

초임계 이산화탄소의 수직 상향 유동에서의 관내 열전달에 관한 실험적 연구

김 동 역^{*†}

* 경북대학교 정밀기계공학과

Experimental Investigation of Heat Transfer During Vertical Upward Flow of Supercritical CO₂ in Circular Tube

Dong Eok Kim^{*†}

* Dept. of Precision Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.

(Received March 18, 2014 ; Revised May 1, 2014 ; Accepted May 2, 2014)

Key Words: Supercritical CO₂(초임계 이산화탄소), Local Heat Transfer(국부 열전달), Buoyancy(부력), Flow Acceleration(유동 가속), Correlation(상관식)

초록: 초임계 CO₂의 수직상향유동에서의 난류열전달에 관한 실험적연구가 내경 4.5 mm의 원형관에서 수행되었다. 실험범위는 유체평균온도 29 - 115 °C, 압력 74.6 - 102.6 bar, 국부 벽면 열유속 38 - 234 kW/m² 그리고 질량유속 208 - 874 kg/m²s 였다. 중간정도의 벽면 열유속 및 낮은 질량유속에서 벽면온도는 확연한 최대점을 나타냈다. 열전달에 대한 부력 및 유동가속의 영향을 살펴보기 위하여 실험 및 참조상관식(Kranoshchekov and Protopopov⁽¹²⁾)에서 획득된 Nusselt 수의 비를 부력 및 유동가속을 나타내는 변수인 Bo* 및 q⁺를 이용하여 분석하였다. 이 분석을 통해 유동가속 변수인 q⁺는 실험에서의 열전달 현상을 적절히 표현할 수 있는 변수라는 것을 확인할 수 있었다. 마지막으로 초임계 유체의 수직상향 유동에서의 새로운 열전달 상관식이 개발되었으며, 이 상관식은 ±30 %의 오차범위에서 실험데이터를 잘 예측하였다.

Abstract: An experimental investigation of turbulent heat transfer during the vertical upward flow of supercritical CO₂ was conducted in a circular tube with inner diameter of 4.5 mm. The experiments were conducted at bulk fluid temperatures ranging from 29 to 115 °C, pressures from 74.6 to 102.6 bar, local wall heat fluxes from 38 to 234 kW/m², and mass fluxes from 208 to 874 kg/m²s. At moderate wall heat and low mass fluxes, the wall temperature had a noticeable peak value. For observing the buoyancy and flow acceleration effects on heat transfer, the ratios of Nusselt numbers from the experimental data and a reference correlation were compared with the Bo* and q⁺ distributions. The flow acceleration parameter q⁺ appropriately represented the heat transfer phenomena in the experiments. A new heat transfer correlation for the vertical upward flow of the supercritical pressure fluid was developed, and was found to agree with the experimental data with an error margin of ±30 %.

- 기호설명 -

<p>A_{in} : 튜브의 내측 표면적 (m²)</p> <p>A_o : 튜브의 외측 표면적 (m²)</p> <p>Bo* : 무차원 부력 변수</p> <p>c_p : 정압 비열 (J/kg K)</p> <p>$\frac{c_p}{c_{p,b}}$: 평균 정압비열 (J/kgK) $(i_w - i_b) / (T_w - T_b)$</p> <p>D : 관 지름 (m)</p>	<p>g : 중력가속도 (m/s²)</p> <p>G : 질량유속 (kg/m²s)</p> <p>Gr_q : 열유속 근거 Grashof 수, $g\beta_b D_i^4 q_w^* / (\nu_b^2 k_b)$</p> <p>$\overline{Gr}_b$: 평균 Grashof 수, $(\rho_b - \bar{\rho})gD_i^3 / (\rho_b \nu_b^2)$</p> <p>h : 열전달 계수 (W/m²K)</p> <p>i : 엔탈피 (J/kg)</p> <p>k : 유체의 열전도도 (W/mK)</p> <p>k_s : 고체의 열전도도 (W/mK)</p> <p>K_v : 유동가속변수 $4q_w^* D_i / (Re_b^2 \mu_b c_{p,b} T_b)$</p>
--	--

† Corresponding Author, dekim@knu.ac.kr

L	: 관 길이 (m)
\dot{m}	: 질량유량 (kg/s)
Nu	: Nusselt 수 hD/k
P	: 압력 (bar)
Pr	: Prandtl 수 $c_p\mu/k$
\dot{q}_{loss}^*	: 국부 손실 열유속 (W/m ²)
\dot{q}_w^*	: 국부 열유속 (W/m ²)
q^+	: 무차원 열유속 $\dot{q}_w^*/\beta_b(Gc_{p,b})$
\dot{q}	: 단위부피당 열발생률 (W/m ³)
\dot{Q}	: 열전달률 (W)
\dot{Q}_{loss}	: 손실 열전달률 (W)
r	: 반경방향 거리 (m)
Re	: Reynolds 수 $4\dot{m}/(\pi D\mu)$
T	: 온도(°C or K)
u	: 유체의 속도 (m/s)
x	: 축방향 거리 (m)

그리스문자

β	: 부피팽창계수 (1/K)
μ	: 역학점성 (Pa s)
ν	: 동점성 (m ² /s)
ρ	: 밀도 (kg/m ³)
$\bar{\rho}$: 평균밀도 (kg/m ³)
σ	: 측정변수의 불확실성

하첨자

b	: 유체평균온도에 근거
cr	: 임계점
i, in	: 내측, 입구
m	: 평균
o	: 외측
pc	: 가상임계점 (pseudo-critical)
w	: 벽면유체온도에 근거

1. 서 론

초임계 유체는 발전 공학, 항공우주공학, 화학공학, 저온물리학 및 냉동공조 등의 산업분야에서 널리 사용되어 왔다. 그 중에서도 초임계 수 냉각 반응로(Supercritical Water Cooled Reactor, SCWR), 초임계 이산화탄소 브레이튼 사이클 및 냉동공조 시스템들은 초임계 유체 응용의 대표적인 예라고 할 수 있다. 이러한 산업 및 공학적 응용분야에서 초임계 유체의 열전달 특성은 핵심적인 변수이다. 임계영역 부근에서 밀도, 점성, 엔탈피, 열전도도 및 부피팽창계수 등 유체의 열물리적 성질은 임계영역 이하에서의 단상 유체와 비교하여 온도와 압

력에 따라 매우 급격하게 변화한다. 그로 인해 초임계 압력에서의 유체의 열전달은 일반적인 단상 유체와 큰 차이를 보인다.

물성치의 변화가 비교적 크지 않은 유체의 경우 난류영역에서의 열전달은 주로 밀도, 열전도도, 비열 및 점성에 의존하고, 일반적으로 Reynolds 수 (Re) 및 Prandtl 수(Pr)의 함수로 나타난다(식 (1)).⁽¹⁾ 이러한 이유 때문에 초임계 유체를 위한 대부분의 열전달 상관식들은⁽²⁻²¹⁾ Re 와 Pr 를 유체의 평균온도 및 벽면온도에서의 물성치와 조합한 형태로 개발되었다.

$$Nu_b = \frac{hD}{k_b} = 0.023Re_b^{0.8}Pr_b^{0.4} \quad (1)$$

하지만 초임계 유체와 같이 온도 및 압력에 따라 물성치의 변화가 큰 경우에 관내 강제대류 열전달에서 유체의 열물성치는 열역학적 임계점 부근에서 유동의 수직 및 수평방향으로 현저히 변화한다. 특히, 유동의 중심과 벽면에서의 급격한 밀도차이는 부력을 생성하여 유동구조를 변화시키고 난류구조에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이러한 현상은 유체로 전달되는 열유속이 클 때 극대화된다. 일반적으로 유동내에서의 난류강도 또는 에디 확산률(eddy diffusivity)은 유동단면에서의 유체간의 축방향 속도차이로 인해 유발되는 전단력에 의해 유지된다. 그러므로 유체의 급격한 물성치 변화로 인하여 벽면부근에 상대적으로 낮은 밀도의 유체층이 존재할 경우 부력이 작용하여 유체간에 작용하는 전단력을 감소시키고 이는 에디 확산률을 감소시키는 원인이 된다⁽²²⁾. Jackson 과 Hall⁽²³⁾은 난류 경계층에서의 전단력의 감소에 관한 근사해석을 통해 부력의 작용이 유체의 열전달에 심각한 영향을 미치게 되는 기준을 도출하였고 수직관에서의 부력의 영향을 받는 유체의 열전달에 관한 간단한 상관식을 제시하였다.

