

수평 다채널 관에서의 유동 비등 열전달 특성에 관한 연구

최용석 · 임태우[†]
(한국해양대학교)

Study on Characteristics of Flow Boiling Heat Transfer in Multi channels

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

Abstract

Two-phase flow boiling heat transfer in micro-channels was experimentally investigated. The test section consisted of 15 rectangular micro-channels with a depth of 0.45mm, width of 0.20mm. The experiments were performed for heat fluxes ranging from 5.6 to 46.1kW/m² and mass fluxes from 150 to 450kg/m²s using FC-72 as the working fluid. According to the results, at the low heat flux region, heat transfer coefficient strongly depends on the heat flux, while heat transfer coefficient at the high heat flux region was independent on the heat flux. Four correlations were used to predict the heat transfer coefficient. The measured heat transfer coefficient was compared with four correlations. It was found that Kaew-On and Wongwises's correlation well predicted the measured data, within the MAE of 40.3%.

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

I. 서론

마이크로 채널을 이용한 마이크로 열교환기는 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 기술(You et al., 2007)의 발전과 더불어 그 활용이 더욱 증대되고 있다. 다시 말하면, 전자 장비의 소형화가 진행될수록 고밀도 집적회로가 사용되며, 이에 따라서 칩의 단위면적당 발열량이 증가하게 된다. 소형 칩에 장착가능하며 발열을 효과적으로 제거 할 수 있는 방법 중 하나가 마이크로 채널을 이용한 냉각이다. 이때 마이크로 채널은 히트 싱크로서 열을 흡수하는 역할을 하게 된다. 마이크로 채널에서 흡수한 열은 채널 내부의 작동유체의 온도를 상승시키게 되며, 작동유체가 단상(single phase)으로 유지되는 경우와 포화온도

까지 온도가 상승하여 2상(two-phase)으로 유지되는 경우가 있다.

마이크로 채널의 좁은 유로 특성상 레이놀즈수가 낮아 층류가 오랫동안 유지되는 특성이 있으며, 단상 유동의 경우 2상 유동에 비해 비교적 예측이 쉽고 실험 및 수치해석적 해를 얻기 용이하다. 하지만 비등이 발생되어 액체와 기체가 혼합된 2상 유동의 경우 마이크로 채널에서의 열유동 특성 및 열전달 메커니즘은 기존의 매크로 채널과는 많은 차이가 있다고 알려져 있다(Li & Wu, 2010; Wang et al., 2012; Lee & Lee, 2001; Lee & Mudawar, 2005). 특히 마이크로 채널에서의 열전달 특성과 열전달 메커니즘은 현재까지도 명확하게 정의되지 않고 있으며, 이에 따라서 이러한 특성을 파악하는 많은 연구들이 계속해서

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

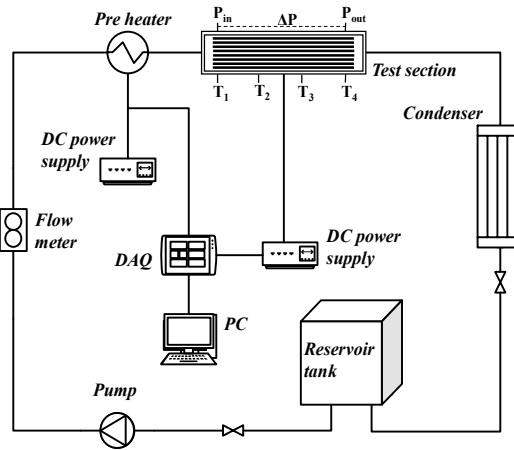
진행되고 있다(Bertsch et al., 2009; Wang & Wang, 2014; Kim & Mudawar, 2013).

마이크로 채널에서의 열유동에 관한 연구는 기존에 진행되었던 매크로 채널의 연구 결과에서 많은 부분 차용되기 때문에, 우선 매크로 채널에서 진행되었던 기존의 연구들을 살펴보면 우선, Shah(1982)는 5.02-15.8mm의 직경을 가지는 튜브에서 진행되었던 780여개의 실험 데이터를 바탕으로 열전달 계수 예측을 위한 상관식을 개발하였다.

