

수직원형관에서 초임계압 CO₂의 열전달 특성[§]

유태호^{*†} · 배윤영^{*} · 김환열^{*}

* 한국원자력연구원

Heat Transfer Characteristics of CO₂ at Supercritical Pressure in a Vertical Circular Tube

Tae Ho Yoo^{*†}, Yoon Yong Bae^{*} and Hwan Yeol Kim^{*}

* KAERI(Korea Atomic Energy Research Institute)

(Received May 19, 2010 ; Revised October 29, 2010 ; Accepted November 1, 2010)

Key Words : Supercritical Pressure(초임계압), Heat Transfer Deterioration(열전달 열화), Vertical Circular Tube(수직원형관), Mixed Convection(혼합대류)

초록: 원자로의 안전을 확보하고 운전성능을 정확히 예측하기 위해서는 핵연료에서 초임계압 냉각재로 전달되는 열전달량을 예측하는 것이 매우 중요하다. 초임계압 유체에서 열전달은 유사임계온도 부근에서 급격하게 변화하는 물성의 영향을 크게 받아 열전달량이 증가하기도 하고, 특정한 질량유속과 열유속 조건에서는 열전달량이 감소하는 현상을 보이기도 한다. 본 연구에서는 초임계압수냉각로(SCWR)의 핵연료집합체 부수로의 수력 직경과 유사한 내경 4.57 mm 원형관 안에서 상·하향 방향으로 흐르는 CO₂로 전달되는 열전달량(실제로는 원형관 외벽온도)을 다양한 조건에서 측정하고 분석하였다. 총 7,250개의 실험결과를 기존의 초임계압 강제대류 상관식들로 예측한 결과와 비교하여 그 상관식들의 정확성을 검토하였으며, 부력매개변수 $\overline{Gr}_b / (Re_b^{2.7} Pr_b^{0.5})$ 를 도입하여 혼합대류 영역에서도 적용할 수 있도록 기존의 상관식을 확장하였다. 그리고 기존의 열전달열화 발생 조건을 본 실험의 열전달열화 조건과 비교하여 적용성을 평가하였다.

Abstract: At supercritical pressure, the physical properties of fluid change substantially and the heat transfer at a temperature similar to the critical or pseudo-critical temperature improves considerably; however, the heat transfer may deteriorate due to a sudden increase in the wall temperature at a certain condition of a mass and heat flux. In this study, the heat transfer rates in CO₂ flowing vertically upward and downward in a circular tube with a diameter of 4.57 mm under various conditions were calculated by measuring the temperature of the outer wall of the tube. The published heat transfer correlations^(6,7) were analyzed by comparing their prediction values with 7,250 experimental data. By introducing a buoyancy parameter, a heat transfer correlation, which could be applied only to a normal heat transfer regime, was extended such that it can be applied to regime of heat transfer deterioration. The published criteria for heat transfer deterioration⁽⁹⁻¹²⁾ were evaluated against the conditions obtained from the experiment in this study.

- 기호설명 -

\bar{c}_p : 평균 비열, kJ/kgK
 D : 직경, m
 G : 질량유량, kg/m²s
 \overline{Gr} : ρ_m 이용한 그라소프 수, Grashof number
 h : 열전달계수, kW/m²K
 k : 열전도율, kW/mK

L : 관 길이, m
 M : 몰 질량, kg/mol
 Nu : 누셀 수, Nusselt number
 Pr : 프란틀 수, Prandtl number
 \overline{Pr} : \bar{c}_p 를 이용한 프란틀 수,
 q'' : 열유속, kW/m²
 \dot{q}, \dot{Q} : 열량, kW
 Re : 레이놀드 수, Reynolds number
 ρ : 밀도, kg/m³
 ρ_m : 평균밀도,
 T : 온도, K or °C
 w : 유체속도, m/s
 x : 가열 시작점부터 길이, m

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 열공학부문 춘계학술대회 (2010. 5. 13.-14., 전북대) 발표논문임.

† Corresponding Author, thyoo82@kaeri.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

- 하첨자
b : 벌크
cr : 임계
exp : 실험 데이터
h : 가열
H₂O : 물
i : 내부
in : 입구
o : 외부
pc : 유사임계점
w : 벽면

1. 서론

최근 제 4 세대 원자로의 하나로 연구가 진행되고 있는 초임계압수냉각로(SCWR : Super-Critical Water-cooled Reactor)에서는 냉각재의 압력을 25 MPa 로 유지하여 열효율의 극대화를 도모한다. 초임계압에서 열전달은 아임계압에서와는 매우 다른 특성을 보이므로 기존의 초임계압화력발전소를 개발하는 과정에서 이에 대한 상당한 연구가 수행되었다. 그러나 원자로심내 핵연료집합체의 수력직경은 보일러 튜브의 직경과는 많은 차이가 나고 운전 조건도 다르므로, 원자로 운전조건에 대한 고유한 초임계압열전달 데이터의 확보가 요구된다.

초임계 상태에서 유체는 온도의 변화에 따라 밀도가 변할 뿐, 상(phase) 변화가 없고, 유사임계온도 부근에서 급격한 물성의 변화로 아임계 상태의 유체보다 높은 열전달이 일어나기도 한다. 그러나 아임계에서와 같이 상변화로 인한 핵비등의 문제는 발생하지 않지만, 낮은 질량유속과 높은 열유속의 조건에서는 열전달이 급격히 감소하는 열전달 열화현상이 일어나기도 한다. 이러한 현상을 연구하기 위해 한국원자력연구원(KAERI)에서는 물보다 임계압력과 온도가 상당히 낮고, 유사임계점 부근에서의 물성변화가 물과 비슷한 CO₂를 이용하는 열전달실험장치 SPHINX (Super-critical Pressure Heat Transfer Investigation for NeXt Generation)를 제작했다. 본 연구에서는 이 장치에 내경 4.57 mm의 수직 원형관을 장착하여 상·하향 유동의 열전달실험을 수행하였다.

