

수직 환상유로에서의 포화 비등 2상유동의 국소 열전달계수 상관식의 개선

Improvement of Saturated Local Heat Transfer Correlation for Boiling Two Phase Flow in Vertical Annulus Channel

천세영, 문상기, 정흥준, 양선규, 정문기

한국원자력연구소
305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

관내부에 가열봉을 가진 수직 환상유로에서 압력범위 0.57~15.01 MPa에 대한 비등 2상유동 국소 열전달계수를 측정하는 실험을 수행하여, 기존의 Chen 및 Kandlikar 열전달 상관식에서의 예측치와 실험치를 비교하였다. 본 실험조건에서는 Chen 상관식 및 Kandlikar 상관식은 고압영역에서는 예측능이 떨어지는 경향을 보였다. 이들 상관식에 수력학적 등가직경을 적용하면 상관식의 예측능이 향상하였다. 기포류에서 환상분무류까지의 다양한 유동양식 및 고압조건까지 적용할 수 있도록 Chen 상관식을 개선하였고 실험자료로부터 구한 압력 및 건도를 고려한 계수 f_c 로 Chen 상관식을 보정함으로써 저압에서 고압까지 압력 의존성 없이 평균 오차 0.7 %, RMS 오차 21.4 % 이내로 실험치를 예측하였다.

Abstract

The heat transfer experiments in an annular flow channel with inner heater rod have been performed in ranges of pressure from 0.57 to 15.01 MPa. The Chen and Kandlikar correlation for the saturated boiling two phase flow heat transfer were compared with the experimental data. In the present conditions, the prediction performance of these correlations lowered in high pressure region. When the hydraulic equivalent diameter was applied to the correlations, the prediction performance of the correlations were improved. The Chen correlation was improved by using the factor f_c taking account of the effects of the pressure and quality on the heat transfer coefficient. The present correlation with the factor f_c predicted the experimental data within mean and RMS errors of 0.7% and 21.4%, respectively.

1. 서론

비등 2상유동은 단상 유동에 비해 월등히 높은 열전달율을 얻을 수 있기 때문에 원자로 냉각계통, 증기발생기 및 보일러등 열부하가 큰 장치에서 이용되고 있다. 이러한 열전달 장치의 계획, 설계에 있어서 열전달계수의 정확한 예측은 아주 중요한 사항이다. 비등열전달은 기포의 성장, 이탈, 2상 유동양식, 국부적인 비열평형 효과, 열전달 표면의 특성 및 유체의 성질등과 밀접한 관계가 있으나 이들 관련 인자를 모두 고려한 열전달 모델은 아직 개발되지 못하고 있다.

지금까지 포화상태의 2상 강제대류 열전달계수를 구하는 많은 상관식이 개발되었다. 그 중에서 널리 알려져 있는 상관식들을 살펴보기로 한다. Chen⁽¹⁾은 핵비등 열전달과 대류 비등의 열전달을 각각 계산하여 더하는 간단한 형태로 구성된 상관식을 개발하였다. Shah⁽²⁾는 800여개의 실험자료를 사용하여, 비등수(Boiling number) Bo 와 대류수(Convection number) Co 를 이용한 그래픽 형태의 상관식을 제시하였다. 최근 Kandlikar⁽³⁾는 여러 종류의 유체에 대하여 5000여개의 실험자료로부터 폭넓은 조건을 수용하는 상관식을 개발하였다. 상기 상관식들은 열전달계수를 비등 2상 유동의 복잡성으로 인해 핵비등 열전달과 대류 열전달의 2가지 항으로 단순화하고 있는 것이 특징이다. 현재 이들 상관식 중에서 Chen 상관식이 가장 신뢰성이 있는 것으로 인식되고 있으며, 원자력 분야에서도 원자로 노심 설계나 열수력 안전성 해석 계산코드에 널리 사용되고 있다. 그러나 Chen 상관식은 3.5 MPa 이하의 낮은 압력조건에서의 실험자료로부터 개발된 것이며, Kandlikar 상관식 역시 6.4 MPa 이하의 압력범위를 가지고 있다. 비등 2상유동 열전달에 관한 실험적 연구는 고온, 고압 실험의 기술적 어려움 때문에 대부분 낮은 압력에서 수행되고 있으며 고압조건에서 수행된 실험적 연구는 거의 없다. 천세영 등⁽⁴⁾은 관내부에 가열봉을 가진 수직 환상유로에서 압력 범위 0.57~15.01 MPa에 대한 비등 2상유동 열전달계수를 측정하는 실험을 수행하고 상기 상관식들의 예측성능은 2상유동의 유동양식과 압력에 따라 크게 영향을 받는다고 보고하였다.

본 연구는 한국원자력연구소의 고온, 고압 열수력 실험장치인 RCS Loop 장치에서 생산된 열전달계수 실험지를 사용하여, Chen 상관식을 기포류에서 환상분무류까지의 다양한 유동양식 및 고압조건까지 적용할 수 있도록 개선하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

RCS 열수력 Loop장치는 천세영 등의 보고서⁽⁵⁾에 자세히 기술되어 있다. Test section 구조 및 열전대의 위치는 그림 1 에 나타나 있다. Test Section은 내경 19.3 mm의 수직관 내부에 외경 9.54 mm의 가열봉이 설치된 환상유로 형태로 되어있다. 가열봉 표면의 온도를 측정하기 위하여 외경 0.5 mm의 K-type 비접지형 열전대 5개가 부착되어 있다.

본 실험의 주요 측정변수는 Test section 입구 및 출구의 순환용수 온도와 압력, Test section 유량 및 차압, 가열봉 표면온도 및 가열봉에 투입되는 전력 등이며, 측정된 신호는 모두 워크스테이션의 자료 획득 및 처리장치에서 자동적으로 수집, 처리 및 저장된다. 이들 압력, 유량, 온도 및 전력의 불확실도(Uncertainty)는 압력, 유량 및 온도에 대하여 각각 $\pm 0.3\%$, $\pm 1.5\%$ 및 0.6% 이하였다. 가열봉의 전력 측정에 대한 불확실도는 $\pm 1.0\%$ 이하였다.