Tran et al.(1996)은 직경 2.46mm의 튜브와 수력직경 2.40mm인 사각 채널에서 R12의 열전달에 관한 실험을 수행하였다. Tran et al.의 실험 결과에 의하면 열전달 계수는 질량 유속과 증기 건도와는 거의 무관한 것으로 나타났으며, 열유속의 영향을 주로 받는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 핵비등이 채널에서 비등의 주요 메커니즘으로 작용할 때 나타난다. 반면에 강제 대류 비등이 주요 메커니즘으로 작용할 때에는 열전달 계수는 열유속보다는 질량 유속과 증기 건도에 의존하는 경향을 보이며, 환상류(annular flow)가 유동의 대부분을 차지하게 된다.

Qu & Mudawar(2003a)은 폭과 깊이가 각각 0.231mm×0.713mm인 13개의 채널로 이루어진 병렬 마이크로 채널에서 물을 작동유체로 사용하여 비등 열전달 실험을 수행하였다. 실험 결과에 의하면 증기 건도가 증가함에 따라서 열전달 계수는 감소하였으며, 질량 유속이 증가함에 따라서 열전달 계수는 증가하였다. Qu & Mudawar (2003b)는 이러한 실험 결과를 토대로 환상류가 주를 이루는 강제 대류 비등이 마이크로 채널에서의 열전달을 지배하는 주요 메커니즘으로 결론내렸으며, 이러한 유동을 해석하기 위해서 2상 환상류 모델(annular two-phase flow model)을 제안하였다.

Megahed & Hassan(2010)은 질량 보존식과 운동량 보존식을 토대로 환상류 영역에서 열전달 계수를 구하기 위한 이론적인 식을 유도하였다. 그리고 후속 연구(Megahed, 2012)에서는 폭과 깊



[Fig. 1] Schematic of Experimental Setup

이가 각각 0.276mm×0.225mm, 채널의 개수가 45개인 병렬 마이크로 채널에서 FC-72의 비등 열전달 실험을 수행하였다. 그 결과, 열전달 계수는 약 0.2 이하의 낮은 증기 건도에서는 급격하게 감소하여 그 이후의 증기 건도에서는 열전달 계수가 거의 일정하게 유지되었음을 확인하였다.

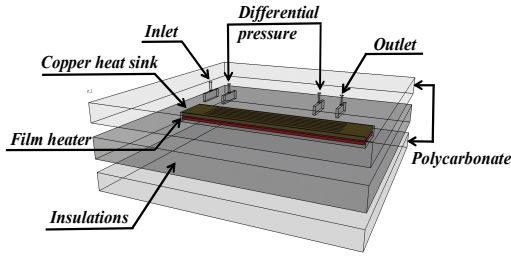
본 연구에서는 FC-72를 작동 유체로 사용하여 마이크로 채널에서의 2상 유동 비등 열전달 실험을 수행하였다. 그리고 실험에서 얻어진 열전달 계수를 분석하였으며, 열전달 계수를 예측하기 위한 기존의 여러 상관식들과 비교하였다.

II. 실험장치 및 방법

1. 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치는 저장탱크, 기어펌프, 유량계, 예열기, 시험부 그리고 응축기 등으로 이루어져 있으며, 개략도를 [Fig. 1]에 나타내었다. 작동 유체인 FC-72는 저장탱크에서 기어펌프를 거쳐 예열기, 시험부, 응축기를 거쳐 다시 저장탱크로 유입되는 사이클을 반복한다.

