

헬리컬 코일관 내 초임계 CO₂의 압력강하 특성

유태근⁺·김대희⁺⁺·노건상⁺⁺⁺·구학근⁺⁺⁺⁺·오후규⁺⁺⁺⁺⁺
(원고접수일 : 년 월 일, 심사완료일 : 년 월 일)

Pressure Drop Characteristics of Supercritical CO₂ in a Helically Coiled Tube.

Tae-Guen Yu⁺, Dae-Hui Kim⁺⁺, Geon-Sang Roh⁺⁺⁺, Hak-Geun Ku⁺⁺⁺⁺, Hoo-Kyu Oh⁺⁺⁺⁺⁺

Abstract : The heat transfer coefficient and pressure drop during gas cooling process of carbon dioxide in a helically coiled tube were investigated experimentally. The experiments were conducted without oil in the refrigerant loop. The main components of the refrigerant loop are a receiver, a variable speed pump, a mass flowmeter, a pre-heater, a gas cooler(test section) and an isothermal tank. The test section is a double pipe type heat exchanger with refrigerant flowing in the inner tube and water flowing in the annulus. It was made of a copper tube with the inner diameter of 4.85 [mm], the outer diameter of 6.35 [mm] and length of 10000 [mm]. The refrigerant mass fluxes were 200~600 [kg/m²s] and the average pressure varied from 7.5 [MPa] to 10.0 [MPa]. The main results were summarized as follows : The heat transfer coefficient of supercritical CO₂ increases, as the cooling pressure of gas cooler decreases. And the heat transfer coefficient increases with the increase of the refrigerant mass flux. The pressure drop decreases in increase of the gas cooler pressure and increases with increase the refrigerant mass flux.

Key words : Carbon Dioxide(이산화탄소), Gas Cooling(가스냉각), Helically Coiled Tube(헬리컬 코일관), Heat Transfer Coefficient(열전달계수), Pressure Drop(압력강하)

기호설명

A : 전열면적 [m²]
c_p : 정압비열 [kJ/kg·K]
d : 관경 [m]
f_c : 마찰계수
G : 질량유속 [kg/m²·s]
h : 열전달계수 [kW/m²·K]
L : 시험구간 길이 [m]
M : 질량유량 [kg/s]
P : 압력 [MPa]
q : 열유속 [kW/m²]

T : 온도 [°C]
u : 유속 [m/s]
ΔP : 압력강하 [kPa]
dz : 소시험부의 길이 [m]

그리스 문자

k : 열전도도 [W/(m·K)]
ρ : 밀도 [kg/m³]

하첨자

avg : 평균값

+ 책임저자(부경대학교 냉동공조공학과), E-mail: ringhalf@mail.pknu.ac.kr, Tel: 051)621-6802

++ 부경대학교 냉동공조공학과

+++ 동명대학교 가스냉동과

++++ 동명대학교 가스냉동과

+++++ 부경대학교 냉동공조공학과

cw : 냉각수
 i : 내측
 in : 입구
 loc : 국소값
 o : 외측
 out : 출구
 re : 냉매
 w : 관벽

무차원수

Re : Reynolds 수, $U \cdot L / \nu$

1. 서론

환경보호에 대한 국제적인 관심이 높아지면서 기존의 CFC계 및 HCFC계 냉매 사용에 대한 규제가 강화되고 있다. 이에 대한 방안으로 합성물질인 HFC계 및 자연냉매의 활용이 거론되고 있지만, HFC계 냉매의 경우 지구의 온난화에 영향을 미치는 것으로 알려지고 있기 때문에 1997년 채택된 교토의정서에는 온실 효과 가스의 배출규제물질에 포함되어 있다. 이에 반해 자연냉매는 오존층 파괴 및 지구온난화에 대한 영향이 미미하다. 그 중에서도 CO₂는 다른 냉매들과 달리 인화성과 독성이 없어서 안전성이 뛰어나며, 비열과 체적열용량 등의 우수한 열역학적 물성을 가지고 있다. 또한 냉동기에 적용할 때 성능 개선의 가능성이 많아 국내외에서 많은 연구가 진행 중이다.^{1), 2)}

