

오프셋 스트립 현이 있는 협소 사각유로의 비등열전달

김 병 주[†], 정 은 수, 손 병 후*

홍익대학교 기계·시스템디자인공학과, *한국건설기술연구원

Boiling Heat Transfer in a Narrow Rectangular Channel with Offset Strip Fins

Byong Joo Kim[†], Eun Soo Jeong, Byong Hu Sohn*

Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea

*Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si 411-712, Korea

(Received July 30, 2004; revision received September 9, 2004)

ABSTRACT: An experimental study on saturated flow boiling heat transfer of R113 was performed in a vertical narrow rectangular channel with offset strip fins. Two-phase pressure gradients and boiling heat transfer coefficients in an electrically heated test section were measured in the range of quality 0~0.6, mass flux 17~43 kg/m²s, and heat flux of 500~3,000 W/m². Two-phase friction multipliers were determined as a function of Lockhart-Martinelli parameter. Local boiling heat transfer coefficients were analysed in terms of mass flux, heat flux and local vapor quality. Correlation for boiling heat transfer coefficients was proposed, which was in good agreement with experimental data.

Key words: Flow boiling heat transfer(유동비등 열전달), Narrow rectangular channel(협소 사각유로), Offset strip fins(오프셋 스트립 현), Two-phase friction multiplier(2상유동 마찰배수), 레이놀즈 계수(Reynolds factor)

기 호 설 명

A	: 면적 [m ²]	i_{fg}	: 증발열 [kJ/kg]
C	: 마티넬리 변수의 상수	j	: Colburn 계수
D_h	: 수력 직경 [m]	k	: 열전도계수 [W/mK]
F	: 레이놀즈 계수	L	: 시험부 길이 [m]
f	: 마찰계수	l	: 현 길이 [m]
G	: 질량유속 [kg/m ² s]	M	: 분자량
g	: 중력가속도 [m/s ²]	p	: 압력 [kPa]
H	: 현 높이 [m]	Q	: 열공급률 [W]
h	: 열전달계수 [W/m ² K]	q''	: 열유속 [W/m ²]
		Re	: 레이놀즈수, $\rho u D / \mu$
		S	: 핵비등 억제계수
		s	: 현 폭 [m]
		T	: 온도 [°C]
		t	: 현 두께 [m]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-320-1611; fax: +82-2-322-7003

E-mail address: bjkim@wow.hongik.ac.kr

v	: 비체적 [m^3/kg]
W	: 질량유량 [kg/s]
X	: 마티넬리 변수
x	: 건도
z	: 유동방향 좌표

그리스 문자

α, δ, γ	: 흰 형상계수
ρ	: 밀도 [kg/m^3]
σ	: 표면장력 [N/m]
ϕ	: 2상유동 마찰배수

하첨자

A	: 가속
c	: 임계값
cb	: 대류비등
e	: 시험부 출구
exp	: 실험
F	: 마찰
f	: 액상
G	: 중력
g	: 기상
nb	: 핵비등
pb	: 푸울비등
pre	: 예측
sat	: 포화
TP	: 2상
w	: 벽

1. 서 론

에너지 산업의 일반적인 공정에서 유체 사이의 열전달과정은 필수적으로 수반되며, 효율적인 열전달과 시스템의 소형·경량화 측면에서 다양한 종류의 열전달 고양체를 삽입한 밀집형 열교환기(compact heat exchanger)가 사용되고 있다. 판-흰 열교환기(plate-fin heat exchanger)는 주로 기체와 기체 사이의 단상 열전달과정에 적용되었으나 상변화가 발생하는 증발기 및 응축기로도 그 적용이 확대되고 있다. 판-흰 열교환기에 사용되는 흰은 평활 흰(plain fin), 다공 흰(perforated

fin), 그리고 오프셋 스트립 흰(offset strip fin) 등 여러 종류가 있다. 판과 판 사이에 설치된 오프셋 스트립 흰은 열 경계층을 주기적으로 파괴하여 열저항을 감소시키나 마찰과 항력의 증가로 압력손실은 크게 증가시킨다.