실험절차는 다음과 같다. Test section 입구의 유량, 온도 및 압력을 설정된 조건에 맞춘 다음 Test section 가열봉에 전력을 공급하고 서서히 가열전력을 설정된 전력까지 증가시킨다. 모든 실험변수가 설정된 조건을 만족하면 5개의 가열봉 표면온도를 포함한 실험변수들을 자료 획득 및 처리장치에서 동시에 측정, 수집한다.

본 실험에서는 다음과 같은 범위에서 814개의 실험자료를 얻었다.

- 계통압력 : 0.57~15.01 MPa
- 질량유속 : 200~650 kg/m²s
- 입구과냉도 : 85~353 kJ/kg

- 가열봉 표면온도 측정위치에서의 건도 : 0~0.536
- 열유속 : 520~1765 kW/m²

계통압력은 Test section 입구 압력을 사용하였다. 입구과냉도는 압력 조건에 따른 증발잠열과 입구 엔탈피의 차이이며 건도는 질량유속, 입구과냉도 및 가열봉 투입전력에서 열역학적 평형을 가정하여 구한 값이다.

3. 실험결과

비등 열전달은 2상유동 양식과 밀접한 관계가 있으며 본 연구는 포화상태의 비등 2상유동 열전달을 대상으로 하고 있다. 따라서 먼저 실험자료가 2상유동의 어느 양식에 해당하는 지를 살펴보기로 한다. Mishima 및 Ishii⁽⁶⁾는 고압의 수증기-물에 적용할 수 있는 2상유동양식의 천이조건 관계식을 개발하였다. 그림 2 및 3은 Mishima 및 Ishii의 천이조건 관계식을 본 실험자료에 적용하여, 가열구간에 따라 천이가 일어나는 위치를 구한 것이다. 그림은 가열부 출구부분에서는 실험자료가 환상분무류 영역에 속해 있는 것을 보여주고 있다. 그러나 가열구간 중간부분(그림 1에서 가열구간 입구에서 932 mm의 위치에 있는 열전대 T/S 5부분)에서는 질량유량, 입구과냉도 및 압력이 큰 조건에서 일부 실험자료가 미포화 단상류영역에 있는 것을 나타내었다. 본 연구에서는 포화 2상유동영역의 814개 실험자료만을 사용하였으며, 유동양식은 가열구간 출구부분(T/C 1 및 2의 위치)에서 환상분무류 그리고 가열구간 중간부분(T/C 5의 위치)에서는 슬러그, 처연류가 지배적이었다.

실험자료로부터 열전달계수 $h_{TP,exp}$ 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$h_{TP,exp} = \frac{q''}{(T_w - T_f)} \quad (1)$$

여기서 q'' 는 가열봉 표면 열유속, T_w 및 T_f 는 각각 가열봉 표면온도 및 T_w 의 측정위치에 대응하는 유체온도이다(본 실험의 경우 포화온도). 실험에서 유체온도는 직접 측정할 수 없었기 때문에 Test section에 따라 국부 압력이 선형으로 변한다고 가정하여 Test section의 입구 압력과 출구 압력의 차로부터 해당하는 국부 압력을 구하고 포화온도를 결정하였다. 그림 4에 가열구간 출구부(T/C 1 및 2의 위치)에서의 열전달계수와 가열구간 중간부(T/C 5의 위치)의 열전달계수를 압력의 함수로 나타낸다. 이 그림에서 실선은 압력에 따른 열전달계수의 경향을 나타내고 있다. 가열구간 출구에서의 열전달계수는 압력의 증가에 따라 커지고 약 10 MPa이상에서 작아지는 경향이 보이고 있다. 한편 가열구간 중간부에서는 8 MPa 이상의 압력에서 열전달계수는 일정한 값을 유지하며, 가열구간 출구의 열전달계수에 비하여, 압력의 전 영역에서 높은 열전달계수를 나타내고 있다. 이는 위에서 지적한 바와 같이 가열구간 출구부와 중간부의 유동양식의 차이에 기인하고 있다.

그림 5는 모든 열전달계수의 실험치를 건도의 함수로 나타낸 것이다. 각 실험치는 압력, 유량, 입구 과냉도 조건이 다르기 때문에 크게 흩어져있으나 건도의 증가에 따라 열전달계수는 작아지는 것을 알 수가 있다.

4. 기존 상관식과 실험자료의 비교

현재 포화 비등 2상유동 열전달에 대하여 가장 널리 사용되고 있는 Chen 상관식⁽⁷⁾과 가장 최근에 개발된 Kandlikar 상관식⁽⁸⁾이 실험자료와 비교된다. Chen 상관식은 다음과 같이 핵비등 열전달계수 h_{NB} 와 대류 열전달계수 h_{FC} 를 더한 형태로 되어 있다.

$$h_{TP,Chen} = h_{NB} + h_{FC} \quad (2)$$

핵비등 열전달계수는 다음과 같이 구해진다.

$$h_{NB} = S h_{FE} \quad (3)$$

$$h_{FE} = \frac{0.00122 A T_{sat}^{0.24} \Delta p_{sat}^{0.75} C_{pl}^{0.45} \rho_l^{0.49} \lambda_l^{0.79}}{\sigma^{0.5} h_{fg}^{0.24} \rho_f^{0.24}} \quad (4)$$

여기서 S는 억제계수로 2상유동의 레이놀드수 Re_{jTP}^* 의 함수로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S &= [1 + 0.12(Re_{jTP}^*)^{1.14}]^{-1} && \text{for } Re_{jTP}^* < 32.5 \\ S &= [1 + 0.42(Re_{jTP}^*)^{0.78}]^{-1} && \text{for } 32.5 < Re_{jTP}^* < 70 \\ S &= 0.0797 && \text{for } Re_{jTP}^* > 70 \end{aligned} \quad (5)$$

2상 레이놀드수 Re_{jTP}^* 는 액상의 레이놀드수 Re_j^* 와 인수 F 의 함수이며 다음과 같이 표시된다.

$$Re_{jTP}^* = Re_j^* F^{1.25} 10^{-4} \quad (6)$$

여기서 F 는 Martinelli 변수 X_{tt} 의 함수이다.

$$F = 2.35 (1/X_{tt} + 0.213)^{0.736} \quad (7)$$

대류 열전달계수는 Dittus-Boelter의 상관식에서 Re_j^* 를 사용하여 구한 단상류에 대한 열전달계수 h_i 와 F 로부터 다음과 같이 구한다.

$$h_{FC} = h_i F \quad (8)$$

Kandlikar 상관식은 비등수 B_o 와 대류수 C_o 를 사용하여 다음과 같은 형태로 표시된다.

$$\frac{h_{TP,Kand}}{h_i} = C_1 C_o^{C_2} (25Fr)^{C_3} C_o + C_3 B_o^{C_4} F_{\beta} \quad (9)$$

여기서 h_i 는 Dittus-Boelter 상관식을 사용하여, 각각의 계수는 다음과 같다.

