

< 논문 >

수평 사각 마이크로채널 내에서의 유동 비등 열전달

허 철[†] · 김 무 환^{*}

(2006 년 4 월 17 일 접수, 2006 년 8 월 31 일 심사완료)

Flow Boiling Heat Transfer in a Horizontal Rectangular Microchannel

Cheol Huh and Moo Hwan Kim

Key Words : Flow Boiling Heat Transfer (유동 비등 열전달), Microchannel(마이크로채널), Two-phase Flow(2 상 유동), Pressure Drop(압력강하)

Abstract

An experimental investigation was performed to study flow boiling heat transfer of deionized water in a microchannel. Measurement and evaluation of boiling heat transfer coefficients were carried out using a single horizontal rectangular microchannel having a hydraulic diameter of 100 μm . Tests were performed for mass fluxes of 90, 169 and 267 $\text{kg/m}^2\text{s}$ and heat fluxes of 200-700 kW/m^2 . Test results showed that the measured boiling heat transfer coefficients had no dependence on mass flux and vapor quality. Most macro-channel correlations of boiling heat transfer coefficient did not provide reliable predictions.

기호설명

A : 면적 [m^2]
 D_h : 수력직경 [m]
 G : 질량유속 [$\text{kg/m}^2\text{s}$]
 H : 두께 [m]
 h : 열전달계수 [$\text{kW/m}^2\text{K}$]
 I : 입력 전류 [A]
 i : 엔탈피 [J/kg]
 i_{fg} : 증발잠열 [J/kg]
 k : 열전도계수 [W/mK]
 L : 길이 [m]
 \dot{m} : 질량유량 [kg/s]
 Nu : 누셀트 수 [-]
 P : 압력 [kPa]
 q : 열량 [W, kW]
 q'' : 열유속 [kW/m^2]

T : 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
 V : 입력 전압 [V]
 W : 폭 [m]
 x : 건도 [-]
 β : 채널 단면의 폭 대 높이 비 [-]
 ρ : 밀도 [kg/m^3]

하첨자

bw : 마이크로 히터의 바닥 면
 ch : 마이크로채널
 eff : 유효(총량으로부터 손실 량을 제외)
 experiment : 실험 값
 f : 유체
 h : 마이크로 히터
 in : 입구
 loss : 열손실
 out : 출구
 pred : 상관식으로부터의 예측 값
 sat : 포화상태
 sub : 과냉상태
 tp : 2 상 유동
 n : 단위 마이크로 히터/마이크로채널 구간

[†] 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : dratom@postech.ac.kr

TEL : (054)279-5911 FAX : (054)279-3199

^{*} 회원, 포항공과대학교 기계공학과

1. 서론

고성능 마이크로채널 열교환기는 최근 고열유속 환경에서 운전되는 기계 및 전자장비의 급속한 발달로 인하여 그 필요성이 점차 증가하고 있다. 특히, 마이크로채널 내에서 냉각재의 증발 잠열을 이용하는 상변화 열전달 마이크로채널 히트싱크는 많은 연구의 대상이 되고 있다. 그러나 수력 직경 0.2 mm 미만의 마이크로채널 내에서의 열전달 특성을 정확히 예측하는 것은 무척이나 어려운 작업이다. 미세 유로에서의 유동 비등 열전달에 대한 그간의 연구는 주로 1 mm 내외의 미세 원형 관과 미세 사각 유로를 이용하여 수행되어 왔다. 이는 마이크로채널 열전달 실험에 있어서 정량적 제어 및 측정이 매우 어렵다는데 기인한 것이다. 따라서 기존 연구자들 대부분은 다채널 시스템을 적용함으로써 작동 유체인 냉각재의 유량을 늘리고 더 불어 시험부로 투입되는 열량을 증폭시킴으로써 제어 및 측정의 용이성을 도모하는 방법을 취해

왔다.

Lazarek과 Black⁽¹⁾은 R-113을 이용한 3.1 mm의 원형 관내 유동 비등 실험을 통하여 핵비등 열전달이 주요 열전달 메커니즘임을 보였다.

Tran 등⁽²⁾은 R-12를 이용한 2.4 mm의 사각 관과 2.46 mm의 원형 관내 유동 비등 실험을 통하여, 열전달계수는 열유속에 강한 의존도를 보이며 질량유속과 건도에 의한 영향력은 다소 약하다는 실험 결과를 보였다. 이러한 경향은 열전달 주요 메커니즘이 핵비등임을 의미한다.

