Proceedings of
The 5th National Congress on Fluids Engineering
March 26-28, 2008, Jeju, Korea

원형관에서 수직상향유동 초임계압 CO_2의 대류열전달 상관식 개발

강덕지* · 김환열** · 배윤영***

Development of a correlation on the convective heat transfer of supercritical pressure CO_2 vertically upward flowing in a circular tube

Deog Ji Kang* and Hwan Yeol Kim** and Yun Young Bae***

Keywords : *Supercritical CO_2, Convective heat transfer correlation, Circular tube*

Abstract

In a SCWR (SuperCritical pressure Water cooled Reactor), the coolant temperature initially at below the pseudo-critical temperature at the bottom of a reactor core increases as the coolant flows upward through the sub-channels of the fuel assemblies, and it finally becomes higher than the pseudo-critical temperature when it leaves the reactor core. At certain conditions, heat transfer deterioration occurs near the pseudo-critical temperature and it may cause a drastic rise of the fuel surface temperature resulting a fuel failure. Therefore, an accurate estimation of the heat transfer coefficient is very important for the thermal-hydraulic design of a reactor core. An experiment on heat transfer to the vertically upward flowing CO_2 at a supercritical pressure in a circular tube were performed at KAERI. The internal diameter of the test section is 6.32 mm, which corresponds to the hydraulic diameter of a sub-channel in the conceptional design proposed by KAERI. The test range of the mass flux is 285 to 1200 kg/m^{2}s and the maximum heat flux is 170 kW/m^2. The inlet pressure is maintained at 8.12 MPa, which is 1.1 times the critical pressure. A new correlation, which covers both the normal and deterioration heat transfer regimes was proposed and compared with the estimations by exiting correlations.

1. 서 론

초임계압에서는 유사임계온도 근처에서 비열, 밀도, 동점성계수, 열전도계수 등, 유체의 물성이 급격히 변하므로 아임계압에서의 열전달과는 크게 다른 양상을 보인다. 유량과 열속의 조건에 따라 열전달 효율이 급격히 떨어지는 열전달 열화(heat transfer deterioration)가 발생할 수 있다. 이러한 차이로 초임계압에서의 열전달계수는 아임계압에서 사용하는 상관식으로는 예측이 불가능하며, 급격한 물성 변화 및 열전달 열화에 대한 이론적 해석의 어려움으로 인해 초임계압에서의 열전달계수를 계산하는데는 실험에 근거하는 경험식이 사용되고 있다. 초임계압에서의 열전달을 예측하는 상관식을 개발하기 위한 연구는 1950년대부터 주로 초임계압 화력발전소에 응용하기 위해 시작되었다. 그러나 이 상관식들은 주로 내경 10 mm가 넘는 튜브에 대한 실험을 바탕으로 개발된 것으로 초임계압수냉각로 노심의 부수로 수력직경으로 제시되고 있는 4 - 6 mm 정도의 부수로에 직접 적용할 수 있는 지는 의문시된다. 또한 여러 연구자들에 의해 다양한 유체 및 직경에 대한 실험이 수행되어 여러 가지의 열전달 상관식이 제시되었으나, 실험조건에 따른 편차가 매우 커서 학계에서 널리 인정되는 상관식은 없는 실정이다. 따라서 초임계압수냉각로의 안전을 확보하기 위해서는 새로이 제시되는 노심 개념의 기하학적 구조와 운전조건에서 적용할 수 있는 독자적인 열전달 상관식의 개발이 요구된다.

한국원자력연구원에서 개념적으로 제시한 1400 MWe 출력의 초임계압수냉각로의 노심에서 부수로의 수력직경은 약 6.5 mm 이다. 따라서 이와 유사한 직경을 가지며 시장에서 구입할 수 있는 내경이 6.32 mm인 원형관에 대하여 한국원자력연구원 내에 설치된 CO_2를 작동유체로 하는 초임계압 유체 열전달 실험장치인 SPHINX(Supercritical Pressure Heat Transfer Investigation for NeXt Generation)에서 다양한 범위의 질량유속 및 열유속 조건에서 실험을 수행하였다. 실험결과로부터 열전달계수를 계산하였고, 이를 기존의 열전달 상관식과 비교하였다. 그리고 실험데이터를 토대로 기존 상관식에 부력매개변수의 함수를 추가하여 정상 열전달 및 열화 열전달의 예측이 가능한 상관식을 제시하고자 하였다.

