

마이크로핀관내 냉동기유가 초임계 이산화탄소의 열전달과 압력강하에 미치는 영향

구학근^{1*}

¹동명대학교 냉동공조공학과

Effect of the lubrication oil on heat transfer and pressure drop characteristics of supercritical carbon dioxide in a microfin tube

Hak-Keun Ku^{1*}

¹Department of refrigeration and air-conditioning engineering, Tongmyong University

요약 본 논문은 수평 마이크로핀관내 초임계 CO₂와 PAG 혼합물의 열전달과 압력강하 특성에 대해서 실험적으로 연구한 것이다. CO₂와 PAG 혼합물의 열전달계수는 압력이 10 MPa이고, 질량유속은 520 kg/m²s이며, PAG 오일 농도는 0.06~2.26%에서 측정하였다. PAG 오일농도가 0.3%인 경우, CO₂와 PAG 혼합물의 열전달계수와 압력강하는 순수 CO₂ 냉매의 열전달계수와 동일한 경향을 나타내었다. 그리고 PAG 질량농도가 2.26%인 경우, 초임계 온도근처에서 측정한 열전달계수는 순수 CO₂의 열전달계수 보다 약 50%정도 낮게 나타났다. 마찰압력강하는 60℃의 CO₂ 평균온도에서 순수 CO₂의 압력강하보다 약 1.6배 더 높게 나타났다.

Abstract This paper presents an experimental study of heat transfer and pressure drop characteristics of supercritical carbon dioxide with PAG inside a horizontal microfin tube. Heat transfer coefficient and pressure drop gradients were measured at 10 MPa in pressure and 520 kg/m²s in mass flux with variation of PAG mass concentration from 0.06% to 2.26%. The tendencies of both heat transfer and frictional pressure drop characteristics show the same as those of pure CO₂ up to 0.3% in PAG mass concentration. In case of 2.26% in PAG mass concentration, measured heat transfer coefficients showed 50% lower than those of pure CO₂ near the pseudocritical temperature and measured frictional pressure drop gradients show 1.6 times higher in comparison with those of pure CO₂ at 60℃ in CO₂ bulk temperature.

Key Words : Carbon dioxide, Heat transfer coefficient, Gas cooler, Supercritical pressure, Microfin tube, Lubrication oil, PAG(Poly Alkylene Glycol)

1. 서론

최근 들어 프레온계 냉매의 지구온난화와 오존층파괴로 인해 대체냉매에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 유력한 후보 대체냉매로는 자연냉매인 이산화탄소(CO₂)가 거론되고 있다. 이 냉매는 무색, 무취이며, 인체에 무해하고, 오존층파괴지수(ODP)와 지구온난화지수(GWP)가 대단히 낮다. 또한, 증발잠열이 높고, 비체적이 다른

냉매에 비해 작기 때문에 냉매충전량을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 냉동 및 히트펌프 시스템을 더욱더 콤팩트화할 수 있는 장점이 있다.[1-3]

증기압축식 히트펌프 시스템에서 압축기 윤활유인 냉동기유는 유분리기에서 100% 모두 분리되지 않고, 냉매와 혼합되어 배관내를 흘러가게 된다. 따라서 냉매에 혼합되어 있는 냉동기유는 열교환기 전열관내의 전열성능과 압력강하 특성에 영향을 미치게 된다.

*Corresponding Author : Hak-Keun Ku

Tel: +82-17-552-3521 e-mail: hgkur@tu.ac.kr

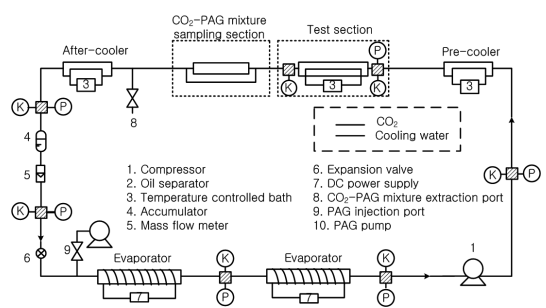
접수일 12년 01월 06일

게재확정일 12년 04월 12일

수정일 (1차 01월 31일, 2차 02월 03일, 3차 02월 13일, 4차 02월 17일, 5차 02월 21일, 6차 03월 02일, 7차 03월 20일)

