

수직환형유로에서 상향유동 초임계압 CO₂의 열전달 특성

강덕지[†] · 김 신* · 김환열** · 배윤영**

Heat Transfer Characteristics for an Upward Flowing Supercritical Pressure CO₂ in a Vertical Annulus Passage

Deog Ji Kang, Sin Kim, Hwan Yeol Kim, and Yoon Yeong Bae

Key Words : Supercritical water-cooled reactor(초임계압수냉각로), heat transfer deterioration(열전달열화), annulus passage(환형유로)

Abstract

Heat transfer experiments at a vertical annulus passage were carried out in the SPHINX(Supercritical Pressure Heat Transfer Investigation for NeXt Generation) to investigate the heat transfer behaviors of supercritical CO₂. The collected test data are to be used for the reactor core design of the SCWR(SuperCritical Water-cooled Reactor). The mass flux was in the range of 400 ~1200 kg/m²s and the heat flux was chosen up to 150 kW/m². The selected pressures were 7.75 and 8.12 MPa. The heat transfer data were analyzed and compared with the previous tube test data. The test results showed that the heat transfer characteristics were similar to those of the tube in case of a normal heat transfer mode and degree of heat transfer deterioration became smaller than that in the tube. Comparison of the experimental heat transfer coefficients with the predicted ones by the existing correlations showed that there was not a distinct difference between the correlations.

기호설명

D	: 직경 (m)
x	: 길이 (m)
P	: 압력 (Pa)
T	: 온도 (°C)
G	: 질량유속 (kg/m ² sec)
q''	: 열유속(kW/m ²)
ρ	: 밀도(kg/m ³)
k	: 열전도율(kW/m K)
C_p	: 정압비열 (kJ/kg K)
h	: 열전달계수(kW/m ² K)
Re	: 레이놀드 수(Reynolds number)
Pr	: 프란틀 수(Prandtl number)
Nu	: 누셀 수(Nusselt number)

Gr : 그라소프 수(Grashof number)

Subscript

w	: 벽면
b	: 벌크
$crit, pc$: 임계, 유사임계

1. 서론

초임계압수냉각로(SCWR : SuperCritical Water-cooled Reactor)는 경제성 있고 안전한 새로운 개념의 원자로를 개발하고자 추진중인 Generation IV (Gen-IV) 프로젝트에서 선정된 노형 중의 하나이며, 기존의 경수로 기술의 바탕에 화력 발전소의 초임계압 설계기술을 접목하고 재료, 수화학 및 안전 등의 몇 가지 분야에 대한 연구가 수행된다면 국내에 확보된 기술을 바탕으로 충분히 설계할 수 있는 개념으로 알려져 있다. 이들 연구 분야 중에, 초임계 상태에서의 열전달 실험은 원자로 노심에서의 열수력 현상을 정확히 예측하기 위해

[†] 제주대학교 에너지공학과
E-mail : kangdj@cheju.ac.kr
TEL : (064)754-3647 FAX : (064)757-9276

* 제주대학교 에너지공학과

** 한국원자력연구원

필요한 연구분야이다.

초임계 상태의 유체가 아임계 상태일때와 크게 다른 점은 유사임계온도 근처에서 물성이 급격하게 변한다는 점이다. 이러한 물성의 변화 때문에 열전달 효율 또한 유동조건에 따라서 상당히 큰 변화를 보이게 된다. 초임계압수냉각로에서는 물이 냉각재로서 유사임계온도로 원자로 내부를 통과하기 때문에 그 과정에서 일어나는 열전달 특성에 대한 정확한 정보를 가지고 이를 원자로 설계시 고려하여야 한다. 이러한 열전달 특성을 연구하기 위한 실험설비인 SPHINX(Supercritical Pressure Heat Transfer Investigation for NeXt Generation)를 한국원자력연구소(KAERI)에 설치하였다. 작동유체로는 물 대신 CO₂가 사용되었다. 이는 CO₂가 물보다 임계압력과 온도가 낮아 실험 조건 유지가 쉽고, 이 두 유체의 유사임계온도 근처에서의 열전달 특성이 비슷하기 때문이다.

