

## 병렬 마이크로 채널에서 FC-72의 비등 열전달 특성

최용석<sup>1</sup> · 임태우<sup>†</sup> · 유삼상<sup>2</sup> · 김환성<sup>3</sup> · 최형식<sup>4</sup>

(Received September 4, 2014 ; Revised November 4, 2014 ; Accepted November 19, 2014)

### Boiling heat transfer characteristics of FC-72 in parallel micro-channels

Yong-Seok Choi<sup>1</sup> · Tae-Woo Lim<sup>†</sup> · Sam-Sang You<sup>2</sup> · Hwan-Seong Kim<sup>3</sup> · Hyeung-Sik Choi<sup>4</sup>

**요약:** 본 연구에서는 병렬 마이크로 채널에서 FC-72의 비등 열전달 특성을 파악하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 병렬 마이크로 채널은 깊이 0.2 mm, 폭 0.45 mm, 길이 60 mm의 15개의 마이크로 채널로 구성되었으며, 실험은 열유속 16.4 kW/m<sup>2</sup>와 25.6 kW/m<sup>2</sup>의 조건에서 수행되었으며, 이때 질량유속 300, 400 그리고 500 kg/m<sup>2</sup>s의 범위에서 이루어졌다. 실험을 통해 측정된 열전달 계수는 낮은 건도에서는 건도가 증가함에 따라 급격하게 감소하며, 일정 건도 이상에서는 일정하게 유지되었다. 본 연구를 통해 마이크로 채널에서 FC-72의 비등 열전달 메커니즘을 확인하였으며, 실험에서 얻어진 열전달 계수는 열전달 계수를 예측하기 위한 기존의 상관식들과 비교·분석하였다.

**주제어:** 비등, FC-72, 열전달 계수, 열전달 메커니즘, 마이크로 채널

**Abstract:** In this study, an experimental study was performed to understand the boiling heat transfer characteristics of FC-72 in parallel micro-channels. The parallel micro-channels contained channels having a 0.2 mm × 0.45 mm [H×W] cross section and length of 60 mm. And heat flux was varied from 16.4 to 25.6 kW/m<sup>2</sup> and mass fluxes from 300 to 500 kg/m<sup>2</sup>s. The measured heat transfer coefficient was sharply decreased at lower vapor quality and then it was kept approximately constant as the vapor quality is increased. From the experimental results, the boiling heat transfer mechanism of FC-72 was confirmed and the measured heat transfer coefficient was compared and analyzed with the existing correlations to predict the heat transfer coefficient.

**Keywords:** Boiling, FC-72, Heat transfer coefficient, Heat transfer Mechanism, Micro-channels

## 1. 서 론

MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)를 비롯하여 각종 전자 기기들의 소형화는 필연적으로 높은 열소산율을 요구하게 되었다. 그 중 마이크로 채널을 이용한 열교환기는 매크로 채널에 비해 높은 열전달 계수를 가지는 것이 많은 실험적인 연구들에 의해 밝혀졌으며, 현재까지도 많은 연구가 진행되고 있다. 특히, 마이크로 채널에서의 비등 열전달 메커니즘과 열전달 계수를 예측하는 연구가 주를 이루고 있다[1][2].

마이크로 채널에서의 비등을 지배하는 메커니즘은 핵비등과 대류 비등으로 구분된다. 핵비등이 유동을 지배하는 영역에서는 기포의 생성과 이탈에 의해 주로 열전달이 이루어지며, 이 영역에서는 기포류(bubbly flow)와 슬러류(slug flow)가 유동의 대부분을 차지한다. 또한 열전달 계수는 열유속에 주

로 의존하며, 질량유속과 증기 건도에는 크게 영향을 받지 않는다. 반면에 대류 비등이 유동을 지배하는 영역에서는 환상류(annular flow)가 유동의 대부분을 차지하며, 가열면 주위의 얇은 액막에서의 증발을 통해서 주로 열전달이 이루어진다. 이 영역에서의 열전달 계수는 질량유속과 증기 건도에 주로 의존하며, 열유속과는 거의 무관한 것으로 나타난다.

