'99 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

광범위한 압력 조건을 갖는 수직 환상관에서의 2상 비등 열전달

Two-Phase Boiling Heat Transfer in Vertical Annulus under a Wide Range of Pressure

천세영, 권오철, 김복득, 양선규, 정문기

한국원자력연구소
305-353 대전 광역시 유성구 덕진동 150

요약

한국 원자력 연구소의 RCS 열수력 Loop를 사용하여 광범위한 압력 범위의 환상 유로 실험에서 포화 비등 열전달 계수를 구하였다. 실험은 압력 0.57 ~15.01 MPa, 유량 200~650 kg/m²s, 입구 과냉도 85~353 kJ/kg의 조건에서 수행하였다. 2상 비등 열전달 계수를 예측하기 위해 Chen 및 Kandlikar의 상관식을 사용하였다. 8 MPa 이하의 압력 범위에서는 실험값과 잘 일치되는 값을 보였지만, 10 MPa 이상의 압력에서는 큰 오차가 있었다. 관의 직경은 열수력 등가 직경을 사용하였다.

Abstract

A saturated flow boiling heat transfer coefficients have been calculated in a wide range of pressures for an internally heated vertical annulus in RCS loop facility of Korea Atomic Energy Research Institute. The experimental conditions covered ranges of pressure from 0.57 to 15.01 MPa, mass flux from 200 to 650 kg/m²s, and inlet subcooling form 85 to 353 kJ/kg. The Chen's correlation and the Kandlikar's correlation were used to calculate two phase flow boiling heat transfer coefficients. The correlations gave good agreements with the measured data below pressure of 8 MPa, but showed large errors above 10 MPa pressure range. Hydraulic diameter is used for annulus' diameter.

1. 서론

비등 열전달은 액체에서 증기로의 상변화시 수반되는 열전달 과정으로 정의된다. 비등 유동은 액상과 기상의 혼합물로 구성된 2상 유동 양식을 가지며 매우 높은 열전달률을 갖기 때문에 증발기나, 보일러, 그리고 원전 노심 등 높은 열전달률을 요구하는 냉각장치에 사용되고 있다. 이러한 장치 설계시 정확한 비등 열전달 계수를 정확히 예측하는 것은 매우 중요한 일이다. 열전달 계수의 정확한 예측을 통해 설계 비용을 현저히 줄일 수 있을 뿐 아니라, 잘못된 설계로 인한 사고를 피할 수 있다.

지금까지의 연구를 통해 비등 유동 현상은 매우 복잡한 기구를 가진다는 것이 밝혀졌다.[(1)] 기포의 성장과 2상의 혼합물로 되어있는 영역에서 이탈 현상, 유동 양식 및 유입 현상, 열역학적 평형이 깨어지는 것, 열전달 표면의 특징, 그리고 유체 성질의 효과 등 많은 고려 상황이 있다. 실제적으로 이 모든 것을 고려한 모델은 개발되지 못했다.

지금까지 열전달 계수를 구하기 위하여 30개 이상의 많은 상관식들이 개발되어 있다. 이 상관식들은 크게 모든 영역에 적용할 수 있는 상관식과, 한가지 경우에 대해서만 적용할 수 있는 상관식으로 구분할 수 있다. 모든 범위에 대해서 적용할 수 있는 상관식이 더 많은 운전 상태와 더 많은 데이터 베이스를 이용하기 때문에 더 큰 가치가 있다고 할 수 있다. 가

장 많이 사용되는 상관식은 1966년 Chen[2]이 개발한 상관식으로, 이것은 핵비등 열전달과 대류 비등의 열전달을 각각 따로 계산하여 더하는 간단한 형태로 되어있다. Chen 상관식은 현재 RELAP5나 COBRA-TF와 같은 원전 열수력 안정성 해석 코드에서 사용되고 있는 상관식이다. 1982년 Shah[3]는 800여개의 자료를 사용하여, 비등수(Boiling number) Bo와 대류수(Convective number) Co를 이용한 그래픽 형태의 상관식을 개발하였다. 1982년 Bjorge et al.[4]. 은 물에 대하여 과냉상태와 높은 건도 영역에서도 사용할 수 있는 상관식을 개발했다. 1986년 Khanpara et al.[5]는 그들의 R-113을 작동유체로 원형관에 대해 실험한 데이터를 Shah, Pujol and Stenning, 그리고 1983년에 개발된 Kandlikar[6] 의 상관식을 이용해서 비교해 보았다.