Constant	Convective region	Nucleate boiling region
C_1	1.1360	0.6683
C_2	-0.9	-0.2
C_3	667.2	1058.0
C_4	0.7	0.7
C_5	0.3	0.3

C_5 는 수직관에 대해서, 그리고 $Fr > 0.04$ 인 경우 0이며, 작동유체가 물인 경우 $F_{\beta} = 1$ 이다. 또한 각 계수의 값이 핵비등 영역과 대류비등 영역으로 나누어지는 데 그 기준은 다음과 같다.

$C_o < 0.65$ 일 때 - 대류비등 영역

$C_o > 0.65$ 일 때 - 핵비등 영역

주어진 조건에서 열전달계수는 위의 두 가지 경우에 대하여 모두 계산한 후 둘 중에 큰 값을 열전달계수의 예측 값으로 사용한다.

Chen 상관식은 및 Kandlikar 상관식은 원형관에서 얻어진 실험자료로부터 개발되었다. (Chen 상관식은 극히 일부 환상유로에서의 실험자료를 포함하고 있다.) Gungor 등⁽⁷⁾은 환상유로에서의 실험자료를 여러 상관식과 비교한 결과, 환상관의 유로 간격(Gap)이 4 mm 이상일 때는 수력학 등가직경 D_{he} 을, 간격이 4 mm 이하의 경우는 가열 등가직경 D_{hs} 을 사용하면 상관식들의 예측

성능이 향상하는 것을 보여주었다. 그림 6 및 7은 각각 Chen 상관식 및 Kandlikar 상관식에 수력학 등가직경과 가열 등가직경을 사용하여 구한 열전달계수의 예측치와 실험에서 구한 열전달계수를 비교한 것이다. 그리고 표 1에는 각 상관식의 오차를 보여준다. 여기서 사용한 예측오차, 평균 오차 및 RMS오차의 정의는 다음과 같다.

$$\text{Prediction error} = \frac{h_{TP,pred} - h_{TP,exp}}{h_{TP,exp}}$$

$$\text{Mean error} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{h_{TP,pred} - h_{TP,exp}}{h_{TP,exp}} \right)$$

$$\text{RMS error} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{h_{TP,pred} - h_{TP,exp}}{h_{TP,exp}} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Chen 상관식의 예측성능(그림 6)을 보며 가열 등가직경을 사용한 경우 압력에 대한 의존성은 작게 나타나나 실험치를 아주 낮게 예측하고 있으며, 수력학적 등가직경을 사용한 경우는 10 MPa 이상의 압력에서 실험치를 크게 예측하고 있는 것을 알 수 있다. 그림 7에서 Kandlikar 상관식은 Chen 상관식 보다 양호한 예측성능을 보여주고 있으나 Chen 상관식과 같이 가열 등가직경을 사용하면 실험치를 낮게 예측하는 경향을 나타내었다. 그림 6 및 7 그리고 표 1에서 Gungor등⁶⁾이 보여준 바와 같이 본 실험조건에서는 상관식에 수력학적 등가직경(본 Test Section의 유로 간격은 4.93 mm)을 적용하면 상관식의 예측성능이 향상하는 것을 알 수 있다.

5. Chen 상관식 개선

Chen 상관식과 Kandlikar 상관식의 형태를 비교하면 Kandlikar 상관식이 이론적 접근 보다 많은 실험자료에서 얻어진 계수들을 사용하고 있다. 이는 개발에 사용된 실험자료의 범위를 벗어나면 예측성능의 저하를 가져올 가능성이 있다. 따라서 현재 가장 널리 사용되고 있는 Chen 상관식의 개선을 시도하였다.

Chen 상관식은 위에서 기술한 바와 같이 압력 및 2상유동 양식의 영향을 적절하게 반영하지 못하고 있다. 2상유동 양식에 가장 영향을 미치는 인자의 하나로 건도 x 가 생각된다. 건도와 열전달계수의 관계는 아직 명확하게 파악된 바가 없으나⁸⁾ 그림 5에서 보는 바와 같이 건도와 열전달계수에는 분명한 관계가 있으므로 다음과 같은 보상계수를 생각한다.

$$f_C = \frac{h_{TP,exp}}{h_{TP,Chen}} \quad (10)$$

여기서 $h_{TP,Chen}$ 에는 수력학적 등가직경을 적용한다. f_C 는 건도와 압력의 함수로 가정한다.

$$f_C = \{ f_1(P) \} x + f_2(P) \quad (11)$$

f_1 및 f_2 는 압력 P 의 함수이다.

압력을 고정하여 각 압력에서 x 의 함수로써 f_C 를 나타내면 그림 8 및 9에서 다음과 같이 f_1 와 f_2 의 함수형을 결정할 수 있다.

$$f_1 = \ln \left(\frac{P}{P_{atm}} \right) - 5.57 \quad (12)$$

$$f_2 = 2.14 - \left(\frac{P}{P_{atm}} \right) \times 10^{-2} \quad (13)$$

여기서 P_{atm} 는 표준 대기압이다. 개선된 Chen 상관식은 다음과 같다.

$$h_{TP,pred} = (h_{NB} + h_{FC}) f_C \quad (14)$$

그림 10에 식(14)에서 구한 예측치와 실험치를 비교하였다. 그림은 Chen 상관식을 압력 및 건도를 고려한 계수 f_C 로 보상함으로써 저압에서 고압까지 압력 의존성 없는 양호한 예측성을 보여 주고 있다. 표 1 은 식(14)가 평균오차 0.7% 및 RMS 오차 21.4 % 이내로 실험치를 예측하고 가장 우수한 성능임을 보여주고 있다.

