

# 사각 채널에서의 강제대류 열전달 Forced convective Heat Transfer in rectangular channel

임태우\* · 유삼상\*\*†  
T. W. Lim\*, and S. S. You\*\*†

(접수일 : 2012년 03월 23일, 수정일 : 2012년 06월 05일, 채택확정 : 2012년 06월 11일)

**Key Words** : Forced convective heat Transfer(강제대류 열전달), Mini/micro-channel(미니/마이크로 채널), Two-phase flow(2상류), Vapor quality(증기 건도)

**Abstract** : This paper performed experimental research in order to measure boiling heat transfer coefficient of water in microchannel with hydraulic diameter of 500 μm. Tests were conducted within the ranges of heat fluxes from 100 to 400 kW/m<sup>2</sup>, vapor qualities from 0 to 0.2, and mass fluxes of 200, 400, and 600 kg/m<sup>2</sup>s. From the experimental results, it was found that flow boiling heat transfer coefficient is not dependent on mass flux or vapor quality, but instead on heat flux to a certain degree. The measured data of heat transfer are compared to a few available correlations proposed for mini-channels. Among them, Sun and Mishima's correlation is found to predict the present data well, within the mean absolute error of 17.84%.

## 1. 서 론

오늘날, 열발생 장치를 효과적으로 냉각시키기 위한 새로운 설계기술들이 요구되고 있다. 이러한 요구에 부응하는 기술이 마이크로 채널을 이용한 냉각이라 할 수 있다. 그 이유는 공냉기술로 고열유속 장치를 냉각시키기 어렵다는 것이다. 미니 또는 마이크로 채널에서의 이상 유동 열전달은 단상 액체 유동에 비해 열소산 능력이 대단히 크기 때문에 마이크로 채널은 소형 열교환기, 미세 유체 시스템, 전자 부품 냉각 요소로 사용될 수 있다. 마이크로 채널에서 일어나는 열전달 과정 및 유체역학적 특성은 매크로 스케일에서의 그것과 분명히 다르며<sup>1, 2-5)</sup>, 매크로 스케일에서 얻을 수 있는 지식의 일부만이 마이크로 스케일에 적용할 수 있는 것으로 알려져 있다. 현재까지 마이크로 채널 구조<sup>6)</sup>에서의 유동 비등 열전달에 대한 메커니즘을 이해하기 위한 수많은 연구가 이루어져 왔으며, 핵 비등이 마이크로 채널내에서의 증발을 지배하는 것<sup>7)</sup>으로 여러 연구자들에 의해 밝혀지

고 있다. 또한 이전의 큰 관에서의 유동 비등의 경우 대류와 핵 비등 열전달을 중요하게 고려하였으며, 총 열전달은 전형적으로 이들 두 개의 성분을 결합하여 취급하였다. 그러나 마이크로 채널에서의 유동은 보통 층류이기 때문에 전통적인 비등 상관식들은 열전달계수를 높게 예측한 것으로 밝혀졌다<sup>8)</sup>.

Lazarek와 Black<sup>9)</sup>은 내경이 3.15mm인 관에서 R113의 포화 유동 비등 실험을 통해 두 개의 무차원 수(Reynolds and boiling numbers)를 바탕으로 간단한 상관식을 개발하였다. 그 결과 열전달계수는 열유속에 강하게 의존하나 증기 건도의 영향은 거의 받지 않는다는 것을 알아냈다. 이러한 결과는 핵비등이 주요 열전달 메커니즘이라는 것을 나타내는 것이다.

Tran 등<sup>10)</sup>은 소형 채널에서 R12에 대한 비등열전달 실험을 수행하였다. 지배적인 열전달 메커니즘으로 대류보다는 핵형성(nucleation)이라 간주하였으며, Reynolds number 대신 Weber number를 도입하여 열전달계수를 상관하였다.