또한, 관내에서 초임계 유체가 높은 열유속으로 가열될 때 유동은 열팽창 효과로 인하여 크게 가속된다. 이러한 유동 가속 현상이 클 때, 난류경계층은 재층류화(re-laminarization)될 수 있고, 유체로의 열전달량은 현저히 감소하게 된다⁽²⁴⁾⁻⁽²⁹⁾. McEligot 등⁽³⁰⁾은 유동가속을 나타내는 변수, $K_v = (\nu_b/u_b^2)(du_b/dx)$ 를 정의하였다. 그리고 Moretti 와 Kays⁽³¹⁾ 및 Perkins 등⁽³²⁾은 K_v 의 값이 3×10^{-6} 보다 작을 때 유동은 난류상태로 유지된다고 제안하였다.

본 연구의 목적은 초임계 유체의 열전달 현상을

정량적으로 연구하는 것이다. 국부 열전달 변수들의 측정을 위해 실험루프 및 시험부는 국부 열유속, 국부 벽면 온도 및 국부 유체평균온도를 측정할 수 있도록 설계되었다. 또한 부력 및 유동가속의 열전달에 대한 영향을 살펴보기 위해 수직 상향 유동에 대한 실험을 수행하였다. 그리고 초임계 유체 유동에서의 부력 및 유동가속의 효과를 고려한 새로운 열전달 상관식이 개발되었다.

2. 실험

2.1 실험 루프

본 연구에서는 수직상향 유동에서 초임계 CO₂의 열전달 현상을 정량화하기 위한 실험루프를 설계 및 제작하였다. Fig. 1는 실험루프의 구성도를 나타낸다. 주요 측정 및 제어 변수는 시스템 압력, 작동유체(CO₂)의 질량유량, 시험부의 입구온도 및 관 벽에서 가해지는 열유속 등이다.

초임계 영역에서의 실험을 위해, 실험루프의 시스템 압력은 임계 압력(73.8 bar) 이상으로 가압되어야 한다. 이를 위해 공압에 의해 가동되는 액체용 펌프(air-driven liquid pump, Maximator G35)를 사용하여 사이폰이 삽입된 컨테이너에 저장된 순도 99.5%의 CO₂를 약 50 bar의 액체상태에서 가압하였다.

유체의 질량유량은 마그네틱 기어펌프(Micropump GLHH25, Lesson SCR rated DC motor)를 이용하여 조절하였다. 유량은 모터의 회전속도(rpm) 조절기(Lesson Speedmaster)로 제어하였고 미세조절을 위해 루프의 분지라인에 부착된 니들밸브를 사용하였다. 유량은 코리올리 질량 유량계(Rheonik RHM 03 a1 model)로 측정하였으며 유량계는 0.05 kg/min ~ 2.5 kg/min의 범위에서 측정최대 유량 대비 0.1%의 정확도와 0.05%의 반복성을 갖는다.

시험부 입구온도는 각 지점에서의 유체의 평균온도와 엔탈피를 계산하기 위해 필요한 핵심적인 변수이다. 본 실험에서는 PID 온도제어기(Autonics TZ4ST model)가 부착된 순환에열히터(Watlow Cast X-2000 model, 6 kW)를 사용하여 유체의 입구온도를 설계치가 되도록 조절하였다.

벽면 열유속을 인가하고 조절하기 위해 시험부는 직류 전원 공급기(Sorensen SGI series DC power supply, 60 V, 500 A, 30 kW)를 이용하여 전기적으로 가열하였다. 실험 시에 전원 공급기는 일정 전력 모드로(constant power mode) 운전되었고 전압과 전류는 시험부의 전기저항에 따라 자동으로 조절되었다.

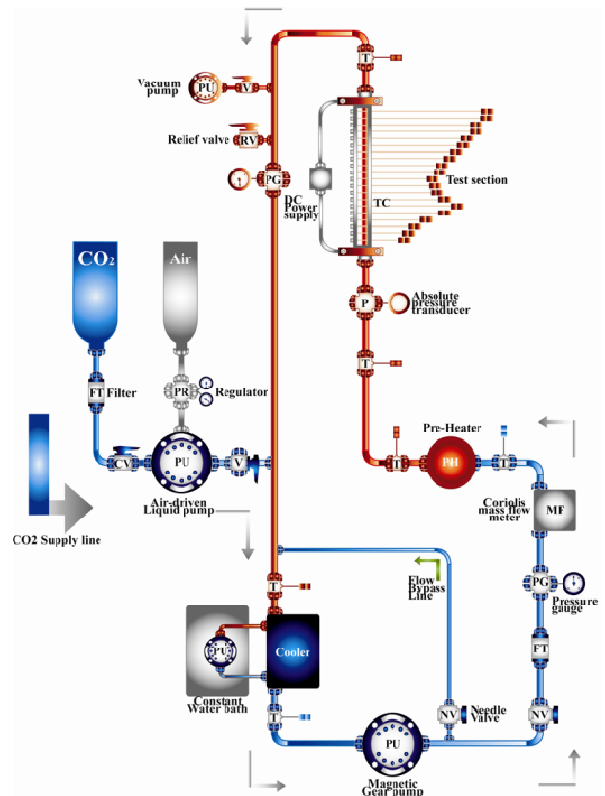


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental loop

실험 루프내에 모든 온도는 직경 0.5 mm의 K 타입 열전대로 측정하였다. 모든 열전대는 0.2 °C의 정확도로 보정되었다. 시험부 입구를 제외한 실험 루프에서의 압력은 다이얼 형태의 게이지 압력계로 측정하였고 시험부 입구의 압력은 절대압력계(Setra Model 204 High accuracy pressure transducer)로 측정하였다. 절대압력계는 ~ 207 bar의 범위에서 최대측정 압력 대비 0.11%의 정확도를 갖는다.

2.1 시험부 설계

본 연구에서는 실험을 위해 내경(D_i) 4.5 mm, 외경(D_o) 6.3 mm의 스테인레스 재질의 원관을 사용하였다. 시험부의 가열길이(L)는 900 mm이다. 열유동적 입구 효과를 고려하기 위하여 가열시작점에서 100 mm 거리의 지점으로부터 데이터 수집을 시작하였다. 시험부의 전기가열을 위한 전극은 실험 튜브의 양끝에 부착되었으며 시험부 양단은 두 개의 절연 핏팅을 이용하여 전기적으로 절연하였다. 국부 관벽 온도의 측정을 위해 20개의 K 타입 열전대를 시험부를 따라 40 mm의 일정한 간격으로 부착하였다. 모든 열전대는 0.2 °C의 정확도로 보정하였다. 각각의 열전대는 피크(PEEK) 재질로 제작된 지그와 볼트를 이용하여 Fig. 2에서

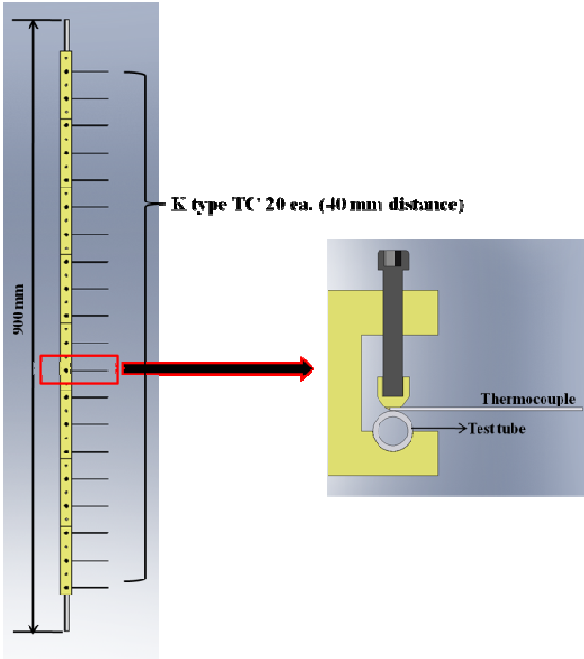


Fig. 2 Test tube and thermocouple clamping structure

보는 바와 같이 시험부의 외벽에 부착하였다. 시험부에서는 입구 및 출구 평균온도를 측정하였고 압력은 절대압력계를 이용하여 입구에서만 측정하였다.