Lazarek and Black [3]을 포함한 몇몇의 연구자들[4]-[6]은 마이크로 채널에서의 비등을 지배하는 주요 메커니즘을 핵비등이라고 주장하는 반면에 Qu and Mudawar [7]와 Lee and Lee [8]는 환상류가 주를 이루는 대류 비등이 주요 메커니즘이라고 주장하였다.

하지만 최근의 연구들을 살펴보면 연구자들마다 주요 메커니즘이 다르게 나타나는 것은 실험조건, 채널의 형상과 크기, 작동유체의 선정 등의 차이에서 발생한다고 보고하고 있

<sup>†</sup> Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3925-0731>): Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Dongsam-dong, Yeongdo-gu, Busan, 606-791, Korea, E-mail: kyunlim@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4256

1 Graduate School, Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: choiys@kmou.ac.kr

2 Division of Mechanical and Energy Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: ssyou@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4366

3 Department of Logistics System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: kimhs@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4334

4 Division of Mechanical and Energy Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: hchoi@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4297

다[9][10].

본 연구에서는 FC-72를 작동유체로 선정하여 병렬 마이크로 채널에서의 유동 비등에 관한 실험을 수행하였으며, 이를 토대로 FC-72의 마이크로 채널에서의 비등 열전달 메커니즘을 확인하였다. 또한 실험을 통해 측정된 열전달 계수는 기존의 4개의 상관식들과 비교·분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

실험장치는 저장탱크, 기어펌프, 예열기 그리고 시험부로 구성되어 있으며, 실험장치의 개략도를 Figure 1에 나타내었다. 작동유체는 FC-72를 사용하였으며, 작동유체는 저장탱크에서 기어펌프를 통해 유량계를 거쳐 예열기로 공급되어 일정한 온도까지 예열된 후 시험부로 유입된다. 작동유체는 시험부에서 재가열되어 액체-증기 혼합물 상태로 응축기에서 응축된 후 저장탱크로 모여 다시 사이클을 순환하는 폐회로 시스템으로 구성되었다.

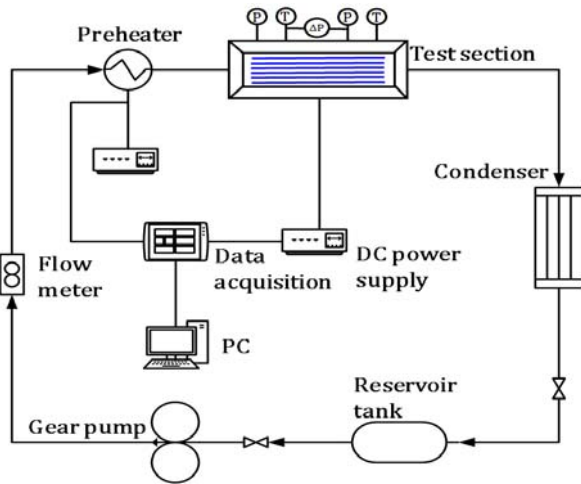


Figure 1: Schematic of experimental setup

Figure 2는 시험부를 나타내며, 마이크로 채널의 깊이와 폭은 각각 0.2 mm, 0.45 mm이며, 개수는 15개로 구성되었다. 채널의 총길이는 60 mm이며, 마이크로 채널이 있는 동관의 하부에는 필름히터가 부착되어 직류 전원 공급 장치를 통해 일정한 열량을 공급하게 된다. 직류 전원 공급 장치는 0~50 V와 0~0.3 A의 전압과 전류 범위 내에서 조절되며, 필름히터에 인가되는 전압과 전류를 측정하여 시험부에 전달되는 열량을 계산하게 된다. 동관과 필름히터 사이에 T-type 열전대 4개를 부착하여 온도를 측정하며, 열손실을 최대한 방지하기 위해 필름히터 하부에는 단열재를 설치하였다. 또한 동관의 상부에는 채널에서의 유동을 직접 관찰할 수 있도록 폴리카보네이트로 제작한 투명한 커버를 부착하였다.