흰이 있는 유로에서 단상 특히 기상유동 및 열전달의 해석은 수많은 연구자에 의해 수행되었으며 그 마찰계수와 열전달계수의 상관식이 Manglik and Bergles⁽¹⁾에 의해 집대성되었다.

판-흰 유로의 비등열전달에 대한 연구는 소수의 연구자에 의해 수행되었다. Robertson and Lovegrove⁽²⁾는 R11을 작동유체로 사용하여 판-흰 열교환기의 비등열전달 특성을 실험적으로 연구하였다. Mandrusiak and Carey^(3,4)는 실제의 오프셋 스트립 흰을 모사하여 가열면상에 흰을 확대 가공한 판-흰 모델을 이용하여 비등열전달에 대한 실험적 연구를 수행하고 2상유동 마찰배수와 비등열전달계수에 대한 상관식을 제시하였다. 그러나 이는 실제 흰보다 5배 이상 크게 가공된 흰에 대한 결과로 그 적용성에 한계가 있다. Thonon et al.⁽⁵⁾과 Feldman et al.⁽⁶⁾은 다공 흰과 오프셋 스트립 흰이 설치된 판-흰 열교환기에서의 비등열전달 실험을 수행하고 열전달계수의 예측을 위한 상관식을 제시하였으나 실험결과와의 오차가 커서 그 정확도가 의문시된다.

본 연구에서는 판-흰 열교환기의 유로인 오프셋 스트립 흰이 장착된 협소 사각유로에서의 비등열전달 실험을 수행하여 2상유동 마찰배수와 비등열전달계수를 해석하고 비등열전달계수의 예측을 위한 상관식을 제안하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

흰이 있는 협소 사각유로에서 R113의 유동비등열전달 및 압력손실 특성을 해석하기 위한 실험장치의 개략도가 Fig. 1에 도시되어 있다. 실험장치는 크게 시험부, 응축기, 냉매탱크, 냉매공급부와 자료획득장치로 구성된다. R113은 냉매탱크로부터 필터, 기어펌프, 질량유량계(Oval, 0~0.9 kg/min), 예열기를 지나 시험부인 협소 사각유로에 공급된다. 시험부에 공급되는 냉매의 온도는 냉매탱크와 예열기에서의 열공급량에 의해 조절된다. 냉매탱크에는 2 kW 용량의 히터가 설치되어 있다. 예열기로 실리콘 히터(300 W)가 부착된 길

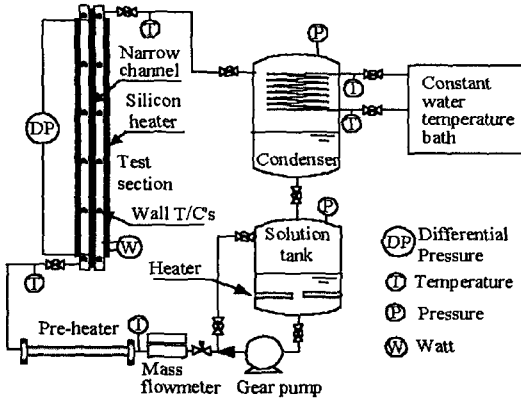


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

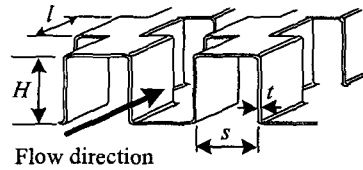
이 1 m, 외경 12.5 cm의 STS304관이 사용되었다. 시험부를 구성하는 판의 재질은 황동이며 비등과정중 액상과 기상의 2상 혼합물이 유동하는 사각유로의 폭, 길이, 그리고 간극은 각각 120 mm, 760 mm, 그리고 3 mm이다. 유로에 설치한 오프셋 스트립 환의 재질은 STS304로 그 치수와 형상이 Table 1에 주어져 있다. 황동 판의 외면에 실리콘 히터(Watlow, 3kW)를 부착하여 유로에 균일 열유속을 공급할 수 있도록 하였으며 전력계에 의해 공급률을 측정하였다. 유로를 구성하는 전면 판과 후면 판에 T형 열전대를 길이방향으로 등간격으로 설치하여 벽면온도를 측정하였다. 판의 상단부와 하단부의 유로 폭 중앙에 2개의 압력공을 설치하여 유로에서 발생하는 압력강하를 측정하였다. 유로의 차압은 차압변환기(Druck, 차압범위 0~175 mbar)로 측정하였으며 온도와 압력 측정위치는 환에 의해 방해받지 않는 열린 부분으로 선정하였다.