지금까지 발표된 관련 문헌을 조사해보면, 프레온계 냉매에 대한 냉동기유의 영향을 조사한 연구[4,5]는 비교적 많은 반면에, 이산화탄소의 냉각 열전달에 대한 냉동기유의 영향을 파악 및 분석한 논문은 대단히 부족하며, 이에 대해서 정확하게 분석한 이론 및 실험데이터도 대단히 부족한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 냉동기유인 PAG를 사용하여 마이크로핀관형 가스냉각기내 초임계 이산화탄소의 냉각 열전달과 압력강하 특성에 대해서 실험적으로 조사하고자 한다. 이를 통해 마이크로핀관내 초임계 이산화탄소의 냉각열전달과 압력강하 특성에 대한 기초자료를 제시하고자 한다.



[그림 1] 실험장치의 상세도
[Fig. 1] Schematic of experimental apparatus.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

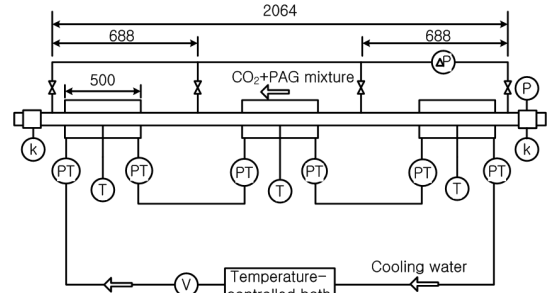
Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 실험장치는 압축기, 예냉기(Pre-cooler), 시험부, 과냉각기(After-cooler), 팽창밸브, 증발기 등으로 구성되는 증기압축식 히트펌프 시스템이다.

냉매의 순환경로를 살펴보면, 우선 수액기에서 액상으로 충전된 이산화탄소 냉매는 질량유량계를 거쳐 팽창밸브로 들어간다. 이때 고압의 냉매액은 저압의 냉매액과 증기로 변하여 증발기로 유입된다. 증발기로 들어온 냉매는 전기가열방식에 의해 증발한 후 압축기로 유입된다. 압축기에서는 고압의 증기로 압축된 후 예냉기를 통해 시험부(가스냉각기)로 들어가게 된다. 가스냉각기에서는 냉각수와 열교환한 후, CO₂-PAG 혼합물 시료 채취부를 통해 과냉각기로 들어간다.

이산화탄소 압축기용 냉동기유인 PAG를 히트펌프 시스템(9 지점으로)에 주입하기 위해 PAG 펌프를 설치하였다. 또한, 본 연구에서는 CO₂-PAG 혼합물의 PAG 질량

농도를 측정하기 위해서 시험부 출구에 CO₂-PAG 혼합물 시료 채취부와 시료 채취 펌프(8 지점)를 설치하였다.

2.2 시험부



K : K-type thermocouple T : T-type thermocouple
PT: Resistance thermometer P : Gauge-type pressure transducer
ΔP: Differential pressure transducer V : Volumetric flow meter

[그림 2] 실험부의 상세도
[Fig. 2] Schematic of test section.