1989년 Kandlikar[7]는 1983년에 개발된 상관식을 더욱 수정하여 여러가지 유체에 대하여 수직, 수평관에서 모두 사용할 수 있는 범용의 상관식을 개발하였다.

일반적으로 COBRA-TF나 RELAP5등의 전산코드에는 Chen의 상관식이 사용된다. 본 연구에서는 CHF 실험을 위한 환상 유로에서 측정한 데이터로 열전달 계수를 계산하여 Chen과 Kandlikar의 상관식과 비교하였다. Chen의 상관식은 사용한 데이터의 압력 범위가 3 MPa 정도이고, Kandlikar의 상관식도 물에 대해서는 6.4 MPa의 압력범위에서 개발된 식이다. 본 연구는 0.57 ~ 15.01 MPa 의 압력 범위에서 위의 상관식이 열전달 계수와 표면온도를 계산하는데 얼마나 유효한지를 규명해 보고자 한다. 또한 원형관의 실험데이터로 개발한 상관식이 수력직경을 사용했을 때, 환상관에 얼마나 잘 적용될 수 있는가 보고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 실험은 한국 원자력 연구소의 RCS 열수력 Loop 장치에서 수행하였다. 실험장치 및 실험방법은 참고문헌[8] 자세히 기술되어 있다. 그림 1은 이 장치의 개략도이다. Loop는 순환펌프, 예열기, Test Section, 기수분리기, 응축기, 가압기, 열교환기 등 주요 부품으로 이루어져 있다. Test Section에 들어가는 유량의 측정에는 3종류의 Orifice 유량계 중에서 실험 유량의 범위에 적합한 것을 선택하여 사용한다. 유량은 순환펌프의 회전속도 조절, Bypass Line의 유량조절 그리고 유량제어 밸브의 조절을 조합하여 제어된다. 저유량영역에서 흔히 관찰되는 유량의 진동은 본 실험범위에서는 Test Section 입구측의 밸브를 Throttling함으로써 피할 수 있다. 예열기는 Test Section 입구의 용수 온도를 조절하기 위하여 설치되어 있다. 본 연구에 사용된 Test Section은 Test Section Pipe 내부에 핵연료봉을 모의한 출력분포가 균일한 가열길이 1842 mm의 가열봉이 장전된 구조로 환상유로를 형성하고 있다. 가열봉에는 표면온도를 측정하기 위한 K-Type 비접지형 열전대 6개가 정해진 위치에 부착되어 있다. Test Section.구조 및 열전대의 위치는 그림 2에 나타내었다. Test Section에서 수증기-물 2상 유동 상태로 나온 순환용수는 기수분리기에서 수증기와 물로 완전히 분리되고 U-Tube Type 열교환기에서 설정된 온도까지 냉각된다. 실험장치의 가압은 내부에 40kW의 가열기가 설치된 가압기가 사용된다.

본 실험의 주요 측정변수는 Test Section 입구 및 출구의 순환용수 온도와 압력, .Test Section 유량 및 차압, 가열봉의 표면 온도 및 히터 봉에 투입되는 전력등이며 측정된 신호는 모든 워크스테이션의 자료 처리 장치에서 자동으로 수집, 처리된다. 이들 압력, 유량, 온도 및 전력의 측정 불확실도는 각각 자료처리장치의 지시치의 ± 0.3% , ± 1.5% 및 0.6% 이하이다. 히터 봉 전력 측정에 대한 불확실도는 ±1.0 이하이다.

실험절차는 다음과 같다. Test Section.입구의 유량, 온도 및 압력을 설정된 조건에 맞춘 다음, Test Section 가열기에 전원을 공급시키고 서서히 가열전력을 증가시킨다. 전력을 2상 비등 열유동이 발생하기까지 단계적으로 증가시키면서 실험을 실시하였다.