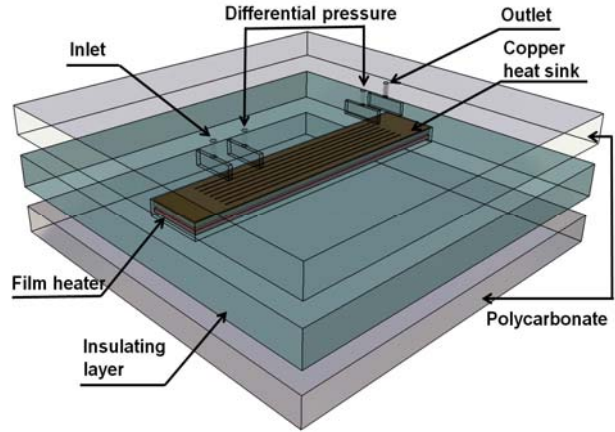


Figure 2: Test section

### 2.2 실험방법

실험을 시작하기 전에 약 1시간 동안 시스템내의 작동유체를 순환시킴으로써 예열기와 시험부의 필름히터를 통해 작동유체를 가열하여 증발시킴으로써 가스제거(degassing) 작업을 수행하였다.

작동유체는 유량계에 의해 측정되며, 본 연구에서 작동유체의 유량은 질량유속 300, 400 그리고 500 kg/m<sup>2</sup>s의 범위에서 수행되었으며, 각 질량유속에서 시험부에 가해진 열유속은 16.4, 25.6 kW/m<sup>2</sup>이다. 일정한 질량유속과 열유속에서 작동유체의 입구온도를 조절하여 출구 증기 건도를 조절하였다.

작동유체의 입·출구 온도는 T-type 열전대를 사용하여 측정하였으며, 압력강하는 차압계를 사용하여 측정하였다. 실험에서 측정된 값들은 데이터 수집 장치(Data Acquisition Equipment)를 이용하여 수집 분석하였다. 측정된 값들의 불확실성은 유량과 압력강하의 경우 각각 풀 스케일에서 ±3%, ±0.25%이다. 또한, 온도 측정의 불확실성은 ±0.3℃이며, 열유속은 필름히터에 인가된 전압과 전류로 계산하였으며, 이때의 불확실성은 2~4%의 범위에 있다[5]. 작동유체인 FC-72의 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1: Properties of FC-72

Gas density	13.43 kg/m <sup>3</sup>
Liquid density	1680 kg/m <sup>3</sup>
Boiling point	56℃
Kinematic viscosity	3.7×10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s
Specific heat	1.1 kJ/kg-K
Latent heat of vaporization	88 kJ/kg
Surface tension	0.012 N/m

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 분석 방법

작동유체인 FC-72는 예열기에서 일정한 온도까지 예열되어 과냉각 상태로 시험부로 공급되게 된다. 따라서 마이크로 채널 내부에는 입구측의 과냉각 영역과 출구측의 포화 영역이 공존하게 된다. 건도가 0인 지점은 과냉각 영역과 포화영역의 사이에 위치하며 식 (1)과 식 (2)에 의하여 계산된다[7]. 본 연구의 실험에서는 총 4개의 열전대가 사용되었으며, 그 중 상류측 3개의 열전대 지점에서는 대부분 과냉각 영역으로 존재한다. 따라서 포화 열전달 계수를 구하기 위해서 하류측 1개의 열전대에서 측정되는 온도를 사용하여 국소 열전달 계수를 구하였다.

$$L_{sub} = \frac{\dot{m}c_{p,l}(T_{sat} - T_{in})}{q''W} \quad (1)$$

$$L_{sat} = L - L_{sub} \quad (2)$$

여기서  $L$ 은 길이를 나타내며,  $\dot{m}$ 은 질량유량,  $c_{p,l}$ 은 액상의 비열,  $q''$ 은 열유속 그리고  $W$ 는 채널의 전체 폭을 나타낸다. 국소 열전달 계수는 식 (3)을 사용하여 계산된다.

$$h = \frac{q''}{(T_w - T_{sat})} \quad (3)$$

$T_w$ 는 벽면 온도를 의미하며, 마이크로 채널 하부의 열전대에서 측정된 온도  $T_b$ 를 교정함으로써 얻어지며, 식 (4)와 같다.

$$T_w = T_b - \frac{q''t_b}{k_s} \quad (4)$$

$t_b$ 는 채널이 가공된 히트싱크의 두께이며,  $k_s$ 는 히트싱크(동)의 열전도도를 나타낸다.