본 연구에서는 수직으로 설치된 환형유로봉을 상향으로 유동하는 초임계압 상태의 CO₂에 대한 열전달 특성을 파악하기 위한 실험이 수행되었다. 실험은 주어진 시스템 압력에 따라 질량유속과 열유속을 변화시켜가며 수행하였다. 열전달 특성에 대한 실험 결과를 분석하였고, 이 결과를 이전에 수행된 직경이 4.4mm 인 튜브로부터 얻은 실험결과[1]와 비교하였다. 그리고 측정된 열전달계수를 기존의 상관식과 비교하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 실험설비인 SPHINX의 개략도이다. 설비의 설계압력은 12.0MPa이다. 루프 내의 CO₂는 공기작동 압축기를 통하여 원하는 압력까지 가압이 된다. 열교환기 출구에서 실험봉 입구까지 CO₂는 액체와 유사한 상태를 유지하고 실험봉의 가열영역을 지나면서 기체와 유사한 상태로 변하게 된다. 그 후로부터 초임계상태의 CO₂는 열교환기 입구까지 기체와 유사한 상태를 유지한다. 가열된 CO₂는 나선형 열교환기에 의해 냉각이 된다. 필요유량에 따른 CO₂의 순환을 위하여 두 대의 기어식 순환 펌프를 설치하였다. 펌프 출구에 설치된 질소 충전식 어큐뮬레이터는 루프 내 압력 섭동을 완충시키는 역할을 한다. 실험봉으로 들어가는 CO₂의 온도는 예열기에 의해 일정한 온도로 유지되며 실험봉에 연결된 교류전력공급장치를 통해 일정한 열유속으로 가열된다. 예열기와 실험봉 사이에는 코리올리식 질량유량계를 설치하였다.

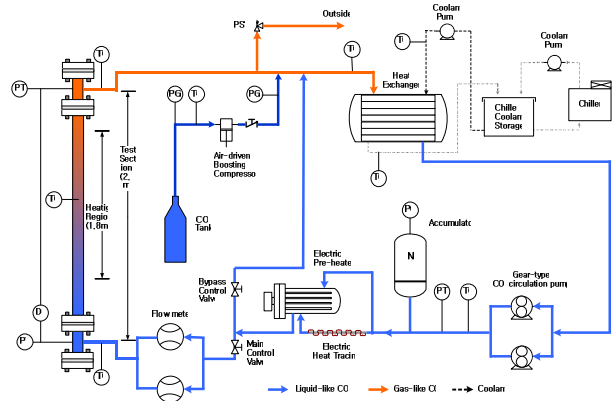


Fig. 1 Schematic diagram of SPHINX

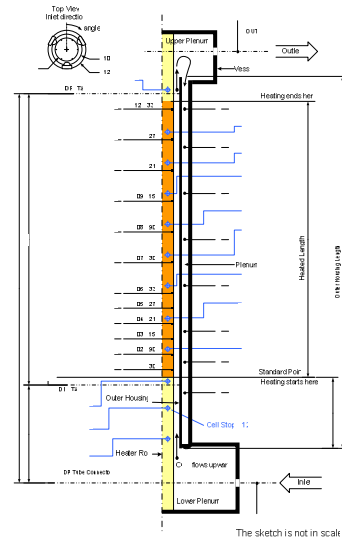


Fig. 2 Sketch of the annular test section

펌프에 설치된 주 밸브와 우회 밸브, 그리고 펌프의 속도를 제어하여 질량유속을 조절한다.