2. 실험 장치 및 실험 조건

실험 장치Fig. 1은 SPHINX로 하향유동 실험을 할 때의 계통도이다. 이 실험장치는 CO₂를 작동 유체로 하여 수직 상·하향유동에서 질량유속과 열

유속, 그리고 압력에 따른 열전달 현상의 변화를 파악할 수 있도록 설계되었다.

CO₂는 왕복동 압축기로 CO₂ 탱크로부터 주순환 루프가 설정된 압력에 도달할 때까지 주입된다. 주입된 CO₂는 순환펌프를 통해 루프를 따라 순환하며, 이 순환하는 CO₂는 예열기를 통해 원하는 입구온도까지 가열된 후 실험부로 들어간다. 실험부에서 가열된 CO₂는 열교환기를 통해 냉각된다. 기본적으로 CO₂의 유량은 순환펌프의 회전수와 주 제어밸브 그리고 우회밸브로 제어되며, 압력은 시스템 안의 총질량과 실험부 입구온도로 제어한다.

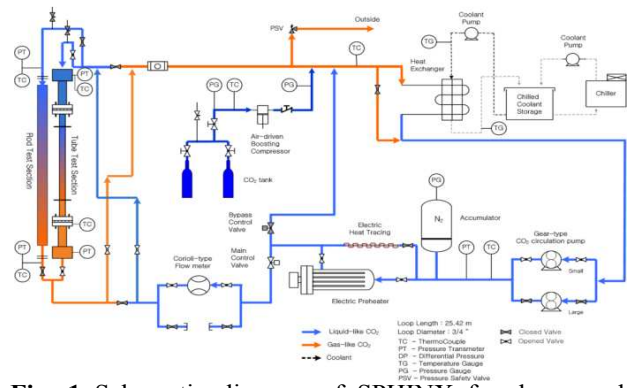


Fig. 1 Schematic diagram of SPHINX for downward flow

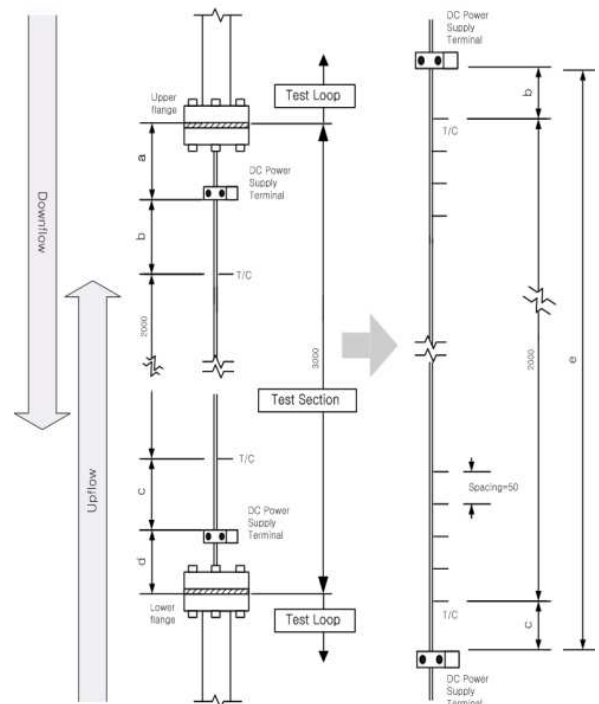


Fig. 2 Test section details and measuring locations

2.1 실험부

실험부는 초임계압수냉각로의 노심 부수로의 수력직경(4 mm ~ 6 mm) 안에 들어가는⁽¹⁾ 내경 4.57 mm를 사용하였다. Fig. 2는 실험부의 제원과 온도 측정 위치를 나타낸 그림이다. 재질은 낮은 열팽창률과 높은 전기저항을 갖는 Inconel 625이고, 관 벽면에 직접 전류를 흘려 가열했으며, 총 길이와 가열길이는 3,000 mm, 2,250 mm로 구성되어 있다. 이 실험부는 상·하 플랜지로 주순환 루프에 연결되어 있으며, 실험부의 외벽에는 온도를 측정하기 위해 총 41개의 접촉식 K형 열전대를 50 mm 간격으로 부착하였다. 첫 번째 측정위치에서 수력학적 및 열적으로 완전히 발달된 유동을 확보하기 위해 실험부의 입구와 가열부, 가열부와 첫 번째 열전대까지 충분한 거리를 확보하였다. Table 1은 상·하향유동의 조건에서 실험부의 각 구간별 길이를 나타낸다.

2.2 실험조건

본 실험은 초임계압수냉각로와 운전조건의 상사를 적용하여 실험압력을 CO₂의 임계압력인 7.38 MPa의 1.05, 1.10배인 7.75 MPa, 8.12 MPa로 선정하였으며, 각각의 운전압력에 따라 질량유속과 열유속을 조절하며 실험을 수행하였다. 하나의 실험으로 충분한 운전범위를 포함할 수 없는 경우에는 입구온도를 달리한 실험결과를 이어 붙여 필요한 모든 엔탈피 영역에 대한 실험 데이터를 얻었다. 초임계압수냉각로에서 감속재의 역할을 하는 water rod에서는 물이 위에서 아래로 흐르고,⁽²⁾ 노심의 냉각재는 아래에서 위로 흐르거나 반경 및 원주방향으로 발생하는 온도차를 완화하기 위해