Fig. 2는 시험부의 상세도를 나타낸 것이다. 시험부는 이중관식 대향류 열교환기이고, 내관으로는 이산화탄소가 흐르고, 내관과 외관의 환상공간으로 냉각수가 흐른다. 시험부의 전체 길이는 2064 mm로, 길이가 688 mm인 3개의 소시험부(subsection)로 구성된다. 각 소시험부의 전열 유효길이는 500 mm이다. 시험부 입구의 냉매 혼합실에는 K형 열전대(측정오차 ±0.05 °C)와 20 MPa까지 측정가능한 게이지 압력계(측정오차 ±0.02 MPa)를 설치하여 이산화탄소의 온도와 압력을 측정하였다. 각각의 소시험부 압력손실은 ±35 kPa까지 측정이 가능한 차압계(측정오차 ±0.0875 kPa)를 이용하여 측정하였다. 각각의 소시험부내 전열관 표면에 상하좌우 4개소에 직경이 0.1 mm인 T형 열전대를 설치하여 관외표면의 온도를 측정하였다. 관외표면온도의 측정오차는 검증결과 ±0.05 °C이었다. 냉각수온도는 각각의 소시험부 출입구에 설치한 냉각수용 혼합실에 삽입한 직경 2.3 mm의 백금온도저항체(측정오차 ±0.02 °C)로 측정하였다. 그리고 이산화탄소와 냉각수의 유량은 70 kg/h까지 측정가능한 질량유량계(측정오차 ±0.28 kg/h)와 200 l/h까지 측정가능한 체적식 유량계(측정오차 ±1 l/h)로 측정하였다.

본 실험에 사용한 마이크로핀관의 상세한 사양은 Table 1에 나타내었다. 종래에 주로 사용되는 내면핀관은 흡이 관측방향에 수직되게 파여 있지만, 본 연구에 사용된 마이크로핀관의 흡은 관측방향에 직선적으로 설치되어 있다. 또한, 마이크로핀관의 평균내경(d_f)는 내면 부차관의 실제 유로단면적(A_f)과 동일한 유로단면적을 가지는 평활관의 내경으로 정의하였다.

[표 1] 시험부의 상세 사양

[Table 1] Geometrical parameters of the test section.

Items	Values
d_o , [mm]	6.06
d_r , [mm]	5.35
d_i , [mm]	4.76
γ , [mm]	0.245
β , [deg.]	0
N, [-]	50
η , [-]	2.08

2.3 분석결과

Fig. 3은 CO₂-PAG 혼합물 시료 채취부의 상세도를 나타낸 것이다. 이 시험 채취부는 공기작동밸브①, ②와 길이 800 mm(외경 1/4인치, 내경 두께 1 mm)의 CO₂-PAG 혼합물 시료 채취관으로 구성된다. 또한, CO₂-PAG 혼합물 시료 채취관은 분리가 가능하다. 공기작동밸브①은 통상 열려 있는 반면, 공기작동밸브②는 닫혀 있다. CO₂-PAG 혼합물은 Fig. 1의 시험부를 나온 후, CO₂-PAG 혼합물 시료 채취부를 통과해서 과냉각기로 들어간다. 공기압축기로 압축된 공기를 공기작동밸브①, ②로 동시에 공급하기 때문에, 공기작동밸브①은 닫혀 있고 공기작동밸브②는 열려 있다. 이러한 방법에 의해 관내를 흐르는 상태에서 CO₂-PAG 혼합물은 바이패스된다. 공기작동밸브①, ②의 작동시간은 압축공기를 공급하기 때문에 0.3 초 이내이다. 또한 Fig. 1에 나타낸 CO₂-PAG 혼합물 시료 채취부(8)를 이용하여 시료를 채취하는 경우 시료 채취용 펌프(75 cc)를 진공상태로 해서 채취하였다.

Table 2는 실험조건을 나타낸 것이다. 본 실험에서는 압력 10 MPa, 질량유속 520 kg/m²s로 고정하고, PAG 질량농도를 변화시켜 가면서 실험을 했다. 또한, Table 1에 나타낸 질량농도는 CO₂-PAG 혼합물 시료 채취부에서 얻은 시료를 이용하여 측정된 값이다. 시험부의 전체 열교환량은 약 1 kW가 되도록 냉각수온도와 유량을 조절하여 실험하였다.

[표 2] 실험조건

[Table 2] Experimental conditions.