Kew와 Cornwell⁽³⁾은 R-141b를 이용하여 내경 1.39 ~ 3.69 mm, 길이 500 mm의 관에서 유동 비등 실험을 수행하였으며, 기존 핵비등 상관식이 실험 결과를 잘 예측함을 보였다.

Bao 등⁽⁴⁾은 R-11과 HCFC123을 이용한 1.95 mm의 원형 관내 유동 비등 실험을 수행하였다. 실험 열전달계수는 Tran 등⁽²⁾과 마찬가지로 열유속과 압력에는 큰 영향을, 질량유속과 건도에는 약한 영향을 받음을 확인하였다.

Table 1 Summary of the previous studied on flow boiling in small channels

Author/year	Fluid	Test conditions	Channel geometry (mm)	Remarks
Lazarek and Black ⁽¹⁾ (1982)	R-113	P=0.13-0.41 MPa G=125-750 kg/m ² s q''=14-380 kW/m ² x=0-0.6	Circular, 3.1, Vertical	Nucleate boiling heat transfer dominant
Tran et al. ⁽²⁾ (1996)	R-12	P=0.51-0.82 MPa G=44-832 kg/m ² s q''=3.6-129 kW/m ² x=0-0.94	Circular, 2.46 Rectangular, 2.4 Horizontal	Nucleate boiling heat transfer dominant
Kew and Cornwell ⁽³⁾ (1997)	R-141b	G=188-1480 kg/m ² s q''=9.7-90 kW/m ² x=0-0.9	Circular, 1.39-3.69, Horizontal	Nucleate boiling heat transfer dominant
Bao et al. ⁽⁴⁾ (2000)	R-11, HCFC123	P=0.2-0.5 MPa G=50-1800 kg/m ² s q''=5-200 kW/m ² x=0-0.9	Circular, 1.95, Horizontal	Nucleate boiling heat transfer dominant
Lee and Lee ⁽⁵⁾ (2001)	R-113	G=51.6-209 kg/m ² s q''=16 kW/m ² x=0.2-0.8	Rectangular, 20x0.4-2 Horizontal	Convective boiling heat transfer dominant
Jacobi and Thome ⁽⁶⁾ (2002)	Water	-	Circular, Horizontal	Numerical calculation of elongated bubble
Yu et al. ⁽⁷⁾ (2002)	Water	P=200 kPa G=50-150 kg/m ² s q''=320 kW/m ² x=0.15-1.0	Circular, 2.98, Horizontal	Nucleate boiling heat transfer dominant
Qu and Mudawar ⁽⁸⁾ (2003)	Water	P=1.17 bar G=135-402 kg/m ² s q''=1000 kW/m ² x=0-0.2	Rectangular, 0.231x0.713 Horizontal	Convective boiling heat transfer dominant

Lee 와 Lee⁽⁵⁾는 R-113 을 이용하여 폭 20 mm, 채널 높이 0.4 ~ 2 mm 의 유로에서 유동 비등 실험을 수행하였으며, 주요 열전달 메커니즘은 대류 비등 기구이며 유로 높이가 작아질수록 건도의 변화가 비등 열전달에 미치는 영향이 크다는 결과를 발표하였다.

Jacobi 와 Thome⁽⁶⁾는 기포가 늘어진 형상으로 성장하면서 얇은 액막의 증발로 인한 열전달 현상이 마이크로채널에서의 주요 열전달 메커니즘임을 보였다.

Yu 등⁽⁷⁾은 내경 2.98 mm, 길이 0.91 mm 의 미세관을 이용하여 2 상 유동 특성 파악을 위한 유동비등 실험을 수행하였으며, Tran 등⁽²⁾과 유사한 결과를 보였다.

Qu 와 Mudawar⁽⁸⁾는 물을 작동유체로 선정하여 폭 0.231 mm, 높이 0.713 mm 의 단면을 가지는 총 21 개의 유로로 이루어진 다채널에서 유동 비등 실험을 수행하였다. 환상류 영역에 해당하는 대류 비등 열전달이 주요 열전달 메커니즘임을 보였다. 미세 유로에서의 비등 열전달과 관련된 기존의 연구결과들을 Table 1 에 정리하였다.

본 연구에서는 단일 마이크로채널 내에서의 유동과 열전달 실험을 위한 새로운 측정 기법과 장치를 제작하였으며, 이를 이용하여 마이크로채널 내에서의 유동 비등 열전달 량에 대한 측정 및 분석을 수행하였다. 또한, 실험으로부터 얻어진 열전달계수와 기존 상관식을 비교 분석함으로써 마이크로채널 내에서의 유동 비등 열전달을 정성적, 정량적으로 연구하였다.

