



## 코일직경변화에 따른 헬리컬 코일형 가스냉각기내 초임계 이산화탄소의 냉각열전달 특성

†손 창 효

부경대학교 기계공학부

(2007년 6월 5일 접수, 2007 9월 19일 채택)

### Heat Transfer Characteristics of Supercritical CO<sub>2</sub> in Helical Coil Gas Coolers on the Change of Coil Diameters

†Chang-Hyo Son

\*School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, San 100, Yongdang-dong,  
Nam-gu, Busan-Si, 608-739, Korea

(Received 5 June 2007, Accepted 19 September 2007)

#### 요 약

본 연구는 코일직경변화에 따른 헬리컬 코일 가스냉각기내 초임계 CO<sub>2</sub>의 냉각 열전달 특성에 대해 실험적으로 조사하였다. 냉매 순환루프의 주요구성품은 수액기, 변속펌프, 질량유량계, 예열기, 헬리컬 코일형 가스냉각기(시험부)로 구성된다. 시험부는 내경 4.55 mm의 평활 동관과 26.75 mm와 41.35 mm인 코일직경으로 이루어져 있다. 냉매질량유속은 200 kg/m<sup>2</sup>s에서 800 kg/m<sup>2</sup>s까지 변화시켰고, 가스냉각기의 입구압력 범위는 7.5 MPa에서 10.0 MPa까지이다. 코일직경이 26.75 mm인 가스냉각기내 이산화탄소의 냉각열전달 계수가 코일직경이 41.35 mm인 열전달 계수보다 높은 것으로 나타났다. 또한 초임계 상태에서 제안한 종래의 냉각 열전달 상관식과 비교한 결과, 대부분의 상관식이 과소예측되었고, 그 중에서도 이산화탄소의 냉각 열전달 계수는 Pitla 등이 제안한 상관식과 좋은 일치를 보였다. 하지만, 유사임계 온도 영역부근에서는 실험데이터가 더 큰 것으로 나타났다.

**Abstract** – The cooling heat transfer characteristics of supercritical CO<sub>2</sub> in a helical coil gas cooler on the change of coil diameters are experimentally investigated. The main components of the refrigerant loop are a receiver, a variable speed pump, a mass flow-meter, a pre-heater and a helical coil gas cooler (test section). The test sections are made of a copper tube which the inner diameter is 4.55 mm and the helical coil diameters are done of 26.75 mm and 41.35 mm. The mass fluxes of refrigerant are varied from 200 to 800 [kg/m<sup>2</sup>s] and the inlet pressures of gas cooler are 7.5 to 10.0 [MPa]. A gas cooler with helical coil diameter of 26.75 mm has larger heat transfer coefficient than that of 41.35 mm. Also, when compared with experimental data and published correlations available, most of correlations are under-predicted, but Pitla published correlations available, most of correlations are under-predicted, but Pitla et al.'s correlation shows a relatively good coincidence with the experimental data except the region of pseudo critical temperature.

**Key words** : Helical coil gas cooler, Heat transfer coefficient of supercritical CO<sub>2</sub>

#### I. 서 론

프레온계 냉매는 열역학적으로 우수하고, 안정성이 높아 냉동·공조 시스템에 광범위하게 사용되어 왔으나, 오존층 파괴 및 지구 온난화 문제가 대두된 이후,

국제적인 환경 규제가 현실화되었다. 이로 인해 많은 관심을 받고 있는 CO<sub>2</sub>는 자연냉매로서 여러 가지 장점들을 가지고 있다. 즉, 지구 온난화에 미치는 영향이 매우 작으며, 불연성이다. 또, 냉동기유 및 기기재료와의 안전성이 뛰어나며, 무독성이다. 반면에 CO<sub>2</sub>는 임계압력이 7.38 MPa로 높고 임계온도가 31.1°C로 무척 낮은 특징을 가지고 있다. 이로 인해 CO<sub>2</sub> 열펌프 시스템은

†주저자:sonch@pknu.ac.kr

초임계 사이클(supercritical cycle)로 구성되므로 기존 역 랭킨 사이클로 운전되는 증기압축식 시스템과는 다른 특징을 가지게 된다. 즉, CO<sub>2</sub> 가스 냉각과정은 초임계 압력에서 운전되므로 기존 시스템의 응축기와는 달리 CO<sub>2</sub> 상변화 과정이 없이 냉매온도만 크게 감소하게 된다. 이와 같이 CO<sub>2</sub>를 이용한 열펌프 시스템의 가스 냉각기는 기존 열펌프 시스템의 응축기와는 큰 차이가 있으며, 여름철 가스냉각기 내 CO<sub>2</sub>와 대기가 열교환할 때 CO<sub>2</sub>는 임계점 보다 높은 온도가 된다. 그러므로 CO<sub>2</sub>용 가스냉각기는 큰 온도 감소를 고려해야 하며, 효율적인 에너지 사용을 위한 방안을 모색해야 한다.