2.3 데이터 획득 및 정리

초임계 유체에서의 열전달 현상은 물성치의 국부적인 변화에 따라 크게 영향을 받는다. 그리하여 본 연구에서 데이터는 국부적인 변수에 기초하여 수집되고 정리되었다. 실험을 통해 획득하는 최종 데이터는 시험부에서의 국부 열전달계수(h , W/m^2K)이며 다음 식으로 표현된다.

$$h = \frac{q_w}{T_{w,i} - T_b} \quad (2)$$

위의 식을 통해 열전달계수를 계산하기 위해 국부 열유속, 국부 관내벽 온도, 국부 유체 평균온도가 측정되거나 계산되었다.

2.3.1 국부 열유속

시험부는 줄 가열 방법을 통해 가열하여 시험부에서의 단위 부피당 열발생률(\dot{q} , W/m^3)은 일정하다고 가정하였다. 실험에서의 국부 열유속을 측정

하기 위해 모든 실험 케이스에 대해 열손실 테스트를 수행하여 국부 손실 열유속 (q_{loss}^* , W/m^2)을 측정하였다. 열손실 테스트에서는 시험부를 진공 상태로 조성하고 전력 10, 20, 30, 40 W 을 순차적으

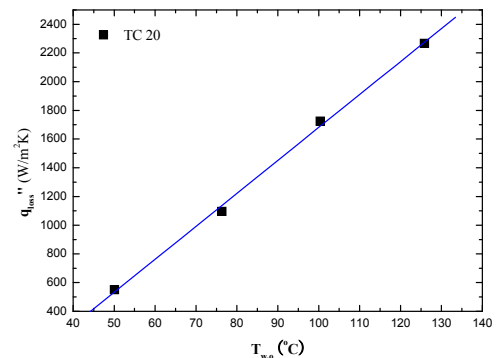
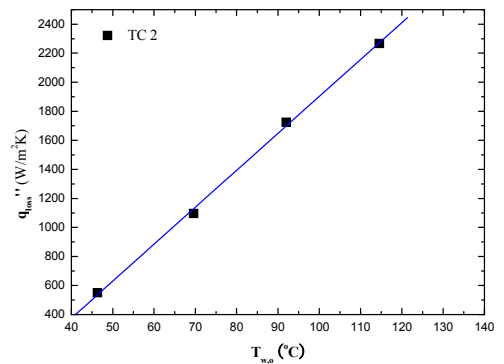
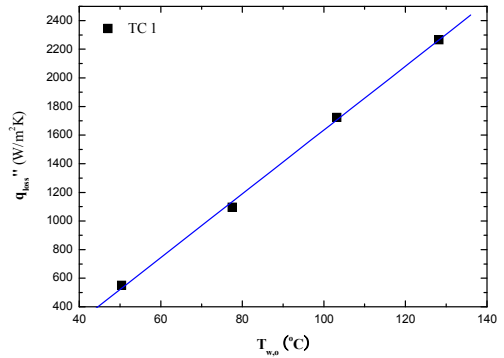


Fig. 3 Local heat loss flux data (q_{loss}^*) correlated with the outer wall temperature ($T_{w,o}$)

로 인가하였고, 이 상태에서 시험부로부터 발생하는 열은 모두 대기로 방출되는 것으로 가정하였다. 그러므로 국부 손실 열유속은 시험부에 인가한 손실 열전달률 \dot{Q}_{loss} (10, 20, 30, 40 W)를 시험부 외측 표면적 A_o 으로 나눈 $q_{loss}^* = \dot{Q}_{loss} / A_o$ 로 나타낼 수 있다. 열손실 테스트 결과 국부 손실 열유속은 시험부 벽면온도가 측정되는 20 지점에 대하여 Fig. 3 에서와 같이 벽면 온도에 따른 선형 함수로 나타낼 수 있었다. 이로부터 국부 열유속은 다음의 식 (3) 과 같이 계산되었다.

$$q_w = \frac{\dot{Q}}{A_{in}} - q_{loss}^* \frac{D_o}{D_i} \quad (3)$$

2.3.2 국부 벽면 온도

앞서 언급하였듯이 시험부에서의 단위 부피당 열발생률은 일정하다고 가정하였다. 식 (4)와 (5)는 본 실험에서 국부 관내벽 온도를 계산하기 위해 적용된 1 차원 열전도 방정식과 그 경계조건을 나타낸다.

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + \frac{\dot{q}}{k_s} = 0 \tag{4}$$

$$-k_s \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_o} = \dot{q}_{loss} \tag{5}$$

$$T(r_o) = T_{w,o}$$

그리하여 시험부의 각 지점의 국부 관내벽 온도 ($T_{w,i}$)는 식 (6)과 같이 도출되었다.

$$T_{w,i} = T_{w,o} - \frac{\dot{q}}{16k_s} (D_i^2 - D_o^2) + \frac{D_o}{2k_s} \left(\frac{\dot{q}D_o}{4} - \dot{q}_{loss} \right) \ln \frac{D_i}{D_o} \tag{6}$$

2.3.3 국부 유체 평균온도

국부 유체 평균온도는 식 (7)의 에너지 보존 방정식을 이용하여 측정된 유체 입구온도로부터 단계적으로 계산되었다. 식에서 n 번째 지점에서의 유체의 열에너지는 (n-1)번째 지점에서의 열에너지와 이 구간을 지나면서 유체가 얻는 열량의 합으로 나타난다. 그리하여 국부 유체의 평균온도는 식 (8)과 초임계 CO₂의 물성치 데이터 (NIST Standard Reference Database23, Version 7.1)를 이용하여 계산되었다.

$$\dot{m}i_n = \dot{m}i_{n-1} + \int_{x_{n-1}}^{x_n} \pi D_i \dot{q}_w^*(x) dx \tag{7}$$

$$i = f(T, P) \tag{8}$$

2.4 불확실성 해석

열전달 계수의 불확실성은 식 (9)를 사용하여 계산하였다.⁽³³⁾

$$\frac{\sigma_h}{h} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\dot{q}_w}}{\dot{q}_w} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{T_{w,i}}}{T_{w,i} - T_b} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{T_b}}{T_{w,i} - T_b} \right)^2} \tag{9}$$

그리고 국부 열유속 및 국부 관내벽 온도의 불확실성은 각각 식 (10)과 식 (11)을 이용하여 획득하였다.

$$\sigma_{\dot{q}_w} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_Q}{A_{in}} \right)^2 + \left(\frac{D_o}{D_i} \sigma_{\dot{q}_{loss}} \right)^2} \tag{10}$$

$$\sigma_{T_{w,i}} = \sqrt{\left(\sigma_{T_{w,o}} \right)^2 + \left\{ \left(\frac{D_o^2 - D_i^2}{16k_s} + \frac{D_o^2}{8k_s} \ln \frac{D_i}{D_o} \right) \sigma_{\dot{q}} \right\}^2 + \left(\frac{D_o}{2k_s} \ln \frac{D_i}{D_o} \sigma_{\dot{q}_{loss}} \right)^2} \tag{11}$$

국부 유체 평균온도의 불확실성은 식 (7)로부터 계산되었다. 본 연구에서 측정온도, 열전달량 및 질량유량의 불확실성은 각각 ± 0.2 °C, ± 5 %, 및 ± 4.2 %였고 압력데이터의 불확실성은 ± 0.3 %였다. 그리하여 열전달 계수의 불확실성은 ± 7.3 %로 나타났다.

2.5 실험조건

본 실험에서 도출된 주요 열전달관련 변수들은 유체평균온도(T_b), 관내벽온도($T_{w,i}$), 열유속(q_w^*), Reynolds 수(Re_b), Prandtl 수(Pr_b), 시스템 압력(P) 및 질량유속(G) 등이다. 이러한 변수들에 대해 다음과 같은 범위에서 실험이 수행되었다.

T_b : 29–115 °C, T_w : 41–238 °C, q_w^* : 38–234 kW/m², Re_b : 18,000–190,000, Pr_b : 0.9–64, P: 74.6–102.6 bar, G: 208–874 kg/m²s.

3. 실험결과

3.1 벽면온도 분포

관내벽온도 분포는 벽면 열유속과 질량유속에 따라 크게 영향을 받았다.

질량유속이 크고 벽면열유속이 낮은 경우, 관내벽온도는 유동방향에 따라 단조 증가하는 경향을 보였다[Fig. 4(a)]. 질량유속이 낮고 벽면 열유속이 중간 정도의 값을 가졌던 경우에는 관내벽온도에서 확인한 최고치가 관찰된 후 급격한 감소를 보이다가 하류지역에서는 단조 증가하는 경향을 보였다[Fig. 4(b)]. 그리고 벽면열유속과 질량유속이 중간 정도였을 때 관내벽온도에서 비교적 완만한 최고점이 관찰되었다[Fig. 4(c)]. 또한 높은 질량유속의 실험에서는 벽면열유속의 크기에 관계없이 관내벽온도가 단조증가하는 결과를 보였[Fig. 4(d), (e)].