3. 실험범위

본 실험에서는 다음과 같은 범위에서 실험자료를 얻었다.
- 계통압력 : 0.57 ~ 15.01 MPa
- 질량유속 : 200 ~ 600 kg/m^{2}s
- 입구과냉도 : 85 ~ 353 kJ/kg
- 출구 건도 : 0.106 ~ 0.536

압력은 Test Section 입구 및 Plenum 및 출구 Plenum에서 측정하였다. 본 실험의 압력은 .입구 Plenum의 압력을 계통 압력으로 사용하였다.

4. 계산절차

본 연구에서는 가장 많이 사용되는 Chen과 가장 최근에 개발된 Kandlikar의 상관식에서 예열전달 계수와 표면온도를 예측하여 실험값과 비교하였으며 비교에 사용된 상관식들은 다음과 같다.

4.1 실험데이터의 열전달 계수의 계산

$$q = h\left(T_w - T_f\right) \tag{1}$$

(1) 식에 의해, 주어진 열유속에서 표면온도와 유체온도를 결정하면 열전달 계수를 구할 수 있다. 표면온도는 설치된 6개의 열전대로 측정했으며, 유체온도는 각 지점의 압력에 해당하는 포화온도를 택하였다.

4.2 Chen의 상관식

2상 비등 열전달 계수는 핵비등 열전달 계수와 대류 열전달 계수를 각각 구한 후 단순히 더하여 계산한다.

$$h = h_{NB} + h_{FC} \tag{2}$$

핵비등 열전달 계수는 다음과 같이 구한다.

$$h_{\mathrm{NB}} = S h_{\mathrm{FZ}} , \tag{3}$$

$$h_{FZ} = \frac{0.00122\ \Delta T_{sat}^{0.24} \Delta p_{sat}^{0.75} c_{pL}^{0.45} \rho_L^{0.49} \lambda_L^{0.79}}{\sigma^{0.5} h_{LG}^{0.24} \mu_L^{0.29} \rho_G^{0.24}} \tag{4}$$

여기서 S는 억제계수로 레이놀드수에 따라 자료를 다음 식과 같이 Curve fitting 하여 사용한다.

$$S = \left[1 + 0.12(\mathrm{Re})^{1.14}\right]^{-1} \quad \text{for Re} < 32.5 \tag{5}$$

$$S = \left[1 + 0.42(\mathrm{Re})^{0.78}\right]^{-1} \quad \text{for } 32.5 < \text{Re} < 70 \tag{6}$$

대류 열전달 계수는 다음과 같이 구한다.

$$h_{FC} = F h_L \tag{7}$$

여기서 h_L은 다음과 같이 Dittus-Boelter식을 사용한다.

$$h_L = 0.023 \frac{\lambda_L}{D} \mathrm{Re}^{0.8}\ \mathrm{Pr}_L^{1/3} \tag{8}$$

여기서 F는 레이놀드수 계수로 Martinelli 변수에 따라 정리한 자료의 근사영역을 Curve fitting한 다음 식을 사용한다. D는 환상관의 열수력 등가직경을 사용한다.

$$F = 2.35\left(1/X_{tt} + 0.213\right)^{0.736} \tag{9}$$

4.3 Kandlikar의 상관식

Kandlikar의 상관식은 비등수 Bo와 대류수 Co를 사용하여 구한 대류항의 열전달 계수와 핵비등항의 열전달 계수를 각각 더하여 계산한다. Kandlikar는 수직관과 수평관, 그리고 물외의 여러가지 유체를 사용하여 다음과 같은 상관식을 개발했다.

$$\frac{h_{TP}}{h_L} = C_1 Co^{C_2} (25\,\mathrm{Fr})^{C_5} + C_3 Bo^{C_4} F_{fl} \tag{10}$$

여기서 h_l은 위에서 사용한 Dittus-Boelter 식을 사용하며, 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

* C5 는 수직관에 대해서, 그리고 Fr > 0.04 인 경우 0 이다. 또한 작동유체가 물인 경우, F_{fl}=1 이다.

데이터는 대류비등영역과 핵비등영역으로 나누어지는데 그 기준은 다음과 같다.