협소 사각유로에서 비등과정으로 생성되는 2상 혼합물은 시험부로부터 응축기로 유입한다. 응축기에는 냉각수 코일이 설치되어 기상냉매의 응축과정을 유도한다. 응축기에 공급되는 냉각수의 온도와 유량을 조절하여 시험부에서 발생한 기상을 응축시켜 시스템의 압력을 일정하게 유지할 수 있다. 응축기와 냉매 저장탱크의 압력은 절대압 변환기(Druck, 압력범위 0~10 bar)로 측정하였다.

R113의 비등열전달 실험은 시스템의 압력을 일정하게 유지한 상태에서 시험부에 공급되는 냉매의 질량유속과 열유속을 변화시키면서 수행하였다. 모든 실험에 대하여 냉매는 저장탱크와 예열기에서 공급하는 열입력을 조절하여 포화액상으

Table 1 Test range and dimensions of offset strip fins

Variables	Range
System pressure, p (kPa)	102.4
Mass flux, G ($\text{kg/m}^2\text{s}$)	17~43
Heat flux, q'' (W/m^2)	500~3,000
Quality, x	0~0.6



Fin height, H (mm)	2.8
Fin length, l (mm)	1.5
Lateral fin spacing, s (mm)	3.5
Fin thickness, t (mm)	0.2
Hydraulic diameter, D_h (mm)	2.84

로 설정하여 시험부에 공급하였다. 시스템이 정상상태에 도달하였을 때 냉매의 유량, 주요 지점에서 냉매의 온도, 가열면의 온도, 유로의 압력손실 등의 자료를 자료획득기(HP3852A)를 통하여 측정하고 컴퓨터에 저장하였다.

실험자료의 불확실성 해석을 Kline⁽⁷⁾이 제안한 방법에 따라 수행하였다. 비등열전달계수의 경우 불확실성은 $\pm 8.7\%$ 이며, 2상유동 마찰배수의 경우는 $\pm 12.5\%$ 이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 단상유동 열전달

실험장치의 신뢰도를 확인하기 위하여 비등열전달 실험에 앞서 물과 R113을 작동유체로 하여 단상유동 실험을 수행하였다. 단상유동에 대한 실험 결과로부터 유도된 마찰계수와 Colburn 계수를 레이놀즈수의 함수로 Fig. 2에 도시하였다. Manglik and Bergles⁽¹⁾는 마찰계수 f 와 Colburn 계수 j 에 대하여 다음의 상관식을 제안하였다.

$$f = 9.6243 \text{Re}_{D_h}^{-0.742} \alpha^{-0.186} \delta^{0.305} \gamma^{-0.266} \times [1 + 7.669 \times 10^{-8} \text{Re}_{D_h}^{4.429} \alpha^{0.92} \delta^{3.767} \gamma^{-0.236}]^{0.1} \quad (1)$$

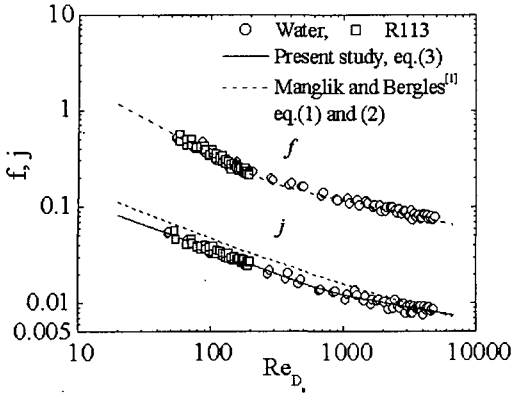


Fig. 2 Single phase friction factor and Colburn factor.