Items	Values
P, [MPa]	10
G, [kg/m ² s]	520
T _{in} , [°C]	20~75
y _c , [%]	0.06~2.26

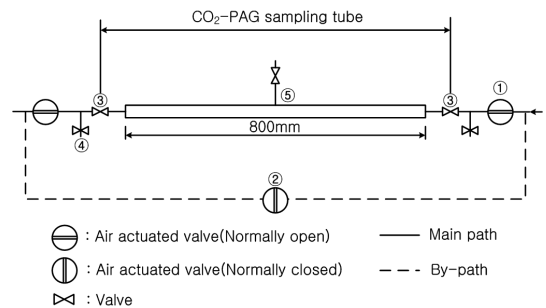
2.4 CO₂-PAG 농도 측정방법

CO₂-PAG 혼합물의 농도 측정방법은 아래의 순서에 나타내었다.

- ① CO₂-PAG 혼합물 시료 채취부 및 CO₂-PAG 혼합물 시료 펌프(Fig. 1 (8))를 이용하여 CO₂-PAG 혼합물을 채취한다.
- ② CO₂-PAG 혼합물의 채취용기(채취부 및 채취용 펌프)의 질량을 각각 측정한다.
- ③ ②에서 측정된 채취용기로부터 CO₂를 방출시키고, CO₂가 완전히 방출된 후, PAG만 남아 있는 채취용기의 질량을 측정한다.
- ④ PAG가 남아 있는 채취용기를 세정하고 건조시킨 후, 채취용기의 질량을 측정한다.
- ⑤ 순서 ②에서 측정된 질량으로부터 순서 ④에서 측정된 질량을 뺀다. 그리고 CO₂-PAG 혼합물만의 질량(M_{CO₂+PAG})을 구한다.
- ⑥ 순서 ③에서 측정된 질량으로부터 순서 ④에서 측정된 질량을 빼고, PAG만의 질량(M_{PAG})를 계산한다.
- ⑦ 순서 ⑤, ⑥에서 계산한 질량으로부터 PAG의 질량 비율 농도를 다음 식으로 계산한다.

$$y = \frac{M_{PAG}}{M_{CO_2+PAG}} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

또, 질량측정은 측정정도가 1 mg인 전자저울을 사용하였고, PAG 질량농도의 오차는 ±0.01% 이내이다.



[그림 3] CO₂-PAG 혼합물 채취부의 상세도

[Fig. 3] Schematic of CO₂-PAG mixture sampling section.

2.5 데이터 정리

마이크로핀관내 CO₂의 냉각열전달 특성을 분석하기 위해서는 먼저, 냉각수가 없는 열교환량(Q_{cs})과 냉매가

연은 열교환량(Q_{gc})을 알아야 하고, 그 수식들은 다음과 같다.

$$Q_{cs} = M_{cs} \cdot c_{p,cs} \int_{T_{cs,in}}^{T_{cs,out}} dt \quad (2)$$

$$Q_{gc} = M_{gc} \cdot (i_{gc,in} - i_{gc,out}) \quad (3)$$

여기에서, M_{cs} 와 M_{gc} 는 각각 가스 냉각기측 열원수의 유량과 냉매의 순환량이다. 그리고 $T_{cs,in}$ 과 $T_{cs,out}$ 는 각각 가스 냉각기측 열원수의 입구와 출구 온도를 나타내며, $T_{gc,in}$ 과 $T_{gc,out}$ 는 각각 가스 냉각기측 냉매의 입구와 출구 온도를 나타낸다. $c_{p,cs}$ 와 $c_{p,gc}$ 는 각각 가스 냉각기측 열원수와 냉매의 비열을 나타낸다. 또 $i_{gc,in}$ 과 $i_{gc,out}$ 는 각각 가스 냉각기 입구와 출구에서의 냉매의 엔탈피를 나타낸다. 가스 냉각기 소구간에서의 열유속 q_{gc} 는 다음과 같은 식 (4)로부터 계산하였다.