Table 1 Test section dimensions (mm)

	a	b	c	d	e
Upward flow	250	50	200	500	2250
Downward flow	500	200	50	250	2250

Table 2 Test conditions

Fluid	CO ₂
Flow direction	Vertical upward, downward
Pressure, P (MPa) (P/Pcr)	7.75 (1.05), 8.12 (1.10)
Inlet temperature, T (°C)	5 ~ 38
Mass flux, G (kg/m ² s)	100, 200, 400, 500, 600, 700, 800
Heat flux, q''(kW/m ²)	2 ~ 130

혼합구역(mixing zone)의 개념을 제시하기도 하는데,⁽³⁾ 이 두 경우 모두 원자로심에서 상·하향유동이 동시에 존재하므로 본 연구에는 이 두 가지 유동에 대해 모두 실험을 수행하여 유동 방향에 따른 열전달 특성을 비교하였다. 또한 강제대류와 혼합대류 영역에서의 열전달 특성을 비교하기 위한 실험조건도 추가하였다. Table 2에 이러한 실험조건을 종합하여 나타냈다.

2.3 벽면온도 및 열전달계수

실험부의 내부 벽면온도는 측정된 실험부의 외부 벽면온도로부터 식 (1)을 이용하여 얻을 수 있다.⁽⁴⁾

$$T_{w,i} = T_{w,o} + \frac{\dot{q}}{4k_w} \left[\left(\frac{D_o}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \right] - \frac{\dot{q}}{2k_w} \left(\frac{D_o}{2} \right)^2 \ln \frac{D_o}{D_i} \quad (1)$$

여기서 체적가열률은 아래 식 (2)와 같다.

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{\left[\frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2) L_h \right]} \quad (2)$$

열전달계수는 위에서 계산된 원형관의 내벽온도와 CO₂의 벌크온도, 그리고 원형관에 가해지는 열유속에 의해 아래 식 (3)으로 계산된다.

$$h = \frac{q''}{(T_{w,i} - T_b)} \quad (3)$$

3. 결과 및 토의

3.1 열유속의 영향

Fig. 3은 압력 7.75 MPa, 질량 유속 700 kg/m²s 일 때 상향유동과 하향유동에서 원형관 내벽온도와 열전달계수를 열유속의 변화에 따라 각각 (a)와 (b)에 나타내었다. 그림에서 가로축은 벌크엔탈피를 나타내며, 상위 그림의 세로축은 식 (1)로부터 도출된 내벽온도를 나타내고 실선은 벌크온도를 나타냈다. 그리고 아래 그림의 세로축은 식 (3)으로 구한 열전달계수를 나타내고 실선은 아임계압에서 아임계압의 강제대류 열전달에 주로 사용되는 식 (4)의 Dittus-Boelter 상관식으로 예측한 열전달계수를 나타냈다.

$$Nu = \frac{hD}{k_b} = 0.023 Re_b^{0.8} Pr_b^{0.4} \quad (4)$$

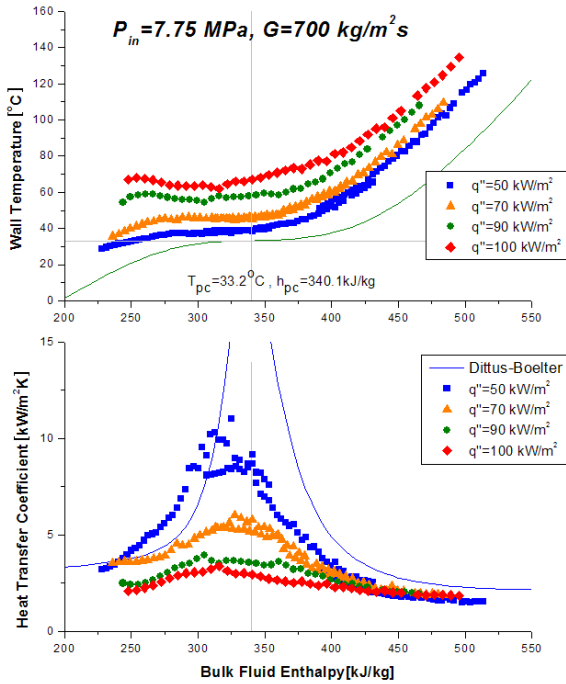
Fig. 3을 보면 두 방향의 유동 모두 열유속이 증가할수록 벽면온도가 증가하였고, 열전달계수는

감소하였다. 이것은 식 (3)에서 열유속의 증가속도보다 벽면온도와 벌크온도 차의 증가속도가 더 크다는 것을 의미한다. 또한 열유속이 작을수록 Dittus-Boelter 상관식에 점점 근접하는 경향을 보이고 있다. 이것은 열유속에 의한 물성치 변화가 상대적으로 작아져서 Dittus-Boelter 상관식이 유도

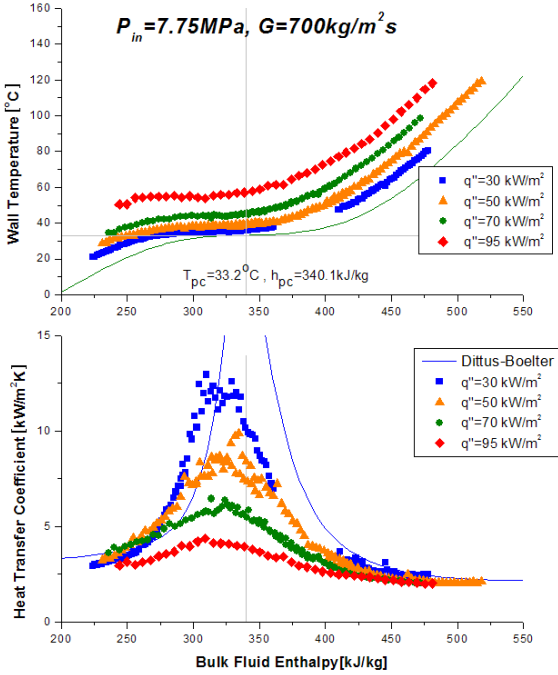
된 아임계 강제대류의 조건에 점점 근접하기 때문이다.