6. 결론

관내부에 가열봉을 가진 수직 환상유로에서 압력범위 0.57~15.01 MPa에 대한 비등 2상유동 국소 열전달계수를 측정하는 실험을 수행하여, 기존의 Chen 및 Kandlikar 열전달 상관식에서의 예측치와 실험치를 비교하고 기포류에서 환상분무류까지의 다양한 유동양식 및 고압조건까지 적용할 수 있도록 Chen 상관식의 개선을 시도함으로써 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 환상분무류영역인 가열구간 출구에서의 열전달계수는 압력의 증가에 따라 커지고 약 10 MPa 이상에서 작아지는 경향이 보였다. 한편 슬러그 및 천류가 지배적인 가열구간 중간부에서는 8 MPa 이상의 압력에서 열전달계수는 일정한 값을 유지하며, 가열구간 출구의 열전달계수에 비하여, 압력의 전 영역에서 높은 열전달계수를 나타내었다.
- (2) 본 실험조건에서는 Chen 상관식 및 Kandlikar 상관식에 수력학적 등가직경을 적용하면 상관식의 예측성능이 향상하였다.
- (3) 실험자료로부터 구한 압력 및 건도를 고려한 계수 f_C 로 Chen 상관식을 보상함으로써 저압에서 고압까지 압력 의존성 없이 평균 오차 0.7 %, RMS 오차 21.4 % 이내로 실험치를 예측하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 이루어졌으며 이에 대하여 관계자 여러분께 감사드립니다.

기호설명

B_o : 비등수, $q'' / (G h_{fg})$	C_o : 대류수, $[(1-x)/x]^{0.8} (\rho_g / \rho_l)^{0.5}$
C_{fl} : 액체의 비열, kJ/kgK	$C_{1\sim 5}$: Kandlikar 상관식의 계수들
D : 유로 직경, m	D_{hw} : 수력학적 등가직경, m
D_{he} : 가열 등가직경, m	F : Enhancement factor, 식(7)
F_r : 프루드(Froude)수, $G^2 / (\rho^2 g D)$	f_c : Chen 상관식의 보상계수, 식(11)
f_1 : 식(12)	f_2 : 식(13)
G : 질량유속, kg/m ² s	h : 열전달계수, kW/m ² K
h_{fg} : 증발잠열, kJ/kg	L_h : 가열구간 입구에서의 거리, m
P : 압력, MPa	P_{atm} : 표준 대기압, MPa
P_r : 프란틀(Prandtl)수, $C_p \mu / \lambda$	q'' : 열유속, kW/m ²
Re_f^* : 액상의 레이놀드수, $G(1-x) D / \mu_l$	S : Suppression factor, 식(5)
T : 온도, K	ΔT_{sat} : 과열도, K, $T_w - T_{sat}$

x : 건도 η : 점성계수, Ns/m^2
 λ : 열전도계수, kW/mK ρ : 밀도, kg/m^3
 σ : 표면장력, N/m
 ΔP_{tot} : 가열면 표면온도 T_w 에 대응하는 포화압력 P_w 과 계통압력의 차이, Pa
 X_{tt} : Martinelli 변수, $[(1-x)/x]^{0.9}(\rho_g/\rho_l)^{0.5}(\mu_l/\mu_g)^{0.1}$

하첨자

<i>Chen</i> : Chen 상관식	<i>exp</i> : 실험치
<i>f</i> : 유체	<i>FC</i> : 강제대류
<i>fl</i> : 유체종류	<i>g</i> : 기체
<i>Kand</i> : Kandlikar 상관식	<i>l</i> : 액체
<i>NB</i> : 핵비등	<i>pred</i> : 예측치
<i>sat</i> : 포화상태	<i>TP</i> : 2상유동
<i>w</i> : 가열표면	

참고문헌

- (1) Chen, J. C., 1966, "A Correlation for Boiling Heat Transfer to Saturated Fluids in Convective Flow," *Industrial and Engineering Chemistry, Process Design and Development*, Vol. 5, No. 3, pp. 322-329.
- (2) Shah, M. M., 1982, "Chart Correlation for Saturated Boiling Heat Transfer: Equations and Further Study," *ASHRAE Transactions*, Vol. 88, Part 1, pp. 185-196.
- (3) Kandlikar, S. G., 1990, "A General Correlation for Saturated Two-Phase Flow Boiling Heat Transfer Inside Horizontal and Vertical Tubes," *Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer*, Vol. 112, pp. 219-228.
- (4) 천세영 등, 1999, "광범위한 압력조건을 갖는 수직 환상관에서의 2상 비등 열전달," 대한기계학회, '99년도 열공학부문 추계학술대회 논문집 pp.577 ~583 ,KSME 99TE098.
- (5) 천세영 등, 1998, "Hot Test Loop 시설운영," 한국원자력연구소, KAERI/MR-307/97, pp. 61-71.
- (6) Mishima, K. and Ishii, M., 1984, "Flow Regime Transition Criteria for Upward Two-Phase Flow in Vertical Tube," *Int J. Heat Mass Transfer*, Vol. 27, pp. 723-737.
- (7) 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.
- (8) Lahey, Jr, R. T., 1992, "Boiling Heat Transfer, Modern Developments and Advances," ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS, pp. 430-432.