3.2 열전달 특성

초임계 유체유동에서 심각한 물성치 변화는 열전달 현상에 현저한 영향을 미친다. 그러므로 초임계 유체에서의 열전달 특성에 관한 명확한 이해를 위해서는 실험에서의 열전달 데이터를 물성치의 영향을 반영하는 적절한 열전달 상관식과 비교 분석을 수행해야 한다. 그리하여 본 연구에서는 Kranoshchekov 와 Protopopov⁽¹²⁾의 열전달 상관식 [식 (12)]를 참조 상관식으로 채택하였다.

$$Nu_{KP} = 0.0183 Re_b^{0.82} Pr_b^{0.5} \left(\frac{\rho_w}{\rho_b} \right)^{0.3} \left(\frac{c_p}{c_{p,b}} \right)^n \tag{12}$$

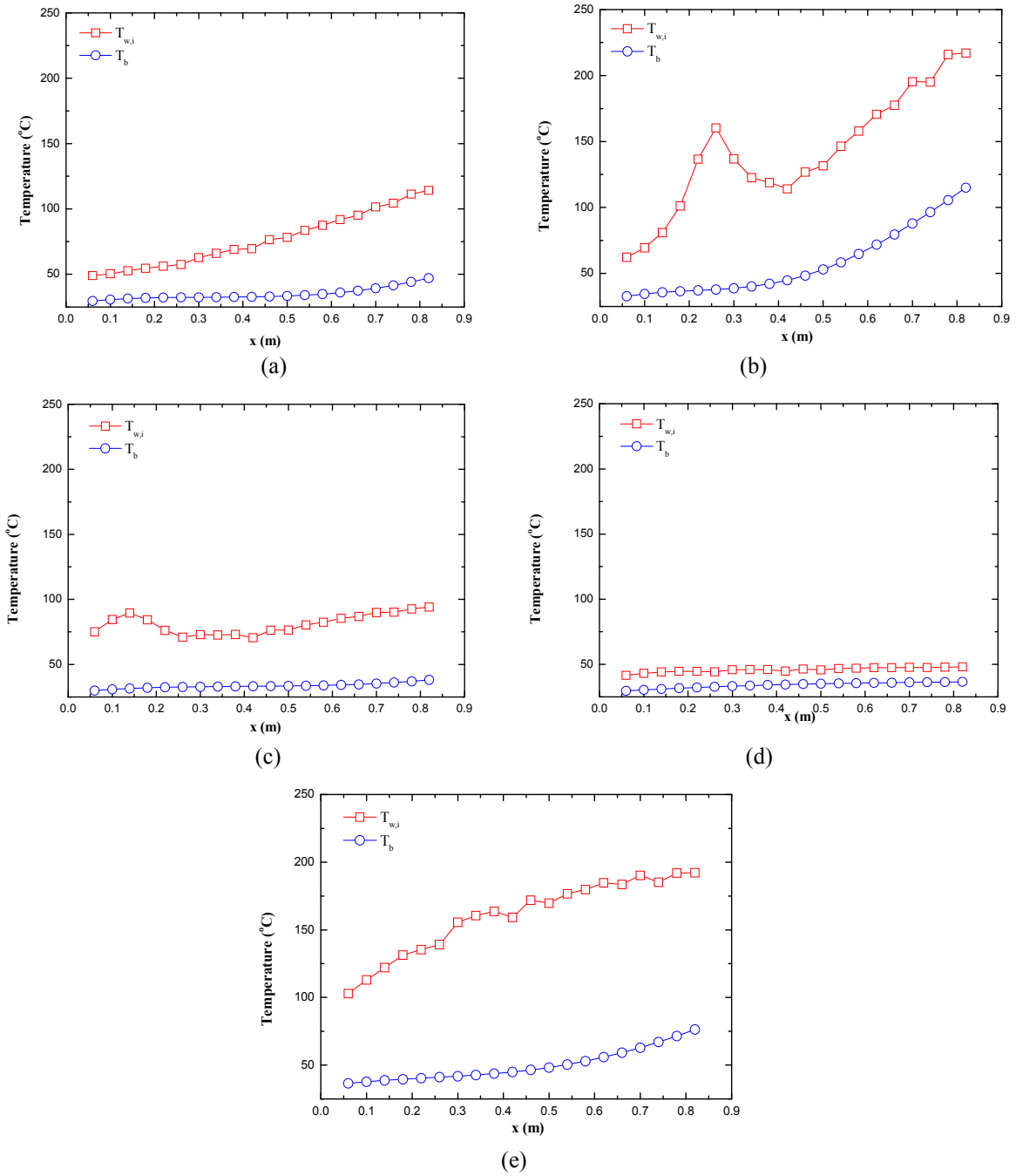


Fig. 4 Local inner wall and bulk temperature distributions along the test tube; (a) $P = 76.21$ bar, $G = 238$ kg/m²s, $q_{w,m} = 52$ kW/m², (b) $P = 84.19$ bar, $G = 230$ kg/m²s, $q_{w,m} = 83$ kW/m², (c) $P = 77.45$ bar, $G = 489$ kg/m²s, $q_{w,m} = 85$ kW/m², (d) $P = 83.35$ bar, $G = 663$ kg/m²s, $q_{w,m} = 62$ kW/m², (e) $P = 90.87$ bar, $G = 873$ kg/m²s, $q_{w,m} = 216$ kW/m²

여기서,

$$n = 0.4 \text{ for } T_b < T_w < T_{pc}, 1.2T_{pc} < T_b < T_w$$

$$n = 0.4 + 0.2 \left\{ \left(\frac{T_w}{T_{pc}} \right) - 1 \right\} \text{ for } T_b < T_{pc} < T_w$$

$$n = 0.4 + 0.2 \left\{ \left(\frac{T_w}{T_{pc}} \right) - 1 \right\} [1 - 5 \left\{ \left(\frac{T_b}{T_{pc}} \right) - 1 \right\}]$$

$$\text{for } T_{pc} < T_b < 1.2T_{pc}, T_b < T_w$$

T_b, T_{pc}, T_w are in K.

식 (12)의 상관식은 Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 벽면 열유속이 낮고 질량유속이 높은 경우 실험 데이터를 잘 예측하였다. 그러나 Fig. 5(b), (c)와 (d)에서 볼 수 있듯이 벽면열유속이 증가함에 따라 이 상관식은 실험결과와 다소 큰 차이를 나타냈다.