3.2 질량유속의 영향

Fig. 4는 압력 8.12 MPa, 열유속 70 kW/m²에서 질량유속의 영향을 비교해 본 그림이다. 그래프를 가로지르는 선은 8.12 MPa에서의 유사임계온도와

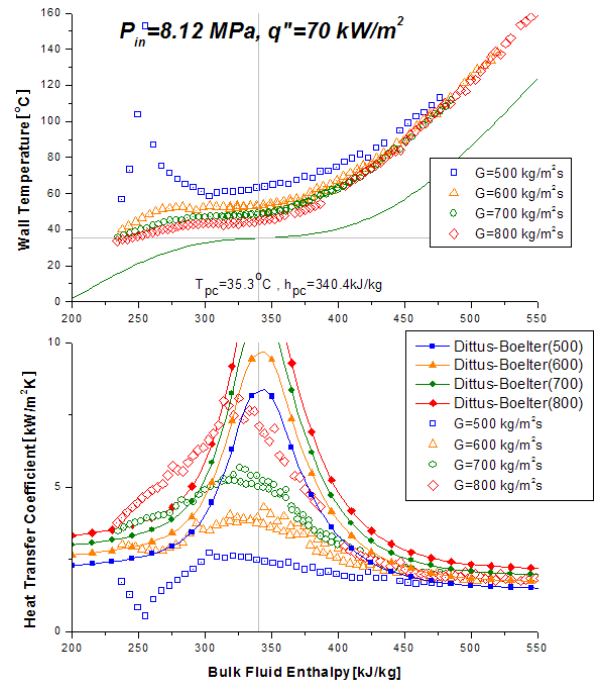


(a) Upward flow

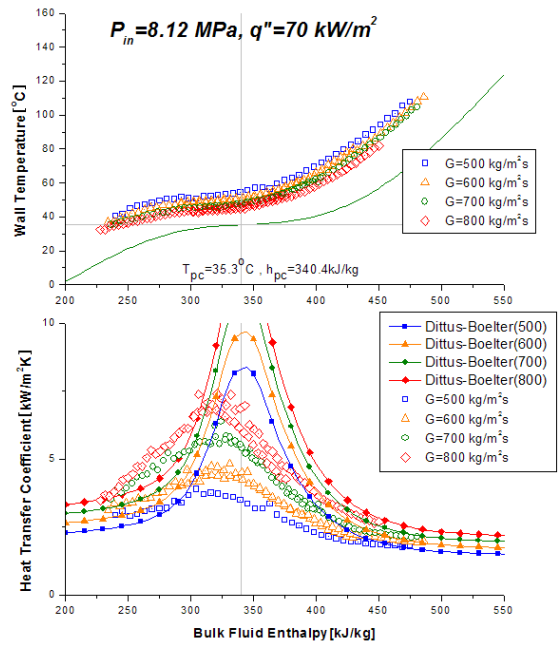


(b) Downward flow

Fig. 3 Effect of heat flux on the wall temperature and heat transfer coefficient at a mass flux 700 kg/m²s



(a) Upward flow



(b) Downward flow

Fig. 4 Effect of mass flux on the wall temperature and heat transfer coefficient at a heat flux 70 kW/m²