2. 실험

2.1 실험장치 및 시험부

수평 사각 마이크로채널 내에서의 유동 비등 열전달 실험을 위한 실험장치의 사진을 Fig. 1 에 나타내었으며, 실험장치에 대한 설명은 Huh 와 Kim⁽⁹⁾ 에 구체적으로 기술되어 있다.

시험부는 6 개의 마이크로 히터와 단일 마이크로채널로 구성되어 있다. Fig. 2 에 보이는 바와 같이 히터의 구조가 여러 개의 독립형 히터 배열(heater array)의 형태를 갖도록 설계하였다. 총 6 개의 독립 히터를 작동 유체의 유동이 있는 유로 바로 아랫면에 설치함으로써 열의 흐름의 왜곡을 최소화할 수 있도록 하였으며, 각각의 히터를 별도로 제어함으로써 그 발열량과 열유속을 정확히 측정하고자 하였다. 또한, 각각의 히터는 전원 공급 및 전압, 전류 측정을 위하여 각각 4 개의 리드 라인을 갖도록 하였으며, 이때 리드 라인의 선 폭은 히터의 선 폭보다 충분히 크게 함으로써 발열 열량이 가능한 히터에 집중될 수 있도록 하였다. 마이크로 히터는 백금 (Pt)으로 이루어진 금속 패틴이 전류 입력을 받아 발열하는 주열 히팅 현상을 이용하였다. 백금은 전기 저항이 커서 그 발열량이 클 뿐 아니라 온도에 따른 저항의 변화가 매우 선형적인 특성을 가지고 있으므로, 히터의 역할뿐 아니라 국소 구간의 온도를 측정할 수 있는 저항 온도 센서(RTD)의 역할도 수행할 수 있도록 하였다.



Fig. 1 Overall image of the test apparatus

2.2 실험 조건 및 방법

시험부에서의 열량은 각각의 마이크로 히터로 인가되는 전압과 전류를 각각 측정하고 이를 이용하여 도출한다. 가열 면의 온도는 마이크로 히터의 저항 변화를 측정하고, 온도에 따른 히터 저항 변화의 선형 관계식을 이용하여 도출한다. 온도에 따른 마이크로 히터의 저항 변화는 일정 온도 제어 항온조와 검교정된 표준 RTD를 이용하여 교정 곡선을 획득한다. 교정된 마이크로 히터의 온도 측정 성능은 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 의 정확도를 갖는다. Fig. 3은 백금 마이크로 히터의 온도 변화에 따른 저항 변화의 교정 곡선이다. 교정 곡선에 표시되어 있는 특정 히터의 추세선에서 보이는 바와 같이 온도에 따른 마이크로 히터의 저항 변화는 매우 선형적이다.

실험을 위한 작동유체는 3 차 증류수를 사용하였으며, 충분한 비등과정을 통하여 작동유체 내에 녹아 들어가있는 응축 가스를 제거하였다.

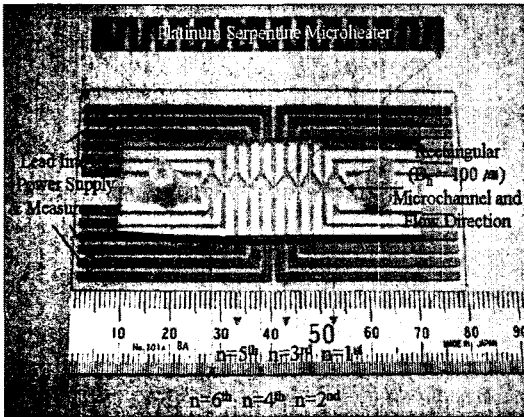


Fig. 2 Microheater (6 heaters)