표 1 상관식들의 오차

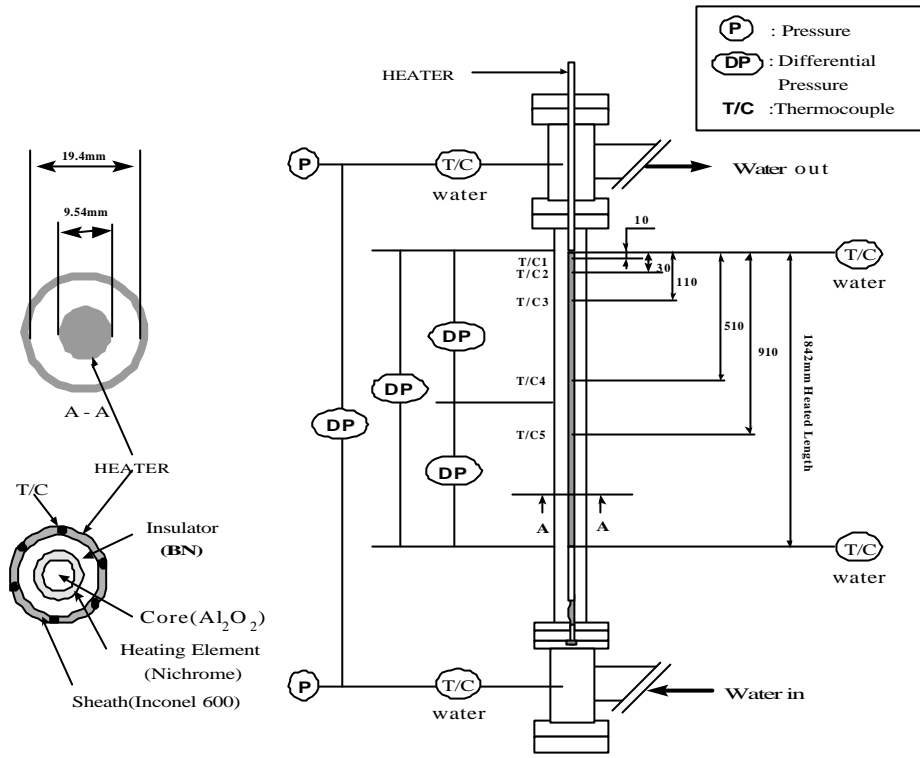


그림 1
Test

Section 구조 및 열전대 위치

상관식	적용 유로직경	평균오차	RMS 오차
Chen	D_{hw}	-0.024	0.47
	D_{he}	-0.485	0.520
Kandlikar	D_{hw}	0.030	0.266
	D_{he}	-0.175	0.274
Present	D_{hw}	0.007	0.214
	D_{he}		