[Fig. 2]는 시험부를 나타내었다. 시험부는 상·하부 커버, 마이크로 채널이 가공된 동판, 필름 히터, 그리고 단열재로 구성된다. 상·하부 커버는



[Fig. 2] Test Section

투명한 폴리카보네이트 재질로 제작되었으며, 상부 커버에는 유동 분배와 차압 측정을 위한 매니폴드가 가공되었으며, 이전 연구(Choi et al., 2013; Choi et al., 2014)에서 CFD를 통해서 매니폴드의 적절성을 확인하였다. 동판에 가공된 마이크로 채널은 폭과 깊이 각각 0.45mm×0.20mm인 사각 채널이며, 채널의 개수는 총 15개이다. 채널의 총 길이는 60mm이며, 압력 측정 구간은 40mm이다. 동판의 하부에는 필름히터가 부착되며 필름히터는 직류 전원 공급장치를 통해 마이크로 채널에 일정한 열량을 공급한다. 직류 공급장치는 0-50V의 전압과 0-0.3A의 전류 범위 내에서 조절되며, 필름히터에 인가되는 전압과 전류를 측정하여 마이크로 채널에 전달되는 열량을 계산하였다. 동판과 필름히터 사이에는 4개의 T-type 열전대를 부착하여 온도를 측정하였다.

2. 실험방법

실험 시작 전 약 1시간 동안 예열기와 필름히터를 이용한 가스 제거(degassing) 작업을 통해 작동 유체 내에 용존 가스를 배출하였다. 시스템 내부 작동 유체의 유량은 유량계에 의해 측정되며, 본 연구에서는 질량 유속 150, 250, 350 그리고 450kg/m²s의 범위에서 실험이 수행되었으며, 각 질량 유속에서 열유속을 조절하여 출구 증기 건도를 조절 하였으며, 이때 열유속은 5.6-46.1kW/m² 범위에서 조절되었다. 작동 유체의 입·출구 온도는 T-type 열전대를 사용하여 측정하

였으며, 압력강하는 차압계를 사용하여 측정하였다. 열전대와 차압계 등에서 측정된 값은 데이터 수집장치(DAQ)를 이용하여 수집하였다.

측정 데이터의 불확실성은 유량과 압력강하의 경우 각각 폴 스케일에서 ±3%, ±0.25%이며, 온도 측정의 불확실성은 ±0.3°C이다(Lim et al., 2011). 열전달 계수의 불확실성은 Holman(1982)의 방법을 이용하여 계산하였으며, 4-11% 범위에 있다. 그리고 주로 낮은 열유속에서 불확실성이 높게 나타났다. FC-72의 물성치는 제조사인 3M사에서 제공하는 자료를 이용하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 분석 방법

열손실은 대부분 시험부에서 외부로 방출되는 대류에 의한 열전달에 기인하며, 단상 유동 열전달 조건에서 에너지 평형을 고려하여 열손실을 계산하였다(Mishan et al., 2007; Choi et al., 2014).

국소 열전달 계수 h 는 식 (1)과 같이 계산되며, 이때 벽면온도 T_w 는 직접 측정이 불가능하므로 동판 하부에서 열전대를 통해 측정된 온도 T_b 를 이용하여 1차원 열전도 해석을 통해서 식 (2)와 같이 계산된다.

$$h = \frac{q''}{T_w - T_{sat}} \quad (1)$$

$$T_w = T_b - \left(\frac{q'' t_b}{k_s} \right) \quad (2)$$

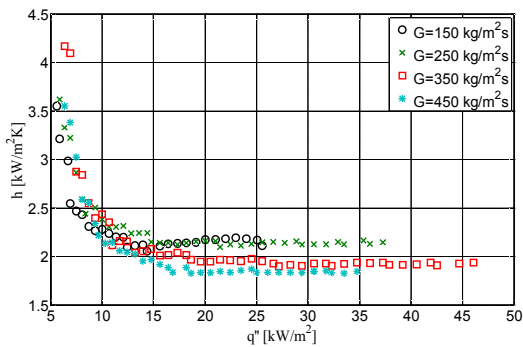
여기서 q'' 은 열유속, T_{sat} 은 포화온도, t_b 는 동판의 두께 그리고 k_s 는 동판의 열전도도를 나타낸다.