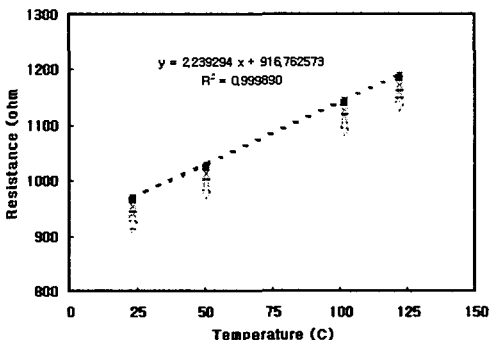


Fig. 3 Calibration curve of the microheater

이를 통하여 응축 가스가 비등 열전달 현상에 미치는 효과를 원천적으로 억제하였다. 시험부의 유량은 RS-232 인터페이스를 통하여 시린지 펌프를 제어하고, 전자저울을 통하여 질량유량을 측정하였다. 시험부의 유량이 설정된 조건에 도달한 후 측정된 압력과 차압으로부터 유동이 안정되었다고 판단되면 직류전원 공급장치를 이용하여 히터로 공급되는 열량을 서서히 증가시킴으로써 시험 조건을 구현 하였다. 실험 시 측정된 온도, 압력, 전압, 그리고 전류 등의 출력 신호들은 데이터 로거, GPIB to USB 인터페이스, 컴퓨터 등으로 구성된 데이터 취득 장치를 이용하여 수집 및 분석하였다. 작동유체인 물의 열역학적 물성은 NIST chemistry webbook⁽¹⁰⁾에서 제공하는 NIST standard reference database의 값들을 이용하였다.

본 연구에서의 실험 조건은 Table 2에 나타낸 바와 같다.

2.3 실험 데이터 처리 및 오차 분석

Fig. 2에 보이는 바와 같이 시험부가 총 6개의 마이크로 히터와 단일 마이크로채널로 구성되어 있다. 따라서, 본 연구에서는 실험 데이터 처리를 위하여 시험부를 Fig. 4에 보이는 바와 같이 유동 방향에 따라 6개의 마이크로 히터/마이크로채널 구간으로 분할하여 분석하였다.

각각의 마이크로 히터에서의 발열 열량과 열손실량은 다음의 식 (1)과 (2)를 이용하여 구하였다. 하첨자 n 은 유동 방향으로의 단위 마이크로 히터/마이크로채널 구간을 의미한다.

$$q_n = V_n \cdot I_n \quad (1)$$

$$q_{loss,n} = \frac{k_{bw,n}(T_{h,n} - T_{bw,n})}{H_{bw,n}} W_{ch,n} L_{ch,n} \quad (2)$$

Table 2 Experimental condition

Hydraulic diameter	100 μm , (W 100 x H 100 μm)
Test channel length	40 mm
Effective boiling length	30 mm
Working fluid	Deionized water
Mass flux	90, 169, 267 $\text{kg/m}^2\text{s}$
Volume flow rate	0.05, 0.1, 0.15 ml/min
Heat flux	200 - 700 kW/m^2
Quality range	0 - 0.4

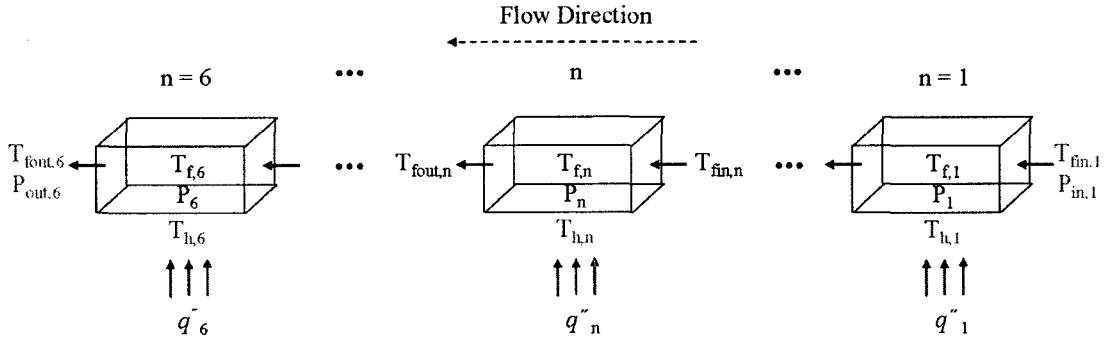


Fig. 4 Six sections of microheater and microchannel pair

Table 3 Experimental uncertainties

Temperature	$\pm 0.1^\circ\text{C}$
Pressure	$\pm 0.76\text{ kPa}$
Pressure difference	$\pm 0.34\text{ kPa}$
Mass Flux	$\pm 1.09\%$
Heat Flux	$\pm 2.74\%$
Vapor Quality	0.025
Heat Transfer Coefficient	$\pm 3.3 \sim \pm 10.1\%$

열유속은 개별 마이크로 히터로 인가되는 총 열량 중 누설 열량을 제외한 유효 열량과 유효 열전달 면적을 고려하여 구하였다.