$$j = 0.6522 \text{Re}_{D_h}^{-0.540} \alpha^{-0.154} \delta^{0.149} \gamma^{-0.068} \times [1 + 5.269 \times 10^{-5} \text{Re}_{D_h}^{1.34} \alpha^{0.504} \delta^{0.456} \gamma^{-1.055}]^{0.1} \quad (2)$$

여기서 α, δ, γ 는 환의 형상계수로써 각각 $s/H, t/l, t/s$ 이다. 마찰계수의 경우 본 실험의 결과는 Manglik와 Bergles가 제안한 상관식(1)과 $\pm 15\%$ 의 오차범위에서 잘 일치하였다. 그러나 Colburn 계수의 경우 Manglik와 Bergles의 예측치는 실험 결과보다 크게 나타났으며 이는 Manglik와 Bergles의 상관식이 주로 프란틀수가 작은 기체의 경우를 대상으로 유도되어 프란틀수의 영향을 과소평가하였기 때문으로 풀이된다.⁽⁸⁾ 따라서 본 연구에서 채택한 오프셋 스트립 환에 대한 Colburn 계수를 정확히 예측하는 상관식으로 식(3)을 유도하였으며 실험결과와의 평균 오차(rms error)는 6.3%이다.

$$j = 0.389 \text{Re}_{D_h}^{-0.518} [1 + 1.2 \times 10^{-8} \text{Re}_{D_h}^{2.76}]^{0.1} \quad (3)$$

3.2 비등유동의 압력강하

오프셋 스트립 환이 설치된 협소 사각유로에서 작동유체의 비등과정이 진행되면 유로에서의 압력강하는 단상유동에 비하여 급격히 증가한다. Fig. 3은 시험부 출구에서 냉매의 건도 x 를 변수로 하여 냉매의 질량유속 변화에 따른 2상유동 압력강하를 보여주고 있다. 질량유속이 증가할수록 압

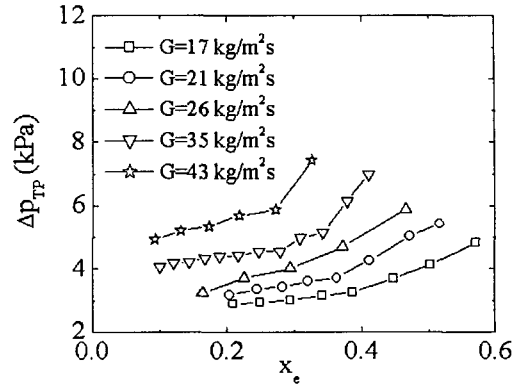


Fig. 3 Two-phase pressure drop in a narrow rectangular channel with offset strip fins.

력강하는 증가하며 시험부에서의 상변화율이 클수록, 즉 시험부 출구의 건도가 증가할수록에 압력강하는 빠르게 증가함을 알 수 있다.

2상유동 압력구배는 기본적으로 마찰, 가속, 그리고 중력 압력구배의 3가지 항으로 구성된다.

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_{TP} = -\left(\frac{dp}{dz}\right)_F - \left(\frac{dp}{dz}\right)_A - \left(\frac{dp}{dz}\right)_G \quad (4)$$

중력에 의한 압력구배는 시험부의 건도로부터 예측되는 기공률로부터 구할 수 있으며 가속에 의한 압력구배는 시험부 입구와 출구에서의 건도와 기공률의 변화로부터 계산할 수 있다. 마찰에 의한 압력구배는 식(5)와 같이 일반적으로 표현되며

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_F = \frac{2f_f G^2 (1-x)^2 v_f}{D} \phi_f^2 \quad (5)$$

여기서 G, v, D , 그리고 ϕ 는 질량유속, 비체적, 직경, 그리고 2상유동 마찰배수이며 하첨자 f 는 액상을 의미한다. 원관의 경우 액상만이 유동할 경우에 대한 2상유동 마찰배수는 Lockhart and Martinelli⁽⁹⁾에 의해 다음과 같이 제안되었다.