출구의 증기 건도 x 는 에너지 평형으로부터 식 (3)과 같이 계산된다.

$$x = \frac{1}{h_{fg}} \left[\frac{q}{\dot{m}} - c_p(T_{sat} - T_{in}) \right] \quad (3)$$

식 (3)에서 q 는 열량, h_{fg} 는 잠열, \dot{m} 은 질량 유량, c_p 는 정압비열 그리고 T_{in} 은 입구온도를 나타낸다.

[Fig. 3]은 각 질량 유속 별 열유속 변화에 대한 열전달 계수의 변화를 나타낸 것이다. 전반적으로 일정 열유속을 가해주기까지는 열전달 계수는 급격하게 감소하며, 대략 열유속 $15\text{-}20\text{kW/m}^2$ 이후에서는 열유속과는 무관하게 열전달 계수는 거의 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다. 또한 높은 열유속 영역(15kW/m^2)에서는 낮은 질량유속 ($150\text{-}250\text{kg/m}^2\text{s}$)일 때의 열전달 계수가 상대적으로 높게 나타났다. 낮은 열유속 영역($5\text{-}15\text{kW/m}^2$) 즉, 낮은 증기 건도 영역에서는 열유속의 영향이 크게 작용하며, 높은 열유속 영역(15kW/m^2 이상)에서는 열유속 보다는 질량 유속의 영향을 비교적 더 많이 받고 있다고 볼 수 있다. 이러한 현상은 열유속의 증가에 따라서 비등 메커니즘의 변화가 발생된 것으로 판단된다.



[Fig. 3] Variation of Heat Transfer Coefficient with Respect to Heat Flux

Shah(1982)는 식 (4)와 같이 새로운 무차원 수인 대류수(convection number) Co 를 제안하여, 열전달 계수를 대류수와 비등수(boiling number) Bo 에 관한 함수로 식 (5)와 같이 표현하였다. 식 (5)에서 나타낸 바와 같이 Shah(1982)는 핵비등 요

소 E 와 강제 대류 비등 요소 S 중 더 강하게 작용하는 요소를 택하여 열전달 계수를 계산하였다.