2.2 실험봉

Fig. 2는 가열봉에 의해 내부가 가열되는 실험봉인 환형유로봉을 표시한 것이다. 작동유체인 CO₂는 실험봉 내부를 따라 상향 유동한다. 가열되지 않는 바깥쪽 관은 직경이 10.0mm이고 내부의 가열봉은 8.0mm이다. 실험봉에서 총 가열되는 길이는 1800mm이다. 표면 온도 측정을 위해 가열봉 하부에는 100mm, 상부에는 200mm 간격으로 각각 6개씩, 총 12개의 열전대를 가열봉 표면에 설치하였다. 가열봉의 비가열부분으로 인한 영향을 피하기 위하여 가열이 시작되고 끝나는 부분으로부터 50mm 씩 떨어진 위치에 첫번째 열전대와 열두번째 열전대를 설치하였다. 가열주위로 계산되는 실험봉의 열등가직경은 4.5mm로 이전 실험에 사용된 단일관의 직경(4.4mm)과 거의 같다.

Table 1 Test conditions

Condition	Unit	Value
Inlet pressure	MPa	7.75, 8.12
Inlet temperature	°C	(1.05, 1.1 P _{crit} respectively) 0 ~ 37 °C
Mass flux	Kg/m ² sec	400 ~ 1200
Heat flux	kW/m ²	Up to 150

2.3 실험조건

실험은 정해진 운전압력에 따라 질량유속, 열유속, 그리고 유체의 입구온도를 변경하며 수행하였다. CO₂의 임계압력은 7.38MPa 이고 임계온도는 30.98°C이다. 임계압력의 각각 1.05, 1.1 배인 7.75MPa 과 8.12MPa 을 운전압력으로 정하였다. 이 각각의 운전압력에 따라 질량유속과 열유속을 조절하며 실험을 수행하였다. 그리고 입구온도를 조절하여 실험결과 분석에 필요한 모든 벌크 엔탈피 영역에 대한 실험 데이터를 얻을 수 있도록 하였다. Table 1은 실험조건에 대해 정리한 것이다.

3. 결과 및 토의

3.1 벽면온도 및 열전달계수

벽면온도는 가열봉 표면에 설치된 열전대를 통하여 측정된다. 열전달계수는 측정된 벽면온도, 계산된 CO₂의 벌크온도, 그리고 가열봉에 가해지는 열유속에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$h = \frac{q''}{(T_w - T_b)} \quad (1)$$

Fig. 3은 입구압력이 임계압력의 1.1 배인 8.12MPa에 대해 벽면온도와 열전달계수를 표시한 그래프이다. 그래프에서 검은 실선은 CO₂의 벌크온도와 Dittus-Boelter 상관식으로부터 구한 열전달계수를 나타낸다. 그리고 회색 실선은 유사임계온도와 그 온도에서의 비엔탈피를 나타낸다.

질량유속이 같은 조건에서, 가열봉의 벽면온도는 열유속이 증가함에 따라 더 높은 수치를 보였다. 그리고 열유속이 증가함에 따라 높아진 벽면온도로 인해 열전달계수는 낮아짐을 확인하였다. 질량유속이 400kg/m²s, 열유속이 30kW/m²일 때 벽면온도는 CO₂의 벌크온도와 평행한 분포를 갖고 열전달계수는 유사임계엔탈피보다 약간 낮은 영역에서 최대값을 갖는다. 그러나 열유속이 증가함에 따라, 열유속이 50kW/m² 이상인 조건에서는