$$q_{eff,n} = q_n - q_{loss,n} \quad (3)$$

$$q''_n = \frac{q_{eff,n}}{W_{ch,n} L_{ch,n}} \quad (4)$$

시험부 출구 및 2 상 유동 구간에 해당하는 각 단위 히터/채널 구간 출구에서의 열역학적 건도는 식 (5)에서와 같이 총 열량 중 현열 열량을 제외한 상변화에 투입되는 잠열 열량만을 고려하여 계산하였다.

$$x_{out,n} = \frac{\sum_n q_{eff,n} - \sum_{sub,n} q_{eff,n}}{\dot{m}_f i_{fg}} \quad (5)$$

2 상 유동 구간에서의 유동 비등 열전달계수는 유효 열유속, 마이크로 히터의 가열 면 온도, 그리고 국소 포화온도를 이용하여 구하였다.

2 상 구간에서의 국소 포화온도는 Huh 와 Kim⁽⁹⁾에서 구해진 단위 히터/채널 구간 국소 압력으로 부터 구해진다.

$$h_{TP,n} = \frac{q''_{eff,n}}{T_{h,n} - T_{sat,n}} \quad (6)$$

계측된 온도, 압력, 열전달계수 등의 불확실성은 Table 3 에 나타난 바와 같다. 이와 같은 실험 변수들에 대한 불확실성 해석은 Holman⁽¹¹⁾이 제안한 방법을 이용하여 수행하였다.

3. 비등 열전달

3.1 열전달 경계조건

거시 스케일에서 수행된 실험결과를 이용하여 구축된 기존 열전달 상관식 대부분은 전 가열면에 균일 열유속을 가정하고 개발되었다. 즉, 원형 관의 경우 원주 방향으로, 사각 채널의 경우 사면이 모두 동일한 열유속으로 에너지가 공급되는 경계조건을 가진다. 그러나 마이크로채널의 경우 대부분 구조적, 실용적 측면에서 비대칭 열 경계조건을 가지게 된다. 즉, 본 연구에 적용된 마이크로채널의 경우 채널 바닥 면으로만 열이 공급되고, 나머지 세면은 채널 구조물(PDMS)⁽⁹⁾의 낮은 열전도도로 인하여 단열 경계조건을 사용하였다. 이와 같은 사각 채널에서의 비대칭 열유속 경계조건에 대하여 Shah 와 London⁽¹²⁾은 다음과 같은 누셀트 수를 제시하였다.

$$\text{Nu}_1 = -0.3204\beta^5 + 1.9442\beta^4 - 4.7367\beta^3 + 6.3025\beta^2 - 5.8389\beta + 5.3606 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} Nu_4 = & -0.8118\beta^5 + 5.5612\beta^4 - 15.297\beta^3 \\ & + 21.619\beta^2 - 15.524\beta + 8.0553 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 누셀트 수 Nu_1 과 Nu_4 는 각각 일면 가열 조건과 사면 가열 조건에서 도출된 것이다. 본 연구에서는 누셀트 수의 비, Nu_1/Nu_4 를 상관식으로부터 구한 열전달계수에 곱해줌으로써 비대칭 열 경계조건으로 인한 차이를 고려하였다.

3.2 유동 비등 열전달

관내 유동 비등 열전달은 핵비등(nucleate boiling)과 강제 대류 열전달(forced convection)의 두 가지 기구에 의하여 이루어진다. 핵비등의 경우 열전달은 열유속과 시스템 압력에 영향을 받으며, 가열 면에서의 기포의 생성 및 이탈과 관련된 현상이 주요 열전달 메커니즘이다. 반면, 강제 대류 열전달은 질량유속과 건도에 의한 영향을 받으며, 가열 면에 존재하는 얇은 액막으로부터 채널 중심부 기상으로의 액체의 증발이 주

열전달 메커니즘이다.

본 연구의 결과, 마이크로채널에서 질량유속과 건도가 유동 비등 열전달계수에 미치는 영향은 Fig. 5 에 보이는 바와 같이 매우 적다. 또한 열유속의 영향도 크지 않음을 Fig. 6 으로부터 알 수 있다. 즉, 마이크로채널에서 유동 비등 열전달계수는 핵비등 열전달과 유사한 거동을 보인다. 그러나, 마이크로채널의 작은 유로 특성상 생성된 기포가 유로를 채우면서 매우 빠르게 흐름으로써 환상류와 유사한 거동을 보이고, 이로 인하여 기포와 가열 면 사이에 존재하는 액막이 열전달에 영향을 미침을 Fig. 7 로부터 알 수 있다. 이와 같이, 마이크로채널에서 유동 비등 열전달은 핵비등과 강제 대류 열전달에 의한 복합적 열전달 메커니즘이다.



