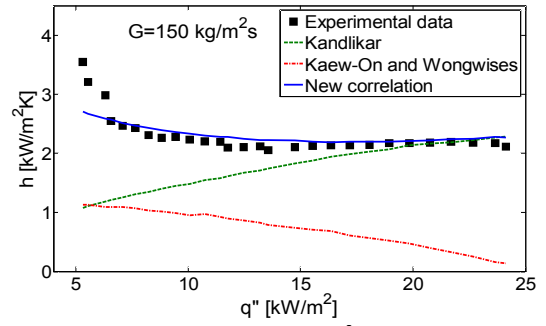
$$Bo = \frac{q''}{Gh_{lv}}$$
(9)

여기서 G 는 질량유속, h_{lv} 는 증발 잠열을 나타낸다.

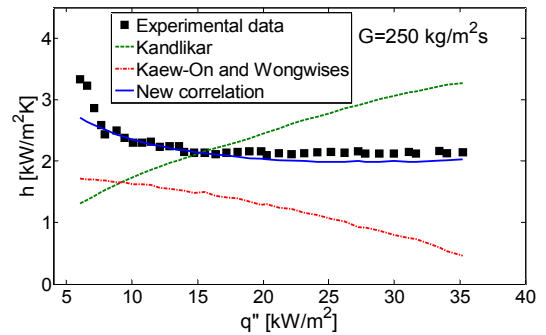
본 연구에서 열전달 계수를 예측하기 위해서 너셀 수(Nusselt number) Nu 를 레이놀즈 수(Reynolds number) Re_l , 웨버 수(Weber number) We_{lo} , 증기건도 x 그리고 비등수에 관한 함수로서 상관하였으며, 식 (10)과 같다.

$$Nu = 0.26Re_l^{0.23} We_{lo}^{-0.22} Bo^{-0.35}(1-x)^{-0.85}$$
(10)

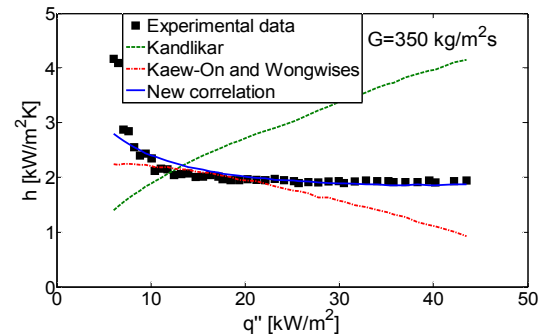
따라서 본 연구에서 제안하는 2상 유동 열전달 계수의 상관식은 식 (11)와 같이 정리된다.



(a) $G=150\text{kg/m}^2\text{s}$



(b) $G=250\text{kg/m}^2\text{s}$



(c) $G=350\text{kg/m}^2\text{s}$

[Fig. 5] Comparison of Measured and Predicted Heat Transfer Coefficients

$$h = 0.26Re_l^{0.23} We_{lo}^{-0.22} Bo^{-0.35}(1-x)^{-0.85} \frac{k_l}{D_h}$$
(11)

여기서 하첨자 lo 는 채널 내부에 액체만 가득

찬 상태(liquid-only)로 유동한다고 가정하는 것을 의미한다.

[Fig. 5]는 각 질량유속 별 실험에서 얻어진 열전달 계수와 새로운 상관식을 포함하여 여러 상관식들에 의한 열전달 계수를 비교하여 나타내었다. Kandlikar(1991)의 상관식은 열전달 계수를 열유속이 증가할수록 높게 예측하였다. Kaew-On & Wongwises(2009)는 열유속이 증가할수록 열전달 계수가 감소하는 것으로 예측하였으나 전반적으로 실험값에 비해서 낮게 예측하였다. 새로운 상관식은 낮은 열유속 영역에서 실험값에 비해서 열전달 계수를 낮게 예측하였으며, 열유속이 증가할수록 거의 일정하게 유지되는 형태로 예측하였다. 낮은 열유속 영역에서 높게 나타나는 열전달 계수의 예측은 미흡한 것으로 보인다.

[Fig. 6]은 실험값에 대해서 각 열전달 예측 상관식에 의한 열전달 계수를 비교하여 나타낸 것이다. 예측의 정확성은 식 (12)와 같이 정의되는 mean absolute error(MAE)를 사용하여 비교하였다.