#### 3.2 결과 분석

##### 3.2.1 비등 열전달 메커니즘

물과 비교해서 FC-72는 낮은 표면 장력과 작은 접촉각으로 인해서 기포의 이탈 직경 또한 물에 비해서 매우 작다 [11]. 그로 인해서 물은 증기 기포의 직경이 채널 단면을 가득 채우는 환상류 영역으로 신속하게 천이하는 반면에 FC-72는 오랫동안 기포류와 슬러류가 주를 이루는 핵비등 상태를 유지하게 된다[7].

Figure 3는 증기 건도의 증가에 따른 열전달 계수의 변화를 나타낸 것이다. 전체적으로 증기 건도가 증가함에 따라서 열전달 계수는 감소하며, 열유속이 증가함에 따라 열전달 계수는 증가한다. 질량유속 300 kg/m<sup>2</sup>s 와 400 kg/m<sup>2</sup>s에서는 질량유속의 영향을 크게 받지 않는 것으로 보이며, 약 0.2 이상의 증기 건도에서는 질량유속과 건도의 변화와 무

관하게 열전달 계수는 거의 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 본 연구에서 사용한 작동유체와 실험 조건에서는 핵비등이 비등 열전달을 지배하는 메커니즘으로 볼 수 있다.

본 연구와 같은 작동유체인 FC-72를 사용한 Jang et al. [12]의 결과를 보면 증기 건도와 질량 유속이 증가함에 따라 열전달 계수도 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 차이는 각 실험에서 사용된 채널의 크기에서 발생하는 것으로 사료된다. 본 연구에서 사용한 채널의 수력직경이 0.277 mm 인 반면에 Jang et al.의 연구에서 사용한 채널의 직경은 2 mm, 4 mm로서 채널 직경이 작아질수록 표면 장력이 유동에 미치는 영향이 증가하며 기존의 매크로 관에서와는 다른 형태로 거동하는 것으로 알려져 있다[13]-[15].

마찬가지로 FC-72를 작동유체로 사용한 Megahed[18]의 결과는 본 연구의 결과와 마찬가지로 증기건도가 증가함에 따라 열전달 계수는 감소하며, 약 0.2~0.25 이상의 증기 건도에서는 거의 일정하게 유지되는 것으로 나타났다.

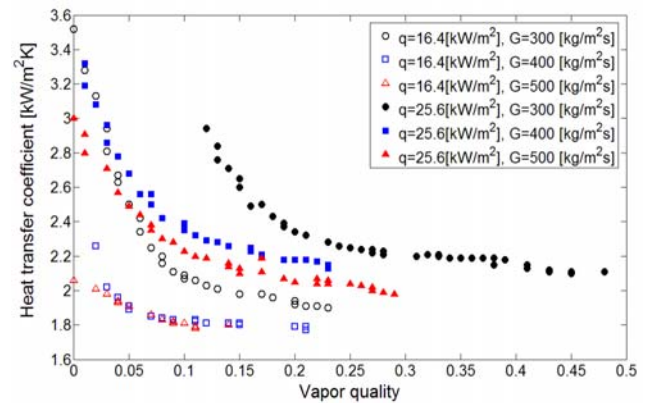


Figure 3: Heat transfer coefficient with respect to vapor quality

##### 3.2.2 열전달 계수 예측

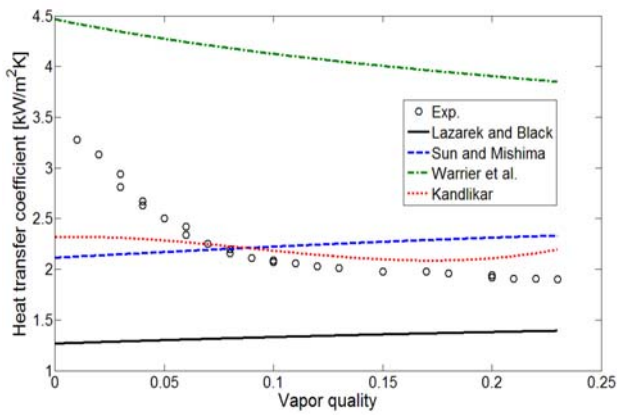
실험을 통해 측정된 열전달 계수는 Larzarek and Black [3], Sun and Mishima [17], Warriar et al. [18] 그리고 Kandlikar [19], 상관식 등 미니/마이크로 채널에서 개발된 4개의 상관식과 비교하였다.