CO₂는 임계압력이 7.38 MPa이고 임계온도가 31.1℃로 매우 낮기 때문에 사이클의 고온열원에서 냉각 과정은 임계점 이상에서 일어난다. 따라서 CO₂의 방열 과정은 기존의 응축과정과는 달리 상변화가 없는 초임계 영역에서 일어나며 이를 가스냉각과정이라고 한다. 이처럼 CO₂를 이용한 시스템의 가스냉각과정은 기존 시스템의 방열과정과 큰 차이가 있으며 안정성, 효율성 및 내구성 등에 세심한 주의가 요구된다.

따라서, 본 논문에서는 CO₂용 냉동·공조 시스템에서 가장 중요한 요소 기기인 가스 냉각기의 설계를 위한 기초자료를 제공하고자 CO₂를 냉매로 사용하여 초임계영역에서 헬리컬 코일형 가스 냉각기의 열전달과 압력강하 특성에 대해서 고찰하고자 한다.

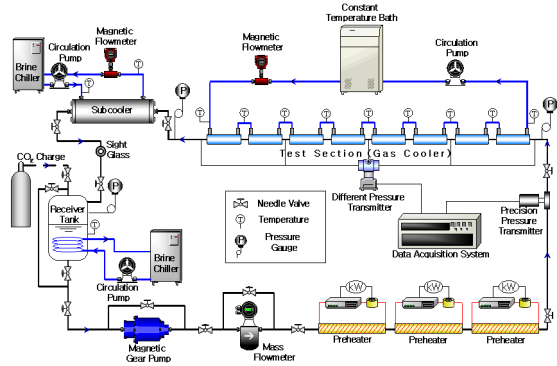


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

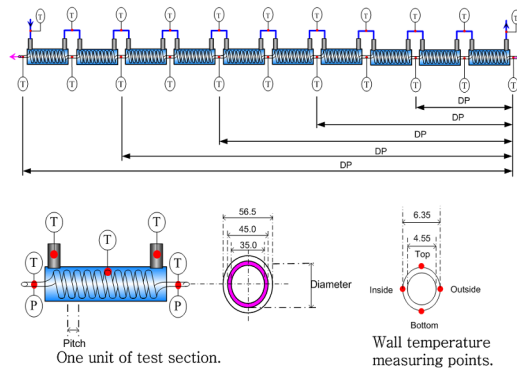


Fig. 2 Details of the test section.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 실험장치는 크게 냉매 순환루프와 냉각수 순환루프로 구성되어 있다. 냉매 순환루프에서 CO₂ 냉매는 액상으로 수액기에 충전된 후, 구동원인 냉매펌프를 지나 질량유량계로 들어간다. 냉매액은 질량유량계에서 유량이 측정된 후, 예열기를 통과하면서 전기히터에 의해 가열되어 압력과 온도가 초임계 상태로 된다. 예열기에서 나온 초임계 상태의 냉매는 시험부인 헬리컬 코일형 가스 냉각기로 유입되도록 구성되어 있다. 그리고 냉각수 순환루프에서는 초임계 상태의 냉매를 냉각시키기 위해 냉각수가 시험부 내관과 외관사이의 환상공간으로 냉매와 대향류로 흐르며 냉각수 유량계

Table 1 Experimental conditions.

Refrigerant	R-744
Test section	Helically Coiled Tube
$d_i(d_o)$ [mm]	4.85(6.35)
G_{re} [kg/m^2s]	200, 400, 600
$P_{gc, in}$ [MPa]	7.5~10.0
$T_{cw, in}$ [$^{\circ}C$]	15

에서 일정하게 조절된다.

Fig. 2는 시험부인 헬리컬 코일형 가스 냉각기의 상세도를 나타낸 것이다. 시험부는 내관에 냉매가 흐르고 외관에 냉각수가 흐르는 이중관식 대향류 열교환기이다. CO₂의 전열관의 내경은 4.85 [mm], 외경은 6.35 [mm], 코일의 반경은 42 [mm], 길이는 10,000 [mm]의 동관으로 제작하였으며 셀은 내경 55 [mm]인 PVC관으로 제작되었다. 그리고 각 시험부는 입구에서 1000 [mm]씩 동일간격으로 10개 구간으로 나누어져 있으며 각 구간마다 냉매, 관벽, 냉각수 온도 및 차압을 측정할 수 있도록 구성하였다.