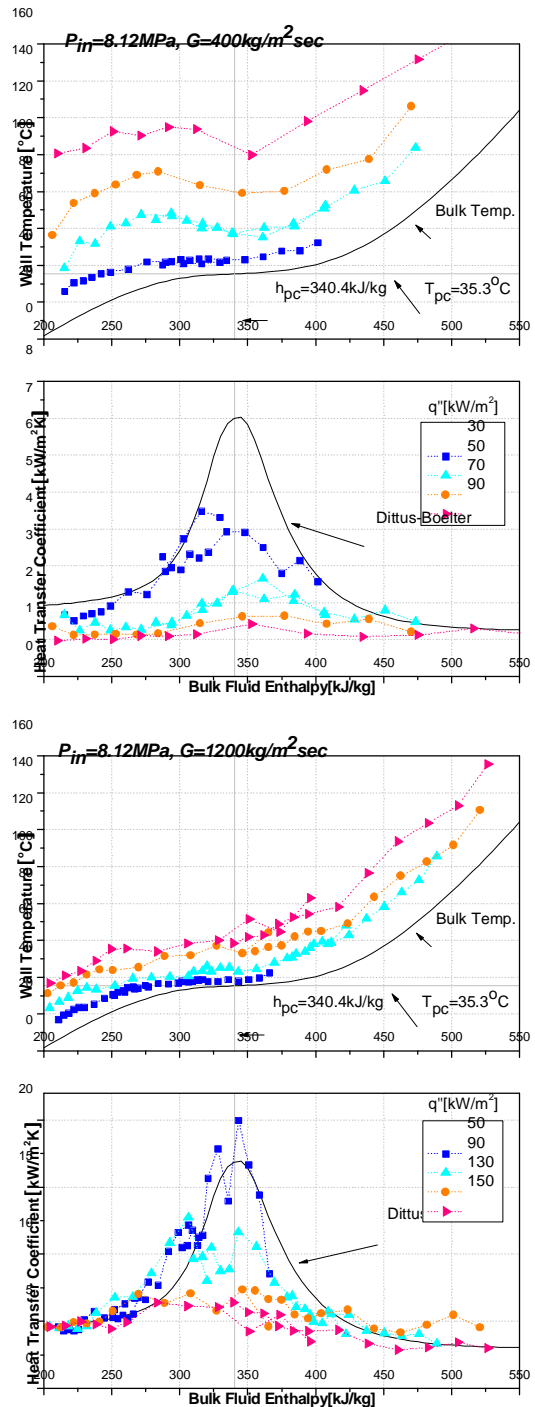


Fig. 3 Wall temperature and heat transfer coefficient at an inlet pressure of 8.12MPa

벽면온도가 유사임계엔탈피보다 낮은 영역에서 증가하고 이로 인해 열전달계수는 낮아진다.

유사임계온도에서 먼 영역에서는 단상강제대류에서의 Dittus-Boelter 상관식(식(2))으로부터 구한 열전달계수값이 실험값과 비슷하지만, 유사임계온도 부근에서는 잘 맞지 않는 것을 확인하였다.

입구압력이 8.12MPa로 실험한 결과에서 확인한

열전달 특성들은 임계압력의 1.05 배인 7.75MPa 실험결과에서도 확인할 수 있었다.

$$Nu = \frac{hD}{k_b} = 0.023 Re_b^{0.8} Pr_b^{0.4} \quad (2)$$

3.2 단일관 실험결과와의 비교 환형유로봉 실험에 앞서 수직으로 설치된 단일

관에 대한 실험이 수행되었다. 실험에 사용된 단일관의 내부직경은 4.4mm 로 환형유로봉의 열등가직경인 4.5mm 와 거의 유사하다.

입구압력은 8.12MPa 이고 질량유속이 400kg/m²s 과 1200kg/m²s 에 대한 단일관과 환형유로봉의 벽면온도와 열전달계수를 각각 Fig. 4 와 Fig. 5 에 나타내었다. 질량유속이 400kg/m²s 인 조건에서, 열유속이 30kW/m² 에서는 열전달 열화현상이 나타나