2. 실험 및 결과

2.1 실험장치 및 실험관

초임계압수냉각로에서는 냉각재로 물이 사용되나 물의 임계점이 고온, 고압(22.1MPa, 374℃)이므로 실험실 수준에서 초임계 조건을 유지하기가 쉽지 않기 때문에 대체유체로서 CO_2를 사용하였다. 이는 CO_2의 임계압력과 임계온도가 물에 비해 매우 낮고 초임계상태에서의 물성변화가 물과 매우 흡사하기 때문이다. 그림 1은 실험장치의 개략도이다. 실험장치의 설계 압력은 12.0

* 한국원자력연구원, kangdj@kaeri.re.kr
** 한국원자력연구원, hykim1@kaeri.re.kr
*** 한국원자력연구원, yybae@kaeri.re.kr

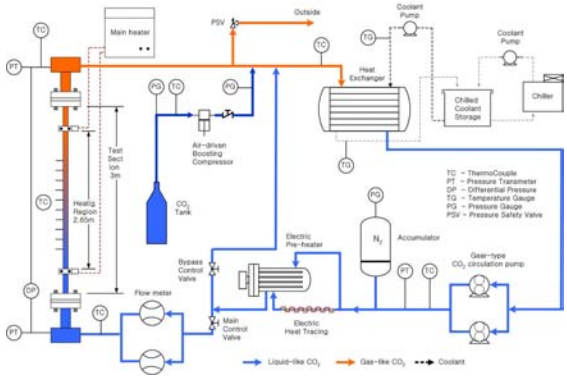

Fig. 1 Schematic of the SPHINX.

MPa이고 설계온도는 80℃이다. 작동유체인 CO_2는 공기작동 압축기에 의해 루프 내에 충진 및 가압이 되고, 기어식 순환펌프에 의해 루프 내를 순환한다. 열교환기 출구에서 실험부의 입구까지 CO_2는 액체와 유사한 초임계 상태를 유지하게 되고 실험부 전단에 설치된 예열기에 의하여 원하는 입구온도까지 예열된 후 실험부에 연결된 직류전력공급장치에 의해 일정한 열유속으로 가열된다. 실험부를 거치면서 가열된 CO_2는 기체와 유사한 초임계 상태가 되며, 열교환기를 통과하면서 온도가 떨어져 다시 액체와 유사한 초임계 상태가 되어 펌프로 흘러 들어가면서 루프 내를 순환한다.

실험에 사용된 원형관은 내경이 6.32 mm, 두께가 1.6 mm, 길이는 3 m이며 재질은 Inconel 625이다. 원형관의 외벽온도를 측정하기 위하여 총 41개의 접착식 K형 열전대가 하부 플랜지로부터 700 mm인 지점부터 50 mm 간격으로 부착되었다. 유동이 완전히 발달된 난류 조건이 형성된 이후부터의 열전달에 대한 정보를 얻기 위해 직류공급단자는 가열이 시작되는 지점부터 첫 번째 열전대까지의 길이가 500 mm가 되도록 설치하였다.

2.2 실험조건

운전압력은 임계압력의 1.1배에 해당하는 압력으로 정하였으며, 주어진 압력에서 질량유속과 열유속을 변경하며 실험을 수행하였다. 실험부로 들어가는 CO_2의 입구온도는 우선 낮은 온도로 설정하여 실험을 한 후, 이 때 실험부 출구의 벌크온도 이후의 범위를 포함할 수 있도록 입구온도를 올려 다시 실험을 하였다. 이런 식으로 입구온도를 달리하며 각 실험조건에서 원하는 엔탈피 영역의 모든 외벽온도를 얻고자 하였다. 질량유속 및 열유속 등의 실험조건을 표 1에 나타내었다.