2.2 실험방법

초임계영역에서의 CO₂ 냉각 열전달 실험은 냉매의 질량유속과 입구압력을 각각 변화시키면서 수행하였다. 냉매의 질량유속은 200~600 [kg/m^2s]사이에서 변화시켰으며 입구압력은 7.5~10.0 [MPa]로 변화시키면서 실험하였다. 온도와 압력은 실험장치가 정상 상태에 도달한 후 측정하였으며, 차압은 관내부에 압력탭을 설치하여 시스템내의 압력변동이 최소화 되는 상태에 이르렀을 때 차압계를 이용하여 측정하였다. 데이터 측정이 완료되면 다시 냉매 유량과 냉각수 유량을 조절하여 반복실험을 하였다. Table 1에 본 연구의 실험조건을 나타내었다.

3. 실험자료 정리

3.1 열전달

각각의 소시험부에서 국소 열전달 계수는 뉴턴의

냉각법칙에 의해서 식(1)로 계산할 수 있다.

$$h = \frac{q}{T_{re} - T_{w, in}} \quad (1)$$

여기서 T_{re} 는 냉매온도, $T_{w, in}$ 은 관내벽면온도이다. q 는 냉각수의 온도와 유량으로부터 식 (2)로 계산한 냉각수의 열유속이다.

$$q = \frac{M_{cw} \cdot c_{p, cw} \cdot (T_{cw, out} - T_{cw, in})}{\pi \cdot d_i \cdot dz} \quad (2)$$

위 식에서 M_{cw} 는 냉각수 유량, $c_{p, cw}$ 는 냉각수 비열, L 은 소시험구간의 전열길이를 나타낸다. 국소 열전달 계수를 구하는 지점에서의 냉매온도 T_{re} 는 소시험부 사이마다 측정한 냉매 온도를 이용하여 식 (3)에서 구하였다.

$$T_{re} = \frac{T_{re, n-0.5} + T_{re, n+0.5}}{2} \quad (3)$$

내벽면 온도 $T_{w, in}$ 은 상부, 하부, 측부의 4곳에서 측정한 외벽면 온도 $T_{w, out}$ 을 산술 평균한 후, 증공원통에 사용되는 일차원 전도 방정식을 이용하여 식 (4)로 계산하였다.

$$T_{w, in} = T_{w, out} + \frac{d_{in} \cdot q}{2k_w} \cdot \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right) \quad (4)$$

여기서 k_w 는 관의 열전도도, q 는 식 (2)로 계산한 열유속이다.

3.2 압력강하

헬리컬 코일관내 단상유동 상태에 적용되는 마찰압력강하 상관식[1]은 아래의 상관식으로 계산하였다.

$$\Delta P = \frac{f_c}{4} \cdot \frac{L}{d_i} \cdot \frac{G_{re}^2}{2\rho_{re}} \quad (5)$$

여기서 L 은 시험구간의 전체길이, d_i 은 내관의 내경, ρ_{re} 는 내관을 흐르는 냉매의 밀도, G_{re} 는 내관을 흐르는 냉매의 평균질량유속, f_c 는 헬리컬 코일관의 마찰계수, 그리고 ΔP 는 실험으로 구한 값이다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 열전달

4.1.1 압력변화에 따른 열전달계수

Fig. 3은 일정한 질량유속($G_{re}=400$ [kg/m^2s])에서 CO₂의 냉각압력변화에 따른 열전달계수를 가스냉각기

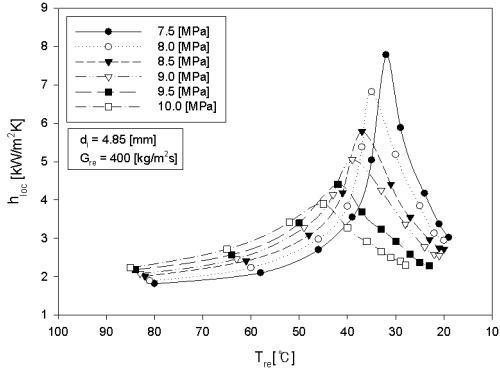


Fig. 3 Variation of heat transfer coefficient with respect to gas cooling pressure.