본 연구에서는 열전달 현상에 대한 부력의 효과

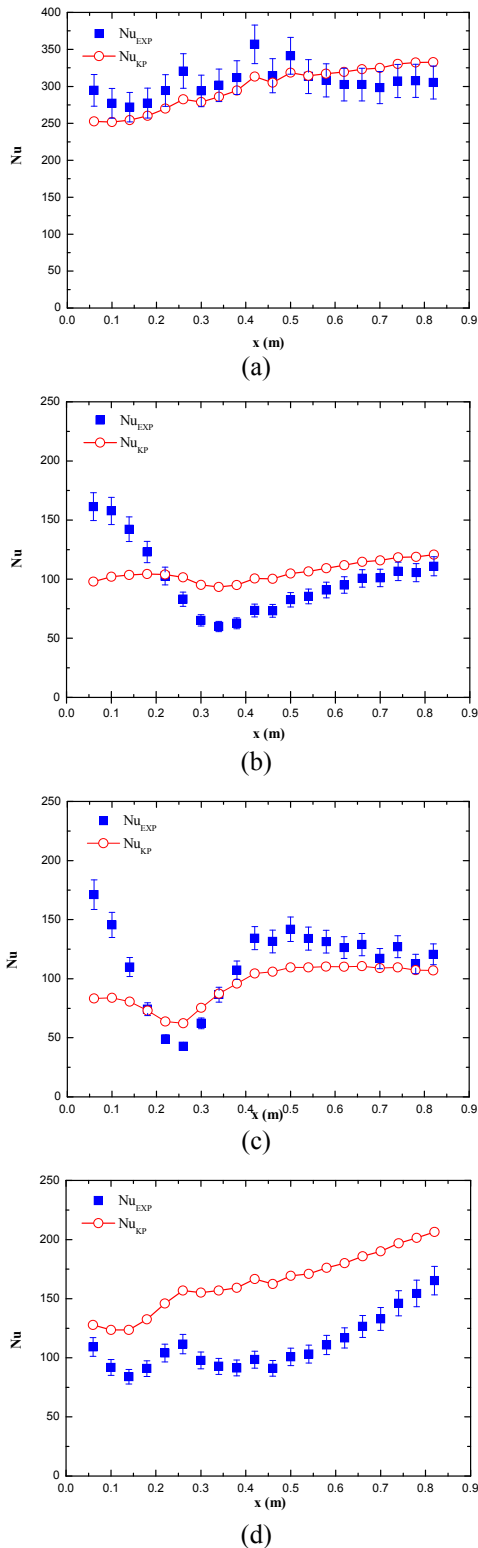


Fig. 5 Nusselt number distributions from the experiments (Nu_{EXP}) and the reference correlation (Nu_{KP}); (a) $P = 83.35$ bar, $G = 663$ kg/m²s, $q_{w,m} = 62$ kW/m², (b) $P = 76.21$ bar, $G = 238$ kg/m²s, $q_{w,m} = 52$ kW/m², (c) $P = 84.19$ bar, $G = 230$ kg/m²s, $q_{w,m} = 83$ kW/m², (d) $P = 77.45$ bar, $G = 489$ kg/m²s, $q_{w,m} = 85$ kW/m²

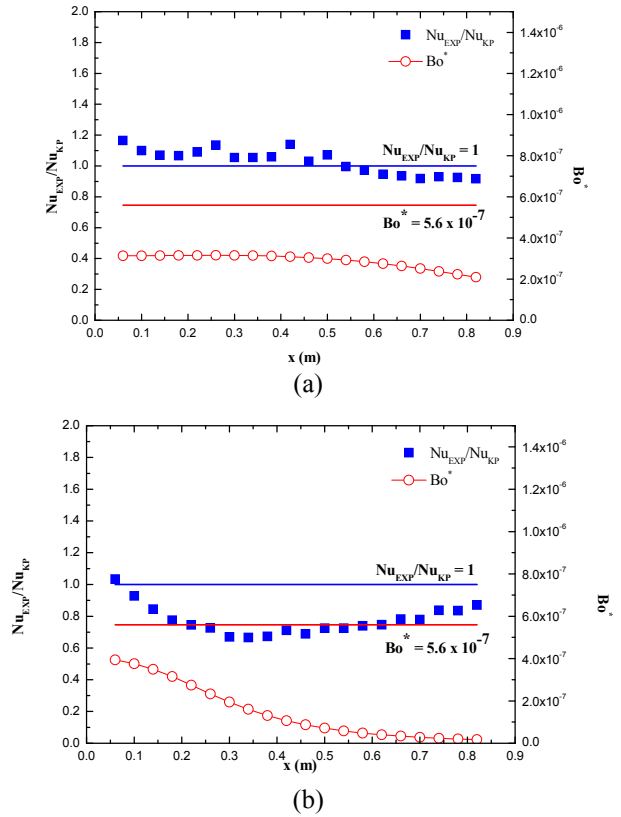


Fig. 6 Ratio of Nusselt numbers from the experimental data (Nu_{EXP}) and the reference correlation (Nu_{KP}), and Bo^* ($<5.6 \times 10^{-7}$) distributions along the test section; (a) $P = 83.35$ bar, $G = 663$ kg/m²s, $q_{w,m} = 62$ kW/m², (b) $P = 90.87$ bar, $G = 873$ kg/m²s, $q_{w,m} = 216$ kW/m²

를 분석하기 위하여 식 (12)로부터 계산된 Nusselt 수(Nu_{KP})에 대한 실험에서의 Nusselt 수(Nu_{EXP})의 비를 Jackson 등⁽³⁴⁾이 도출한 부력을 나타내는 무차원 수인 Bo^* [식 (13)]에 따라 비교 분석하였다. Mikielewicz 등⁽³⁵⁾은 Bo^* 의 값이 5.6×10^{-7} 보다 작을 때 열전달에서 부력의 효과를 무시할 수 있다고 제안하였다.

$$Bo^* = \frac{Gr_q}{Re_b^{3.5} Pr_b^{0.8}} \quad (13)$$

Fig. 6(a)에서 볼 수 있듯이 질량유속이 높고 벽면 열유속이 낮을 때, Bo^* 의 값은 5.6×10^{-7} 보다 작았으며 Nu_{EXP}/Nu_{KP} 값은 거의 1에 가까웠다. 그러나 질량유속이 비교적 높고 벽면 열유속이 높았을 때 Nu_{EXP}/Nu_{KP} 값은 Fig. 6(b)에서 보는 바와 같이 Bo^* 의 값이 5.6×10^{-7} 보다 작았을 경우에도 약 0.65까지 감소하였다. 또한 Bo^* 의 값이 5.6×10^{-7} 보다 큰 경우에는 참조 상관식과 비교하여 열전달의 향상과 감소가 모두 존재했다. Fig. 7(a)와 (b)에

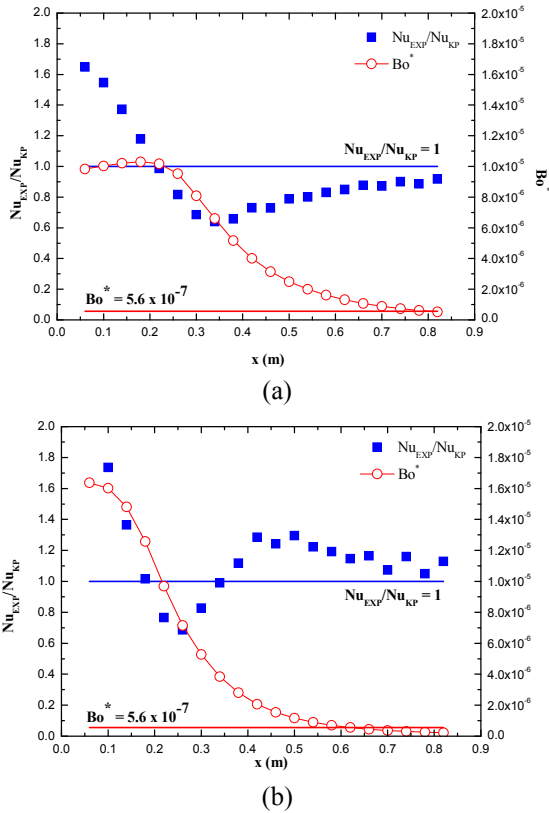


Fig. 7 Ratio of Nusselt numbers from the experimental data (Nu_{EXP}) and the reference correlation (Nu_{KP}), and Bo^* ($>5.6 \times 10^{-7}$) distributions along the test section; (a) $P = 76.21$ bar, $G = 238$ kg/m²s, $q_{w,m} = 52$ kW/m², (b) $P = 84.19$ bar, $G = 230$ kg/m²s, $q_{w,m} = 83$ kW/m²

서 보는 바와 같이 Bo^* 의 값은 일반적으로 유동방향으로 감소하는 경향을 나타냈다.

Bo^* 가 큰 값을 가지는 상류지역에서는 Nu_{EXP}/Nu_{KP} 값이 1 보다 큰 값을 나타냈다. 그리고 Bo^* 의 값이 감소함에 따라 Nu_{EXP}/Nu_{KP} 는 최소값을 나타낸 후 하류지역에서는 1에 점점 가까워지는 경향을 보였다.