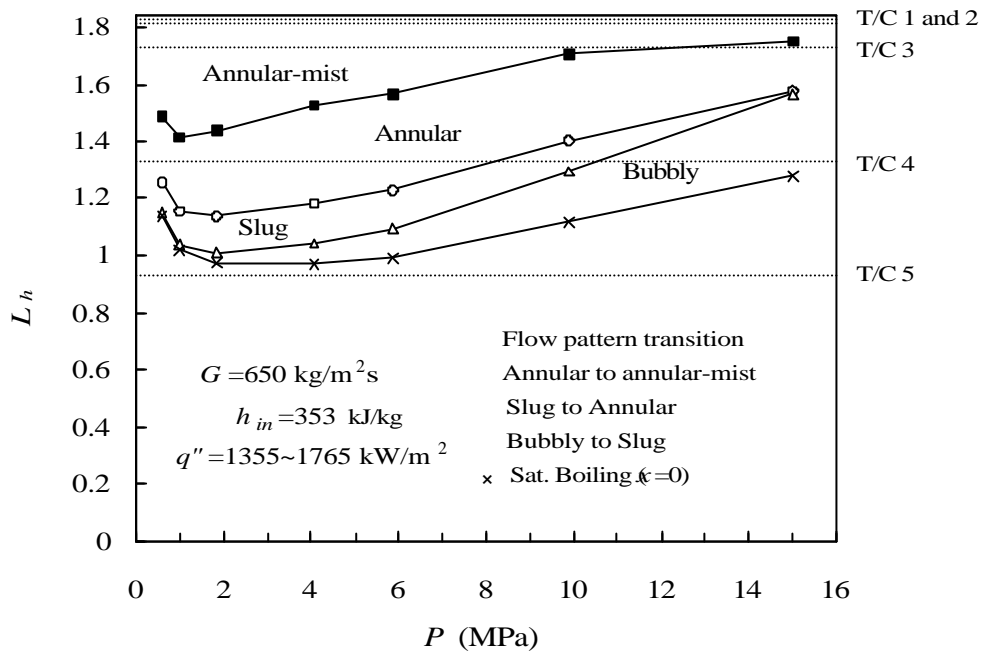


그림 2
 가열구간에
 서의
 2상유동양식
 천이
 위치-유량이
 큰 경우

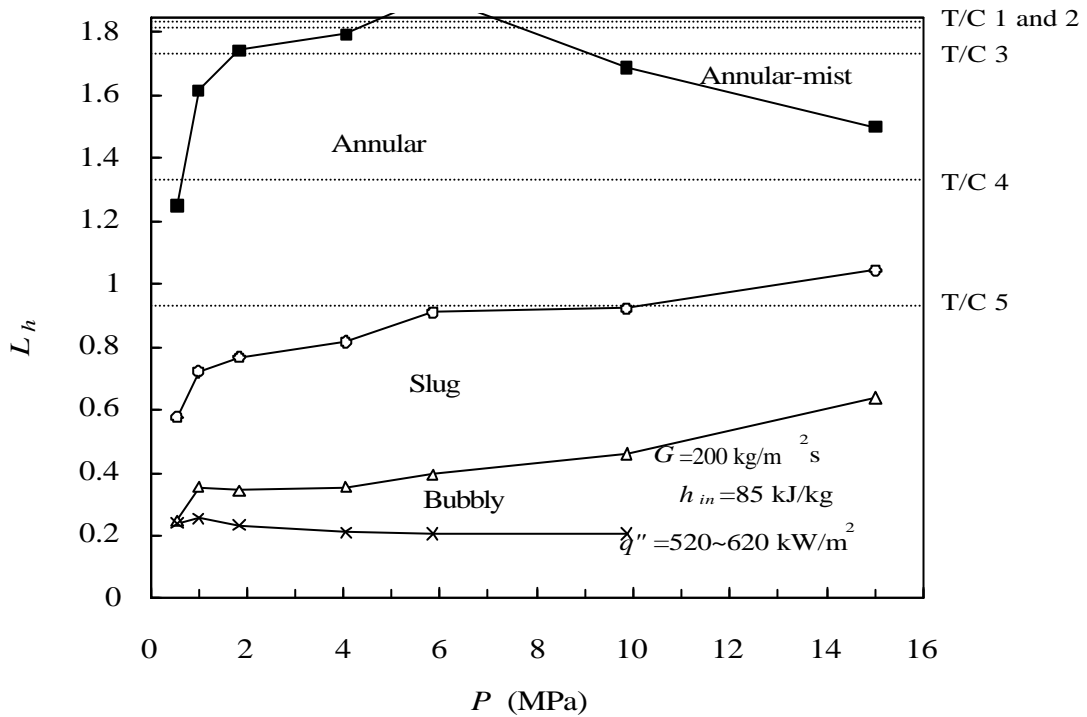


그림 3 가열구간에서의 2상유동양식의 천이 위치-유량이 작은 경우

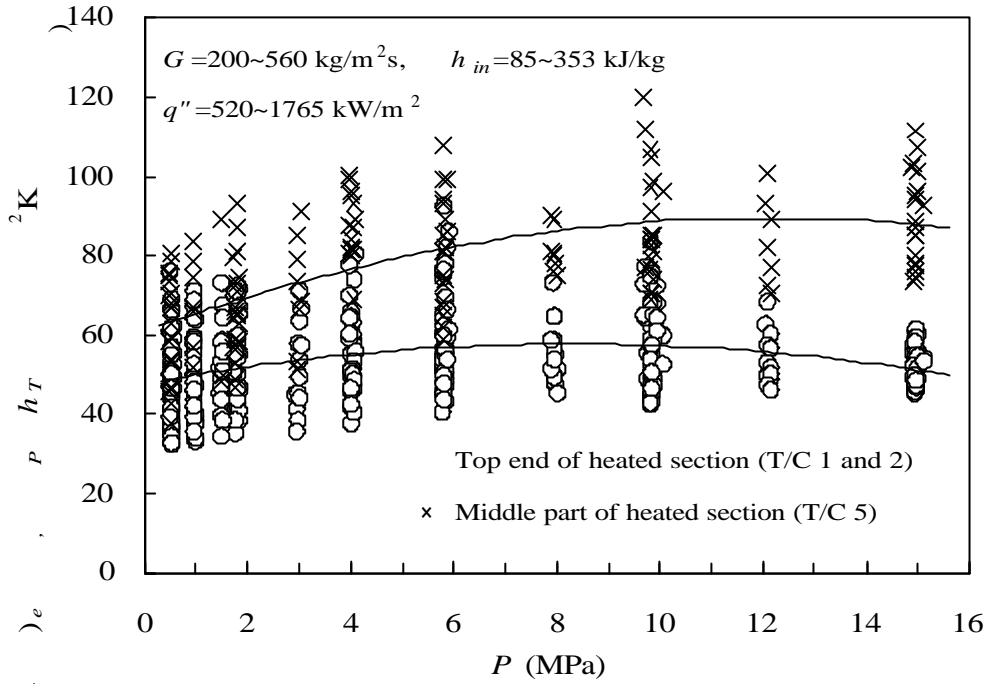