2.3 기존상관식과의 비교

초임계압에서의 상관식은 일반적인 단상유동 상관식에 물성의 급격한 변화를 고려하기 위하여 밀도비, 비열비와 같은 항이 추가된 형태를 지닌다. 그러나 아직까지 초임계상태의 열전달,

Table 1 Test conditions.

Condition	Unit	Value
Inlet pressure	MPa	8.12(1.1P_{cr})
Inlet temperature	℃	5 - 37
Mass flux	kg/m^{2}sec	285,400,500,600,750,854, 1000,1200
Heat flux	kW/m^2	Up to 170

특히 열전달열화와 같은 현상에 대한 이론적인 분석이 만족스럽게 이루어지지 않아 대부분의 상관식은 실험결과에 근거한 경험식의 형태로 제시되었다. 본 절에서는 기존의 연구자들이 제시한 상관식들에 본 실험의 수행 조건을 대입하여 계산한 결과와 실험데이터를 비교하였다. 표 2는 비교에 사용된 상관식들을 정리한 것이다.

실험결과는 무차원수인 누셀수를 가지고 비교하였으며, 사용된 실험데이터의 수는 총 3977개이다. 실험으로부터 계산한 누셀수와 각 상관식으로부터 계산한 누셀수의 비교로부터 구한 평균오차, 표준편차, 그리고 10%, 20% 및 30% 오차범위 내에 분포하는 데이터 수를 표 3에 나타내었다. 전체적으로 표준편차가 크고 오차범위를 벗어난 데이터가 많음을 알 수 있는데, 이는 비교에 사용된 상관식들이 열전달열화현상을 고려하지 않은 상관식들이기 때문이며, 또한 질량유속이 큰 조건이면서 열유속이 낮은 조건에서는 벌크온도와 벽면온도의 차가 크지 않아, 이러한 조건에서의 실험데이터로부터 생긴 오차 때문이라고 판단된다. 비교에 사용된 상관식들 중에서 Bishop 등이 제시한 상관식이 열전달계수를 가장 잘 예측하는 것으로 나타났다.

2.4 상관식의 개발

앞서 비교에 사용된 상관식들은 열화가 일어나는 조건을 고려하지 않았으므로, 실험데이터와 상당한 편차를 보였다. 따라서 열전달 열화가 일어나는 조건의 실험결과까지 하나의 상관식으로 표현하기 위하여 기존의 상관식에 부력 매개변수라는 새로운 인자를 도입하였다. Jakcson과 Hall[2]은 온도에 따라 밀도가 급격히 변하는 유체에 대하여 부력으로 인한 전단응력의 감소 정도를 식 (1)과 같이 무차원수로 표현하였는데, 여기서 점성비와 밀도비의 곱은 대부분의 실험조건에서 거의 1에 가깝기 때문에 생략하면, 그라쇼프수를 레이놀즈수로 나눈 항만이 부력에 의해 전단응력이 변하는 정도를 조절하는 항이 된다. 이를 부력 매개변수 B라고 표시하였다.

$$\frac{\triangle \tau_{\delta_B}}{\tau_w} = 1.33\times 10^4 \frac{\overline{Gr_b}}{Re_b^{2.7}} \left(\frac{\mu_w}{\mu_b}\right)\left(\frac{\rho_b}{\rho_w}\right)^{\frac{1}{2}} \quad , \quad B = \frac{\overline{Gr_b}}{Re_b^{2.7}} \qquad (1)$$

비교에 사용된 상관식들 중 실험결과를 가장 잘 예측한 Bishop 등의 상관식에서 입구효과를 표현하는 부분을 제거하고, 계수를 약간 조정하여 식 (2)와 같이 수정하여 Nu_0라 하였다.