Yu 등<sup>11)</sup>은 내경이 2.98 mm인 미소 수평관에서

\*\*† 유삼상(교신저자) : 한국해양대학교 기계·에너지시스템공학부

E-mail : ssyu@hhu.ac.kr, Tel : 051-410-4366

\*임태우 : 한국해양대학교 기관공학부

\*\*† S. S. You(corresponding author) : Division of Mechanical & Energy Systems Engineering, Korea Maritime University  
E-mail : ssyu@hhu.ac.kr, Tel : 051-410-4366

\*T. W. Lim : Division of Marine System Engineering Korea Maritime University

물을 사용하여 2상 압력강하, 비등 열전달 그리고 임계 열유속에 관한 연구를 수행하였다. 실험 조건은 시스템 압력이 200 kPa, 질량 유속이 50-200 kg/m<sup>2</sup>s 이다. 그들은 실험결과로부터 Tran et al.의 상관식과 유사한 형태로 국소열전달계수를 상관하였다.

Warrier 등<sup>12)</sup>은 작동 유체로 FC-84를 사용하여 수력 직경이 0.75mm인 미소 사각 채널에서 유동 비등 실험을 수행하였다. 그 결과 단지 Boiling number와 증기 건도의 함수로 2상 열전달계수를 상관하였다.

Sun과 Mishima<sup>13)</sup>는 직경이 0.21에서 6.05mm에 이르는 미니 채널에서 11개의 액체에 대한 수많은 데이터베이스를 토대로 포화 유동 비등 열전달에 관해 가장 많이 사용되는 13개의 상관식들을 비교 분석하였다. 그 결과 Lazarek과 Black에 의해 얻어진 결과와 유사하게 열전달계수의 증기 건도에 대한 의존성은 그다지 크지 않으며, 증기 건도보다는 Weber number에 더 크게 의존한다는 것을 관측하였다. 따라서 Sun과Mishima는 Lazarek과 Black 상관식을 토대로 Weber number를 고려하여 새로운 상관식을 제안하였다.

본 연구에서는 미니/마이크로 채널에서의 이상 유동 열전달에 대한 실험적 연구를 통해 미니/마이크로 스케일에서의 열전달 특성을 분석하는 것이며, 또한 얻어진 결과를 기존의 미니 채널에서 얻어진 상관식과 비교·분석하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 유동 비등 열전달과 압력강하 측정을 위한 실험장치의 개략도를 나타낸다. 본 시스템은 입구 저장탱크(reservoir tank), 핫플레이트(hot plate), 시린지 펌프(syringe pump), 필터(filter), 예열기(preheater), 시험구간(test section), 출구 저장탱크(reservoir tank) 그리고 전자저울(electronic balance)로 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 투명판(polycarbonate)으로 덮여있다. 이 투명판은 또한 입·출구의 작동 유체온도와 압력강하 측정을 위해 사용된다.

Fig. 2는 시험부를 나타내며, 마이크로채널은 동판

의 상부 표면에 와이어 커팅법(wire cutting method)을 이용하여 깊이와 폭이 각각 0.5 mm인 사각 채널로 가공된다. 채널 길이는 40 mm의 가열길이를 포함하여 약 80 mm이다. 동판의 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 동판의 하부 표면에 8 mm 간격으로 5개의 T-type 열전대가 부착된다. 마지막으로 열손실을 방지하기 위해 필름히터 아래 단열층(thermal-insulating layer)을 둔다.