Larzarek and Black [3]은 직경 3.15 mm 튜브에서 R-113을 작동유체로 사용하여 실험하였으며, 그 결과 열전달 계수는 건도에 무관하며 열유속에 의존한다고 보고하였으며, 식 (5)와 같은 상관식을 제안하였다.

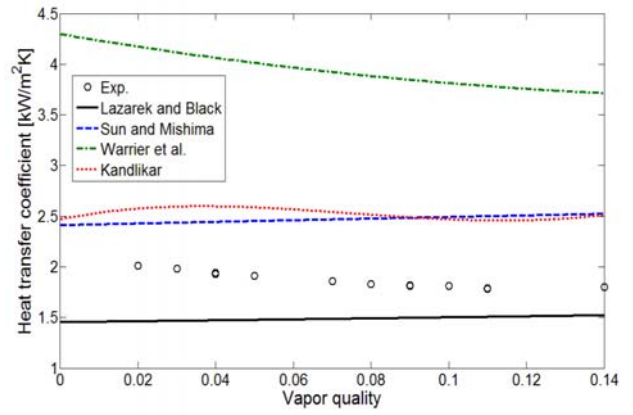
$$h = 30Re_{lo}^{0.857}Bo^{0.714} \frac{k_l}{D_h} \quad (5)$$

하첨자  $lo$ 는 전체 유량이 액체 유량이라고 가정한다는 것을 의미하며,  $Re$ 와  $Bo$ 는 각각 레이놀즈수와 비등수 (boiling number)를 나타낸다.

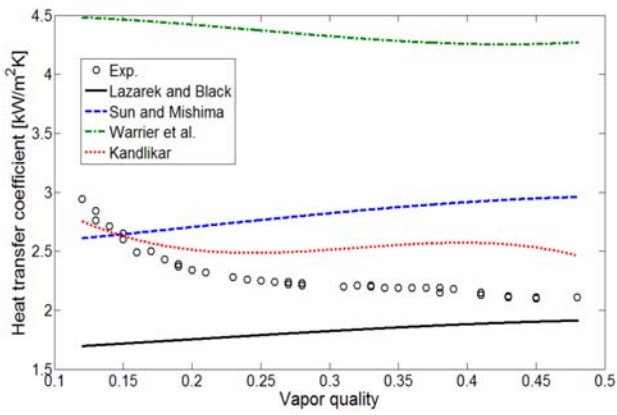
Sun and Mishima [17]는 11개의 작동유체를 대상으로



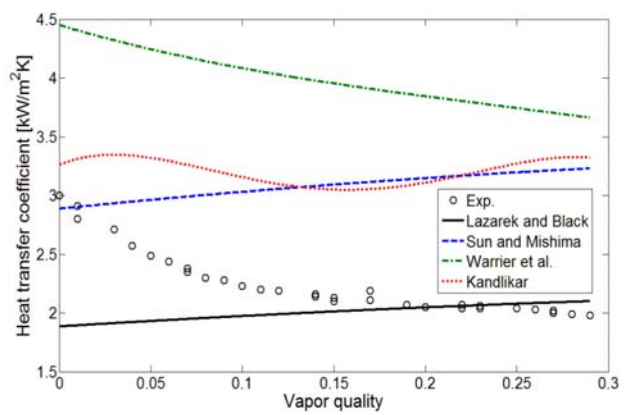
(a)  $q''=16.4 \text{ kW/m}^2$ ,  $G=300 \text{ kg/m}^2\text{s}$



(b)  $q''=16.4 \text{ kW/m}^2$ ,  $G=500 \text{ kg/m}^2\text{s}$



(c)  $q''=25.6 \text{ kW/m}^2$ ,  $G=300 \text{ kg/m}^2\text{s}$



(d)  $q''=25.6 \text{ kW/m}^2$ ,  $G=500 \text{ kg/m}^2\text{s}$

Figure 4: Comparison of experimental data and existing correlation predictions

0.21에서 6.05 mm 직경의 채널에서 비등 열전달 실험 결과를 정리하여 Lazarek and Black [3]의 상관식을 수정·보완하였으며, 식 (6)과 같다.