$$Nu_0 = 0.0065 Re_b^{0.911} \overline{\mathrm{Pr}}_b^{0.66} \left(\rho_w/\rho_b\right)^{0.43} \qquad (2)$$

실험값으로부터 계산한 누셀수를 식 (2)로부터 계산한 누셀수로 나눈 값, 즉 $Nu_{\exp}/Nu_0$을 부력 매개변수 B에 대하여 그림 2와 같이 표현하였다. B가 1.0×10^{-6}보다 작은 영역에서는 부력에 의한 영향이 거의 없기 때문에 부력에 의해 열전달이 저하되는 현상이 발생하지 않는다. 그러나 B가 1.0×10^{-6}보다 커지면, 부력이 커지면서 전단응력이 감소하여 열전달이 제대로 이루어지지 않게 되어 $Nu_{\exp}/Nu_0$의 값은 1보다 작아진다. 이 값은 서서히 감소하여 B가 3.0×10^{-6}에서 0.8까지 감소한다. 이후부터는 B가 1.3×10^{-5}이 될 때까지 0.8의 값을 유지하고, 이보다 커지면 $Nu_{\exp}/Nu_0$는 급격히 감소하며 약 0.3까지 떨어진다. $Nu_{\exp}/Nu_0$이 급격하게 감소하는 $1.3\times10^{-5} < B \le 3.0\times10^{-5}$ 구간에서 부력에 의한 효과가 가장 크다고 할 수 있다. B가 이

Table 2 Compared correlations.[1]

Jackson & Fewster $Nu_b = 0.0183 Re_b^{0.82} \overline{\mathrm{Pr}_b^{0.5}} \left(\frac{\rho_w}{\rho_b}\right)^{0.3}$
Bishop et al. $Nu_b = 0.0069 Re_b^{0.9} \overline{\mathrm{Pr}_b}^{0.66} (\rho_w/\rho_b)^{0.43} [1+2.4/(x/d)]$
Krashchekov & Protopopov $Nu_b = Nu_0 \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.11} \left(\frac{k_b}{k_w}\right)^{-0.33} \left(\frac{\overline{c_p}}{c_{pb}}\right)^{0.35}$ $Nu_0 = \frac{(\xi/8) Re_b \mathrm{Pr}_b}{12.7(\xi/8)^{1/2}(\mathrm{Pr}_b^{2/3}-1)+1.07}, \quad \xi = \frac{1}{(1.82\log_{10} Re_b - 1.64)^2}$
Modified Krashchekov & Protopopov $Nu_b = 0.0183 Re_b^{0.82} \mathrm{Pr}_b^{0.5} \left(\frac{\rho_w}{\rho_b}\right)^{0.3} \left(\frac{\overline{c_p}}{c_{pb}}\right)^n$ $n = 0.4$ for $T_b < T_w < T_{pc}$, and $1.2T_{pc} < T_b < T_w$ $n = 0.4 + 0.2[(T_w/T_{pc}) - 1]$ for $T_b < T_{pc} < T_w$ $n = 0.4 + 0.2[(T_w/T_{pc}) - 1]\{1 - 5[(T_w/T_{pc}) - 1]\}$ for $T_{pc} < T_b < 1.2T_{pc}$ and $T_b < T_w$
Swenson et al. $Nu_w = \frac{hD}{k_w} = 0.00459 Re_w^{0.923} \overline{\mathrm{Pr}_w}^{0.613} (\rho_w/\rho_b)^{0.231}$
Watts & Chou $Nu_b = Nu_{var} f\left(\frac{Gr_m}{Re_b^{2.7}\overline{\mathrm{Pr}_b}^{0.5}}\right), \quad Nu_{var} = 0.021 Re_b^{0.8} \overline{\mathrm{Pr}_b}^{0.55} \left(\frac{\rho_b}{\rho_w}\right)^{0.35}$ $f\left(\frac{Gr_m}{Re_b^{2.7}\overline{\mathrm{Pr}_b}^{0.5}}\right) = \left(1 - 3000 \frac{Gr_m}{Re_b^{2.7}\overline{\mathrm{Pr}_b}^{0.5}}\right)^{0.295}$ for $\frac{Gr_m}{Re_b^{2.7}\overline{\mathrm{Pr}_b}^{0.5}} \le 1.0\times10^{-4}$ $f\left(\frac{Gr_m}{Re_b^{2.7}\overline{\mathrm{Pr}_b}^{0.5}}\right) = \left(7000 \frac{Gr_m}{Re_b^{2.7}\overline{\mathrm{Pr}_b}^{0.5}}\right)^{0.295}$ for $\frac{Gr_m}{Re_b^{2.7}\overline{\mathrm{Pr}_b}^{0.5}} > 1.0\times10^{-4}$