다음으로 본 연구에서는 열전달 현상에 대한 유동가속의 효과를 고려하기 위하여 Nu_{EXP}/Nu_{KP} 의 데이터를 Bankston 과 McEligot⁽³⁶⁾이 제안한 유동가속 변수인 q^+ [식 (14)]를 사용하여 분석하였다.

$$q^+ = \frac{q_w \beta_b}{Gc_{p,b}} \quad (14)$$

Fig. 8(a), (b)와 (c)에서 보는 바와 같이 유동의 상류지역에서 Nu_{EXP}/Nu_{KP} 의 값은 q^+ 가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였고 q^+ 가 최대값을 가졌을 때 Nu_{EXP}/Nu_{KP} 값은 최소값을 나타냈다. 유동의 하류지역에서는 q^+ 값이 감소함에 따라 Nu_{EXP}/Nu_{KP} 값은 서서히 증가하였다. 특히, q^+ 의 값이 0.001 보다 작았을

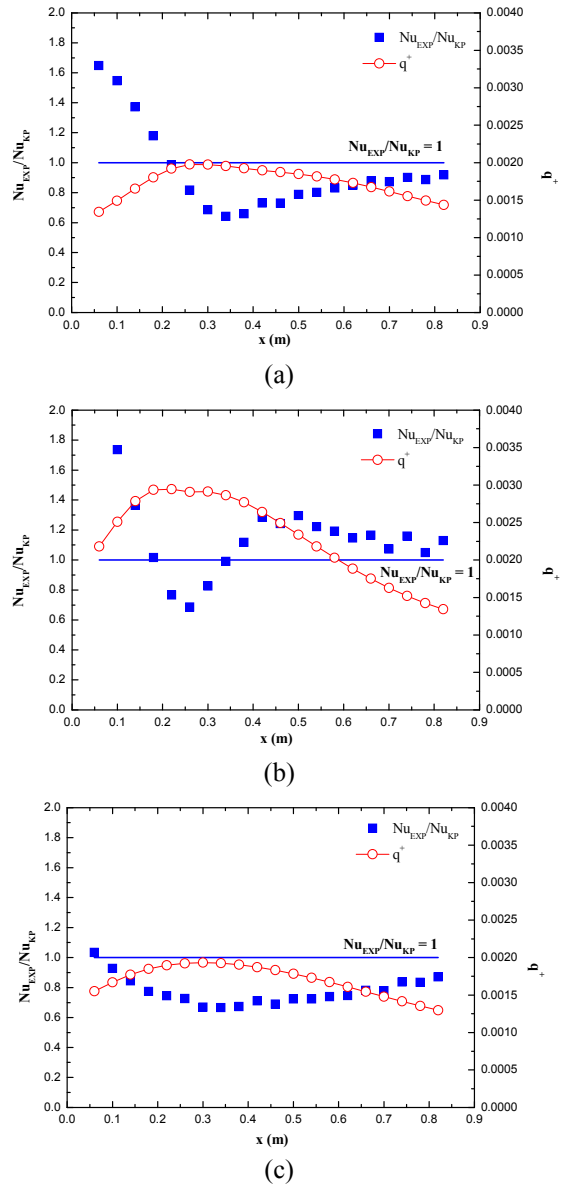


Fig. 8 Ratio of Nusselt numbers from the experimental data (Nu_{EXP}) and the reference correlation (Nu_{KP}), and q^+ distributions along the test section; (a) $P = 76.21$ bar, $G = 238$ kg/m²s, $q_{w,m} = 52$ kW/m², (b) $P = 84.19$ bar, $G = 230$ kg/m²s, $q_{w,m} = 83$ kW/m², (c) $P = 90.87$ bar, $G = 873$ kg/m²s, $q_{w,m} = 216$ kW/m²

때 Nu_{EXP}/Nu_{KP} 값은 1 과 근접했다. 즉, Nu_{EXP}/Nu_{KP} 의 값은 q^+ 가 증가함에 따라 감소하였고 q^+ 가 감소함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 이러한 경향으로 미루어 볼 때 유동가속을 나타내는 변수인 q^+ 는 초임계 유체 유동에서 유동가속으로 인한 열전달의 감소현상을 효과적으로 나타낼 수 있는 변수라는 것을 알 수 있다.

3.3 열전달 상관식의 개발

앞서 언급하였던 것처럼 부력 및 유동가속의 효

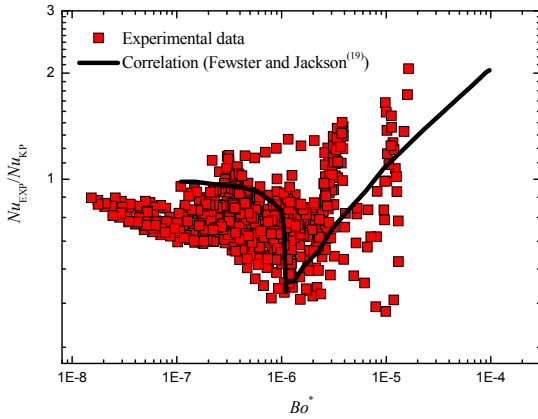


Fig. 9 Comparison of ratio of Nusselt numbers from the experimental data (Nu_{EXP}) and the reference correlation (Nu_{KP}) and correlation of Fewster and Jackson⁽¹⁹⁾

과가 크지 않은 경우 실험을 통해 측정된 열전달 데이터는 참조 상관식[식 (12)]의 결과와 유사한 결과를 보였다. 그러나 부력 및 유동가속의 영향이 심화되었을 때 실험에서의 열전달 데이터는 참조 상관식과 현저한 차이를 나타냈다. 3.2 절에서의 열전달 데이터 분석을 통해 초임계 유체유동에서의 열전달을 대표하는 Nusselt 수는 식 (15)에서와 같이 무차원 변수인 Reynolds 수, Prandtl 수, 밀도비, 비열비, Bo^* 및 q^+ 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$Nu_b = \frac{hD}{k_b} = f[Re_b, Pr_b, \frac{\rho_w}{\rho_b}, \frac{c_p}{c_{p,b}}, Bo^*, q^+] \quad (15)$$

그리고 3.2 절의 열전달 데이터 분석결과를 통해 실험 및 참조 상관식에서의 Nusselt 수의 비는 Bo^* 보다는 q^+ 의 변화와 밀접하게 관련이 되어 있다는 것을 알 수 있었다. 또한 Fig. 9 에서 보는 바와 같이 본 연구에서의 실험데이터는 예측값 및 참조 상관식에서의 Nusselt 수의 비를 Bo^* 의 함수로 표현한 Fewster 와 Jackson⁽¹⁹⁾의 상관식과 큰 차이를 보였다.

그리하여 본 연구에서는 초임계 유체의 수직상향유동에서 Nusselt 수를 Reynolds 수, Prandtl 수, 밀도비, 비열비 및 q^+ 의 함수로 다음과 같이 표현하였다.

$$Nu_b = \frac{hD_i}{k_b} = f[Re_b, Pr_b, \frac{\rho_w}{\rho_b}, \frac{c_p}{c_{p,b}}, q^+] \quad (16)$$

실험결과로부터 Nusselt 수와 식 (16)에 나타난 무차원 변수들의 정량적인 상관관계를 얻기 위해 비선형 곡선 맞춤법을 이용하여 초임계 유체의 수직

Table 1 Selected experimental data of heat transfer to fluids at supercritical pressure

Literature	D (mm)	G (kg/m ² s)	P (bar)	q_w^* (kW/m ²)	Fluids
Kirillov et al. ⁽³⁸⁾	10	200	250	88-375	H ₂ O
CRL exp. ⁽³⁷⁾	8	880-3000	82.4-83.9	54-537	CO ₂
Kim's exp. (this study)	4.5	208-874	74.6-102.6	38-234	CO ₂

Table 2 Selected correlations of heat transfer to fluids at supercritical pressure

Authors	Correlation
Bishop et al. ⁽⁹⁾	$Nu_b = 0.0069 Re_b^{0.9} Pr_b^{-0.66} (\frac{\rho_w}{\rho_b})^{0.43} (1 + \frac{2.4}{x/d})$ $Pr_b = \frac{\mu_b c_p}{k_b}$
Swenson et al. ⁽¹⁰⁾	$Nu_b = 0.00459 Re_w^{0.923} Pr_w^{-0.613} (\frac{\rho_w}{\rho_b})^{0.231} \frac{k_w}{k_b}$ $Pr_w = \frac{\mu_w c_p}{k_w}$
Miropolsky and Pikus ⁽¹⁴⁾	$Nu_b = 0.023 Re_b^{0.8} Pr_{min}^{0.8} (\frac{\rho_w}{\rho_b})^{0.3}$ $Pr_{min} = Min(Pr_b, Pr_w)$
Liao and Zhao ⁽¹⁸⁾	$Nu_b = 0.354 Re_b^{0.8} Pr_b^{0.4} (\frac{Gr_m}{Re_b^{2.7}})^{0.157} (\frac{\rho_w}{\rho_b})^{1.297} (\frac{c_p}{c_{p,b}})^{0.296}$ for vertical upward flow $Nu_b = 0.643 Re_b^{0.8} Pr_b^{0.4} (\frac{Gr_m}{Re_b^{2.7}})^{0.186} (\frac{\rho_w}{\rho_b})^{2.154} (\frac{c_p}{c_{p,b}})^{0.751}$ for vertical downward flow $Nu_b = 0.124 Re_b^{0.8} Pr_b^{0.4} (\frac{Gr}{Re_b^{2.7}})^{0.203} (\frac{\rho_w}{\rho_b})^{0.842} (\frac{c_p}{c_{p,b}})^{0.384}$ for horizontal flow