Co < 0.65 - 대류비등영역

Co > 0.65 - 핵비등영역

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

5. 실험결과

상관식을 이용한 계산값의 Mean Error 와 RMS Error 의 값을 0.57 ~ 15.01 MPa의 범위와 높은 압력범위를 제외한 0.57 ~ 8 MPa의 범위에서 계산한 결과는 표 1 과 같다. 여기에 사용한 예측오차와 평균오차와 RMS 오차는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{Prediction Error} = \frac{h_{cor} - h_{\exp}}{h_{\exp}} \tag{11}$$

$$\text{Mean Error} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{h_{cor} - h_{exp}}{h_{exp}}\right) \tag{12}$$

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{h_{cor} - h_{exp}}{h_{exp}}\right)^2} \tag{13}$$

표 1. 상관식의 Mean Error 와 RMS Error

	Range of Pressure	Mean Error	RMS Error
Chen	0.57 ~ 8 MPa	-0.12	0.207
	0.57 ~ 15.01 MPa	0.265	0.943
Kandlikar	0.57 ~ 8 MPa	-2.9E-2	0.150
	0.57 ~ 15.01 MPa	0.123	0.415

표 1 에서 상관식들은 비교적 낮은 압력범위(0.57 ~ 8 MPa)에서는 오차값이 작지만, 고압(10 ~ 15 MPa)에서는 상당히 큰 오차값을 갖는다는 것을 알 수 있다. Chen 과 Kandlikar 의 결과를 비교해 볼 때, Kandlikar 의 상관식이 좀 더 나은 값을 예측한다는 것을 알 수 있다. 이 결과를 통해볼 때, 기존의 상관식을 이용해서 고압에서 작동하는 원전의 열전달 계수를 계산하는데는 개선의 여지가 있음을 알 수 있다.

그림 3 은 가열봉의 출구쪽에 있는 1 번 열전대에서 측정한 온도와 벽면 온도, 열유속을 (1)식에 적용하여 계산한 열전달계수의 값을 나타내었다. 8 MPa 근방에서 큰 열전달 계수값을 가짐을 알 수 있다. 그림 4 는 Chen 과 Kandlikar 의 상관식으로 계산한 열전달 계수를 압력에 따라 나타내었다. Chen 상관식이 Kandlikar 의 상관식보다 더 밀집되어 있는 형태

로 나타났으며, 압력이 높을수록 열전달계수를 높게 계산하는 경향을 보여다. 그림 5 는 예측 오차를 나타냈다. 고압에서 오차가 크다는 것을 보여주기 위해 전체압력범위(0.57 ~ 15.01 MPa)와 낮은 압력 범위(0.57 ~ 8 MPa)의 그래프를 나누어 나타내었다. 두 상관식 모두 10 MPa 이상의 압력에서는 상당히 큰 오차를 보였으며, 낮은 압력 범위에서 Kandlikar 의 상관식이 더 작은 오차를 보였다. 이것은 두 상관식을 개발하기 위한 자료들이 모두 낮은 압력 범위에서 측정한 데이터들이기 때문에, 높은 압력에서의 결과를 예측하지 못하기 때문이다. 그림 6 은 전체 압력 범위와 낮은 압력 범위에서 각각 실험값과 상관식으로 계산한 열전달 계수값을 비교한 그래프이다. 그림에서 오차가 심한 부분은 높은 압력 범위의 값들이며, 고압에서는 열전달계수를 실제보다 더 크게 예측한다는 것을 알 수 있다. 그림 7 은 실험값과 계산값의 유체와 표면의 온도차의 비를 나타내었다. 낮은 압력 범위에서는 측정값과 온도차를 비교적 잘 예측한다는 것을 알 수 있다. 그림에서 주로 나타나는 오차는 고압에서 실험값의 온도차가 예측값보다 큰 것이었다. 바꾸어 말하면 고압에서 열전달 계수를 크게 예측한다는 것이다. 실제로 15 MPa 에서의 온도차를 계산하면, 실험값의 ΔT 는 20 ~ 35도정도이지만, 예측값의 ΔT 는 10 도 정도로 표면온도를 약 10_25 까지 잘못 예측하였다. 바꾸어 말하면 가장 큰 오차가 나는 계산값에서 표면온도는 10 ~ 25차이까지도 잘못 예측할 수 있다는 것을 보여주다. 그러나 낮은 압력 범위에서는 4 ~ 5도 정도로 잘 예측할 수 있다. 여기서도 역시 Chen 의 상관식보다 Kandlikar 의 상관식이 더 정확한 값을 예측한다는 것을 보여주었다.