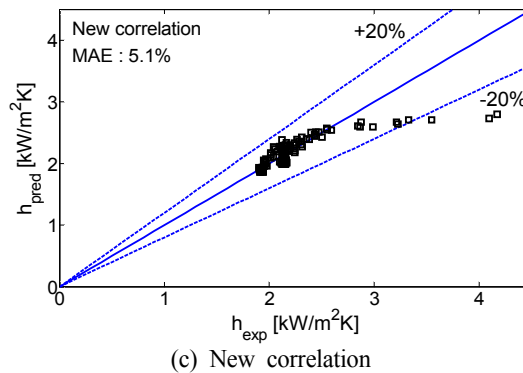
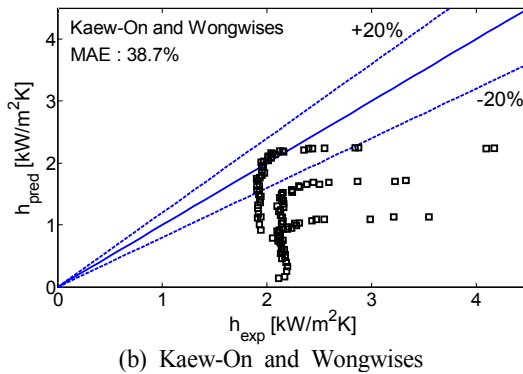
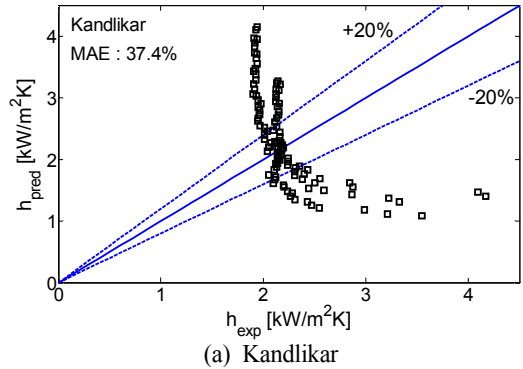
$$MAE(\%) = \frac{1}{N} \sum \left[\frac{|h_{pred} - h_{exp}|}{h_{exp}} \times 100 \right] \quad (12)$$

Kandlikar와 Kaew-On & Wongwises의 상관식은 각각 MAE 37.4%, 38.7% 내에서 실험값을 예측하였으며, 본 연구에서 제안한 새로운 상관식은 MAE 5.1%내에서 실험결과를 잘 예측하였다.

V. 결론

본 연구에서는 마이크로 수평 다채널에서 FC-72의 2상 유동 비등 열전달에 관한 실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 10 K 이하의 과열도 영역에서는 질량유속과 무관하게 공급된 열유속에 따라서 과열도가 증가하였으나, 10 K 이상의 과열도 영역에서는 높은 질량유속일 경우, 과열도가 높게 나타났다. 이것은 질량유속이 증가할수록 열전달 계수가 감소하는 것을 의미한다.



[Fig. 6] Comparison Between the Experimental Data and Correlations

2. 열유속이 증가함에 따라서 열전달 계수는 급격하게 감소하다가 일정 열유속 이상에서는 거의 일정하게 유지되었다. 즉, 낮은 열유속 영역에서는 핵비등에 의한 열전달이 주요 메커니즘으로 작용하며, 열유속이 증가할수록 핵비등과 강제 대류 비등에 의한 열전달이 복합적으로 이루어

지는 것으로 간주된다.

3. 기존의 상관식들은 본 실험의 결과를 정확하게 예측하지 못하였다. 따라서 본 실험결과를 토대로 Reynolds number, Weber number, Boiling number 그리고 증기 건도를 이용하여 열전달 계수에 관한 식을 상관하였으며, 새로운 상관식은 MAE 5.1%내에서 실험결과를 잘 예측하였다.

References

- Bigham, S. & Moghaddam, S.(2015). Microscale study of mechanisms of heat transfer during flow boiling in a microchannel, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 88, 111~121.
- Charnay, R. · Revellin, R. & Bonjour, J.(2015). Flow boiling heat transfer in minichannels at high saturation temperatures: Part I - Experimental investigation and analysis of the heat transfer mechanisms, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 87, 636~652.
- Choi, Yong seok & Lim, Tae woo(2015a). 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(2015b). Study on flow boiling heat transfer in two-phase micro channels heat sink, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering* 39(7), 702~708.
- 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.
- Holman, J. P.(1989). *Experimental Methods for Engineering*, McGraw-Hill :Singapore.
- Kaew-On, J. & Wongwises, S.(2009). Experimental investigation of evaporation heat transfer coefficient and pressure drop of R-410A in a multiport mini-channels, *International Journal of Refrigeration*, 32, 124~137.
- Kandlikar, S. G.(1990). A general correlation for two-phase flow boiling heat transfer inside horizontal and vertical tubes, *Journal of Heat Transfer* 112, 219~228.
- Kandlikar, S. G.(1991). A Model for correlating flow boiling heat transfer in augmented tubes and compact evaporators, *Journal of Heat Transfer* 113, 966~972.
- Kandlikar, S. G.(2010). Similarities and differences between flow boiling in microchannels and pool boiling, *Heat Transfer Engineering* 31, 159~167.
- 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.(2012). Local flow boiling heat transfer characteristics in silicon microchannel heat sinks using liquid crystal thermography, *International Journal of Multiphase Flow* 39, 55~65.
- Mishan, Y. · Mosyak, A. · Progrebnyak, E. & Hetstroni, G.(2007). Effect of developing flow and thermal regime on momentum and heat transfer in micro-scale heat sink, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50, 3100~3114.
- Mudawar, I.(2011). Two-phase microchannel heat sinks: Theory, applications, and limitations, *Journal of Electronic Packaging* 133, 041002-1~31.
- Warrier, G. R. · Dhir, V. K. & Momoda, L. A.(2002). Heat transfer and pressure drop in narrow rectangular channels, *Experimental Thermal and Fluid Science* 26, 53~64.

-
- Received : 28 July, 2016
 - Revised : 16 August, 2016
 - Accepted : 22 August, 2016