$$Co = [(1-x)/x]^{0.8} (\rho_v/\rho_l)^{0.5} \quad (4)$$

$$h_{tp} = \frac{Nu_3}{Nu_4} \max(E, S) h_{sp} \quad (5)$$

$$h_{sp} = 0.023 Re_l^{0.8} Pr_l^{0.4} \frac{k_l}{D_h}$$

$$S = 1.8/N^{0.8}$$

$$\text{For } N > 1.0, E = 230Bo^{0.5} \quad (Bo > 3 \times 10^{-5})$$

$$E = 1 + 46Bo^{0.5} \quad (Bo < 3 \times 10^{-5})$$

$$\text{For } 0.1 < N \leq 1.0, E = FBo^{0.5} \exp(2.74N^{-0.1})$$

$$\text{For } N \geq 1.0, E = FBo^{0.5} \exp(2.74N^{-0.15})$$

$$F = 14.7 \quad (Bo \geq 11 \times 10^{-4})$$

$$\text{or } F = 15.43 \quad (Bo < 11 \times 10^{-4})$$

$$N = Co \quad (Fr_l \geq 0.04)$$

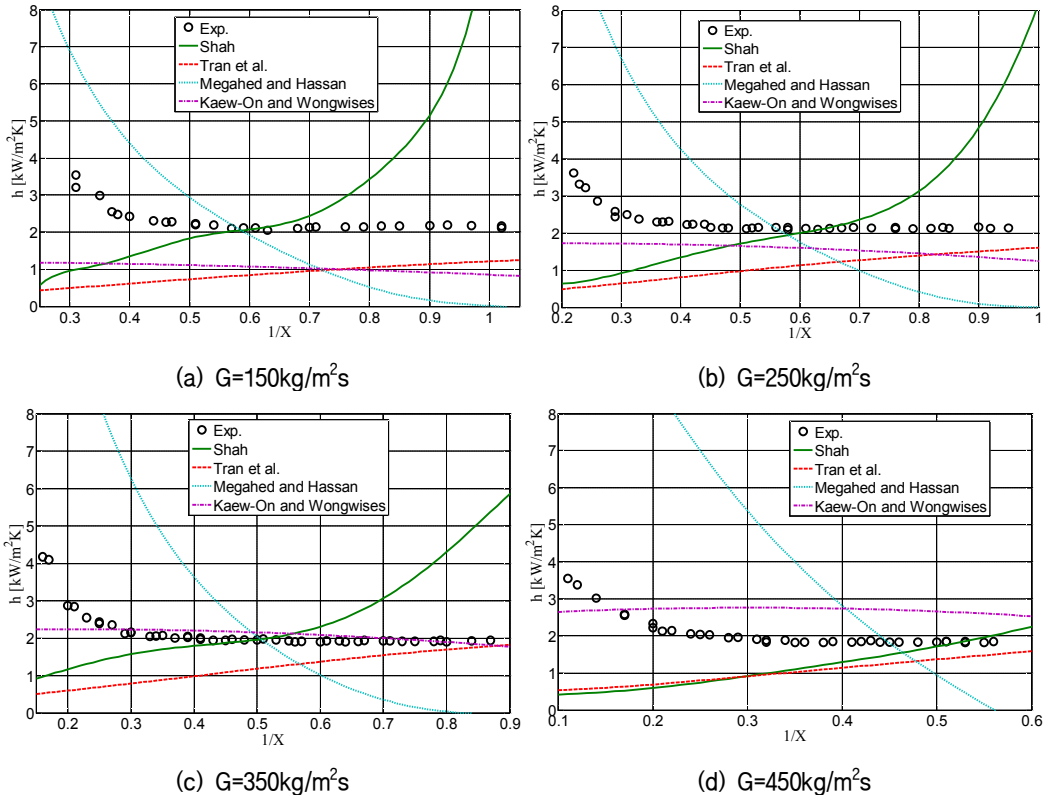
$$\text{or } N = 0.38 Fr_l^{-0.3} Co \quad (Fr_l < 0.04)$$

여기서 Nu_3 와 Nu_4 는 원형관에서 개발된 상관식을 사각 채널로 적용시켜주기 위해서 3면과 4면 가열조건에서 도출된 너셀수를 의미한다(Shah & London, 1978). 하첨자 tp , sp , l 그리고 v 는 two-phase, single-phase, liquid 그리고 vapor를 뜻한다. 또한 ρ 는 밀도, D_h 는 수력직경, Re 는 레이놀즈수, Pr 은 프란틀수, Fr 은 프루드수를 나타낸다.

Tran et al.(1996)은 열전달 계수를 식 (6)과 같이 비등수와 웨버수 We 의 함수로서 계산하였다.

$$h_{tp} = \frac{Nu_3}{Nu_4} \left[8.4 \times 10^{-5} (Bo^2 We_l)^{0.3} (\rho_l/\rho_v)^{-0.4} \right] \quad (6)$$

Megahed(2010)는 환상류 영역에서 질량 보존식



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

과 운동량 보존식을 토대로 Lockhart and Martinelli(1949)의 분리류 모델을 적용하여 열전달 계수를 식 (7)과 같이 계산하였다.

$$h_{tp} = \frac{k_l(1-\alpha)A_{ch}}{\mu_l(1-x)S_{ch}} \left[\frac{2\phi^2 f_f G(1-x)^2}{D_h} - \frac{(1-\alpha)q''(2/\gamma+1)}{Hh_{fg}} \left(-2x \left(-\frac{\rho_l}{\rho_v} + 1 + \epsilon \right) + \epsilon \right) \right] \quad (7)$$

$$\epsilon = (\rho_l/\rho_v)^{2/3} + (\rho_l/\rho_v)^{1/3} - 2$$

여기서 A_{ch} 와 S_{ch} 는 각각 채널의 면적과 채널의 점수길이를 의미하며, μ 는 점성계수, ϕ^2 은 2상 마찰 승수(Lockhart & Martinelli, 1949), f_f 는