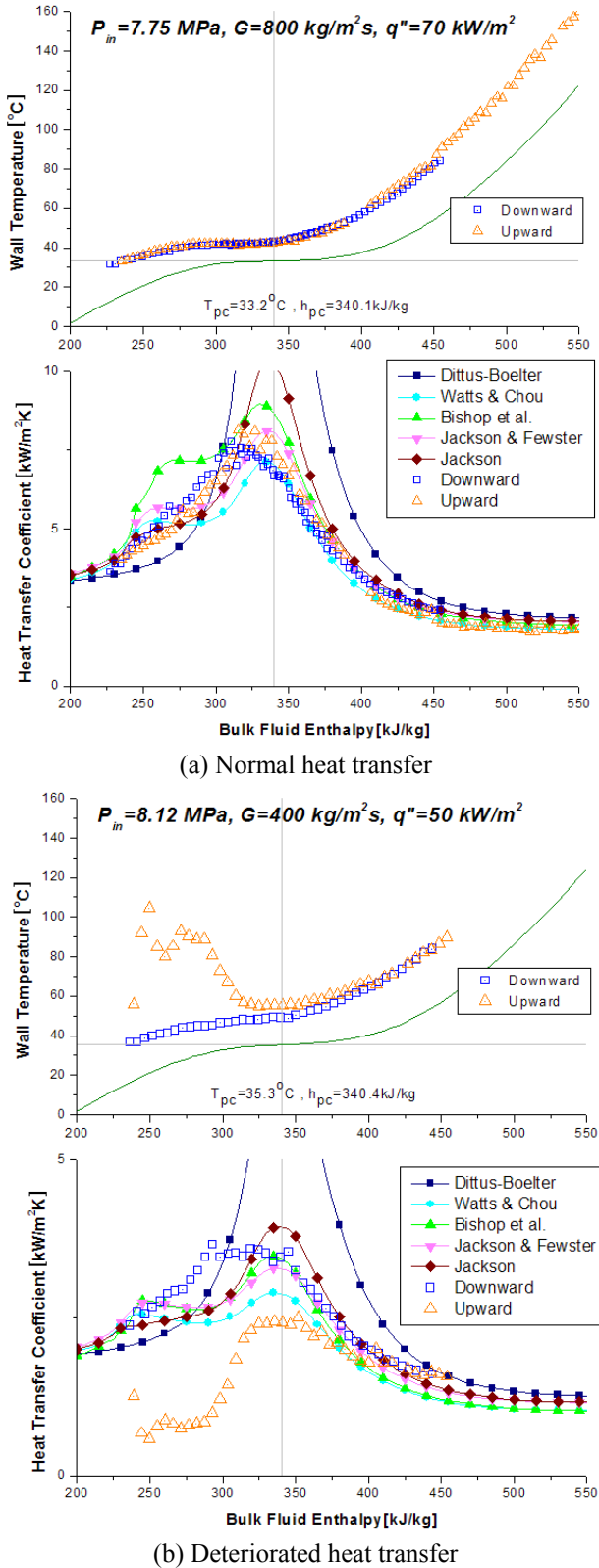


Fig. 5 Comparison upward flow with downward flow

유사임계엔탈피를 나타내며, 열전달계수의 그래프에서 닫힌 모양의 기호들은 각각의 질량유속에서

Dittus-Boelter 상관식으로 예측한 열전달계수를 나타내며, 같은 질량유속에서 실험으로 얻은 열전달계수는 동일한 색과 모양의 열린 기호로 나타내었다. 압력과 열유속이 같은 경우에는 질량유속이 증가할수록 벽면온도는 감소하고, 열전달계수는 증가하였다. 같은 압력과 같은 열유속, 그리고 같은 질량유속임에도 불구하고 상향유동 (a)는 질량유속 500 kg/m²s에서 보는 바와 같이 열전달 열화현상이 일어나지만, 하향유동 (b)에서는 열전달 열화현상이 일어나지 않는 것을 확인할 수 있다.

3.3 상·하향유동 영향

Fig. 5는 대표적인 상·하향유동의 차이를 보여주는 그림이다. (a)는 정상 열전달의 경우 상·하향유동을 비교한 것이고, (b)는 상향유동에서 열전달 열화현상이 일어난 경우 같은 조건에서 하향유동과 비교한 그림이다. 유동조건이 열전달 열화 조건을 만족하지 않는 경우 상·하향유동 모두 정상열전달의 거동을 보이나, 유동조건이 열전달 열화 조건을 만족하는 경우 열전달 열화현상이 일어나는 상향유동과 달리 하향유동에서는 열전달 열화현상이 일어나지 않았다. 열전달 열화현상의 발생 원인으로 Kugarnov 와 Kaptilovf⁽⁵⁾는, ‘M’형 속도분포를 제시하였다. 이를 간단히 요약하면, 열이 가해지는 벽면이 튜브 중심보다 먼저 유사임계점에 도달하면 먼저 밀도가 급격히 줄어들어 벽면 부근에서 속도가 증가하고 부력의 영향을 크게 받기 시작한다. 이때문에 속도분포가 ‘M’형의 분포를 가지게 되며, 그 결과로 벽면 가까운 부분의 속도는 최고가 되나, 속도의 기울기는 ‘0’이 되어 전단응력 역시 ‘0’이 된다. 이 현상으로 인해 난류성분에 의한 열전달이 이루어 지지않아 열전달 열화현상이 발생하는 것이다.

3.4 기존 열전달 상관식과의 비교

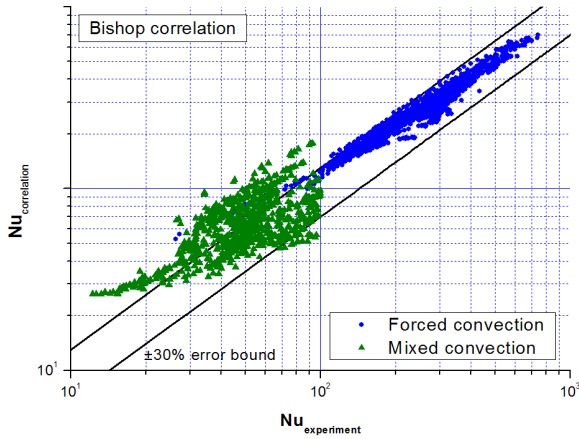
기존의 열전달 상관식들 중 본 실험 결과와 비교했을 때 가장 잘 예측하는 강제대류 영역에서의 Bishop⁽⁶⁾ 상관식 (5)와 상·하향유로 실험을 바탕으로 Watts 와 Chou⁽⁷⁾가 제안한 강제대류 상관식 (6)을 비교 대상으로 선정하였다.

$$Nu_{Bishop} = 0.0069 Re_b^{0.9} Pr_b^{0.66} \left(\frac{\rho_w}{\rho_b}\right)^{0.43} [1 + 2.4/(x/d)] \quad (5)$$

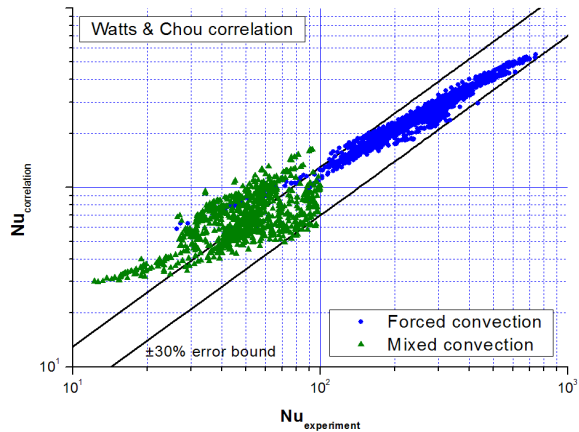
$$Nu_{var} = 0.021 Re_b^{0.8} Pr_b^{0.55} \left(\frac{\rho_w}{\rho_b}\right)^{0.35} \quad (6)$$

Fig. 6 과 Fig. 7 은 각각 식 (5)와 식 (6)으로 예측한 Nu 수를 실험에 의한 Nu 수와 비교한

그림이다. 각각의 가로축은 실험에 의한 Nu 수를 나타내고, 세로축은 상관식에 의한 Nu 수를 나타낸다. 상관식의 오차범위는 $\pm 30\%$ 를 잡았다.