6. 결론

가열길이가 긴 수직 환상 유로를 사용하여 압력 0.57 ~ 15.01 MPa의 범위에서 열전달 계수를 측정하여, 기존의 Chen 및 Kandlikar 의 상관식에서 예측한 결과와 비교하여 상관식의 유효성을 조사하였다. 두 상관식은 8 MPa 압력 범위에서는 비교적 정확한 결과를 보여주었지만, 그보다 큰 압력범위에서는 상당히 큰 오차를 보였다. 상관식을 이용하여 가열봉의 표면온도를 예측한 결과 역시 낮은 압력 범위에서는 잘 맞는 결과를 보여주었다.

결과적으로 기존의 상관식을 이용하여 고압의 운전조건을 가진 원자로등을 설계하거나 안전해석을 할 때 큰 오차가 발생할 수 있으며, 아직 개선의 여지가 있다는 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 중장기 연구, 개발 과제의 지원으로 이루어졌습니다.

기호설명

Bo	비등수, $q/(Gh_{lg})$	x	건도
Cp	비열비, kJ/kgK	ε	예측오차
Co	대류수, $((1-x)/x)^{0.8}(r_g/r_l)^{0.5}$	η	점성계수, Ns/㎡
C_1-C_5	Kandlikar 상관식의 계수들	λ	열전도계수, kW/m℃
D	관 내경	ρ	밀도, kg/㎥
F	Enhancement factor	σ	표면장력, N/m
Fr	프루드수 $G^2/(r^2 gD)$		
G	질량유속, kg/㎡s	**아랫첨자**	
h	열전달계수, kW/㎡ ℃	FC	강제대류
P	압, MPa	fl	유체종류
Pr	프랜틀 수, $C_p m/l$	lg	Latent

q	heat flux, kW/m^2	l	액체
Re	레이놀드수, $GD(1-x)/m$	NB	핵비등
S	Suppression factor	TP	Two Phase
T	Temperature (℃)	sat	포화상태
X_{tt}	Martinelli 변수, $\left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.9}\left(\frac{r_g}{r_l}\right)^{0.5}\left(\frac{m_l}{m_g}\right)^{0.1}$		

참고문헌

(1) Collier,J.G., Thome, J.R., "Convective Boiling and Condensation," 3th Edition, Clarendon Press, Oxford, Chapter 7. (1984)

(2) Chen,J.C., "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.(1966)

(3) Shah,M.M., "Chart Correlation for Saturated Boiling Heat Transfer: Equations and Further Study," ASHRAE Transactions, Vol.88, Part I, pp.185-196. (1982)

(4) Bjorge,R.W., Hall,G.R., and Rohsenow,W.M., Correlation of Forced Convection Boiling Heat Transfer Data, " International Journal of heat and Mass Transfer, Vol.25, No.6, pp.753-757. (1982)

(5) Khanpara,J.C.,Bergles, A.E., and Pate, M.B., "Augmentation of R-113 In-Tube Evaporation With Micro-fin Tubes,"ASHRAE Paper No. PO-86-11, No.3. (1986)

(6) Kandlikar,S.G.,Thakur,B.K. "A New Correlation for Heat Transfer during Flow Boiling," Processings, 16th Southeastern Seminar on Thermal Sciences, Miami, FL.(1982)

(7) Kandlikar,S.G."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. (1990)

(8) 천세영 등, "광범위한 압력 조건하에서의 수직 환상 유로의 유로의 임계열유속," 한국 원자력 학회 '98 추계학술대회, 제3분과 (A), (1998)