$$q_{gc} = \frac{Q}{\pi \cdot d_i \cdot \Delta z} \quad (4)$$

여기에서, Q 는 식 (2)로 계산한 가스 냉각기의 열량이다. 그리고 d_i 는 관내경 이고, Δz 는 소구간의 길이를 나타낸다. 또 냉각 과정에서 관의 원주 방향으로의 열전달 계수는 시스템의 성능에 많은 영향을 미치므로, 원주 방향으로의 열전달계수를 계산할 필요가 있는데, 이러한 국소 열전달계수는 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

$$h_{gc,loc} = \frac{q_{gc}}{T_{gc} - T_{gc,w,in}} \quad (5)$$

위 식에서, $h_{gc,loc}$ 는 가스 냉각기에서의 소구간 국소 열전달계수를 나타내며, T_{gc} 는 가스 냉각기에서의 냉매 온도이고, $T_{gc,w,in}$ 는 가스 냉각기에서의 관벽 내표면 온도이다. 그리고, 관벽 내표면 온도는 정상 상태에서의 1차원 전도 방정식을 사용하여 다음과 같이 식 (6)으로 계산한다.

$$T_{gc,w,in} = T_{gc,w,out} + \frac{Q_{gc,sub}}{2\pi \cdot k_w \cdot \Delta z} \cdot \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right) \quad (6)$$

여기에서, $T_{gc,w,out}$ 는 다음의 식 (7)과 같이 관의 상, 측면부의 표면 온도를 평균한 내관 평균 벽면 온도이고, d_o 와 d_i 는 내관의 외경과 내경이다.

$$T_{gc,w,out} = \frac{T_{w,top} + 2T_{w,side} + T_{w,bottom}}{4} \quad (7)$$

식(7)에서, $T_{w,top}$, $T_{w,side}$, $T_{w,bottom}$ 는 각각 내관의 상부, 측부, 하부의 벽면 측정 온도를 나타낸다.

측정한 압력손실로부터 마찰에 의한 압력손실은 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$(\Delta P/\Delta Z)_f = (\Delta P/\Delta Z)_t + (\Delta P/\Delta Z)_m \quad (8)$$

여기서, $(\Delta P/\Delta Z)_f$, $(\Delta P/\Delta Z)_t$, $(\Delta P/\Delta Z)_m$ 는 각각 마찰에 의한 압력강하, 전체 압력강하 그리고 가속에 의한 압력강하를 나타낸다. 본 연구에서는 관측방향의 국소밀도는 균일한 것으로 가정하여, 다음 식으로 표시되는 소시험부 입출구의 운동량차에 의한 압력강하 $(\Delta P/\Delta Z)_m$ 를 구하였다.

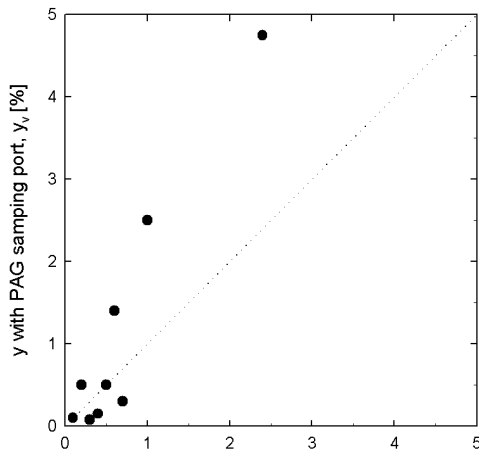
$$(\Delta P/\Delta Z)_m = G^2(1/\rho_{h,out} - 1/\rho_{h,in}) \quad (9)$$

여기서, $\rho_{h,in}$ 와 $\rho_{h,out}$ 는 소시험부 입구 혹은 출구의 혼합 평균밀도이고, 이는 소시험부 입출구에서의 이산화탄소 평균온도의 계산치로 구하였다. 또한, 이산화탄소의 열역학 물성과 수송물성은 REFPROP(버전 8.0)[6]를 이용하여 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 PAG 질량농도

Fig. 4는 CO₂-PAG 혼합물 시료 채취부에서 채취한 시료로부터 측정된 PAG 질량농도 y_c 와, CO₂-PAG 혼합물 시료채취 펌프에서 채취한 시료로부터 측정된 PAG 질량농도 y_v 의 관계를 나타낸 것이다. 시료 채취방법에 따라서 PAG 질량농도 측정치는 달라지고, 특히 높은 PAG 질량농도에서는 y_v 의 값이 y_c 값에 비해 약 2배 정도 높다. 이것은 시료 채취용기를 진공상태로 하여 CO₂-PAG 혼합물을 채취할 때, 관내와 동일한 농도로 시료가 용기에 채워지지 않는 것으로 판단된다. 이로부터 CO₂-PAG 혼합물 시료 채취부에서 유동중인 CO₂-PAG 혼합물을 직접 채취하는 방법이 더 정확한 농도를 측정할 수 있다. 따라서 이하에서는 이 방법으로 측정된 PAG 질량농도를 이용하여 고찰하였다.