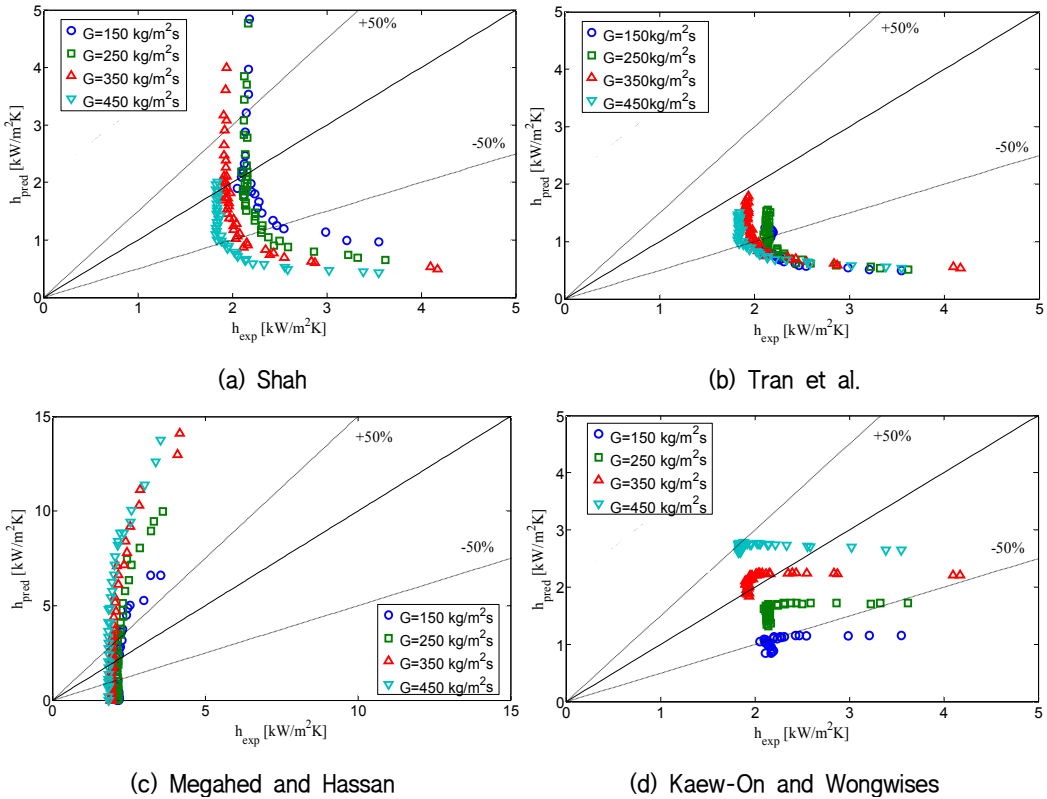
마찰 계수, γ 는 중형비, H 는 채널의 높이를 나타낸다. 그리고 기공률 α 는 다음과 같이 Zivi(1965)의 상관식을 사용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\alpha = \left[1 + \frac{(1-x)}{x} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{2/3} \right]^{-1} \quad (8)$$

Kaew-On and Wongwises(2009)은 수력직경 3.48mm의 미니 채널에서 실험을 수행한 결과 식 (9)와 같은 식을 제안하였다.

$$h_{tp} = Sh_{sp} \quad (9)$$

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



[Fig. 5] Comparison of Experimental data and Predicted Heat Transfer Coefficient

실험을 통해서 측정된 열전달 계수는 각 질량 유속 별로 Shah(1982), Tran et al.(1996), Megahed and Hassan(2010) 그리고 Kaew-On and Wongwises(2009)의 상관식과 비교하였으며, [Fig. 4]에 나타내었다.