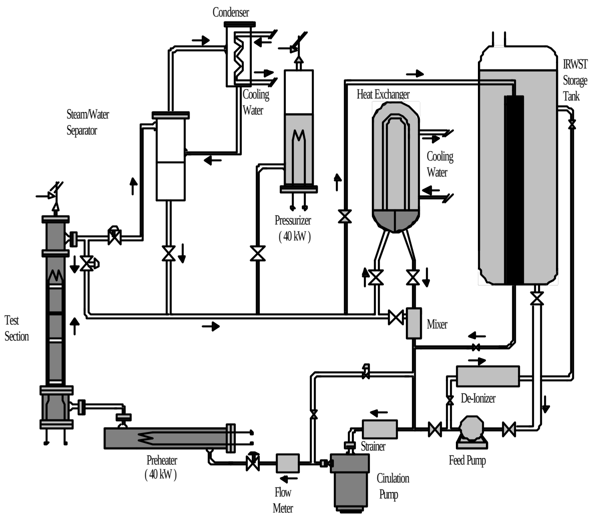

그림 1 . RCS 열수력 Loop 장치 개략도

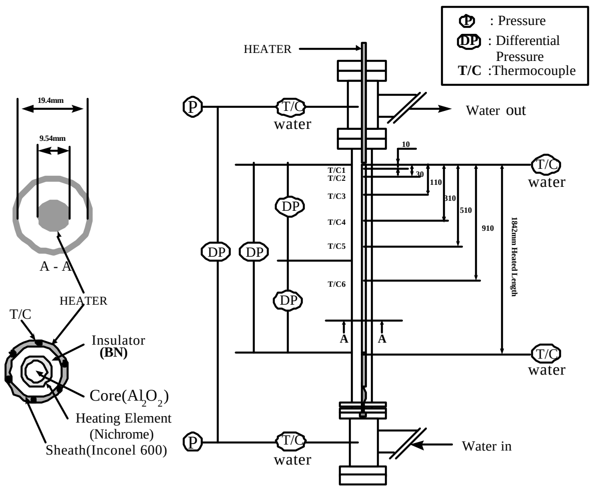

그림 2. 실험대 구조 및 열전대 위치

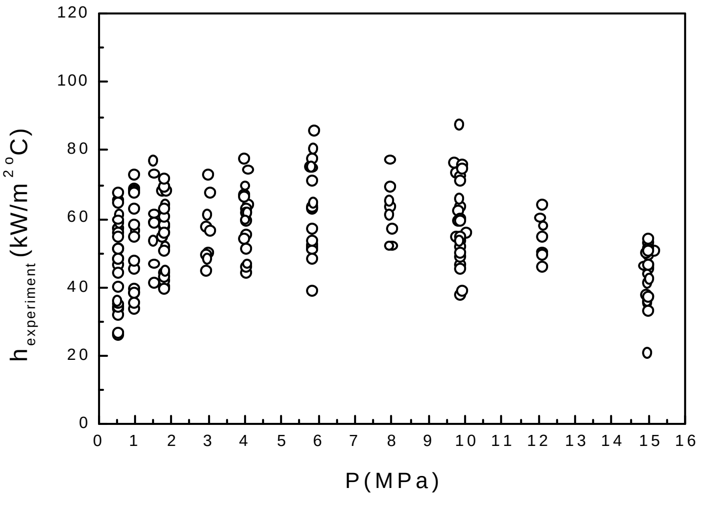

그림 3. 압력에 따른 열전달 계수(실험값)