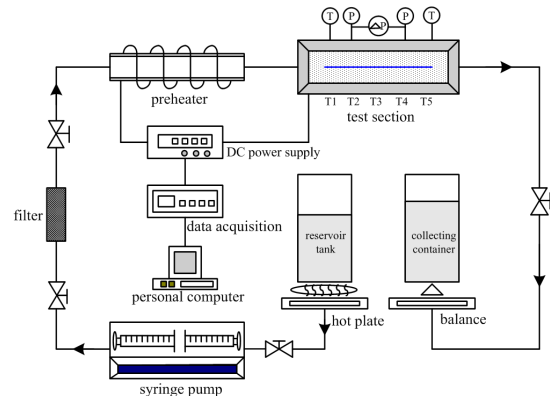


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

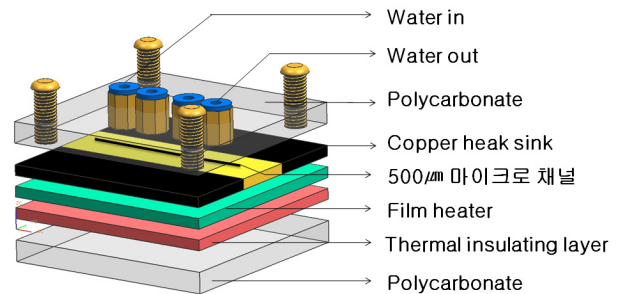


Fig. 2. Test section

실험을 시작하기 전에 저장조의 작동유체를 약 1 시간 동안 가열시켜 증발시킴으로써 가스제거(degassing) 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, 시

험부 입·출구의 압력 강하는 차압계를 사용하여 측정하였다. 시험부 입구의 압력은 110~170 kPa이며, 입구 온도는 그 때의 포화온도에 해당한다.

Table 1 Experimental condition

| Parameter          | Range                             |
|--------------------|-----------------------------------|
| Mass flux          | 200, 400, 600 kg/m <sup>2</sup> s |
| Heat flux          | 100~400 kW/m <sup>2</sup>         |
| Inlet pressure     | 110~170 kPa                       |
| Voltage            | 15~50 V                           |
| Electrical current | 0.2~3 A                           |
| Outlet quality     | 0~0.2                             |

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 차압계 (differential pressure drop transducer)를 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 벽면 온도 측정으로부터 유발되며, 본 연구에서는 6~12%의 범위에 있는 것으로 평가되었으며, 그 보다 더 큰 불확실성은 낮은 열유속에서 일어났다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 열전달 계수

가열기로부터 작동 유체로의 열유속을 결정하기 위해 전도, 대류 그리고 복사로 인한 열손실이 고려되어야 한다. 동(copper) 블록(히트싱크)으로부터 주위로의 열손실은 단상 열전달 조건하에 유체에 전달된 감열로부터 평가된다.

$$q = \rho C_p Q (T_{f,out} - T_{f,in}) \quad (1)$$

여기서 Q는 유량이고, 밀도와 비열은 입구와 출구의 평균 유체 온도를 토대로 계산된다. 일단 비등이 발생하기 시작하면, 모든 실험에 걸쳐 입력 열량의 80~90%가 물(유체)로 전달되며, 이것은 열유속과 유량에 따라 달라진다. 따라서 적용된 열유속  $q''$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$q'' = \phi VI / F \quad (2)$$

여기서  $\phi$ 는 물(유체)에 의해 흡수된 총 열량의 일부를 나타내며, F는 동 블록의 하부와 측면 벽을 포함하는 마이크로채널의 가열 표면으로 다음과 같다.

$$F = (2H_{ch} + W_{ch})L_{ch} \quad (3)$$

본 연구에서는 주어진 단면에서 마이크로채널의 측면 벽온도는 하부 온도와 다르지 않다고 가정하였다. 동일한 가정이 Qu 와 Mudawar<sup>14)</sup>에 의해서도 사용되었다. 그리고 시험 구간의 총 열 평형은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$N = N_1 + N_2 + N_3 \quad (4)$$

여기서 N은 필름 히터에 의해 발생한 총 입력 열량이며, N<sub>1</sub>은 유체로 전달된 열량이고, N<sub>2</sub>는 동 블록을 통해 전도된 열량이며 그리고 N<sub>3</sub>는 열손실로 인해 소산된 열량을 나타낸다.

필름 히터에 가해진 총 입력 열량은 다음과 같이 계산된다.

$$N = IV \quad (5)$$

단상류의 경우 채널내로 흐르는 유체로 전달된 열량은 다음과 같다.

$$N_1 = \dot{m} C_p (T_{f,out} - T_{f,in}) \quad (6)$$

$\dot{m}$ 은 질량 유량이고, C<sub>p</sub>는 비열이며, T<sub>f,out</sub>와 T<sub>f,in</sub>은 시험 구간의 출구 및 입구에서의 유체 온도이다.