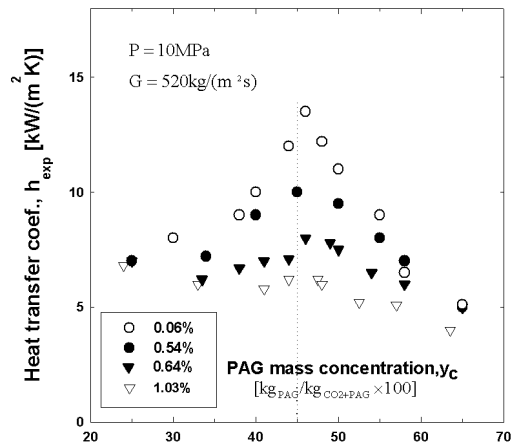


[그림 4] y_c 와 y_v 의 PAG 질량농도 비교
 [Fig. 4] Comparison of PAG mass concentration between y_c and y_v .

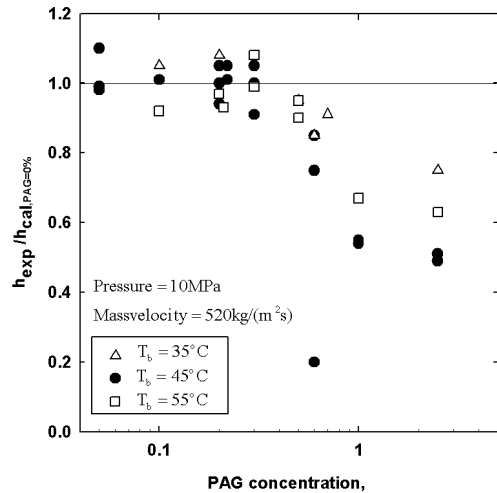
3.2 열전달계수

Fig. 5는 CO₂-PAG 혼합물에 대한 열전달계수의 측정치를 이산화탄소 평균온도 변화에 따라 나타낸 것이다. 그림 중에서 종파선은 압력이 10 MPa 일 때 초임계 온도 (45°C)를 나타낸 것이다. PAG 질량농도가 0.06%인 경우 열전달계수는 초임계 온도 근처에서 최고치를 나타낸다. 이는 순수 초임계 CO₂의 냉각 열전달 특성에서와 동일하다.[7] PAG 질량농도가 증가할수록 초임계 온도 근처의 열전달계수는 저하하고, 질량농도가 1.03%에 도달하면 초임계온도 부근에서 최대값을 나타내는 경향은 나타나지 않는다. 따라서 열전달계수의 온도의존성은 비정상적으로 작아지게 된다. 이는 PAG 질량농도의 증가에 따라 PAG가 전열벽면 근처에 모여서 열저항이 되기 때문이다.

Fig. 6은 이산화탄소의 평균온도가 35°C, 45°C, 55°C 일 때, PAG 질량농도와 열전달계수의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 세로축은 열전달계수의 측정치와, 순수 CO₂ 냉매에 대해서 제안된 마이크로핀관내 예측식[8]으로 계산한 값을 비교한 것이다. CO₂-PAG 혼합물의 열전달계수는 PAG 질량농도가 0.3%이하에서는 순수 CO₂의 열전달계수와 비슷한 값을 나타내지만, 0.3%보다 큰 경우에는 PAG 질량농도의 증가로 인해 열전달계수는 급속히 저하한다. PAG 질량농도가 1%가 되면, 초임계 온도 부근(45°C)의 열전달계수는 순수 CO₂의 열전달계수에 비해 약 50% 저하한다. 그러나 PAG 질량농도가 1% 이상인 경우, 열전달계수는 PAG 질량농도가 증가해도 크게 변하지 않는다. 이는 PAG 질량농도가 1% 근처에서 전열관 내면 전체에 PAG가 부착되기 때문인 것으로 판단된다.