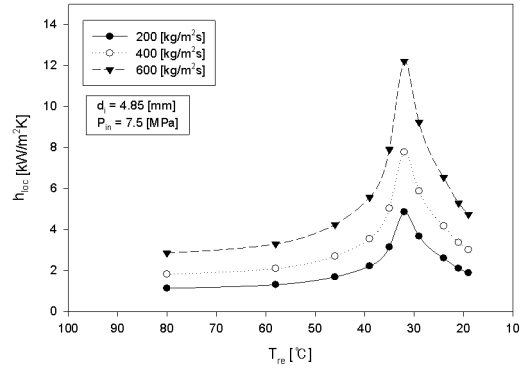


Fig. 4 Variation of heat transfer coefficient with respect to mass fluxes ($P_{in}=7.5$ MPa).

내의 온도변화에 따라 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, 질량유속이 동일한 경우, 가스 냉각기의 입구영역에서 냉매 온도변화에 따른 물성치 차이가 작으므로 열전달계수의 차이가 크지 않다. 그러나 가스 냉각기의 중간부에서는 냉매 온도변화에 따른 물성치 차이가 급격히 변하므로 국소 열전달계수는 크게 증가하다가 감소하였다. 그리고 액단상 영역인 가스 냉각기의 후반부에서 CO_2 의 온도변화에 따른 물성치 차이가 다시 작아지므로 열전달계수의 차이는 작아진다.

4.1.2 질량유속변화에 따른 열전달계수

Fig. 4와 5는 가스 냉각기 입구압력이 각각 7.5 [MPa]와 9.5 [MPa]이고 질량유속이 200~600 [kg/m^2s]인 범위내에서 온도변화에 따른 열전달계수를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, 일정한 압력하에서 질량유속이 증가할수록 CO_2 의 국소 열전달계수는 증가하였다. 이는 질량유속이 증가할수록 CO_2 의 Reynolds 수가 증가하여 열전달이 향상되기 때문이다. 또한 국소 열전달계수는 압력과 질량유속에 관계없이 항상 가임계 온도에서 최대값을 가진다. 이는 CO_2 의 비열 변화가 이 영역에서 가장 크기 때문이다.

4.1.3 평균 열전달계수

Fig. 6은 가스냉각기 내 냉매의 평균 열전달계수 h_{avg} 를 질량유속에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 가스 냉각기의 전체압력 범위내에서 냉매의 질량유속이 증가할수록 CO_2 의 평균 열전달계수는

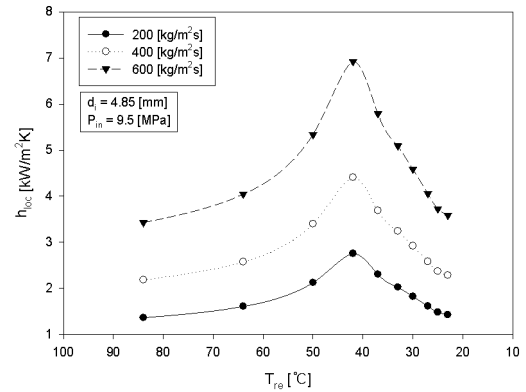


Fig. 5 Variation of heat transfer coefficient with respect to mass fluxes ($P_{in}=9.0$ MPa).

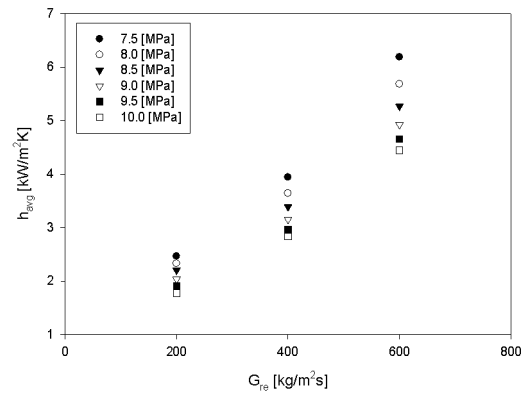


Fig. 6 Average heat transfer coefficients h_{avg} vs. refrigerant mass fluxes G_{re} .