$$\phi_f^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (6)$$

X 는 마티넬리 변수로써

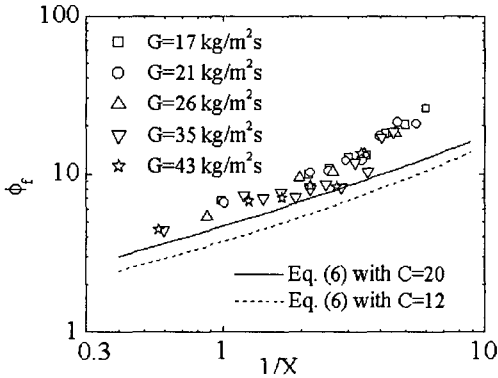


Fig. 4 Two-phase friction multipliers in a narrow rectangular channel with offset strip fins.

$$X^2 = \left. \frac{dp}{dz} \right|_{F,f} / \left. \frac{dp}{dz} \right|_{F,g} \quad (7)$$

로 정의되며 하첨자 g 는 기상을 의미한다. 상수 C 로 액상/기상의 유동이 난류/난류인 경우 20, 그리고 층류/난류인 경우 12를 권장하고 있다.

Fig. 3의 2상유동 압력강하 중 마찰 압력강하에 대하여 식(5)를 적용하여 구한 2상유동 마찰배수가 Fig. 4에 주어지 있다. 원관의 경우에 비하여 흰이 있는 협소 사각유로에서의 2상유동 마찰배수는 30% 이상 크게 나타났으며 이는 흰의 하류에서 발생하는 항력에 의한 효과로 이해할 수 있다.⁽³⁾

3.3 유동비등 열전달

국소 비등열전달계수(local boiling heat transfer coefficient)는 다음의 식으로 정의된다.

$$h(z) = \frac{q''}{T_w(z) - T_{sat}(z)} \quad (8)$$

여기서, q'' 은 유로에 공급되는 열유속이며, 유체의 포화온도 $T_{sat}(z)$ 는 국소 압력에 대한 포화온도로써 유로에서의 2상유동 압력구배를 고려하여 결정할 수 있다. 유로 벽의 내면온도는 실험에서 측정되는 벽온도로부터 벽의 열전도계수와 온도 측정위치에서 벽 내면까지의 거리를 전도법칙에 대입하여 계산할 수 있다.

유로에서 냉매의 국소 건도는 시험부에 포화액

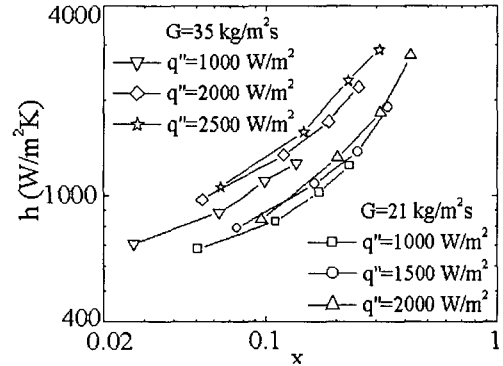


Fig. 5 Boiling heat transfer coefficients.

체가 공급되는 경우 에너지 평형으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$x(z) = \frac{Qz}{WL i_{fg}} \quad (9)$$

Q, W, L, i_{fg} 는 시험부에서의 열공급률, 냉매 질량유량, 시험부의 길이, 냉매의 증발열이다.

Fig. 5는 협소 사각유로에서의 국소 비등열전달계수를 질량유속, 열유속, 그리고 건도의 함수로 보여주고 있다. 일반적인 원관내에서의 비등열전달의 경우와 같이 질량유속이 증가할수록, 비등열전달계수는 증가한다. 유동비등 열전달 영역은 핵비등 영역과 강제 대류비등 영역으로 구분할 수 있다. 건도가 비교적 낮은($x \leq 0.2$) 핵비등 영역에서 비등열전달계수는 건도보다 열유속의 영향을 더 많이 받으며 대류비등 영역에서는 열유속의 영향은 감소하고 건도의 영향이 상대적으로 증가함을 알 수 있다. 특히 낮은 질량유속 조건에서 건도가 증가하면 비등열전달계수는 건도만의 함수로 모이는 경향을 보여주고 있다.