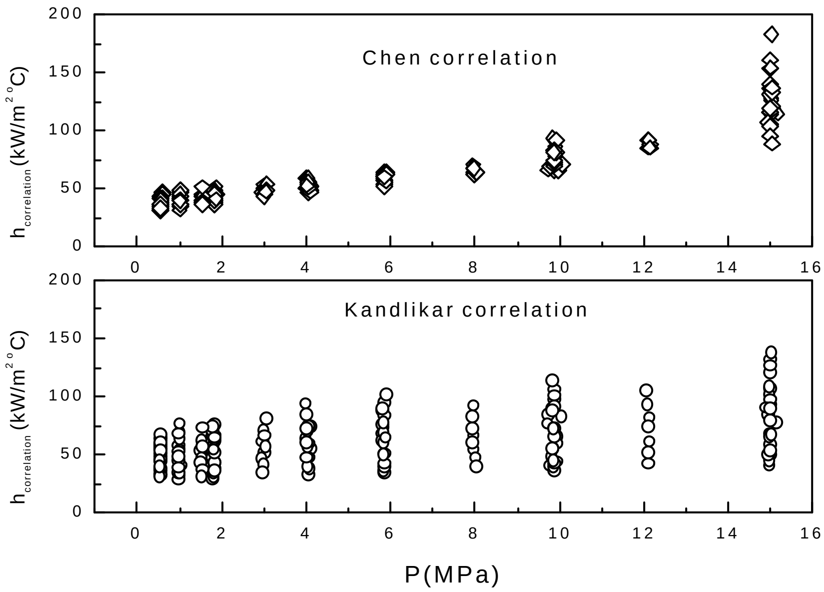

그림 4. 압력에 따른 열전달 계수(예측값)