그림 4

열전달계수에 미치는 압력의 영향

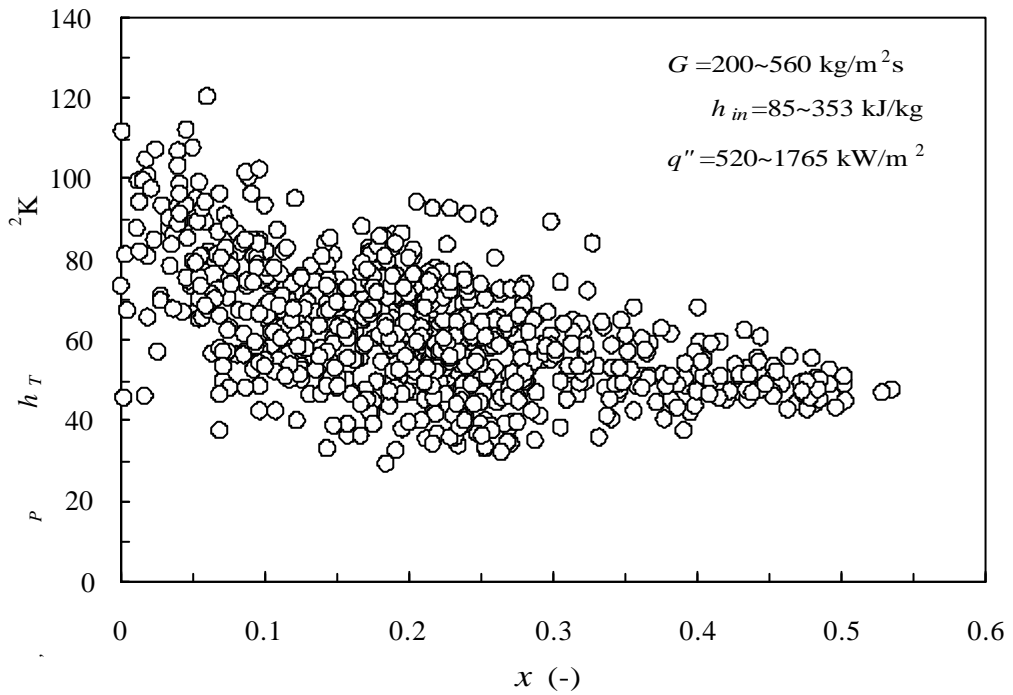


그림 5 열전달계수와 건도의 관계

r d

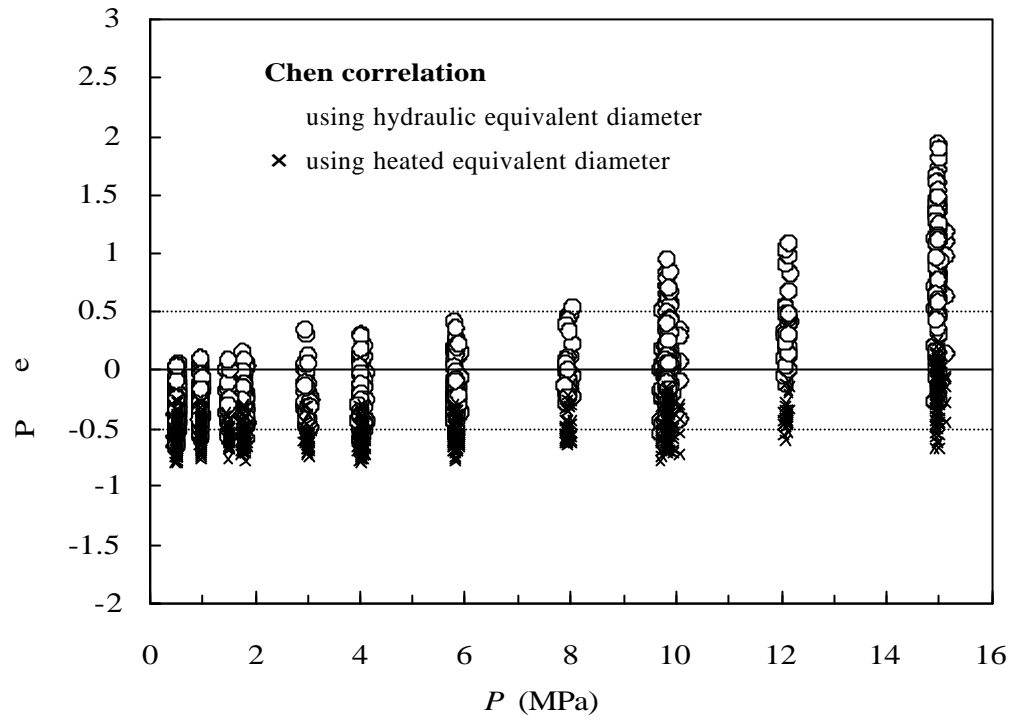


그림 6

Chen 상관식의 예측성능

r

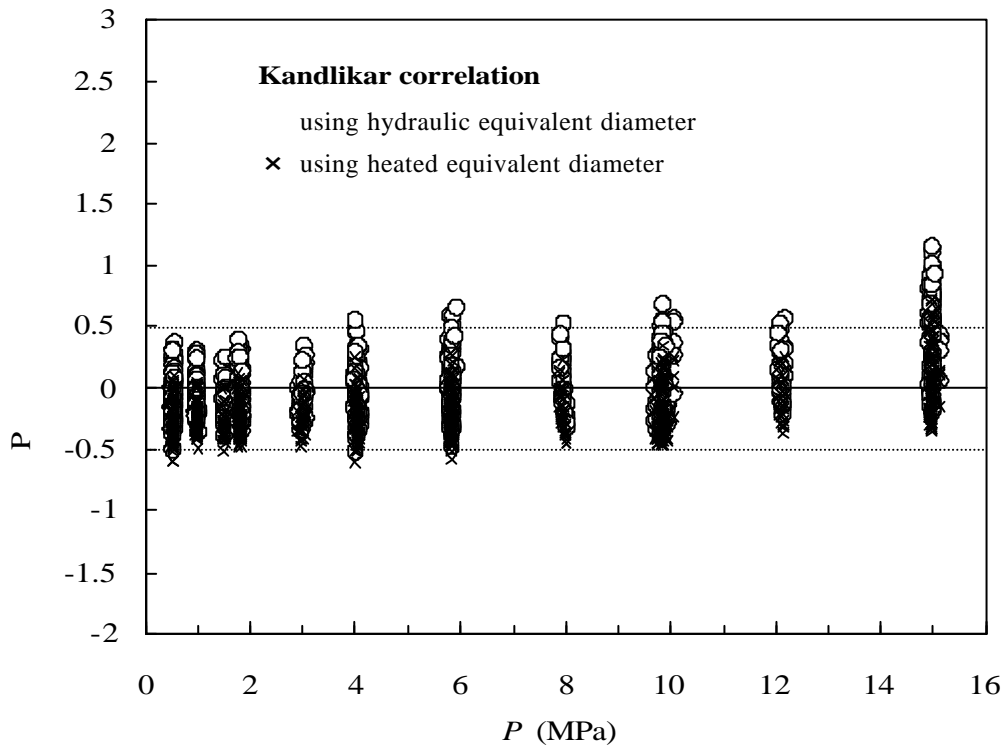