[그림 5] CO₂ 평균온도에 따른 열전달계수
 [Fig. 5] Heat transfer coefficient with CO₂ bulk temperature.



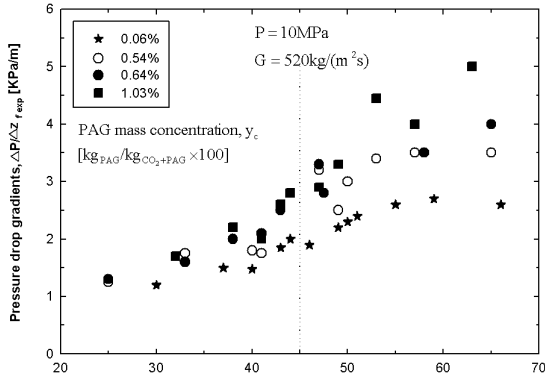
[그림 6] PAG 질량 농도에 따른 열전달 계수의 영향
 [Fig. 6] Effect of PAG on heat transfer coefficient with PAG mass concentration.

3.3 압력강하

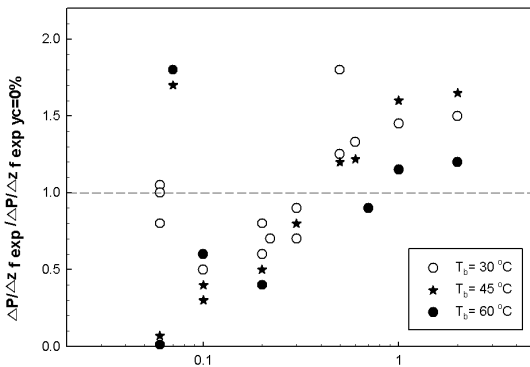
Fig. 7은 CO₂ 평균온도에 따른 마찰압력강하를 나타낸 것이다. 마찰압력강하는 온도가 저하할수록 감소한다. PAG 질량농도가 마찰압력손실에 미치는 영향은 초임계 온도 보다 높은 온도영역에서 뚜렷하게 나타나고, 초임계 온도보다 낮은 영역에서는 오일농도에 대한 영향이 적다.

Fig. 8은 CO₂ 평균온도가 30°C, 45°C, 60°C 근처에서 PAG 질량농도와 마찰압력강하의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 세로축은 마찰압력강하의 측정치와 순수 CO₂ 냉매에 대해서 제안된 마이크로핀관내 마찰압력강하 예측식[7]으로부터 계산한 값을 비교한 것이다. Fig. 8에 나

타낸 것처럼, PAG 질량농도가 약 2%인 경우, 순수 CO₂의 마찰압력강하와 비교해서 약 1.5배 증가하고, CO₂의 평균온도가 60 °C 부근에서는 1.2배 정도 증가한다.



[그림 7] CO₂ 평균온도에 따른 마찰압력강하
[Fig. 7] Frictional pressure drop with CO₂ bulk temperature.



[그림 8] 압력강하에 따른 PAG의 영향
[Fig. 8] Effect of PAG on pressure drop.

4. 결론

본 연구에서는 CO₂-PAG 혼합물의 마이크로핀관내 열전달과 압력강하 특성에 대해서 실험적으로 조사하였고, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) CO₂-PAG 혼합물의 시료 채취방법으로부터 PAG 질량농도의 측정값은 큰 차이를 보였기 때문에 유동 중의 CO₂-PAG 혼합물의 시료 채취방법이 보다 합당하다고 생각된다.
- (2) 열전달특성은 특히 초임계온도 부근에서 PAG 영향은 크고, PAG 질량농도가 1%로 되면 열전달계

수는 순수 CO₂의 열전달 계수에 비해 약 50% 정도 저하한다.