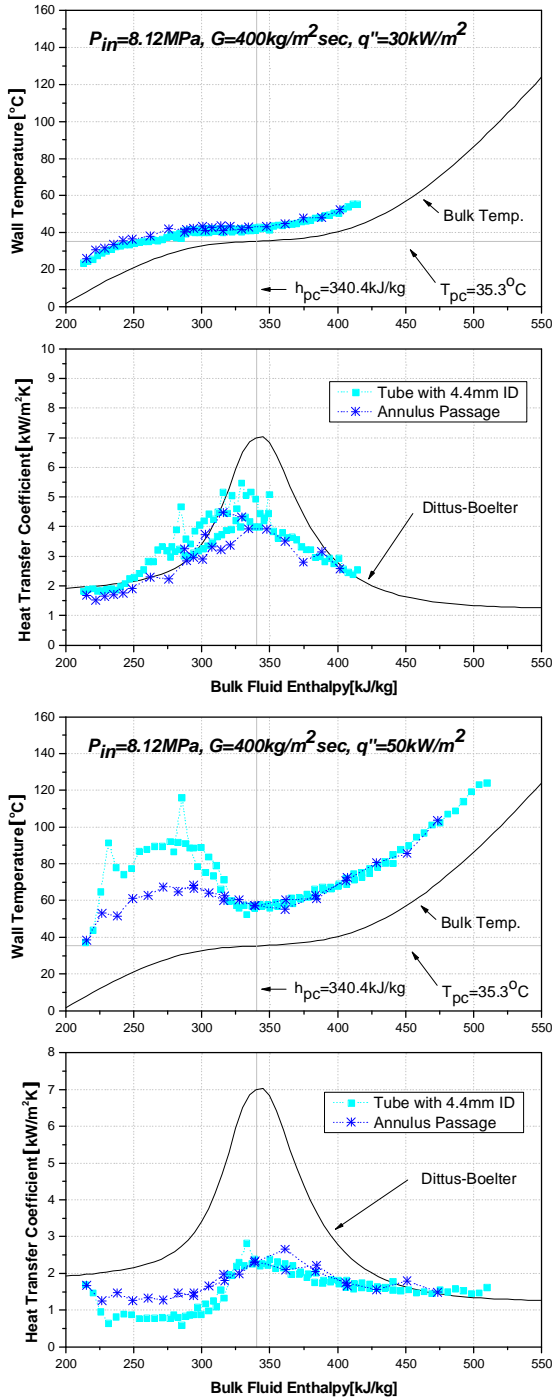


Fig. 4 Comparison with tube test at an inlet pressure of 8.12MPa and mass flux of 400kg/m²s

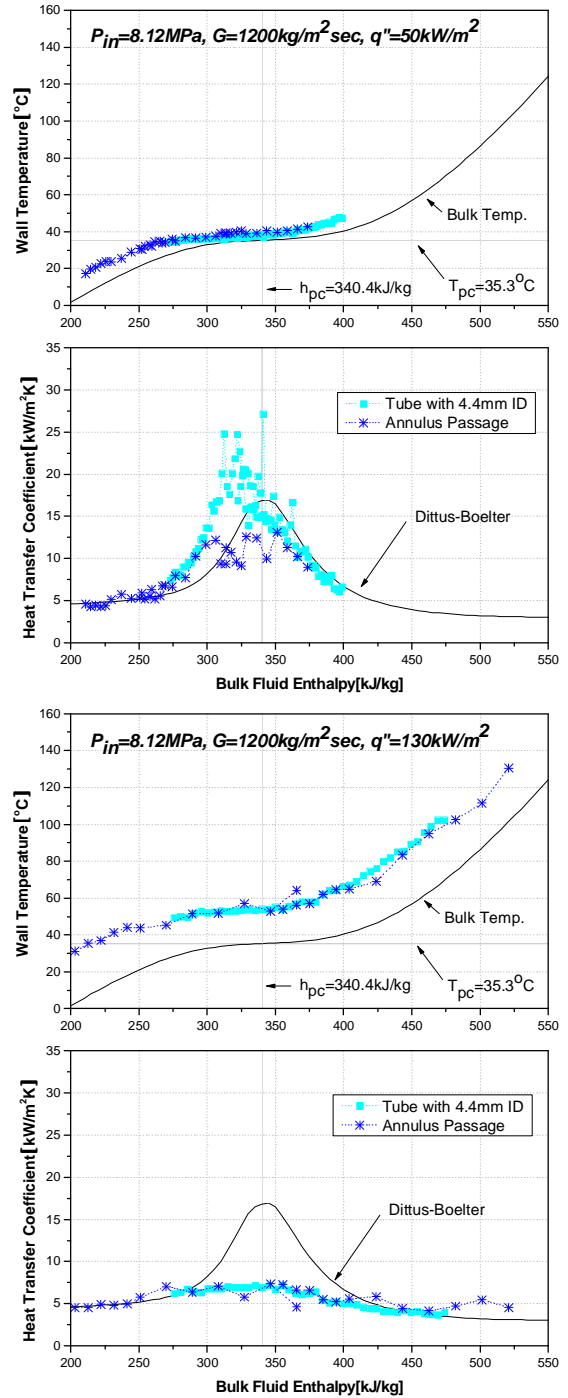


Fig. 5 Comparison with tube test at an inlet pressure of 8.12MPa and mass flux of 1200kg/m²s