그림 7 Kandlikar 상관식의 예측성능

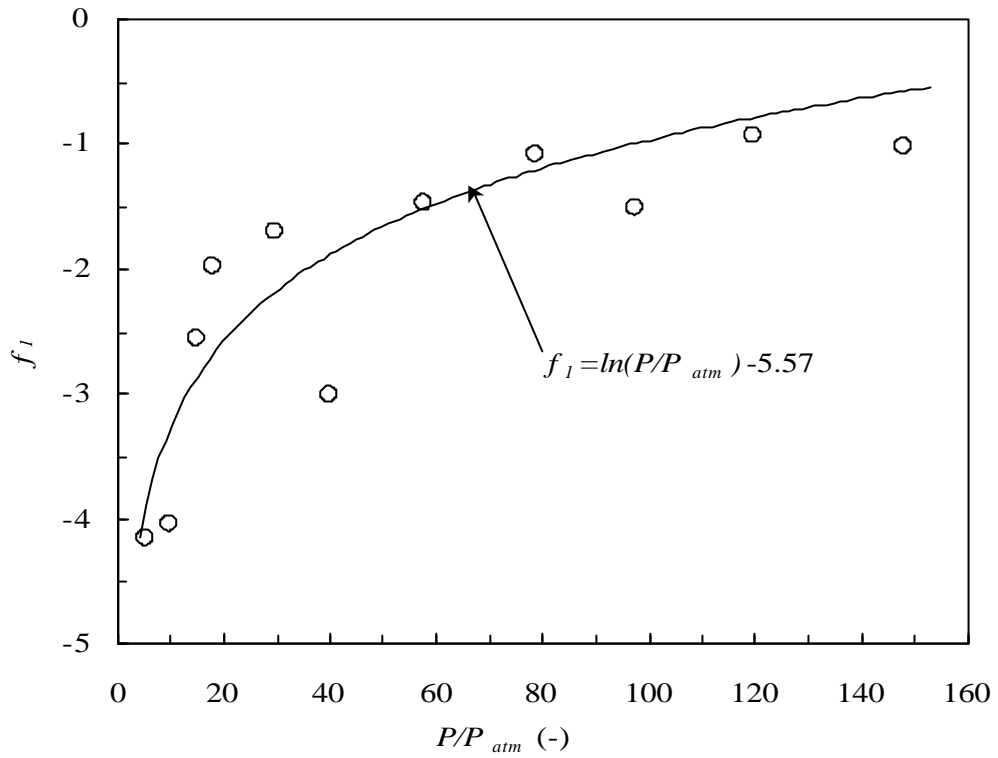


그림 8

f_1 의 함수형

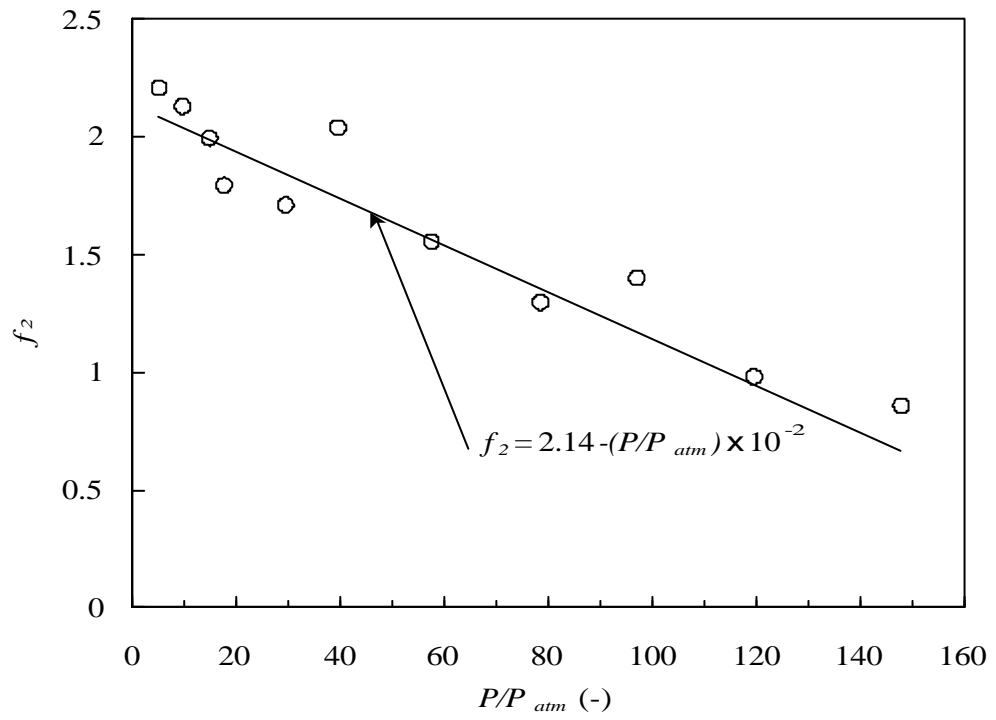


그림 9 f_2 의 함수형

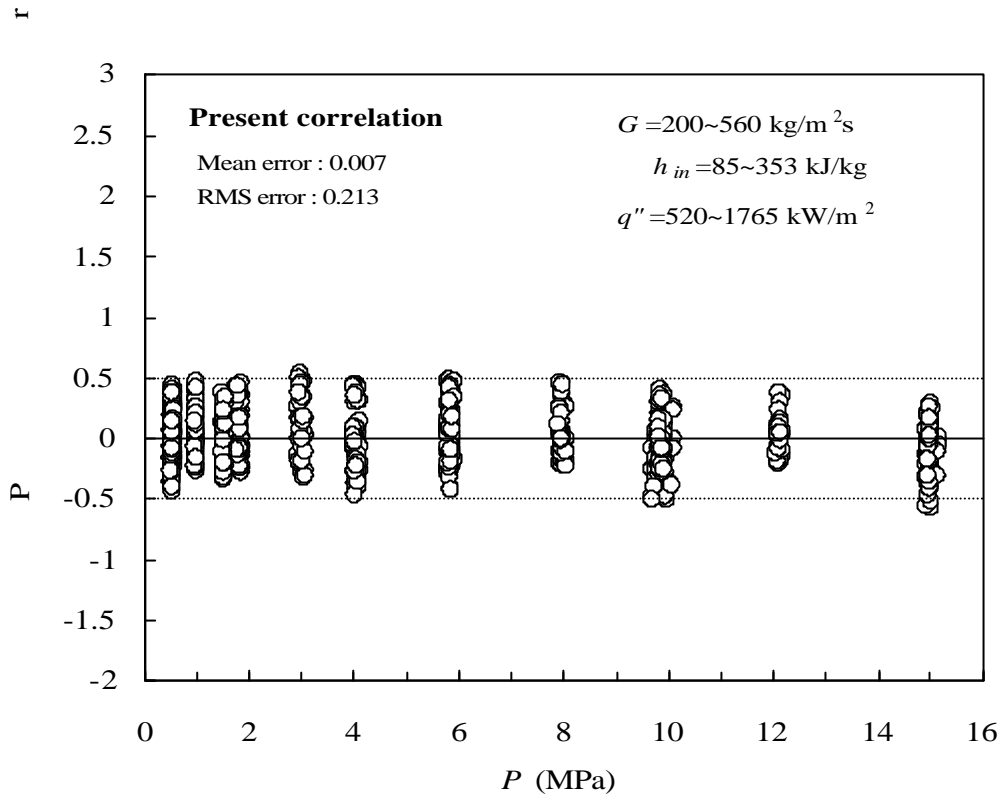


그림 10 개선된 Chen 상관식의 예측성능