$$h = \frac{6Re_{lo}^{1.05}Bo^{0.54}}{We_l^{0.191}(\rho_l/\rho_g)^{0.142}} \frac{k_l}{D_h} \quad (6)$$

Warrier et al. [18]은 열전달 계수를 비등수와 건도만의 함수로써 식 (7)과 같이 예측하였다.

$$h = (1 + 6.0Bo^{1/16} + f_2(Bo)x^{0.65})h_{sp} \quad (7)$$

$$f_2(Bo) = -5.3(1 - 855Bo)$$

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

$h_{sp}$  단상 유체의 열전달 계수를 의미하며,  $Pr$ 은 프란틀 수를 나타낸다.

Kandlikar [19]는 단상 유체에서 예측된 핵비등 요소( $E$ )와 대류 비등 요소( $S$ )를 사용하여 식 (8)과 같이 제안하였다.

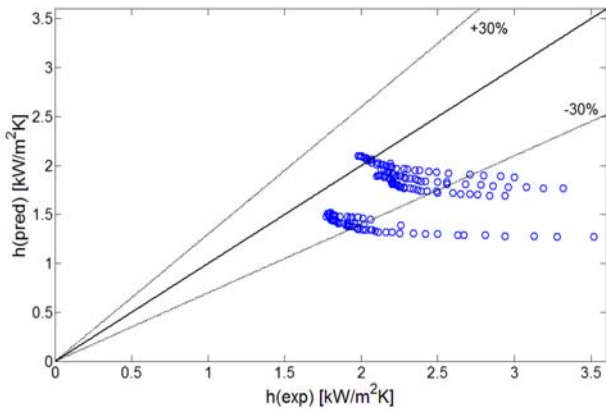
$$h = \max(E, S)h_{sp} \quad (8)$$

$$E = 0.6683Co^{-0.2}(1-x)^{0.8}f(Fr_l) + 1058Bo^{0.7}(1-x)^{0.8}$$

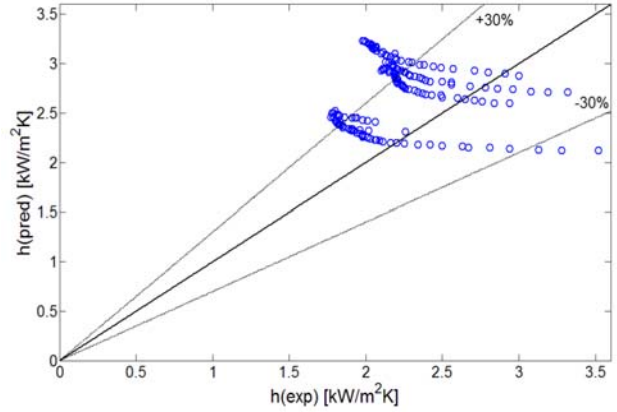
$$S = 1.136Co^{-0.9}(1-x)^{0.8}f(Fr_l) + 667.2Bo^{0.7}(1-x)^{0.8}$$

여기서  $Fr$ 은 프라우드수를 나타내며,  $Fr > 0.04$ 일 때,  $f(Fr) = 1$ 이다.

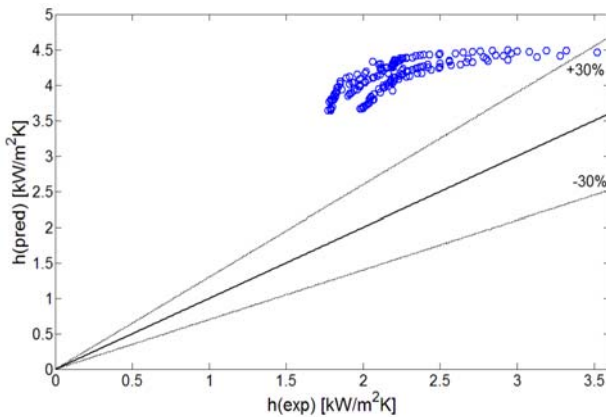
Figure 4는 증기 건도 변화에 따른 열전달 계수를 기존의 상관식들과 비교한 결과를 나타내었다. Lazarek and Black 상관식과 Sun and Mishima 상관식은 증기 건도가 증가함에 따라 열전달 계수 또한 증가하는 것으로 예측하였으며, Warrier et al. 상관식은 증기 건도가 증가함에 따라 열전달 계수가 감소하는 경향을 예측하였다. 하지만 낮은 건도에서 열전달 계수가 급격하게 감소하는 경향은 예측하지 못하였다. Kandlikar 상관식은 증기 건도가 증가함에 따라 감소하였다가 다시 증가하는 것으로 예측하였는데, 이는 증기 건도가 증가함에 따라 식 (8)의 핵비등 요소( $E$ )는 점차 감소하