상향유동에서의 새로운 열전달 상관식을 다음과 같이 개발하였다.

$$Nu_b = 0.791 Re_b^{0.921} Pr_b^{1.036} (\frac{\rho_w}{\rho_b})^{0.720} (\frac{c_p}{c_{p,b}})^{1.082} (q^+)^{0.730} \quad (17)$$

위의 새로운 열전달 상관식의 신뢰성을 평가하기 위하여 상관식에서 예측된 Nusselt 수를 본 연구와 기존의 다른 실험적 연구들에서 얻어진 데이터(Table 1)와의 비교를 수행하였고 이러한 실험데이터들을 기존의 다른 연구자들에 의해 개발된 초임계 유체에서의 열전달 상관식들(Table 2)과도 비교해 보았다. 그 결과 Fig. 10(a)에서 보는 바와 같

Table 3 The standard deviations of the selected correlations from experimental data

Correlations	Standard deviation (%)
Eq. (17) (New correlation)	11.0
Bishop et al. ⁽⁹⁾	45.7
Swenson et al. ⁽¹⁰⁾	44.1
Miropolsky and Pikus ⁽¹⁴⁾	34.0
Liao and Zhao ⁽¹⁸⁾	46.7

이 새로운 상관식은 실험데이터를 $\pm 30\%$ 의 오차 이내에서 잘 예측하였다. 그리고 Fig. 10b, c 및 d에서 볼 수 있듯이 Bishop 등,⁽⁹⁾ Swenson 등⁽¹⁰⁾ 및 Miropolsky 와 Pikus⁽¹⁴⁾의 상관식은 본 실험에서의 데이터(Kim's data) 및 CRL⁽³⁷⁾의 실험데이터와 다소 차이가 있었다.

이것은 이러한 상관식들이 초임계 물(Supercritical water) 실험을 기초로 개발되었기 때문일 것으로 추측된다. 또한 Liao 와 Zhao⁽¹⁸⁾의 상관식은 본 연구에서 활용된 열전달 데이터와 상당한 차이를 보였다.

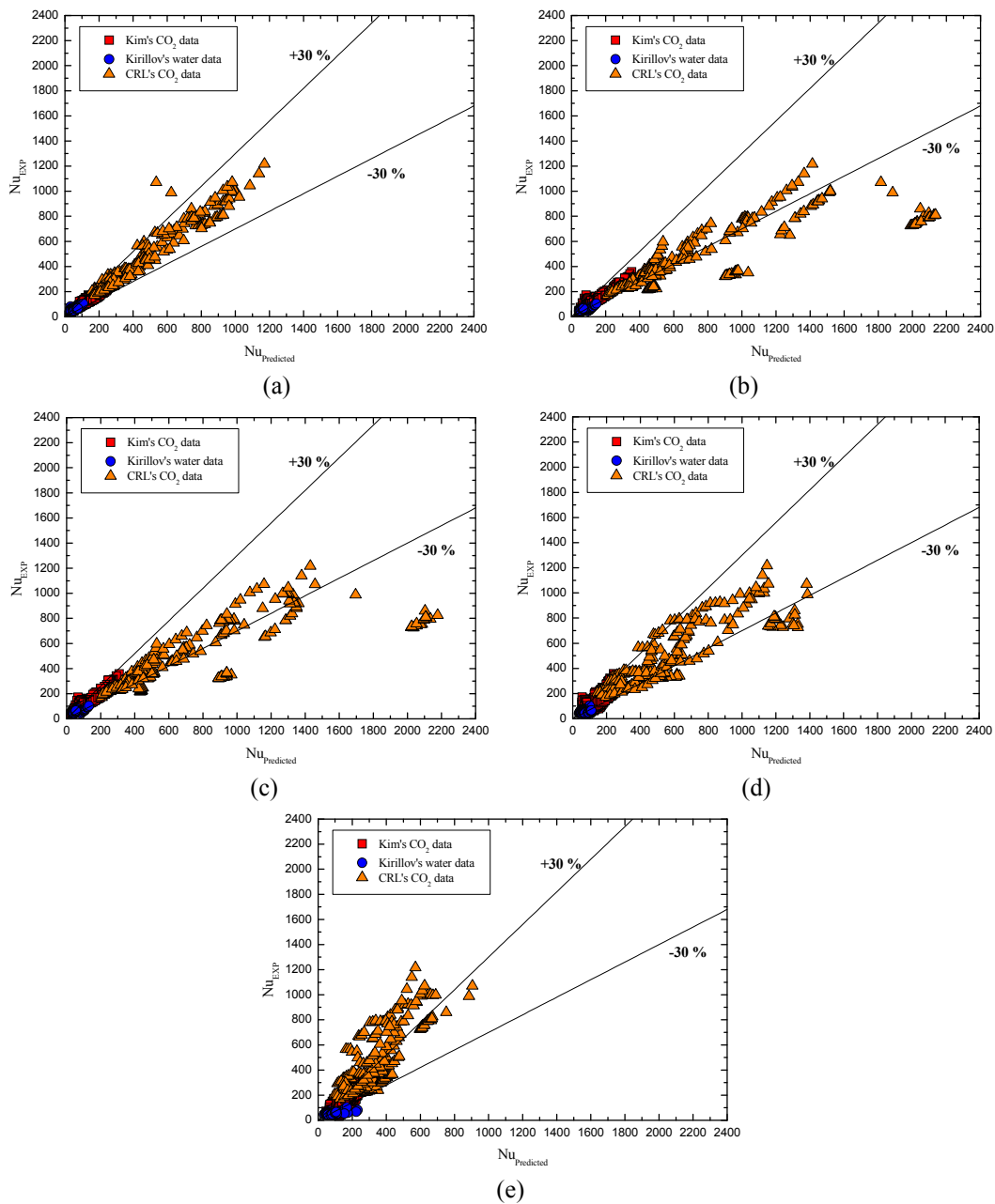


Fig. 10 Comparison of Nusselt numbers predicted from the selected correlations ($Nu_{\text{predicted}}$) and from various experiments (Nu_{EXP}); (a) New correlation (Eq. (17)), (b) Bishop et al.'s correlation⁽⁹⁾, (c) Swenson et al.'s correlation⁽¹⁰⁾, (d) Miropolsky and Pikus's correlation⁽¹⁴⁾, (e) Liao and Zhao's correlation⁽¹⁸⁾

Table 3 은 위의 상관식의 예측값과 실험데이터의 표준편차를 나타낸다. 본 연구에서 개발된 상관식은 기존의 연구자들에 의해 개발된 상관식들과 비교하여 우수한 정확도를 보여주는 것을 알 수 있었다. 그리하여 본 연구에서는 식 (17)을 초임계 유체의 수직 상향유동에서의 열전달 현상을 예측할 수 있는 새로운 상관식으로 제안하였다.

3. 결 론

본 연구에서는 초임계 CO₂ 의 수직 상향유동에서의 관내 강제대류 열전달에 관한 실험을 수행하였다. 실험에서 관 벽면온도는 관벽 열유속과 질량유속에 현저한 영향을 받았다.

관벽 열유속이 중간정도이고 질량유속이 낮았을 때 관벽온도에서 확인한 최고점이 나타났다. 열전달 특성에 대한 부력의 영향을 관찰하기 위해 실험에서 획득된 Nusselt 수 와 참조 상관식을 통해 계산된 Nusselt 수의 비가 부력의 영향을 나타내는 Bo*를 이용하여 분석되었다. 그리고 유동가속의 효과를 고려하기 위하여 실험과 참조 상관식에서의 Nusselt 수의 비를 유동가속 변수인 q⁺를 이용하여 분석하였다. 이를 통해 유동가속변수인 q⁺는 유동내에서 물성치변화가 심각한 초임계유체의 열전달 현상을 효과적으로 설명할 수 있는 변수라는 것을 알 수 있었다.

최종적으로, 본 연구에서는 초임계유체의 수직상향유동에서의 새로운 열전달 상관식이 제안되었다. 이 상관식은 본 연구에서의 실험데이터와 기존의 초임계 유체 열전달에 관한 다른 연구자들의 실험데이터를 ± 30 % 의 오차범위에서 잘 예측하였으며 기존 연구자들의 열전달 상관식들에 비해 우수한 정확도를 나타냈다.