자유 대류와 복사로 인해 시험 구간에서 주변으로 전달된 열손실 N<sub>3</sub>는 채널의 하부 벽면 온도 T<sub>w</sub>와 주변 온도 T<sub>air</sub>에 따라 다르다. 즉, 가열기의 평균온도와 폴리카보네이트 커버의 평균온도가 주변으로의 열손실을 계산하기 위해 사용된다. 대류와 열복사로 인한 손실은 모든 조건에서 최대 열량의 3%이하가 되는 것으로 평가되었다. 자유 대류와 복사로 인한 열손실이 먼저 계산되며, 그리고 나서 축방향 열유속으로 인한 열량이 다음과 같이 결정된다.

$$N_2 = N - N_1 - N_3 \quad (7)$$

결과적으로 비  $\phi$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\phi = (N - N_2 - N_3) / N \quad (8)$$

본 연구에서  $\phi$ 의 값은 0.82-0.91의 범위에 있었으며,

유량과 열유속에 따라 달랐다. 이와 같이  $\phi$ 를 계산하기 위한 유사한 방법들이 Hetsroni등<sup>15)</sup>, Liu등<sup>16)</sup> 그리고 Wang등<sup>17)</sup>등에 의해서도 사용되었다.

국소 열전달계수  $h$ 는 다음 식을 사용하여 계산된다.

$$h = q'' / (T_w - T_{sat}) \quad (9)$$

마이크로채널내의 압력 강하로 인해 국소 포화온도  $T_{sat}$ 는 유동방향으로 감소한다. 마이크로채널내의 국소 압력을 얻기 위해 마이크로채널의 입구에서 출구까지 선형적으로 압력이 강하하는 것으로 가정하며, 국소 포화 온도  $T_{sat}$ 도 마찬가지로이다. 식에서 벽면 온도  $T_w$ 는 마이크로채널의 하부에서 측정된 온도  $T_b$ 를 교정함으로써 얻어지며, 다음과 같다.

$$T_w = T_b - \frac{qt_b}{kA} \quad (10)$$

여기서  $t_b$ 는 동 블록(히트싱크)의 두께이고,  $k$ 는 동 열전도율을 나타낸다.

출구 증기 건도는 다음과 같이 에너지 평형으로부터 계산된다.

$$x_o = \frac{1}{h_{fg}} \left[ \frac{q}{\rho Q} - C_p (T_{sat} - T_{in}) \right] \quad (11)$$

식(11)에서  $h_{fg}$ 는 잠열이며,  $Q$ 는 유량이고,  $C_p$ 는 작동 유체의 비열을 나타낸다.

### 3.2 분석 결과

Fig. 3는 증기 건도의 증가에 따른 열전달계수의 변화를 서로 다른 질량유속 조건에 대하여 나타내었다. 그림으로부터 알 수 있듯이 질량유속의 변화가 열전달에 미치는 영향은 거의 없다는 것을 알 수 있으며, 저건도 영역에서는 건도가 증가함에 따라 열전달계수가 급격히 감소하고 있음을 알 수 있으며, 건도가 증가함에 따라 열전달계수가 거의 일정하게 나타나고 있다. 이러한 결과는 핵비등이 마이크로 채널 내에서의 증발을 지배<sup>10)</sup>하고 있다고 할 수 있다. 핵생성이 시작되면 에너지가 증기 기포로 급속히 전달되어 이 기포는 유로 전 단면을 채울 정도로 성장하게 된다. 이러한 현상은 기포류에서 슬러그와 환상류로의 변환을 나타낸다. 오늘날 핵비등이 미니 또는 마이크로 채널 내 주요 열전달 메커니즘으로 여겨지며, 슬러그와 환상류동 시 채널 내 얇은 액막에 있는 핵생성 기포의 존재로 인해 열전달계수가 일정하거나 감소하는 것으로 간주되고 있다<sup>5,18,19)</sup>.