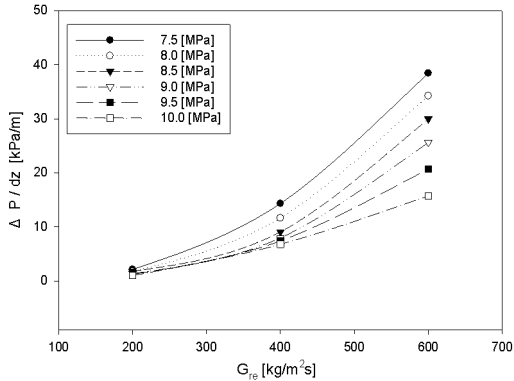


Fig. 7 Variation of the pressure drop with respect to varying mass flux at different inlet pressures during gas cooling process.

선형적으로 증가하였다. 이는 냉매의 질량유속이 증가할수록 Reynolds 수가 증가하여 열전달 효과가 상승하기 때문이다.

4.2 압력강하

4.2.1 질량유속과 냉각압력에 따른 영향

Fig. 7은 가스 냉각기의 입구압력이 7.5~10.0 [MPa]이고 질량유속이 200~600 [$\text{kg/m}^2\text{s}$]인 범위에서 측정한 냉매의 압력강하를 질량유속 변화에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 일정한 가스 냉각기 입구 압력하에서 CO_2 의 질량유속이 증가할수록 압력강하는 증가하고, 일정한 질량유속에서 가스 냉각기 입구압력이 증가할수록 CO_2 의 압력강하는 감소하는 경향으로 나타났다. 또한, 냉매의 질량유속이 증가할 경우, 가스 냉각기의 입구압력이 낮을수록 더 높은 비율로 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 시스템 내의 압력이 증가할수록 냉매의 밀도가 증가하고, 이에 따라 밀도가 증가하면 압력강하도 감소하기 때문이다.

4.2.2 타상관식과의 비교

헬리컬코일 내 단상난류영역에 가장 일반적으로 사용되는 마찰계수(f_c) 상관식으로는 White^[3]가 제안한 다음의 식이 있다.

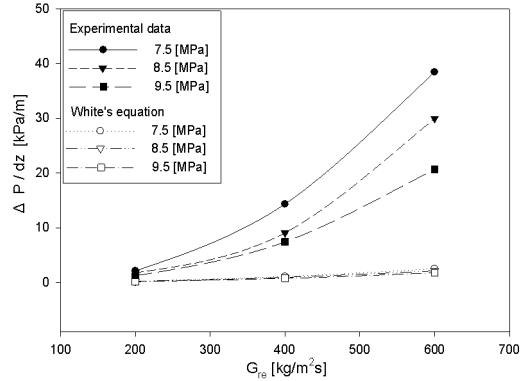


Fig. 8 Comparison of the measured pressure drop with that predicted by White's equation.

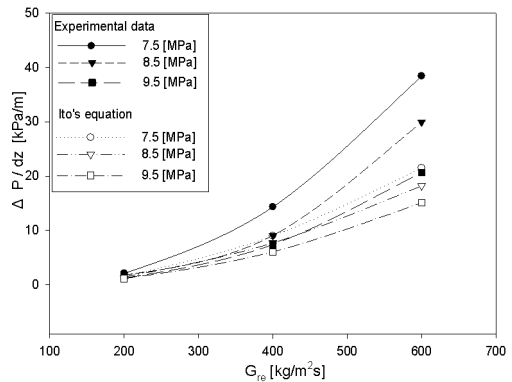


Fig. 9 Comparison of the measured pressure drop with that predicted by Ito's equation.