참고문헌

(References)

- (1) Winterton, R.H.S., 1998, "Where did the Dittus and Boelter Equation come from?," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 41, pp. 809~810.
- (2) McAdams, W.H., Kennel, W.E. and Addoms, J.N., 1950, "Heat Transfer to Super-Heated Steam at High Pressures," *ASME. Trans.*, May, 1950.
- (3) Bringer, R.P. and Smith, J.N., 1957, "Heat Transfer in the Critical Region," *J. Am. Instn. Chem. Engrs.*, 3, No. 1.
- (4) Miropolsky, Z.L. and Shitsman, M.E., 1967, "Heat Transfer to Water and Steam at Variable Specific Heat (in Near Critical Region)," *Soviet Physics*, 2, No. 10.
- (5) Krasnoshchekov, E.A. and Protopopov, V.S., 1959, "Heat Exchange in the Supercritical Region During the Flow of Carbon Dioxide and Water," *Teploenergetika*, 6 No. 12, 26130.
- (6) Petukhov, B.S., Kranoschekov, E.A. and Protopopov, V.S., 1961, "An Investigation of Heat Transfer to Fluids Flowing in Pipes Under Supercritical Conditions, International Heat Transfer Conference," *ASME*, University of Colorado, Boulder, Colorado, USA, 8-12 January, Part III, Paper 67, pp. 569~578.
- (7) Domin, G., 1963, "Heat Transfer to Water in Pipes in the Critical/Supercritical Region," *B.W.K.*, 15, No. 11.
- (8) Kutateladze, S.S. and Leontiev, A.I., 1964, *Turbulent Boundary Layers in Compressible Gases*, Edward Arnold, London.
- (9) Bishop, A.A., Sandberg, R.O. and Tong, L.S., 1965, "Forced Convection Heat Transfer to Water at Near-Critical Temperatures and Supercritical Pressures," *American Inst. Chem. Engrs.-I.chem. E. Symposium Series*, No.2 .
- (10) Swenson, H.S., Carver, J.R. and Kakarala, C.R., 1965, "Heat Transfer to Supercritical Water in Smooth-Bore Tubes," *ASME. Journal of Heat Transfer.*, Nov, 1965.
- (11) Touba, R.F. and McFadden, P.W., 1966, "Combined Turbulent Convection Heat Transfer to near Critical Water," *Perdue Research Foundation, Lafayette, Indiana, Technical Report*, No. 18, L00-1177-18.
- (12) Kranoschekov, E.A. and Protopopov, V.S., 1966, "Experimental Study of Heat Exchange in Carbon Dioxide in the Supercritical Range at High Temperature Drops," *High Temp.*, 4 (3), pp. 375~382.
- (13) Yamagata, K., Nishikawa, K., Hasegawa, S., Fujii, T. and Yoshida, S., 1972, "Forced Convective Heat Transfer to Supercritical Water Flowing in Tubes," *Int. J. Mass Transfer*, 15, pp. 2575~2593.
- (14) Miropolsky, Z.L. and Pikus, V.U., 1967, "Heat Transfer in Supercritical Flows Through Curvilinear Channels," *Proc. I. Mech. E.*, 183, Part 31.
- (15) Lokshin, V.A., Semenovker, O.E. and Vikhrev, V., 1968, "Calculating the Temperature Conditions of the Radiant Heating Surface in Supercritical Boilers," *Teploenergetika*, 15, No. 9, pp. 21~24.
- (16) Schnurr, N.M., 1969, "Heat transfer to carbon dioxide in the immediate vicinity of the critical point," *ASME J. Heat Transfer*, 91, pp. 16~20.
- (17) Dashevskiy, Y.M., Miropol'skii, Z.L. and Khasanov-Agaev, L.R., 1987, "Heat Transfer with Flow of Medium at Supercritical Parameters of State in Channels with Different Spatial Orientation," *Thermal Eng.*, 34 (8), pp. 454~457.
- (18) Liao, S.M. and Zhao, T.S., 2002, "An Experimental Investigation of Convection Heat Transfer to Supercritical Carbon Dioxide in Miniature Tubes," *Int.*

- J. Heat Mass Transfer*, 45, pp. 5025~5034.
- (19) Fewster, J. and Jackson, J.D., 2004, "Experiments on Supercritical Pressure Convective Heat Transfer Having Relevance to SCWR," *Proceedings of the International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP'04)*, 13-17 June, Pittsburgh, USA, Paper 4342.
- (20) Kuang, B., Zhang, T. and Cheng, Xu., 2008, "A New, Wide-Ranged Heat Transfer Correlation of Water at Supercritical Pressures in Vertical Upward Ducts," *The 7th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-7)*, Seoul Korea, October 5-9, 2008.
- (21) Bae, Y.Y. and Kim, H.Y., 2009, "Convective Heat Transfer to CO₂ at a Supercritical Pressure Flowing Vertically Upward in Tubes and an Annular Channel," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33, pp. 329~339.
- (22) Hall, W.B. and Jackson, J.D., 1969, "Laminarisation of a Turbulent Pipe Flow by Buoyancy Forces," *ASME Paper*, No. 69-HT-55.
- (23) Jackson, J.D. and Hall, W.B., 1979, *Influences of Buoyancy on Heat Transfer to Fluids Flowing in Vertical Tubes Under Turbulent Conditions*, in: S. Kakac, D.B. Spalding (Eds.), *Turbulent Forced Convection in Channels and Bundles*, Hemisphere, pp. 613~640.
- (24) Launder, B. E., 1964, "Laminarization of the Turbulent Boundary Layer in Severe Acceleration," *J. Appl. Mech.*, 31, p. 707.
- (25) Schraub, F.A. and Kline, S.J., 1965, "A Study of the Structure of the Turbulent Boundary Layer with and Without Longitudinal Pressure Gradients," *Stanford University, Thermo. Sci. Div. Rep.*, MD-12.
- (26) Badri Narayanan, M.A. and Ramjee, V., 1968, "On the Criteria of Reverse Transition in a Two Dimensional Boundary Layer Flow," *India Inst. Of Sci. Rep.*, AE 68 FMI.
- (27) Patel, V.C. and Head, M.R., 1968, "Reversion of Turbulent to Laminar Flow," *Aero. Res. Council.*, 29 859-F. M., 3929.
- (28) Jones, W.P. and Launder, B.E., 1972, "The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 15, pp. 301~314.
- (29) Bradshaw, P., 1969, "A Note on Reverse Transition," *J. Fluid Mech.*, 35, p. 387.
- (30) McEligot, D.M., Coon, C.W. and Perkins, H.C., 1970, "Relaminarization in Tubes," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 13, pp. 431~433.
- (31) Moretti, P.M. and Kays, W.M., 1965, "Heat transfer to a Turbulent Boundary Layer with Varying Free-Stream Velocity and Varying Surface Temperature—an Experimental Study," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 8, pp. 1187~1202.
- (32) Perkins, K.R., Schade, K.W. and McEligot, D.M., 1973, "Heated Laminarizing Gas Flow in a Square Duct," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 16, pp. 897~916.
- (33) Kline, S.J. and McClintock, F.A., 1953, "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments," *Mech. Eng.*, p.3.
- (34) Jackson, J.D., Cotton, M.A. and Axcell, B.P., 1989, "Studies of Mixed Convection in Vertical Tubes," *Int. J. Heat Fluid Flow*, 10, pp. 2~15.
- (35) Mikielwicz, D.P., Shehata, A.M., Jackson, J.D. and McEligot, D.M., 2002, "Temperature, Velocity and Mean Turbulence Structure in Strongly Heated Internal Gas Flow: Comparison of Numerical Predictions with Data," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 45, pp. 4333~4352.
- (36) Bankston, C.A. and McEligot, D.M., 1970, "Turbulent and Laminar Heat Transfer to Gases with Varying Properties in the Entry Region of Circular Ducts," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 13, pp. 319~344.
- (37) Pioro, I.L. and Duffey, R.B., 2007, *Heat Transfer and Hydraulic Resistance at Supercritical Pressures in Power Engineering Applications*, ASME, New York, pp. pp. 93~98.
- (38) Kirillov, P.L., Pomet'ko, R.S. and Smirnov, 2005, "Experimental Study on Heat Transfer to Supercritical Water Flowing in Vertical Tubes," *Proceedings of the International Conference GLOBAL-2005, Nuclear Energy Systems for Future Generation and Global Sustainability*, Tsukuba, Japan, October 9-13, Paper No. 518, 8.