지 않았지만 열유속이 50kW/m² 일 때는 열화현상이 나타났다. 그리고 질량유속이 1200kg/m²s 인 조건에서는 뚜렷한 열전달 열화현상은 관찰되지 않았다. 위의 실험 결과를 비교하였을 때, 열전달 열화현상이 일어나지 않는 조건에서는 벽면온도와 열전달계수가 비슷하였지만, 열화현상이 일어나는 조건에서는 차이를 보임을 확인하였다. 열전달 열화현상이 일어나는 조건에서, 환형유로봉에서의 벽면온도는 단일관에서보다 덜 올라가는 것을 확인하였고, 그로 인해 열전달계수는 단일관에서 보다 더 높은 수치를 보였다. 이를 통해 볼 때 환형유로봉에서의 열전달 열화 현상은 단일관에서 보다 약하게 나타난다고 생각할 수 있다.

위와 같은 현상은 입구압력을 7.75MPa 로 실험한 결과의 비교에서도 확인되었다.

열전달 열화현상은 일반적으로 낮은 질량유속에서 높은 열유속이 가해지는 조건에서 일어난다고 알려져 있다. 이러한 조건에서 유동 내부의 밀도차로 인한 부력의 효과로 벽면 가까이에서 속도가 최대값을 가지게 되면서 유동의 속도분포는 ‘M’형을 가지게 된다. 유동속도의 최대값을 갖는 벽면 근처에서는 속도변화가 0 이 되고 따라서 전단응력 또한 0 이 되면서 모멘텀이 잘 전달되지 않아 열전달 또한 제대로 이루어지지 않기 때문에 벽면 온도가 올라가게 되고 열전달계수값은 낮아지게 된다[10].

환형유로봉은 열등가직경이 단일관과 비슷하나 CO₂ 가 흐르는 간격이 1.0mm 로 단일관과 다른 형태의 유로를 가지고 있다. 그렇기 때문에 위에서 설명한 열전달 열화현상이 단일관에서의와는 다른 방법으로 이루어지고 열전달 특성도 다르게 나타나는 것으로 보인다.

3.3 기존의 상관식들과 열전달계수 비교

초임계압 물과 CO₂ 에 대한 열전달 실험은 많이 수행되어왔다. 이들 실험으로부터 얻은 상관식들과 환형유로봉에서의 실험결과를 비교하였다. Table 2 에 실험값과의 비교에 사용된 상관식들을 정리하였고, 입구압력 7.75MPa 과 8.12MPa 에 대한 열전달계수의 실험값과 상관식으로부터 얻은 예측값을 Fig. 6 에 나타내었다. 질량유속 400kg/m²s 와 1200kg/m²s 에서, 열전달 열화가 일어나지 않는 열유속 조건의 결과만을 가지고 비교를 하였다.

Dittus-Boelter 상관식은 열전달계수를 예측함에 있어 실험값과 잘 맞지 않는 것으로 나타났다. 다른 4 개의 상관식들은 8.12MPa 에 대해서는 대부분의 데이터가 20% 오차 내에 분포하는 것을 확