Martinelli 변수 X 는 증기 건도에 관한 함수로써 식 (10)과 같이 정의되며, 2상 유동을 분리류 모델로 해석하고자 할 때 고려해주어야 하는 변수 중에 하나이다.

$$X = \sqrt{\frac{(dp/dz)_l}{(dp/dz)_v}} \approx \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.9} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0.5} \left(\frac{\mu_l}{\mu_v}\right)^{0.1} \quad (10)$$

Shah(1982)와 Tran et al.(1996)의 상관식은 Martinelli 변수의 역수인 $1/X$, 즉 증기 건도가 증

가함에 따라서 열전달 계수가 점차 증가하는 것으로 예측하였으나, Megahed and Hassan(2010)과 Kaew-On and Wongwises(2009)의 상관식은 증기 건도가 증가함에 따라서 열전달 계수가 감소하는 것으로 예측하였다. Megahed and Hassan의 상관식의 경우 일정 열유속 이상에서 거의 일정하게 유지되는 열전달 계수의 변화 경향을 예측하지 못하였으며, Kaew-On and Wongwises의 상관식은 낮은 열유속 영역에서 급격하게 감소하는 열전달 계수의 변화를 예측할 수 없었다.

[Fig. 5]는 실험에서 측정된 열전달 계수와 여러 상관식들의 예측치를 비교하여 나타낸 것이다. Megahed and Hassan의 상관식은 전반적으로 본 실험의 열전달 계수에 비해서 높게 예측하였으며, Tran et al.의 경우 실험값에 비해서 낮게

예측하였다. 실험값과 상관식들의 정량적인 비교를 위해 MAE(mean absolute error)를 사용하였으며, MAE는 식 (11)과 같이 정의 된다.

$$MAE(\%) = \frac{1}{N} \sum \left[\frac{|h_{pred} - h_{exp}|}{h_{exp}} \times 100 \right] \quad (11)$$

<Table 1> Mean Absolute Error

Correlation	MAE(%)
Shah	50.3
Tran et al.	50.5
Megahed and Hassan	103.9
Kaew-On and Wongwises	40.3

실험값에 대한 상관식들의 MAE는 <Table 1>과 같이 정리하였다. 본 연구에서 사용한 기존의 상관식 중에서는 Kaew-On and Wongwises의 상관식이 MAE 40.3% 내에서 가장 잘 예측하였다.

IV. 결론

본 연구에서는 마이크로 채널에서 FC-72의 비등 열전달에 관한 실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 비등 열전달 계수는 낮은 열유속 영역, 즉 낮은 증기 건도 영역에서 급격하게 감소하였으며, 그 후 일정 열유속 이상에서는 거의 일정하게 유지되었다.
2. 열전달 계수는 높은 열유속 영역에서 열유속과는 거의 무관하게 나타나는 반면에 질량 유속의 영향을 받는 것으로 나타났다. 이것은 낮은 열유속 영역에서는 핵비등에 의한 비등 열전달이 주요 메커니즘으로 작용하다가 열유속이 증가하면서 강제 대류 비등에 의한 열전달로 변화하는 것을 의미한다.
3. 실험에서 얻어진 열전달 계수와 열전달 계수를 예측하기 위한 기존의 상관식들에 의한 열

전달 계수를 비교한 결과 Kaew-On and Wongwises(2009)의 상관식이 MAE 40.3%내에서 가장 잘 예측하였다. 하지만 Kaew-On and Wongwises의 상관식은 낮은 열유속 영역에서 급격하게 감소하는 열전달 계수의 변화 경향을 정확하게 예측하지 못하였다.

References

Bertsch, Stefan B. · Groll, Eckhard A. & Garimmella, Suresh V.(2009). A composite heat transfer correlation for saturated flow boiling in small channels, International Journal of Heat and Mass Transfer 52, 2110~2118.