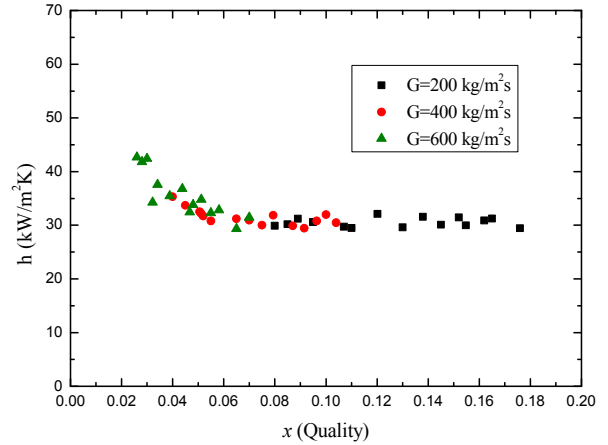


Fig. 3 Variation of heat transfer coefficient with respect to vapor quality

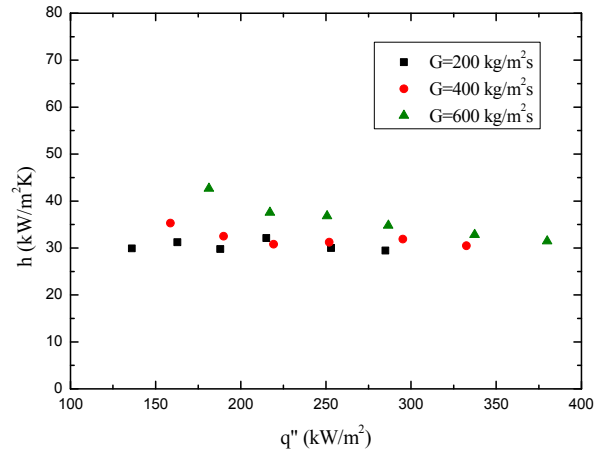


Fig. 4 Variation of heat transfer coefficient with respect to heat flux

Fig. 4는 열유속의 변화에 따른 열전달계수의 영향을 나타내었다. 그림에 나타난바와 같이 저 열유속에서 질량유속 200 kg/m<sup>2</sup>s과 400 kg/m<sup>2</sup>s의 경우 열전달계수가 열유속의 영향을 받고 있다는 것을 알 수 있으며, 600 kg/m<sup>2</sup>s의 질량유속에서는 열유속의 영향을 다소 크게 받고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 핵비등이 마이크로 채널내에서의 증발을 지배한다는 것을 다시 확인 할 수 있다.

Fig. 5는 본 연구에서 얻어진 실험 데이터를 기존의 미니채널에서 얻어진 상관식들과 비교한 결과를 나타내었다. 그림으로부터 알 수 있듯이 기존의 상관식들 중에서 Sun과 Mishima와 Lazarek과 Black의 상관식이 본 연구의 결과를 가장 잘 예측하였으며, 17.8%와 20.3%의 MAE(mean absolute error)를 나타내었다. Table 1에 몇몇 상관식에 대한 MAE가 나타나 있다.