(a) Bishop correlation



(b) Watts & Chou correlation

Fig. 6 Comparison of heat transfer coefficient from the experiment with that from the correlations for upward flow

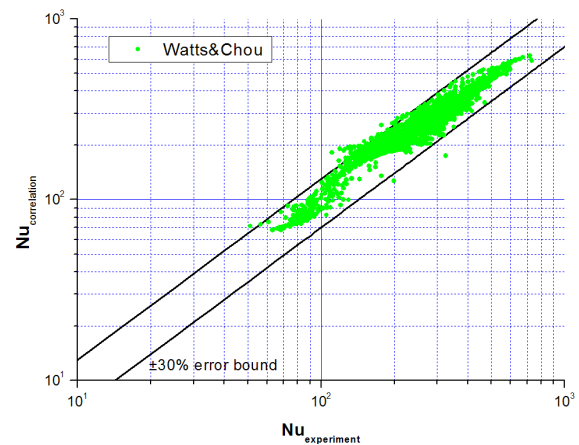


Fig. 7 Comparison of heat transfer coefficient from the experiment with Watts & Chou correlation for downward flow

상향유동인 Fig. 6 에서 강제대류 부분은 상관식과 실험 데이터가 오차범위 안에 대부분 들어가나 Nu 수가 작고, 열전달 열화현상이 일어나는 영역과 부력의 영향을 많이 받는 영역인 혼합대류 부근은 두 상관식 모두 오차범위를 많이 벗어나고 있음을 볼 수 있다. 이것은 두 상관식 모두 정상 열전달, 강제대류 실험 데이터만을 고려하여 만들어졌기 때문이다.

Fig. 7 과 같이 하향유동에서는 식 (6)이 본 실험 결과를 잘 예측하고 있다. 이는 강제대류 영역에서는 식 (6)이 상·하향유동의 열전달에 모두 적용할 수 있음을 보여준다. 하향유동의 경우 유체의 온도가 유사임계점을 통과하면서 밀도가 급격히 감소하여 강제대류에 필적하는 자연대류가 발생하면서 유체유동이 상향유동으로 변함에 따라, Nu 수가 작은 혼합대류 영역의 데이터를 얻을 수 없었다.

3.5 부력 매개변수

식 (7)은 Jackson 과 hall⁽⁸⁾이 제시한 부력매개변수이다.

$$B = \frac{\overline{Gr}_b}{Re_b^{2.7} Pr_b^{0.5}} \tag{7}$$

Fig. 8 과 Fig. 9 에는 실험에 의한 Nu 수를 식 (5) 와 식 (6)으로 예측한 Nu 수로 각각 나누어 값을 식 (7)의 부력 매개변수의 함수로 표시하였다. Fig. 8 에서 실선 1, 2 는 Watts 와 Chou 가 정상 열전달의 경우와 열화현상이 일어난 경우를 구분하여 제안한 식이다. 부력 매개변수가 10^{-5} 이하(강제대류 영역)에서는 실험에 의한 Nu 수와 상관식에 의한 Nu 수의 비가 비교적 위로 많이 분포하고 있다. 또한 10^{-5} 이상(혼합대류 영역)에서는 Nu 수의 비가 감소하다가 다시 증가하고 있다. 이 부분은 자연대류가 지배적이게 되면서 열전달이 회복되고 있는 구간이다.⁽⁷⁾ Fig. 9 는 상향유동에서의 강제대류의 실험으로 나타낸 Bishop 상관식과 실험에 의한 Nu 수의 비를 보여준다. Watts 와 Chou 의 상관식에 비해 실험 데이터 분포가 좀 더 밀집되어 있으며, 강제대류 영역에서부터 부력매개변수가 증가하면서 Nu 수의 비가 감소하다가 10^{-5} 이상에서 증가하고 있다. Fig. 9 에서의 실선은 Bishop 상관식을 이용한 실험값들에 의한 Nu 수 비의 거동을 함수로 제안한 식 (8)로 그린 선이다.

$$Nu_{exp}/Nu_{Bishop} = (1 - 7000B)^2 \tag{8a}$$

for $B < 4.0 \times 10^{-5}$

$$Nu_{exp}/Nu_{Bishop} = (4800B)^{0.4} \tag{8b}$$

for $B > 4.0 \times 10^{-5}$

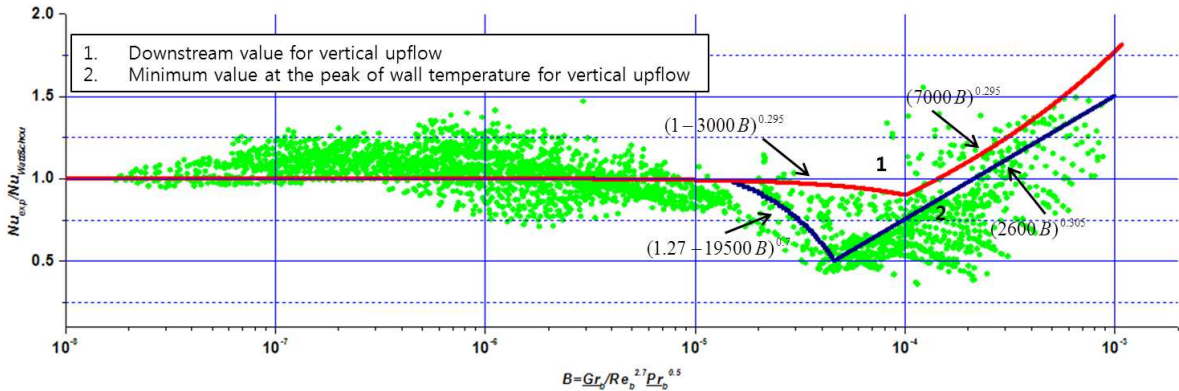


Fig. 8 Experimental Nusselt number normalized by the Watts correlation versus buoyancy parameter for upward flow