비등과정에서의 열전달계수는 핵비등(nb)의 영향과 대류비등(cb)의 영향을 중첩하여 표현할 수 있다.⁽¹⁰⁾

$$h = h_{nb} + h_{cb} = Fh_f + Sh_{pb} \quad (10)$$

대류비등 열전달계수는 액상만이 유동할 경우의 단상열전달계수 h_f 를 2상유동의 영향을 포함

한 레이놀즈 계수(Reynolds factor) F 로 수정하여 표현하고 핵비등 열전달계수는 푸울비등 열전달계수 h_{pb} 를 유동의 영향의 고려한 핵비등 억제 계수(suppression factor) S 로 수정하여 표현할 수 있다. 대류비등 영역에 대하여 단상열전달계수로 식(3)을 사용하고 마티넬리 변수 X 에 식(1)을 적용하면 레이놀즈 계수를 유도할 수 있다. Chen⁽¹⁰⁾은 원관유동의 경우에 대하여 식(11)을, Mandrusiak and Carey⁽⁴⁾는 확대 원이 설치된 사각유로에 대하여 식(12)를 각각 제안하였다.

$$F = 2.35 \left(0.213 + \frac{1}{X} \right)^{0.736} \quad (11)$$

$$F = \left(1 + \frac{28}{X^2} \right)^{0.372} \quad (12)$$

본 실험의 결과를 적용하여 구한 레이놀즈수와 마티넬리 변수의 상관관계가 Fig. 6에 주어져 있다. Chen⁽¹⁰⁾의 결과는 유로 형상의 차이 때문에 본 실험의 결과와 큰 차이를 보여주고 있으며 Mandrusiak and Carey⁽⁴⁾의 상관식도 원 형상의 차이로 본 실험의 결과를 예측하기에는 부족하다. 본 실험에서 구한 레이놀즈 계수는 다음의 식으로 예측될 수 있으며

$$F = \left(1 + \frac{2.52}{X^{0.5}} + \frac{15.1}{X^2} \right) \quad (13)$$

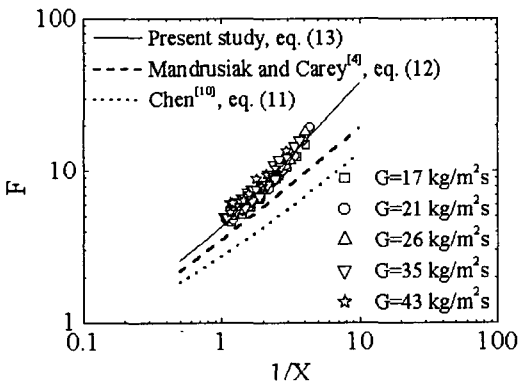


Fig. 6 Reynolds factors in a narrow rectangular channel with offset strip fins.

그 평균 오차는 9.8%이다.

본 연구에서는 푸울비등 열전달계수의 상관식으로 비등열전달계수의 예측능력을 고려하여 Ni-shikawa et al.⁽¹¹⁾이 제안한 상관식을 채택하였다.

$$h_{pb} = 31.4 \left[\frac{p_c^{0.2} F_p}{M^{0.1} T_c} \right]^{0.9} q'^{0.8} \quad (14)$$

$$F_p = \frac{(p/p_c)}{[1.0 - 0.99(p/p_c)]^{0.9}} \quad (15)$$

여기서, M 은 분자량을 의미하며 하첨자 c 는 임계값이다. 핵비등 억제계수 S 는 식(10)에 의하여 실험자료로부터 유도될 수 있으나 자료의 일치성은 일반적으로 매우 열악한 것으로 알려져 있으며,⁽⁴⁾ Bennett et al.⁽¹²⁾은 다음 식을 제안하였다.

$$S = \frac{24.4}{N_B} [1 - \exp(-0.041 N_B)] \quad (16)$$

$$N_B = \frac{h_f}{k_f} \left[\frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)} \right]^{1/2} \quad (17)$$

k, g, σ, ρ 는 열전도계수, 중력가속도, 표면장력, 그리고 밀도이다.