Table 3 Mean error and standard deviation of the predicted Nusselt number from the experimental one and fractional numbers of the data points within specified error bounds.

Correlations	$\overline{R.E.}$	$\sigma_{R.E}$	10%	20%	30%
Jackson & Fewster	-3.9	45.8	25.9	46.7	65.0
Bishop et al.	1.4	46.2	29.5	54.5	73.0
Krashchekov & Protopopov	8.4	51.4	26.8	48.8	64.4
Modified Krashchekov & Protopopov	-6.0	43.3	27.0	48.8	65.0
Swenson et al.	-13.7	51.7	12.5	29.7	48.9
Watts & Chou	-14.5	42.5	22.8	41.3	55.6
Suggested correlation	-8.6	24.9	42.7	64.1	75.1

보다 더 커지게 되면 열전달은 회복되기 시작하며 $Nu_{\exp}/Nu_0$는 증가하기 시작한다. 위와 같은 부력에 의한 영향을 고려하기 위하여 그림 2에 표시된 빨간 실선으로 총 5개의 구간으로 나누어 각 구간의 데이터 분포를 식 (3b)부터 (3f)와 같이 B에 대한 함수로 표현하였다. 이 B에 대한 함수 $f(B)$를 Nu_0에 곱하여 식 (3a)와 같은 상관식으로 표현하였다.

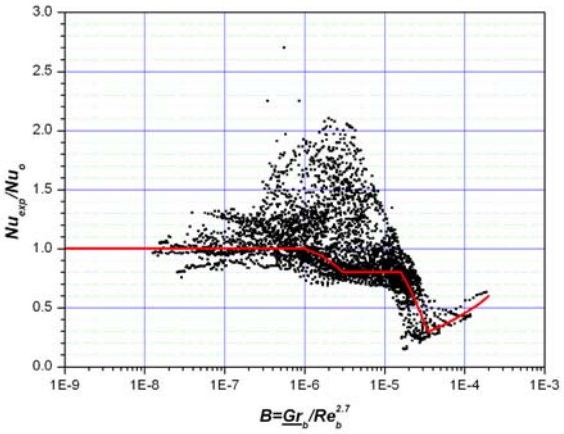

Fig. 2 Variation of the ratio of Nusselt number from the experiment to the eq. (2) as a function of the buoyancy parameter B.

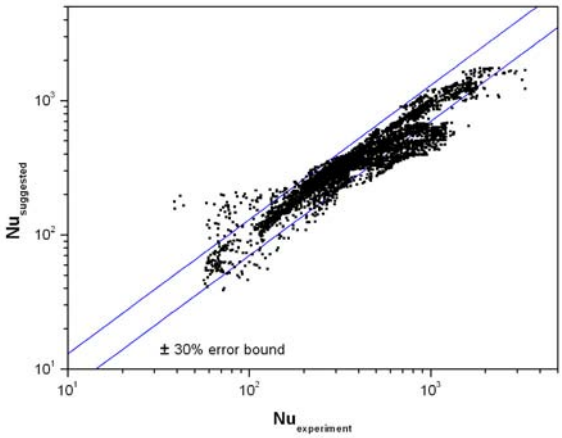

Fig. 3 Comparison of Nusselt number between the experiment and the suggested correlation.