Fig. 7 Major flow pattern at 6th heater and channel

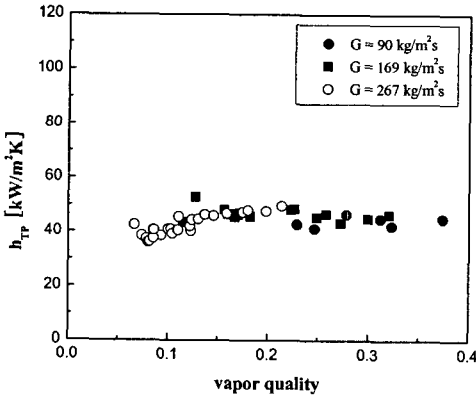


Fig. 5 Heat transfer coefficient: effect of G and x

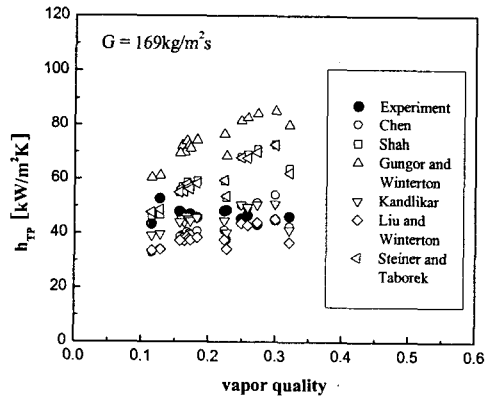


Fig. 8 Prediction of heat transfer: $G=169\text{kg/m}^2\text{s}$

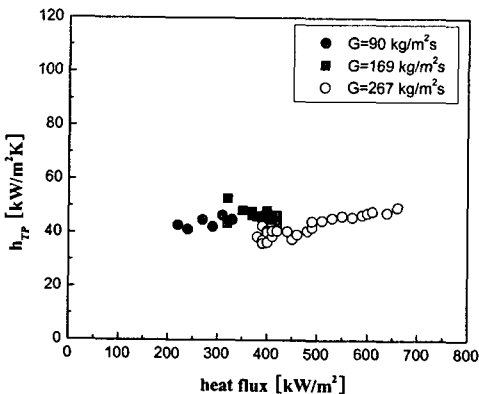


Fig. 6 Heat transfer coefficient: effect of G and q''