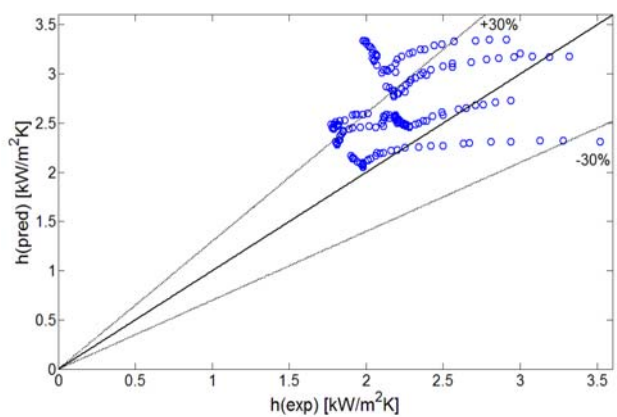
(a) Lazarek and Black



(b) Sun and Mishima



(c) Warriar et al.



(d) Kandlikar

Figure 5: Comparison of experimental data and predicted heat transfer coefficient

지만 대류 비등 요소(S)는 점차 증가하여 결국 핵비등에서 대류 비등으로 전환되는 것을 예측하였다고 판단된다.

Figure 5은 실험을 통해 측정된 열전달 계수에 대한 여러 상관식들의 예측치를 비교해서 나타내었다. Lazarek and Black 상관식을 제외한 나머지 상관식들은 전반적으로 본 연구의 결과에 비해서 높게 예측하였으며, 특히 Warriar et al. 의 상관식은 가장 많은 오차가 발생하였다.

실험 결과와 상관식들의 정량적인 비교는 MAE(mean absolute error)를 사용하여 판단하였으며, MAE는 식 (9)와 같이 정의된다.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum \left[ \frac{|h_{pred} - h_{exp}|}{h_{exp}} \times 100 \right] \quad (9)$$

Table 2는 본 실험 결과와 기존의 상관식들 사이의 MAE를 나타내었다.

열전달 계수의 예측을 위한 상기의 상관식들로는 본 실험 결과를 정확하게 예측하기는 어렵다고 판단 할 수 있다. 전반적으로 기존의 상관식들이 본 실험의 결과를 정확하게 예측하지 못하는 것은 각 상관식들이 개발된 실험 조건의

Table 2: Mean absolute error

Correlation	MAE(%)
Lazarek and Black	22.5
Sun and Mishima	27.2
Warriar et al.	88.9
Kandlikar	24.4

차이에서 비롯된 것으로 사료된다. 즉, 채널의 크기와 형태, 작동유체 및 작동 조건이 상이하기 때문에 열-유동 특성을 결정짓는 요소의 비중이 달라지기 때문이다.

## 5. 결 론

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

1. 본 연구에서 얻어진 열전달 계수는 저건도(0~0.2)에서는 증기 건도가 증가함에 따라 열전달 계수는 최대 약 35%

까지 급격하게 감소하였으며, 일정 건도(0.2)이상에서는 질량유속과 증기 건도에 크게 영향을 받지 않음을 확인하였다.

2. 또한 열유속이  $16.4\text{kW/m}^2$ 에서  $25.6\text{kW/m}^2$ 으로 증가함에 따라 열전달 계수는 약 10% 증가하였으며, 이러한 결과를 바탕으로 본 실험에서는 핵비등이 비등 열전달의 주요 메커니즘으로 작용한다는 것을 알 수 있다.