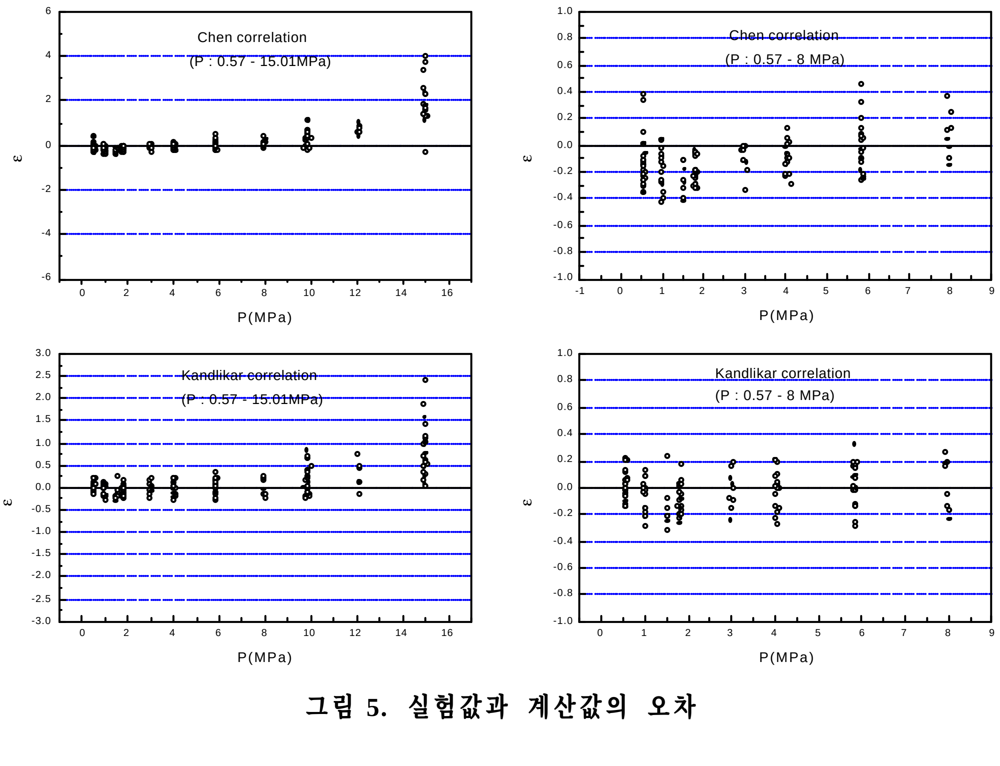

그림 5. 실험값과 계산값의 오차

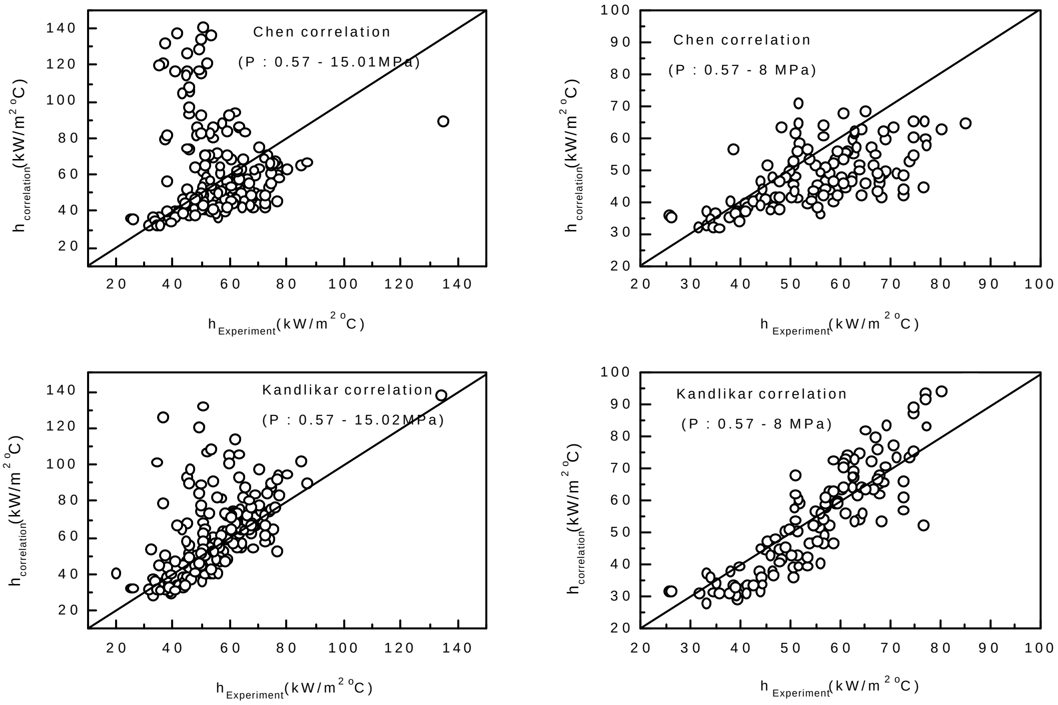

그림 6. 실험값과 계산값의 열전달계수 비교

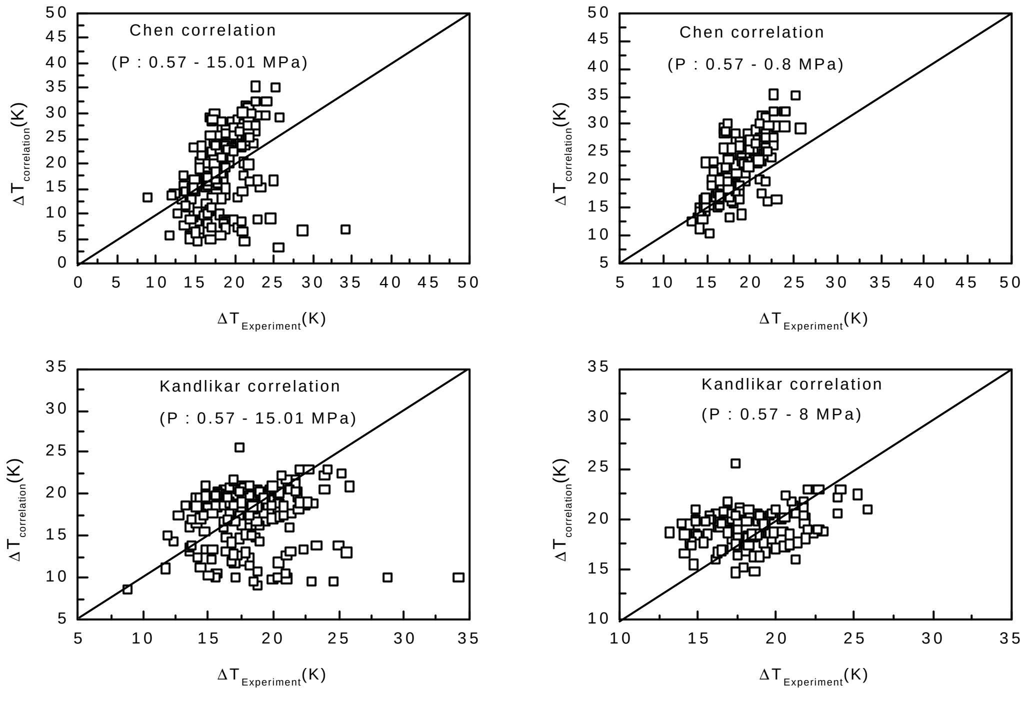

그림 7. 실험값과 계산값의 DT(T_w - T_f)의 비교