식(10)에 식(3), (13), (14)~(17)를 대입하여 계산된 비등열전달계수의 예측치와 실험결과가 Fig. 7에 비교되어 있다. 본 연구에서 제안한 상관식은 실험결과를 $\pm 25\%$ 의 오차범위 내에서 예측하

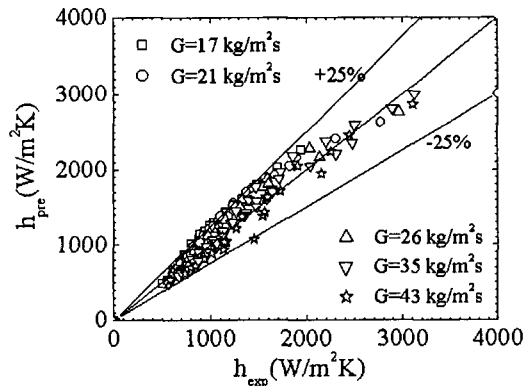


Fig. 7 Comparison of measured boiling heat transfer coefficients with values predicted using equation.⁽¹⁰⁾

고 있으며 평균 오차는 13%이다.

4. 결 론

본 연구에서는 오프셋 스트립 힌이 장착된 협소 사각유로에서의 비등열전달 실험을 수행하여 2상유동 마찰배수와 비등열전달계수를 해석하고 비등열전달계수의 예측을 위한 상관식을 제안하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 힌이 장착된 협소 사각유로에서 2상유동마찰 손실배수는 원관의 경우에 비하여 30% 이상 높은 것으로 확인되었으며 그 차이는 건도가 높을수록 증가하였다.

(2) 협소 사각유로의 비등열전달에 대한 레이놀즈 계수는 원관의 경우보다 약 2배 이상 높으며 대류유동 특성이 증가할수록 그 차이는 증가하였다.

(3) 비등열전달계수를 예측하기 위한 상관식을 제시하였으며, 본 실험의 범위에서 실험결과와 $\pm 25\%$ 의 오차범위 내에서 일치하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특장기초연구(1999-2-304-007-3) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- Manglik, R. M. and Bergles, A. E., 1995, Heat transfer and pressure drop correlations for the rectangular offset strip fin compact heat exchangers, *Exp. Thermal Fluid Sci.*, Vol. 10, pp. 171-180.
- Robertson, J. M. and Lovegrove, P. C., 1983, Boiling heat transfer with freon 11 (R11) in brazed aluminum plate-fin heat exchangers, *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 105, pp. 605-610.
- Mandrusiak, G. D. and Carey, V. P., 1988, Pressure drop characteristics of two-phase flow in a vertical channel with offset strip fins, *Exp. Thermal Fluid Sci.*, Vol. 1, pp. 41-50.
- Mandrusiak, G. D. and Carey, V. P., 1989, Convective boiling in vertical channels with different offset strip fin geometries, *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 156-165.
- Thonon, B., Feldman, A., Margat, L. and Marvillet, C., 1997, Transition from nucleate boiling to convective boiling in compact heat exchangers, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 20, No. 8, pp. 592-597.
- Feldman, A., Marvillet, C. and Lebouche, M., 2000, Nucleate and convective boiling in plate fin heat exchangers, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 3433-3442.
- Kline, S. J., 1985, The Purposes of Uncertainty Analysis, *J. Fluids Eng.*, Vol. 107, pp. 153-160.
- Hu, S. and Herold, K. E., 1995, Prandtl number effect on offset fin heat exchanger performance: predictive model for heat transfer and pressure drop, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, No. 6, pp. 1043-1051.
- Lockhart, R. W. and Martinelli, R. C., 1949, Proposed correlation of data for isothermal two-phase two-component flow in pipes, *Chem. Eng. Prog.*, Vol. 45, pp. 39-48.
- Chen, J. C., 1966, Correlations for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow, *Ind. Chem. Proc. Design and Dev.*, Vol. 5, No. 3, pp. 322-339.
- Nishikawa, K., Fujita, Y., Ohta, Y. and Hidakaka, S., 1982, Effect of the surface roughness on the nucleate boiling heat transfer over the wide range of pressure, *Proc. 7th Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. 4, pp. 61-66.
- Bennett, D. L., Davis, M. W. and Hertzler, B. L., 1980, The suppression of saturated nucleate boiling by forced convective flow, *AIChE Symposium Series*, Vol. 76, pp. 91-103.