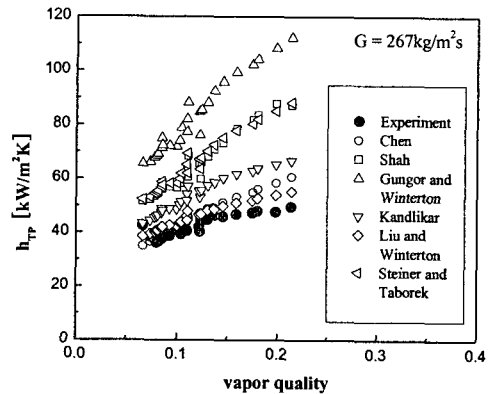


Fig. 9 Prediction of heat transfer: $G=267\text{kg/m}^2\text{s}$

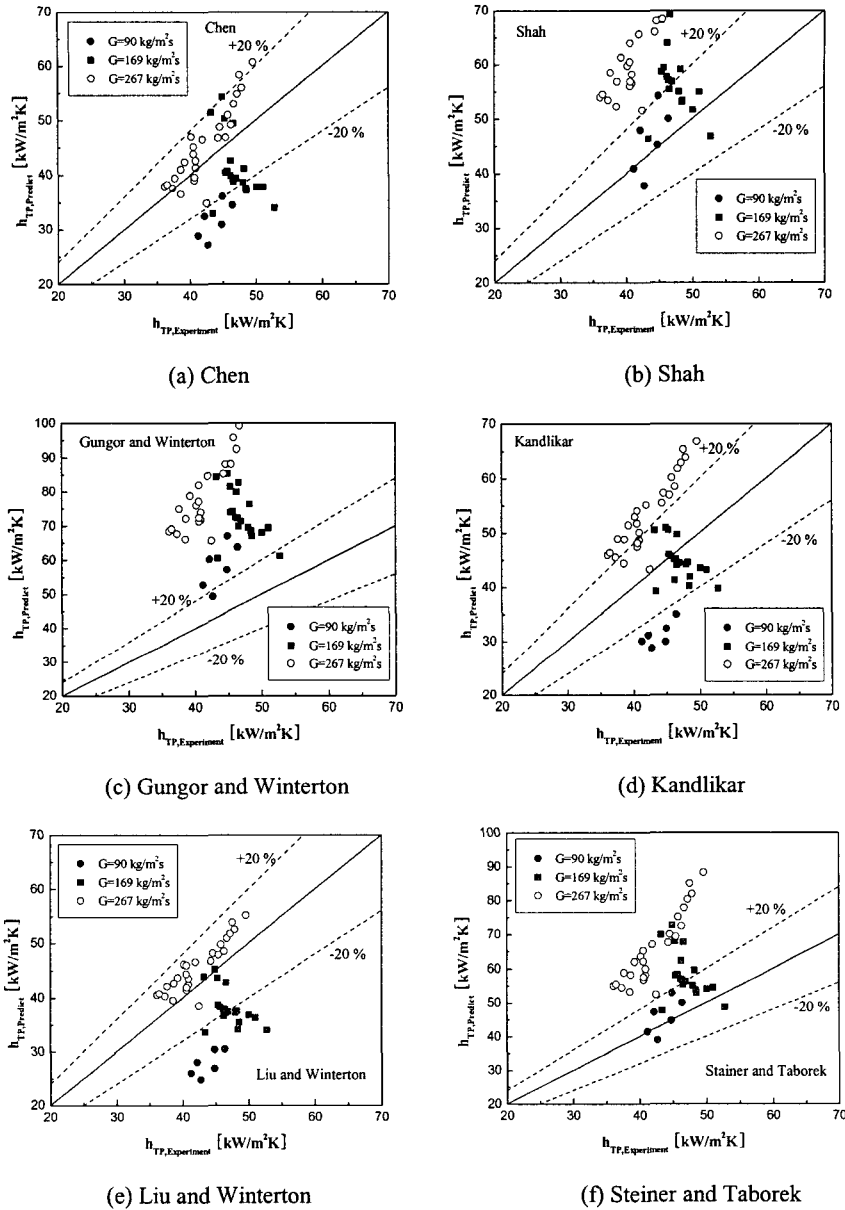


Fig. 10 Comparisons of the experimental and predicted boiling heat transfer coefficient

본 논문에서는 6가지 거시 스케일 상관식과 실험적으로 구한 마이크로채널에서의 유동 비등 열전달 특성을 비교하였다: Chen,⁽¹³⁾ Shah,⁽¹⁴⁾ Gungor와 Winterton,⁽¹⁵⁾ Kandlikar,⁽¹⁶⁾ Liu와 Winterton,⁽¹⁷⁾ 그리고 Steiner와 Taborek⁽¹⁸⁾ 상관식. 일부 상관식이 특정 유량 범위에서 실험치를 비교적 유사하게 예측할 뿐, 대부분의 상관식이 거의 모든 실험 범위에서 유동 비등 열전달 계수를 적절히 예측하지 못함을 Fig. 8과 Fig. 9로부터 알 수 있다. 이와 같은 차이는 다음과

같은 원인에 기인한다. 첫째, 기존 상관식은 매크로 스케일의 수력직경을 이용한 실험 결과를 이용하여 구축되었다. 둘째, 기존 상관식의 유동 영역은 기상과 액상 모두 난류영역에 해당하나, 본 연구에서 수행된 마이크로채널 내에서의 유동 비등은 기상과 액상 모두 층류영역에 해당한다. 이와 같은 원인에 의한 실험 열전달계수와 예측 열전달계수의 차이는 Fig. 10을 통해서 명확히 표현된다.

4. 결 론

본 연구에서는 수력직경 100 μm 의 수평 사각 마이크로채널 내에서 유동 비등 열전달을 실험적으로 조사 및 분석하였다. 실험 조건은 질량유속 90-267 $\text{kg/m}^2\text{s}$, 열유속 200-700 kW/m^2 이었으며, 그 중요한 결론은 다음과 같다.

(1) 유동 비등 열전달계수는 질량유속과 건도에 의한 영향을 적게 받으며, 핵비등 열전달과 유사한 거동을 보인다.