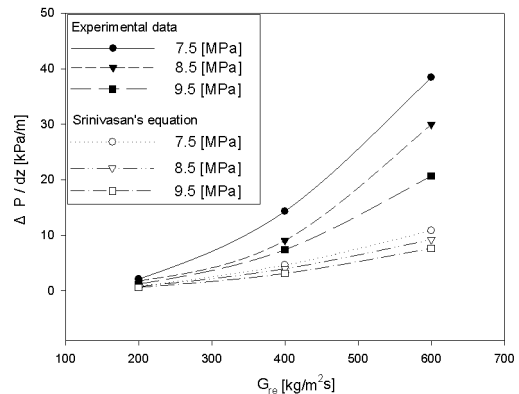


Fig. 10 Comparison of the measured pressure drop with that predicted by Srinivasan's equation.

$$f_c = 0.31 \left[\log \left(\frac{Re}{7} \right)^2 + 0.04 \left(\frac{d}{D} \right)^{0.5} \right] \quad (6)$$

Ito^[4]는 코일관내에서 완전발달된 난류유동의 마찰 계수를 다음과 같은 형태로 제안하였다.

$$f_c = 1.216 Re^{0.25} + 0.116 \left(\frac{d}{D} \right)^{0.5} \quad (7)$$

또한, Srinivasan^[5]은 Ito 상관식을 바탕으로 아래와 같은 형태의 상관식을 제안하였다.

$$f_c = 1.334 Re^{0.2} \left(\frac{d}{D} \right)^{0.1} \quad (8)$$

Fig. 8-10은 가스 냉각기 입구압력이 7.5 MPa, 8.5 MPa와 9.5MPa이고, 질량유속이 200~600 kg/m²s 인 범위에서 측정된 압력강하와 White 상관식, Ito 상관식, Srinivasan 상관식의 예측값들과 비교하였다. 전반적으로 기존 상관식들의 예측값과는 큰 차이를 보였고, 예측값은 실험으로 계산한 값보다 낮게 나타났다. 헬리컬 코일에 대해 제안된 상관식들 중에서 Ito 상관식과 실험값이 가장 근접한 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 헬리컬 코일관내 CO₂의 가스냉각과정에서 열전달계수와 압력강하량을 측정, 기존의 상관식과 비교하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) CO₂ 냉매가 가스 냉각기 내에서 냉각되는 동안 열전달 계수는 서서히 증가하다가 유사임계온도에서 최대값에 도달한 후 감소한다. 가스 냉각기 입구압력의 변화에 따른 열전달 계수는 CO₂의 압력이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내고 있다.

(2) 질량유속의 변화에 따른 열전달 계수는 질량유속이 증가할수록 CO₂의 열전달 계수는 증가한다.

(3) 가스 냉각기 내 냉각 과정 중에 CO₂ 압력강하는 압력이 증가할수록 감소한다. 또한 질량유속에 따른 압력강하는 질량유속이 증가할수록 압력강하가 증가하였다. 측정된 압력강하 값과 White, Ito, Srinivasan 등의 상관식으로 예측한 값을 비교한 결과, Ito의 상관식이 측정된 압력강하 값과 가장 근접한 것으로 나타났다.

- [1] Lorentzen, G. and Pettersen, J., 1993, "A new, efficient and environmentally benign system for car air-conditioning", International Journal of Refrigeration, Vol. 16, No. 1, pp. 4-12.
- [2] Pettersen, J., Rieberer, R., and Munkejord, S. T., 2000, "Heat transfer and pressure drop for flow of supercritical and subcritical CO₂ in microchannel tubes", SINTEF Energy Research. G. S. Choi and C. S. Kim, "Linear Stable Systems", IEEE Trans. of Automatic Control, Vol. 33, No. 3, pp. 1234-1245, 1993.
- [3] K. Akagawa, T. Sakaguchi, M. Ueda, Study on gas liquid two-phase flow in helically coiled tubes, Bull. JSME 14(72), pp 564-571, 1971
- [4] H. Ito, Frictional factors for turbulent flow in curved pipes, J. Eng.81, 123-134, 1959
- [5] P. S. Srinivasan, S. S. Nandapurkar, F. A. Holland, Pressure drop and heat transfer in coils, Chem. Eng. 218, 113-119, 1968

참고문헌