$$Nu_b = Nu_0 \times f(B) \tag{3a}$$
$$f(B) = 1 \quad \text{for} \quad 1.0\times10^{-8} \le B \le 1.0\times10^{-6} \tag{3b}$$
$$f(B) = (1.1 - 1.0\times10^5 \times B) \quad \text{for} \quad 1.0\times10^{-6} < B \le 3.0\times10^{-6} \tag{3c}$$
$$f(B) = 0.8 \quad \text{for} \quad 3.0\times10^{-6} < B \le 1.3\times10^{-5} \tag{3d}$$
$$f(B) = (1.2 - 29500 \times B)^{1.1} \quad \text{for} \quad 1.3\times10^{-5} < B \le 3.0\times10^{-5} \tag{3e}$$
$$f(B) = (1390 \times B)^{0.4} \quad \text{for} \quad 3.0\times10^{-5} < B \le 2.0\times10^{-4} \tag{3f}$$

식 (3)으로 계산한 누쎌수와 실험값으로부터 계산한 누쎌수를 그림 3에 표시하였다. 비교결과 표준편차는 46.2에서 24.9로 상당히 작아진 결과를 보였다. 그리고 10%, 20%, 30% 오차범위 내에 존재하는 데이터수는 각각 42.7, 64.1, 75.1로서 10% 및 20% 오차경계 내에 존재하는 데이터수는 약 10% 포인트 정도의 상당한 증가를 보였다. 이를 통해 새로운 상관식이 다른 상관식에 비해 본 실험결과를 더 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

새로이 제안된 상관식이 실험결과를 잘 예측하고 있는지 알아보기 위하여 몇 개의 실험조건에 대한 열전달계수를 계산하여 비교한 결과를 그림 4에 나타내었다. 비교에 사용되었던 상관식들로 계산한 열전달계수도 함께 표시하였다. 우선 비교적 질량유속이 낮고 열유속이 높은 실험조건, 즉 열전달 열화가 일어나