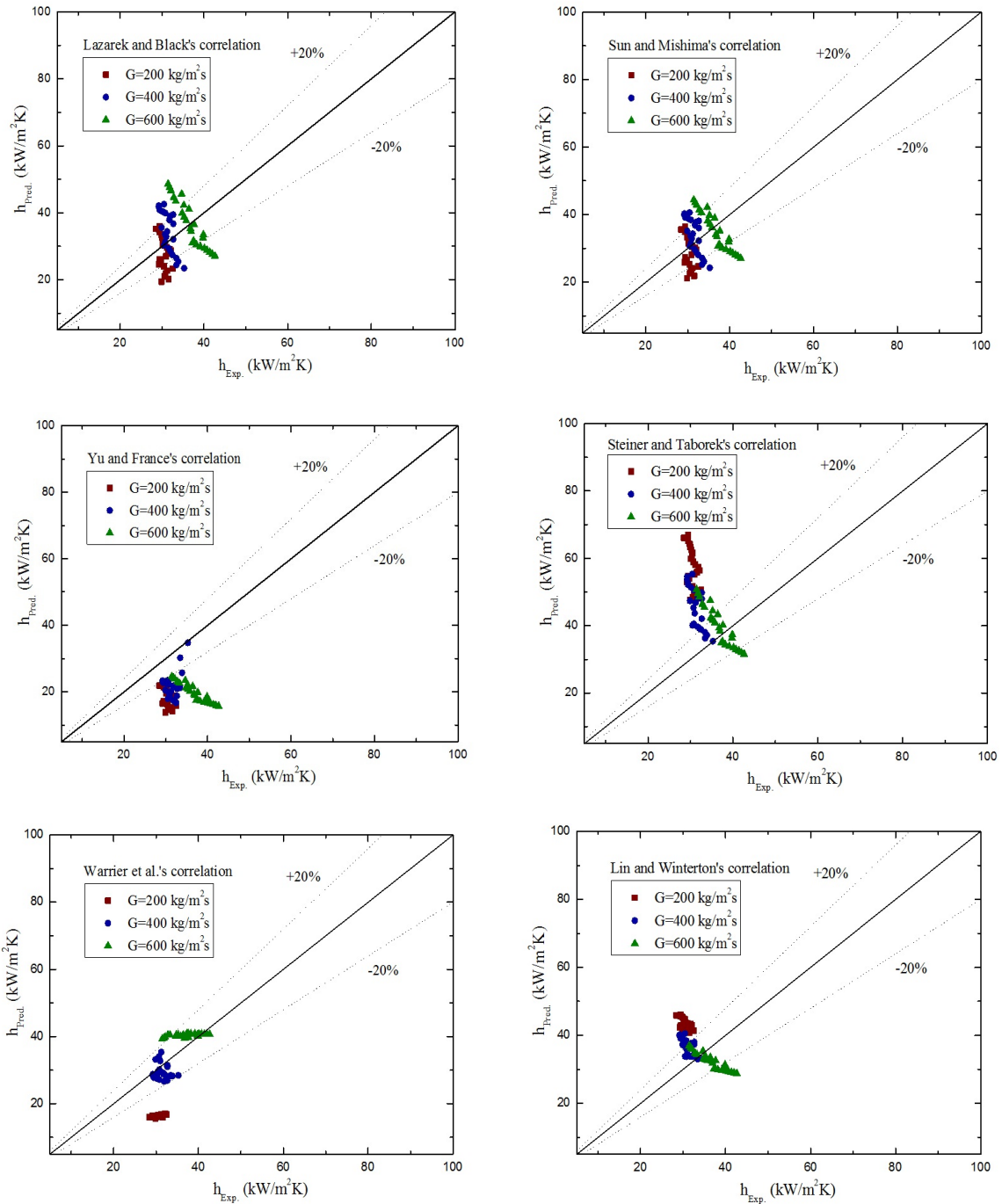


Fig. 5. Comparison between present date and previous correlations

Table 2 Mean absolute error of some correlations

| Correlation         | MAE (%) |
|---------------------|---------|
| Lazarek and Black   | 20.3    |
| Sun and Mishima     | 17.8    |
| Yu and France       | 38.9    |
| Steiner and Taborek | 51.5    |
| Warrier et al.      | 22.1    |
| Lin and Winterton   | 25.0    |

#### 4. 결 론

본 연구에서는 500  $\mu$ m를 가지는 수평 사각 채널에서 유동 비등 열전달 실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구에서 얻어진 유동 비등 열전달계수는 질량 유속의 영향을 거의 받지 않음을 확인하였으며, 건도가 증가함에 따라 열전달계수는 일정하거나 약

간 감소하였다. 이러한 현상은 유동 양식이 기포류에서 슬러그/환상류로 변환되어 채널 내 얇은 액막에 있는 핵생성 기포의 존재로 인한 것으로 여겨진다.

2. 열전달계수는 열유속의 영향을 받고 있다는 것을 알 수 있었으며, 질량유속이 클수록 이러한 현상은 더 크게 나타났다. 이것은 핵 비등이 미니/마이크로 채널 내 주요 열전달 메커니즘이라 볼 수 있다.

3. 본 실험 결과를 기존에 잘 알려진 몇몇 상관식들과 비교하였다. 그 중에서 Sun과 Mishima 그리고 Lazarek과 Black의 상관식이 17.8%와 20.3%의 MAE를 가지고 현 데이터를 가장 잘 예측하였다.