3. 기존의 상관식들은 실험 조건의 차이로 인해 본 연구의 결과를 잘 예측하지 못하였다. Warrier et al. 상관식은 증기 건도의 증가 따른 열전달 계수의 감소 추이를 예측하였으나, MAE 88.9%로서 다른 상관식들에 비해서 많은 오차가 발생하였다. 따라서 마이크로 채널에서의 비등 열전달 계수를 보다 정확하게 예측할 수 있는 상관식의 개발이 요구된다.

## 후 기

본 과제(결과물)는 해양수산부의 지원으로 수행한 해양 에너지 전문인력 양성사업의 연구 결과입니다.

## References

- [1] Y. Mishan, A. Mosyak, E. Pogrebnyak, and G. Hetsroni, "Effect of developing flow and thermal regime on momentum and heat transfer in micro-scale heat sink," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, pp. 3100-3114, 2007.
- [2] L. Zhang, J. M. Koo, and L. Jiang, "Measurements and modeling of two-phase flow in microchannels with nearly constant heat flux boundary conditions," *Journal of Micro Electro Mechanical Systems*, vol. 11, no. 1, pp. 12-19, 2002.
- [3] G. M. Lazarek and G. H. Black, "Evaporative heat transfer, pressure drop and critical heat flux in a small vertical tube with R-113", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 25, pp. 945-960, 1982.
- [4] M. W. Wambsganss, D. M. France, J. A. Jendrzejczyk, and T. N. Tran, "Boiling heat transfer in a horizontal small-diameter tube", *Journal of Heat Transfer*, vol. 115, pp. 963-972, 1993.
- [5] T. W. Lim, S. S. You, H. S. Choi, and D. H. Kim, "Boiling heat transfer characteristics of deionized water in micro channel," *Journal of the Korea Society of Marine Engineering*, vol. 35, no. 6, pp. 750-756, 2011 (in Korea).
- [6] Z. Y. Bao, D. F. Fletcher, and B. S. Haynes, "Flow boiling heat transfer of freon R11 and HCFC123 in narrow passages," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 43, pp. 3347-3358, 2000.
- [7] W. Qu and I. Mudawar, "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*, vol. 46, pp. 2755-2771, 2003.
- [8] H. J. Lee and S. Y. Lee, "Heat transfer correlation for boiling flows in small rectangular horizontal channels with low aspect ratios," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 27, pp. 2043-2062, 2001.
- [9] J. S. Lee and I. Mudawar, "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*, vol. 48, pp. 941-955, 2005.
- [10] S. M. Kim and I. Mudawar, "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*, vol. 64, pp. 1239-1256, 2013.
- [11] S. Mukherjee and I. Mudawar, "Pumpless loop for narrow channel and micro-channel boiling," *Journal of Electronic Packaging*, vol. 125, pp. 431-441, 2003.
- [12] Y. H. Jang, C. S. Park, Y. T. Lee, and Y. C. Kim, "Flow boiling heat transfer coefficients and pressure drops of FC-72 in small channel heat sinks," *International Journal of Refrigeration*, vol. 31, pp. 1033-1041, 2008.
- [13] K. Mishima and T. Hibiki, "Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 22, no. 4, pp. 703-712, 1996.
- [14] P. A. Kew and K. Cornwell, "Correlations for the prediction of boiling heat transfer in small-diameter channels," *Applied Thermal Engineering*, vol. 17, no. 8-10, pp. 705-715, 1997.
- [15] W. Li and Z. Wu, "A general criterion for evaporative heat transfer in micro/mini-channels," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, pp. 1967-1976, 2010.
- [16] A. Megahed, "Local flow boiling heat transfer characteristics in silicon micro channel heat sinks using liquid crystal thermography," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 39, pp. 55-65, 2012.
- [17] L. Sun and K. Mishima, "An evaluation of prediction methods for saturated flow boiling heat transfer in mini-channels," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, pp. 5323-5329, 2009.

- [18] G. R. Warrier, V. K. Dhir, and L. A. Momoda, "Heat transfer and pressure drop in narrow rectangular channels," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 26, no. 1, pp. 53-64, 2002.
- [19] S. G. Kandlikar, "A Model for correlation flow boiling heat transfer in augmented tubes and compact evaporators," *Journal of Heat Transfer*, vol. 112, pp. 219-228, 1990.