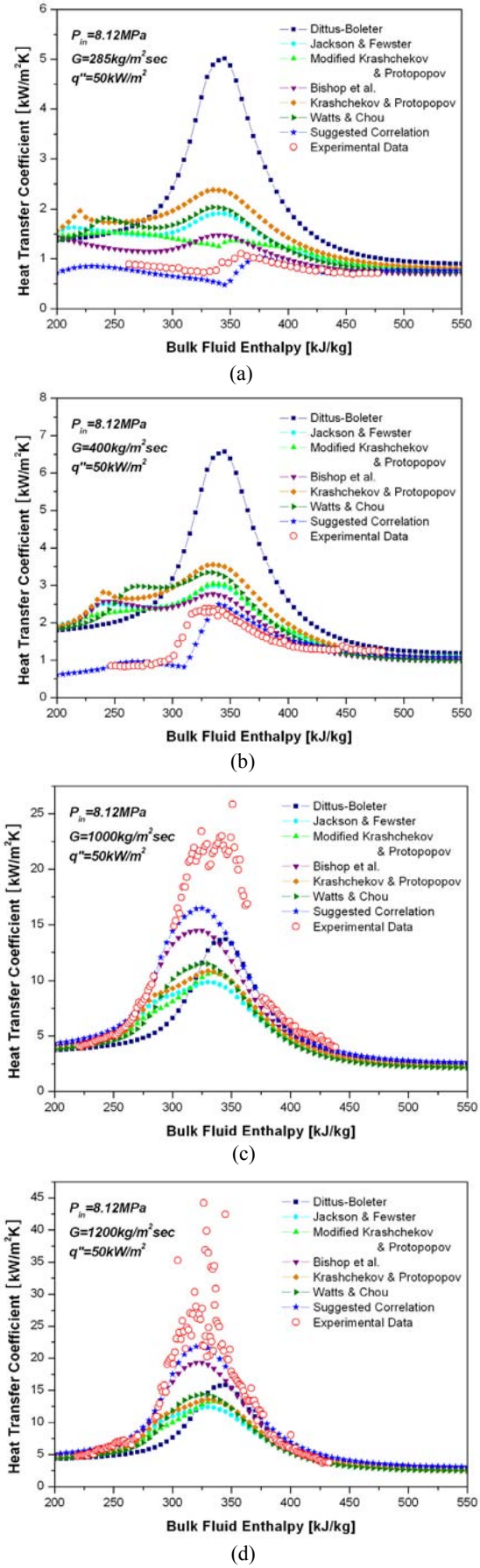

Fig. 4 Comparison of the predicted heat transfer coefficient by various correlations and suggested correlation against the experimental data.

는 조건에 대한 비교결과를 그림 4의 (a)와 (b)에 나타내었다. 그림을 통해 알 수 있듯이, 다른 상관식들은 실험 데이터와 상당히 다른 열전달계수 값을 보였지만, 새로운 상관식은 실험데이터와 상당히 잘 일치하였다. 그림 4의 (c)와 (d)에는 열화현상이 일어나지 않는 정상 열전달의 실험조건으로 계산한 열전달계수를 나타내었다. 유사임계 엔탈피에서 멀리 떨어진 영역에서는 대부분의 상관식이 실험 데이터를 잘 예측하였으나 유사임계 엔탈피 부근에서는 모든 상관식이 열전달계수를 낮게 예측하였다. 그러나 새로이 제안된 상관식이 실험값으로 계산한 열전달계수를 가장 근접하게 예측하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

초임계압수냉각로의 안전을 확보하기 위해서는 노심의 열수력 설계에 필수적인 열수력 현상을 정확히 예측할 수 있는 열전달 상관식이 요구된다. 초임계압 유체의 열전달과 관련하여 많은 상관식들이 제시되었으나 상관식들간 간에 편차가 큰 편이며, 대부분의 상관식들은 정상 열전달에 대한 것으로 열화가 일어나는 조건에서는 실험데이터를 제대로 예측하지 못한다. 따라서 한국원자력연구원에서 수행된 6.32 mm 원형관에 대한 실험결과를 토대로 정상 및 열화 열전달이 일어나는 영역에 모두 적용할 수 있는 열전달 상관식을 제시하고자 하였다. 부력 매개변수를 몇 구간으로 나눈 후 각 구간에서 $Nu_{\exp}/Nu_0$를 적절한 부력 매개변수의 함수로 표현하였고 이를 정상열전달 상관식과 조합하여 하나의 상관식으로 표현하였다. 기존의 상관식들에 비해 표준편차가 상당히 작아졌으며, 오차경계 내에 존재하는 데이터 수는 증가하였다. 특히 열화가 일어나는 영역에서, 새로이 제안된 상관식으로 계산한 열전달계수는 실험값과 상당히 일치함을 보였다.

참고문헌

[1] I. L. Pioro, H. F. Khartabil, R. B. Duffey, "Heat Transfer to Supercritical Fluids Flowing in Channels-Empirical Correlations(Survey)", Nuclear Engineering Design 230(1-3), 69-91, 2004.

[2] J. D. Jackson, W. B. Hall, "Influence of Buoyancy on Heat Transfer to Fluids Flowing in Vertical Tubes under Turbulent Conditions", IMechE conference publications, V.2, pp. 613-640., 1979.

[3] M. J. Watts and C. T. Chou, "Mixed Convection Heat Transfer to Supercritical Pressure Water", Proceedings of the 7th International Heat Trasnfer Conference, Munchen, Germany, Vol. 3, Paper 6-10, pp. 495-500, 1982.

[4] Y. Y. Bae, H. Y. Kim, H. Kim, and D. J. Kang, "Correlations for Convective Heat Transfer to Fluids at Supercritical Pressure Vertically Upward Flowing in Tubes and Annulus Channel", 3rd Sino-Korea Workshop on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, WORTH-3, Chengdu, China, 2007.