- (3) 마찰압력강하 특성은 CO₂ 평균온도가 초임계온도 이상에서 뚜렷하게 나타나고, 질량농도가 약 2%인 경우 순수 CO₂ 냉매의 마찰압력강하에 비해 약 1.6배 증가한다.

References

- [1] J. Pettersen, R. Rieberer, A. Leister, Heat transfer and pressure drop characteristics of supercritical carbon dioxide in microchannel tubes under cooling, in: Preliminary Proceedings of the 4th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids at Purdue, July 25-28, pp. 99-106, 2000.
- [2] G. Kuang, M.M. Ohadi, Y. Zhao, Experimental study on gas cooling heat transfer for supercritical CO₂ in microchannels, in: Seco nd International Conference on Microchannels and Minichannels, June 17-19, Rochester, New York, USA, pp. 325-332, 2004.
- [3] C. Kondou, P. Hrnjak, Heat rejection from R744 flow under uniform temperature cooling in a horizontal smooth tube around the critical point, International Journal of Refrigeration, Vol. 34, pp. 719-731, 2011.
- [4] K. Hambræus, Heat transfer coefficient during two phase flow boiling of HFC-134a, International Journal of Refrigeration, Vol. 14, pp 357-362, 1991.
- [5] G. Kuang, M.M. Ohadi, Y. Zhao, Experimental study of miscible and immiscible oil effects on heat transfer coefficients and pressure drop in microchannel gas cooling of supercritical CO₂, in: Proceedings of the HT 2003, ASME Summer Heat transfer Conference, June 21-23, Las Vegas, Nevada, USA, pp. 671-675, 2003.
- [6] E.W. Lemmon, M.L. Huber, M.O. McLinden, Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties, NIST Standard Reference Database 23 Version 8.0 (2007).
- [7] S.H. Yoon, J.H. Kim, Y.W. Hwang, M.S. Kim, K. Min, Y. Kim, Heat transfer and pressure drop characteristics during the in-tube cooling process of carbon dioxide in the supercritical region, International Journal of Refrigeration, Vol. 26, pp. 857-864, 2003.
- [8] C. Dang, E. Hihara, In-tube cooling heat transfer of supercritical carbon dioxide, Part 1. Experimental measurement, International Journal of Refrigeration, Vol. 27, pp. 736-747, 2004.

기호설명

A_c	: 실제 유로단면적	[m ²]
c_p	: 비열	[kJ/(kgK)]
G	: 질량유속	[kg/(m ² s)]
h	: 대류열전달계수	[kW/(m ² K)]
M	: 냉매유량	[kg/h]
N	: 핀개수	[/]
Q	: 전열량	[kW]
T	: 온도	[°C]
P	: 압력	[Pa]
y	: 오일 질량농도	[%]
$\Delta P/\Delta Z$: 압력강하	[Pa/m]

그리스어

β	: 핀 스파이럴 각도	[deg.]
ρ	: 밀도	[kg/m ³]
n	: 핀정점 각도	[deg.]
γ	: 핀높이	[mm]

하첨자

b	: 냉매
c	: 샘플링부에서 추출
cal	: 계산값
cs	: 열원수(냉각수)
exp	: 실험값
f	: 마찰
gc	: 가스냉각기
i	: 내측
in	: 입구
m	: 운동량
o	: 외측
out	: 출구
r	: 핀팁(tip)
sub	: 소시험부
t	: 전체
v	: 샘플링 포트에서 추출
w	: 관벽

구 학 근(Hak-Kuen Ku)

[정회원]



- 1983년 2월 : 부산수산대학교 냉동공학과 (공학사)
- 1989년 2월 : 부경대학교 대학원 냉동공학과(공학석사)
- 1994년 2월 : 부경대학교 대학원 냉동공학과 (공학박사)
- 1992년 9월 ~ 현재 : 동명대학교 냉동공조공학과 교수

<관심분야>

냉동공조시스템의 성능향상 및 고성능 열교환기 개발 등