Choi, Yong seok · Lim, Tae woo, You, Sam sang · Kim, Hwan seong & Choi Hyeung sik(2014). Boiling heat transfer characteristics of FC-72 in parallel micro-channels, Journal of the Korean Society of Marine Engineering 38(9), 1032~1038.

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, Jatuporn & Wongwises, Somchai(2009). Experimental investigation of evaporation heat transfer coefficient and pressure drop of R-410A in a multiport mini-channel, International Journal of Refrigeration 32, 124~137.

Kim, Sung Min & Mudawar, Issam(2013). Universal approach to predicting saturated flow boiling heat transfer in mini/micro-channels - part II. two-phase heat transfer coefficient, International Journal of Heat and Mass Transfer 64, 1239~1256.

Lee, Han Ju & Lee, Sang Yong(2001). Heat transfer

- correlation for boiling flows in small rectangular horizontal channels with low aspect ratios, *International Journal of Multiphase Flow* 27, 2043~2062.
- Lee, Jaeseon & Mudawar, Issam(2005). Two-phase flow in high-heat-flux micro-channel heat sink for refrigeration cooling applications: part II-heat transfer characteristics, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48, 941~955.
- Li, Wei & Wu, Zan(2010). A general criterion for evaporative heat transfer in micro/mini-channels, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53, 1967~1976.
- Lim, Tae woo · You, Sam Sang · Choi, Hyeung sik & Kim, Dong hyuk(2011). Boiling heat transfer characteristics of deionized water in microchannel, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering* 35(6), 750~756.
- Lockhart, S. M. & 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.(2010). Analytical modeling of annular flow boiling heat transfer in mini- and microchannel heat sinks, *Transactions of ASME, Journal of Heat Transfer* 132(4), 041012-1~11.
- Megahed, Ayman(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. · pogrebnyak & Hetsroni, 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.
- Qu, Weillin & Mudawar, Issam(2003a). Flow boiling heat transfer in two-phase micro-channel heat sinks-I. experimental investigation and assessment of correlation methods, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46, 2755~2771.
- Qu, Weillin & Mudawar, Issam(2003b). Flow boiling heat transfer in two-phase micro-channel heat sinks-II. annular two-phase flow model, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46, 2773~2784.
- Shah, M. M.(1982). Chart correlation for saturated boiling heat transfer: equations and further study, *ASHRAE Trans.* 88, 66~86.
- Shah, R. K. & London, A. K.(1978). *Laminar Flow Forced Convection in Ducts: A Source Book for Compact Heat Exchanger Analytical Data*, Academic Press. :New york.
- Tran, T. N. · Wambsganss, M. W. & Fance, D. M.(1996). Small circular- and rectangular-channel boiling with two refrigerants, *International Journal of Multiphase Flow* 22(3), 485~498.
- Wang, Yuan & Wang, Zhen-guo(2014). An overview of liquid-vapor phase change, flow and heat transfer in mini- and micro-channels, *International Journal of Thermal Sciences* 86, 227~245.
- Wang, Yuan · Sefiane, Khellil & Harmand, Souad(2012). Flow boiling in high-aspect ratio mini- and micro-channels with FC-72 and ethanol : experimental results and heat transfer correlation assessments, *Experimental Thermal and Fluid Science* 36, 93~106.
- You, Sam Sang. S · Lim, Tae Woo · Jeong, Seok Kwon & Park, Jong Un(2007). A study on the microcooling fin fabrication process for enhancing boiling heat transfer, *The Journal of Fisheries and Marine Sciences Education*, 19(3), 366~372.
- Zivi, S. M.(1965). Estimation of steady-state steam void-fraction by means of the principle of minimum entropy production, *Transactions of ASME, Journal of Heat Transfer* 86, 247~251.
-
- Received : 27 July, 2015
 - Revised : 11 August, 2015
 - Accepted : 14 September, 2015