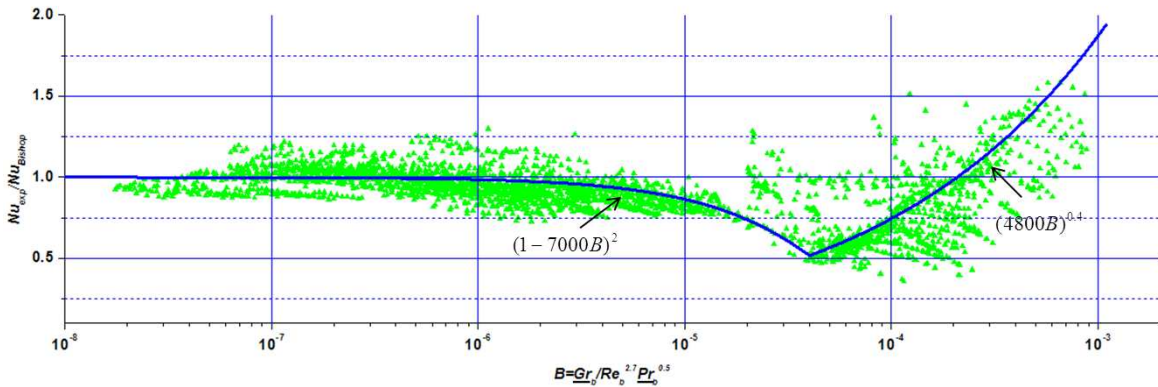


Fig. 9 Experimental Nusselt number normalized by the Bishop correlation versus buoyancy parameter for upward flow

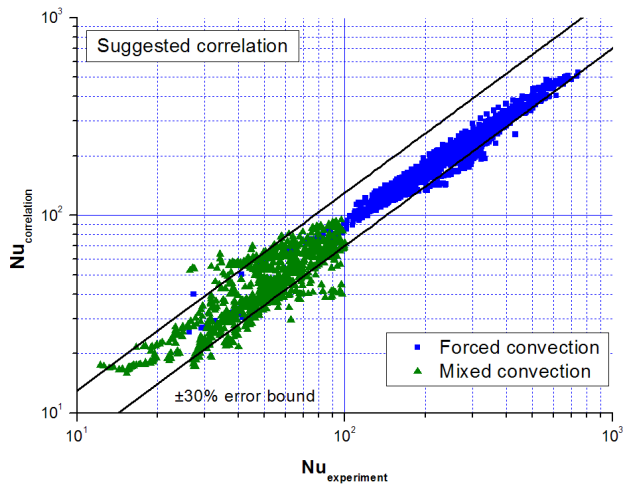


Fig. 10 Comparison of heat transfer coefficient from the experiment with that from the Bishop correlations with Eqs. (8)

이 식을 Bishop 상관식에 추가한 결과 Fig. 10 에서 보는 바와 같이 강제대류 영역뿐만 아니라 혼합대류 영역에서도 제안식과 실험식을 비교했을 때 $\pm 30\%$ 오차 범위 안에 대부분 들어오는 것을 보이면서 Watts 와 Chou 가 제안한 정상 열전달과 열화 열전달을 구분하여 나타낸 식의 복잡성을 줄일 수 있었다. 실제로 본 실험의

결과를 확인하면 정상 열전달과 열화 열전달의 구역이 상당부분 겹치고 연속되기 때문에 따로 구분하여 식을 제안하는 것은 무의미하다고 본다.

3.6 열전달 열화현상 발생 조건

아임계압에서 일어나는 핵비등 문제만큼 위험한 현상은 아니지만, 열전달 열화현상이 일어나는 것은 초임계압수냉각로의 설계에 있어 가능한 한 배제해야 할 현상이다. 여기에서는 기존의 열전달 열화현상 발생 기준식을 본 실험에서 열전달 열화현상이 발생한 조건들과 비교해 보았다.

본 기준식들은 각각 Styrikovich 등⁽⁹⁾의 식 (9), Yamagata 등⁽¹⁰⁾의 식 (10), Kim 등⁽¹¹⁾의 식 (11) 그리고 Grabezhnaya 와 Kirillov⁽¹²⁾의 식 (12)를 비교하였다.