### 참고 문헌

1. Soong, C.Y. and Wang, S.H., 2003, "Theoretical analysis of electrokinetic flow and heat transfer in a microchannel under asymmetric boundary conditions", *Colloid Interface Sci.* vol. 265 pp. 202-13.
2. Peng, X.F. Wang, B.-X., 1993, "Forced convection and flow boiling heat transfer for liquid flowing through microchannels", *Int. J. Heat Mass Transfer* vol. 36 no. 14, pp. 3421-3427.
3. Kandlikar, S.G., 2002, "Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels", *Exp. Therm. Fluid Sci.* vol. 26, pp. 389-407.
4. Wambsganss, M.W., France, D. M., Jendrzejczyk, J. A., Tran, T. N., 1993, "Boiling heat transfer in a horizontal small-diameter tube", *J. Heat Transfer Trans. ASME* vol. 115 no. 4, pp. 963-972.
5. Thome, J.R., 2004, "Boiling in microchannels: a review of experiment and theory". *Int. J. Heat and Fluid Flow* vol. 25, pp. 128-139.
6. Hetsroni G. et al., 2005, "Fluid flow in micro-channels", *Int. J. Heat Mass Transfer* vol. 48 no. 10, pp. 982-1998.
7. Tran, T.N., Wambsganss, M.W. and France, D.M., 1996, "Small circular- and rectangular channel boiling with two refrigerants", *Int. J. Multiphase Flow* vol. 22, no. 3, pp. 485 - 498.
8. Liu, D. and Garimella, S.V., 2005, "Flow boiling in a microchannel heat sink". In: *Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Orlando, FL, November* pp.5-11.
9. Lazarek, G.M. and Black, S.H., 1982. "Evaporative heat transfer, pressure drop and critical heat flux in a small vertical tube". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 25 (7), pp.945-960.
10. Tran, T.N., Wambsganss, M.W. and France, D.M., 1996, "Small circular- and rectangular channel boiling with two refrigerants". *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 22 (3), pp.485-498.
11. Yu, W., France, D.M., Wambsganss, M.W. and Hull, J.R., 2002, "Two-phase pressure drop, boiling heat transfer, and critical heat flux to water in a small-diameter horizontal tube", *Int. J. Multiphase Flow*. Vol. 28, pp.927-941.
12. Warriar, G.R., Dhir, V.K. and Momoda, L.A., 2002, "Heat transfer and pressure drop in narrow rectangular channels", *Exp. Thermal and Fluid Sci.*, Vol. 26, pp.53-64.
13. Sun, L. and Mishima, K., 2009. "An evaluation of prediction methods for saturated flow boiling heat transfer in mini-channels". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52 (7), pp.5323-5329.
14. Qu, W. and Mudawar, I., 2002, "Experimental and numerical study of pressure drop and heat transfer in a single-phase micro-channel heat sink", *Int. J. Heat Mass Transfer* vol. 45, pp. 2549-2565.
15. Hetsroni, G., Mosyak, A., Pogrebnyak, E. and Segal, Z., 2005, "Explosive boiling of water in parallel micro-channels". *International Journal of Multiphase Flow* Vol. 31, pp.371-392.
16. Liu, D., Lee, P.-S. and Garimella, S.V., 2005, "Prediction of the onset of nucleate boiling in microchannel flow". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 5134-5149.
17. Wang, G., Cheng, P. and Wu, H., 2007, "Unstable and stable flow boiling in parallel

microchannels and in a single microchannel”,  
International Journal of Heat and Mass  
Transfer, Vol. 50, pp. 4297-4310.

18. Kandlikar, S.G. and Grande, W.J., 2003,  
“Evolution of microchannel flow passages  
thermo- hydraulic performance and fabrication  
technology”, Heat Transfer Eng. vol. 24, no. 1,  
pp. 3-17.
19. Bergles, A.E., 2003, “Boiling and evaporation in  
small diameter channels”, Heat Transfer  
Engineering Microchannels- Short History and  
Bright Future, vol. 24, no. 1, pp. 18-40.