Table 2. Compared correlations

Dittus-Boelter[4]
$Nu_b = 0.023Re_b^{0.8}Pr_b^{0.4}$
Jackson[5]
$Nu_b = 0.0183Re_b^{0.82}Pr_b^{0.5} \left(\frac{\rho_w}{\rho_b} \right)^{0.3} \left(\frac{c_p}{c_{pb}} \right)^n$
Jackson and Fewster[6]
$Nu_b = 0.0183Re_b^{0.82}Pr_b^{0.5} \left(\frac{\rho_w}{\rho_b} \right)^{0.3}$
Bishop et al.[7]
$Nu_b = 0.0069Re_b^{0.9}Pr_b^{0.66} \left(\frac{\rho_w}{\rho_b} \right)^{0.43} (1 + 2.4D/x)$
Watts and Chou[8]
$Nu_b = 0.021 Re_b^{0.8}Pr_b^{0.55} \left(\frac{\rho_w}{\rho_b} \right)^{0.35} \cdot f(K)$
where $K = Gr_m / (Re_b^{2.7}Pr_b^{0.5})$
$f(K)$ is $(1 - 3000K)^{0.295}$ for $K \leq 1.0 \times 10^{-4}$
and $(7000K)^{0.295}$ for $K > 1.0 \times 10^{-4}$

인하였다. 그러나 이들 중 특정 상관식이 열전달계수를 더 잘 예측한다고 판단하기는 어려운 것으로 나타났다. 입구압력이 7.75MPa 인 실험에서의 데이터가 8.12MPa 인 실험의 데이터보다 더 넓은 범위에 분포되어 있는 것으로 보아 압력이 임계압력과 가까울수록 열전달계수를 예측하기는 더 어려운 것으로 나타났다.

4. 결론

환형유로봉에서 수직상향으로 흐르는 초임계압상태의 CO₂ 의 열전달 특성을 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 압력, 질량유속, 그리고 열유속에 따른 벽면온도와 열전달계수를 측정하였다. 측정결과를 이전에 수행되었던 단일관 실험결과와 비교하였고, 기존의 상관식들로부터 구한 예측값과 비교를 하였다.

질량유속이 같은 조건에서, 열유속이 증가함에 따라 벽면온도는 증가하였고, 이로 인해 열전달계수는 낮아짐을 확인하였다. 기존의 실험결과들과 마찬가지로 환형유로봉 실험에서도 열전달 열화현상은 낮은 질량유속, 높은 열유속에서 관찰이 되었다.

일반적인 열전달 특성은 단일관 실험결과와 같았으나 같은 열등가직경을 갖는 환형유로봉 실험

에서의 열전달 열화가 단일관에서도보다 약하게 일어난 것을 확인하였다. 이는 같은 열등가직경을 갖지만 단일관과는 다른 구조의 유로로 인해 열전달 열화현상이 조금은 다른 방법으로 이루어지기 때문이라고 보인다.

기존의 상관식들과 열전달계수값을 비교하였으나 특정 상관식이 우수하다고 판별하기는 어려웠다. 그러므로 열전달계수를 정확히 예측하기 위해서는 이 실험에 맞는 새로운 상관식이 필요할 것으로 보인다.

참고문헌

- (1) H. Kim, Y.Y Bae, H.Y. Kim, J.H Song, B.H. Cho, 2006, "Experimental Investigation on the Heat Transfer Characteristics in a Vertical Upward Flow of Supercritical CO₂," *Proceedings of ICAPP'06*, Paper 6123, 372-381, Reno, NV USA, June 4-8.
- (2) H.Y. Kim, H. Kim, D.J. Kang, J.H. Song, Y.Y. Bae, 2007, "Heat Transfer Experiments for an Upward Flow of Supercritical Pressure CO₂ in a Narrow Annulus," *3rd Int. Symposium on SCWR-Design and Technology*, Shanghai, China, March 12-15.
- (3) H. Kim, H.Y. Kim, J.H Song, Y.Y Bae, 2005, "Heat Transfer Coefficient in Vertical Upward Flow of Supercritical Pressure CO₂," *Proceedings of KSME Spring Meeting*, Yong Pyong, Korea, November 2-4.
- (4) F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine, 2007, *Introduction to Heat Transfer, 5th Ed.*, p.484, John Wiley & Sons.
- (5) J.D. Jackson and W.B. Hall, 1979, "Forced Convection Heat Transfer to Fluids at Supercritical Pressure," in *Turbulent Forced Convection in Channels and Bundles – Theory and Applications to Heat Exchangers and Nuclear Reactors*, Vol.2, pp.563-612.
- (6) J. D. Jackson, J. Fewster, 1975, "Forced convection data for supercritical pressure fluids," HTFS 21540.
- (7) A. A. Bishop, R. O. Sandberg, L.S. Tong, 1964, "Forced convection heat transfer to water at near-critical temperatures and supercritical pressures," *Report WCAP-2056*, Part IV, Pittsburgh, USA, November.
- (8) M. J. Watts and C. T. Chou, 1982, "Mixed Convection Heat Transfer to Supercritical Pressure Water," *Proceedings of 7th Int. Heat Transfer Conference*, München, Vol.3, pp.495-500.
- (9) H. Komita, S. Morooka, S. Yoshida, H. Mori, 2003, "Study on the heat transfer to the supercritical pressure fluid for Supercritical Water Cooled Power Reactor Development," *10th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics(NURETH-10)*, Seoul, Korea, October 5-9.