$$\frac{q''}{\rho w} \geq 0.6 \text{ kJ/kg} \quad (9)$$

$$q'' \geq 0.2(G)^{1.2} \quad (10)$$

$$q'' > 2 \times 10^{-4}(G)^2 \quad (11)$$

$$q'' > 0.6G \frac{M_{H_2O}}{M} \quad (12)$$

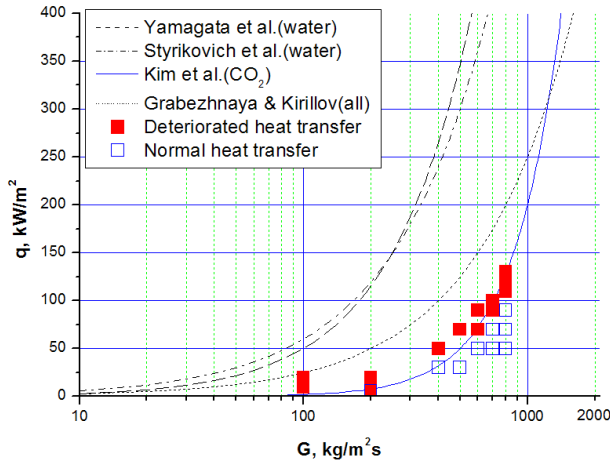


Fig. 11 Boundaries of deteriorated heat transfer

Fig. 11은 이 기준식들과 본 실험에서 일어난 열전달 열화현상을 비교한 것이다. Yamagata와 Styrikovich는 물에 의한 열화기준이기 때문에 CO₂를 작동 유체로 한 본 실험과는 상당히 차이가 나는 것은 당연하다고 볼 수 있다. 하지만 Grabezhnaya와 Kirillov가 제안한 식 (12)의 열화기준은 모든 유체에서 사용될 수 있다고 했으나, 본 실험에서 일어난 열전달 열화현상을 예측하지 못하였다. 그의 논문을 보면 G 가 상당히 큰 경우(5000 kg/m²s 이상)에서는 CO₂의 경우도 잘 예측하였으나, 5000 kg/m²s 이하에서는 정확성을 판단하기 어려웠다. 이에 반해 Kim 등이 CO₂를 이용한 실험결과를 바탕으로 제안한 열화기준식은 본 실험의 열전달 열화현상을 잘 예측하고 있다. 그러나 700 kg/m²s 이상에서는 정확도가 떨어짐을 알 수 있다.

4. 결론

초임계압수냉각로의 부수로 직경과 유사한 내경 4.57 mm 원형관을 이용하여 초임계압 CO₂ 열전달 실험을 상·하향유동 방향에서 수행하였다. 압력, 질량유속, 그리고 열유속에 따른 벽면온도를 측정하고, 질량유속과 열유속의 영향을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 질량유속이 증가할수록, 열유속이 감소할수록 열전달이 증가하였다.

(2) 열전달 열화현상이 발생하는 상향유동과 같은 조건의 하향유동에서는 열전달 열화현상이 생기지 않았다.

(3) 상·하향유동 각각 4200, 3050 개의 실험 데이터 중에서 기존의 상관식이 예측하지 못하는 열전달 열화현상이 일어나는 혼합대류 영역을 부력매계변수의 함수로 표시하고, 이를 Bishop 상관식과

결합하여 상향유동에 대한 새로운 열전달상관식을 제시하였다. 새로운 상관식은 실험결과를 $\pm 30\%$ 오차범위 안에서 예측하였다.

(4) 열전달 열화발생 조건에 대한 기존의 조건식들을 본 실험결과에 적용해 본 결과 Kim 등의 조건식이 가장 적합하였다.

후 기

본 연구에 재정적인 지원을 준 교육과학기술부, 한국과학재단과 실험장치를 제공해 준 한국원자력 연구원에 감사드린다.

참고문헌

- (1) Bae, Y.Y., Jang, J., Kim, H.Y., Yoon, H.Y., Kang, H.O. and Bae, K.M., 2007, "Research Activities on a Supercritical Pressure Water Reactor in Korea," *Nuclear Engineering & Technology*, Vol. 39, No. 4, pp. 273~186.
- (2) Kamei K., Yamaji A., Ishiwatari Y., Jie L. and Oka Y., 2005, "Fuel and Core Design of Super LWR with Stainless Steel Cladding," *Proc. ICAPP 05, Seoul, Korea, May 15-19*, Paper 5527.
- (3) Schulenberg, T. and Starflinger, J., 2008, "Three Pass Core Design Proposal for a High Performance Light Water Reactor," *Progress in Nuclear Energy*, Vol 50, pp. 526~531.
- (4) Incropera, F. P., Dweitt, D. P., Bergman, T. L. and Lavine, A. D., 2007, "Introduction to Heat Transfer," 5th Ed., John & Wiley & Sons.
- (5) Kurganov, V. A. and Kaptil'ny, A. G., 1992, "Velocity and Enthalpy Fields and Eddy Diffusivities in a Heated Supercritical Fluid Flow," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 5, pp. 465~478.
- (6) Bishop, A. A., Sandberg, R. O. and Tong, L. S., 1965, "Forced Convection Heat Transfer to Water at Near-Critical Temperature and Supercritical Pressures," *AIChE, I. Chemical Engineering Symposium Series*, No. 2, London, Institute of Chemical Engineers.
- (7) Watts, M. J. and Chou, C. T., 1982, "Mixed Convection Heat Transfer to Supercritical Pressure Water," *Proceedings of the 7th International Heat Transfer Conference*, Vol. 3, München, Germany, Paper 6-10, pp. 495~500.
- (8) Jackson, J. D. and Hall, W. B., 1979, "Influences of Buoyancy on Heat Transfer to Fluids Flowing in Vertical Tubes Under Turbulent Condition," *Turbulent Forced Convection in Channels and Bundles*, Vol.2, Hemisphere, pp. 613~640.
- (9) Styrikovich, M. A., Margulova, T. Kh. and Miropol'skii, Z. L., 1967, "Current Problems in

- Designing Supercritical Boilers,” *Teploenergetika*, No. 6, pp. 4~7.
- (10) Yamagata, K., Nishikawa, K., Fujii, T. and Yoshida, S., 1972, “Forced Convection Heat Transfer to Supercritical Water Flowing in Tubes,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 15, pp. 2575~2593.
- (11) Kim, J. K., Jeon, H. K., Yoo, J. Y. and Lee J. S., 2005b, “Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of Turbulent Supercritical Flow in Vertical Circular/Non-Circular Tubes,” *Proceedings of the International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-11)*, October 2-6, 10, Avignon, France.
- (12) Grabezhnaya, V. A. and Kirillov, P. L., 2006, “Heat Transfer under Supercritical Pressures and Heat Transfer Deterioration Boundaries,” *Thermal Engineering*, Vol. 53, No. 4, pp. 296~301.