(2) 마이크로채널 내에서 생성된 기포가 유로를 채우면서 매우 빠르게 흐름으로써 환상류와 유사한 거동을 보이고, 이로 인하여 기포와 가열면 사이에 존재하는 액막이 열전달에 영향을 미친다.

(3) Chen 과 Kandlikar 상관식은 $\pm 40\%$ 의 오차로 마이크로채널 내 유동 비등 열전달계수를 예측함을 확인하였다. 그러나 Shah, Gungor 와 Winterton, Steiner 와 Taborek 상관식 등은 실험치를 최대 100%까지 높게 예측한다.

(4) 유동 비등 열전달계수 실험치와 예측치와의 차이는 채널의 수력직경, 층류와 난류의 차이, 그리고 기포가 마이크로채널을 채움으로써 발생하는 유동양식의 차이에 기인한다.

(5) 마이크로채널에서의 유동 비등 열전달을 정확히 예측하기 위하여 수력직경 100 μm 내외의 마이크로채널과 기상과 액상 각각 레이놀즈 수 1000 미만의 층류영역에 대한 새로운 상관식의 개발이 요구된다.

후 기

이 논문은 지역혁신인력양성사업의 재정적 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Lazarek, G.M. and Black, S.H., "Evaporative Heat Transfer, Pressure Drop and Critical Heat Flux in a Small Vertical Tube with R-113," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 25, pp. 945-960.
- (2) 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, pp. 485-498.
- (3) Kew, P.A. and Cornwell, K., 1997, "Correlation for the Prediction of Boiling Heat Transfer in Small-diameter Channels," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 17, pp. 705-715.
- (4) Bao, Z.Y., Fletcher, D.F. and Haynes, B.S., 2000, "Flow Boiling Heat Transfer of Freon R11 and HCFC123 in Narrow Passages," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 3347-3358.
- (5) Lee, H.J. and Lee, S.Y., 2001, "An Experimental Study on Flow Boiling Heat Transfer within Horizontal Rectangular Channels with Small Heights," *Transactions of the KSME B*, Vol. 25, No. 9, pp. 1209-1218.
- (6) Jacobi, A.M. and Thome, J.R., 2002, "Heat Transfer Model for Evaporation of Elongated Bubble Flows in Microchannels," *J. Heat Transfer*, Vol. 124, pp. 1131-1136.
- (7) 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.
- (8) Qu, W. and Mudawar, I., 2003, "Flow Boiling Heat Transfer in Two-phase Micro-channel Heat Sinks - I. Experimental Investigation and Assessment of Correlation Methods," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 2755-2771.
- (9) Huh, C. and Kim, M.H., 2006, "Two-phase Pressure Drop in a Horizontal Rectangular Microchannel," *Transactions of the KSME B*, Vol. 30, No. 11, pp. 1035-1042.
- (10) NIST Chemistry WebBook, <http://webbook.nist.gov/>.
- (11) Holman, J.P., 2001, *Experimental Methods for Engineers*, 7th Edition, McGraw-Hill.
- (12) Shah, R.K. and London, A.L., 1978, *Laminar Flow Forced Convection in Ducts: A Source Book for Compact Heat Exchanger Analytical Data*, Supl. 1, Academic press, New York.
- (13) Collier, J.G. and Thome, J.R., 1994, *Convective Boiling and Condensation* (3rd Ed.), Oxford University Press, Oxford, U.K., pp. 259-265.
- (14) Shah, M.M., 1976, "A New Correlation for Heat Transfer During Boiling Flow Through Pipes," *ASHRAE Trans.* Vol. 82, pp. 66-86.
- (15) Gungor, K.E. and Winterton, R.H.S., 1986, "A General Correlation for Flow Boiling in Tubes and Annuli," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 29, pp. 351-358.
- (16) Kandlikar, S.G., 1990, "A General Correlation for Saturated Twophase Flow Boiling Heat Transfer Inside Horizontal and Vertical Tubes," *J. Heat Transfer*, Vol. 112, pp. 219-228.
- (17) Liu, Z. and Winterton, R.H.S., 1991, "A General Correlation for Saturated and Subcooled Flow Boiling in Tubes and Annuli, Based on a Nucleate Pool Boiling Equation," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, pp. 2759-2766.
- (18) Steiner, D. and Taborek, J., 1992, "Flow Boiling Heat Transfer in Vertical Tubes Correlated by an Asymptotic Model," *Heat Transfer Eng.*, Vol. 13, pp. 43-69.