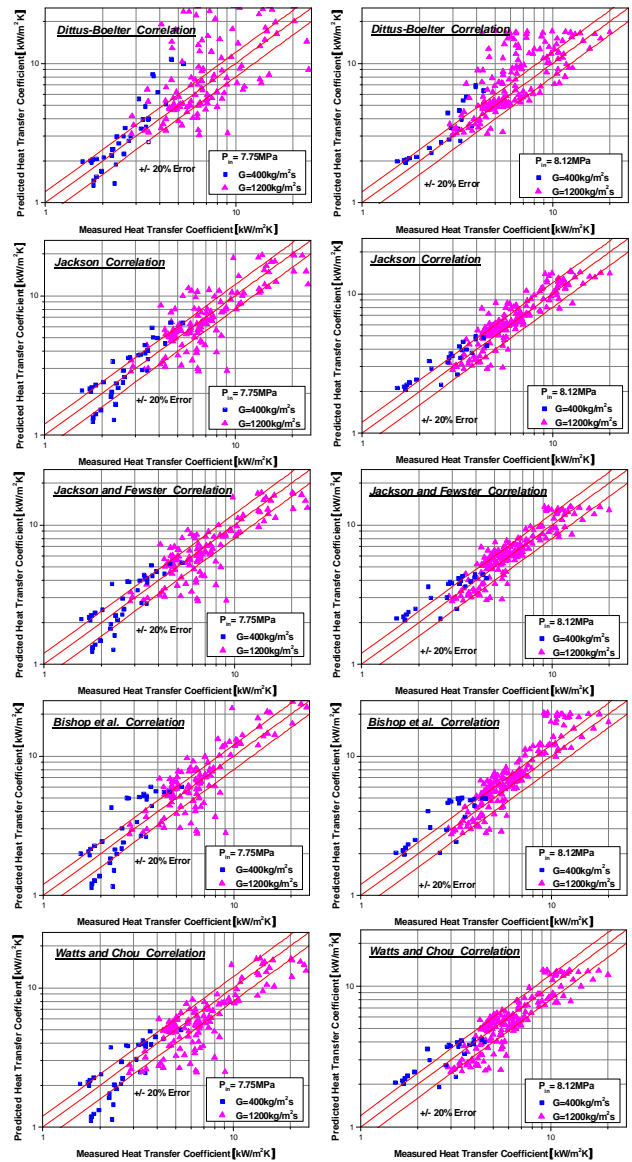


Fig. 6 Comparison of heat transfer coefficient from the experiment with that from the correlations

- (10) V.A. Grabezhnaya, P.L. Kirillov, 2006, "Heat Transfer under Supercritical Pressures and Heat Transfer Deterioration Boundaries," *Thermal Engineering*, Vol.53, No.4, pp.296-301.
- (11) V. A. Kurganov and A. G. Kaptilnyi, 1993, "Flow structure and turbulent transport of a supercritical pressure fluid in a vertical heated tube under the conditions of mixed convection. Experimental data," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.36, No.13, pp.3383-3392.