이에 대한 방안으로 열교환기 설치면적과 성능이 우수한 프레온용 헬리컬 코일형 열교환기에 대한 연구가 있다[1]. 프레온계 냉매용 열교환기는 설치면적이 작고 성능이 우수하지만 압력강하가 크다. CO<sub>2</sub>는 낮은 밀도로 인해 기존 프레온계 냉매에 비해 압력강하가 상당히 낮다[2]. 이러한 이유로 CO<sub>2</sub>를 헬리컬 코일관 열교환기에 적용할 경우 직관에 비해 컴팩트한 구조와 높은 열전달 뿐만 아니라, 상대적으로 낮은 압력강하를 얻을 수 있을 것이다. 지금까지 발표된 논문들 중에는 CO<sub>2</sub>를 헬리컬 코일형 가스냉각기에 적용한 사례가 없으므로 이에 대한 기초 실험데이터가 상당히 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 CO<sub>2</sub> 냉동·공조시스템의 주요 부분인 가스냉각기의 설계를 위한 기초 자료를 제공하고자 하며, 이를 위해 헬리컬 코일관내 CO<sub>2</sub>의 초임계 영역에서의 가스냉각과정 중의 열전달 특성에 대해 실험적으로 고찰함으로써 CO<sub>2</sub> 가스냉각기의 기초적 설계자료를 제공하고자 한다.

## II. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험 장치로 냉매펌프, 예열기, 질량 유량계, 절대압 측정기, 가스냉각기, 보조 냉각기, 수액기, 항온조, 냉각수 순환펌프, 체적식 유량계 등으로 구성되어 있다.

Fig. 1과 같이 수액기에 액상으로 충전된 냉매액은 마그네틱 기어 펌프에 의해 예열기로 유입된다. 예열기로 들어온 냉매액은 가변 전압조정기에 의해 가열되어 초임계 상태의 냉매증기로 상변화된다. 이때 유량조절 밸브와 바이패스에 의해서 일정유량으로 조절되고, 조절된 냉매증기는 가스 냉각기로 들어가서 열원수와 대향류로 열교환한다. 가스 냉각기를 나온 냉매액은 수액기를 거쳐서 재순환한다. 가스냉각기 출구에는 보조 냉

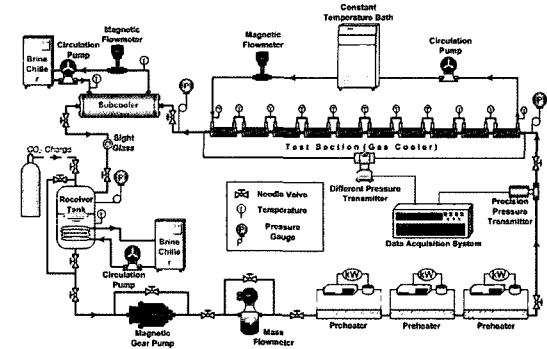


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

각기를 설치하여, 가스냉각기에서 CO<sub>2</sub> 가스를 냉각시키지 뿐만 아니라 가스냉각기 출구의 과냉각도를 조절하였다. 또한 냉매와 열원수의 열교환을 위해 항온조를 설치하였는데, 항온조에서 일정온도로 조절된 열원수는 순환펌프와 질량 유량계를 지나 일정유량으로 조절된 후, 내관과 외관사이의 공간으로 냉매의 흐름과 반대방향으로 흐르면서 CO<sub>2</sub>와 열교환하도록 하였다.

### 2.2. 시험부

시험부는 내관으로 CO<sub>2</sub>가 흐르고 내관과 외관사이의 환상공간에는 열원수가 CO<sub>2</sub>와 반대방향으로 흐르는 이중관형 대향류 열교환기이다. Fig. 2는 시험부의 개략도를 나타낸다. 내관은 내경 4.55 mm(외경 6.35 mm)인 동관이고, 외관은 각각 내경 41.6 mm, 56.5 mm이고 길이 250 mm, 460 mm인 PVC관을 사용한다. 내관의 형태는 길이가 1000 mm로 10개의 소시험부로 이루어진 헬리컬 코일형이다. 실험은 코일직경이 각각 26.75 mm, 41.35 mm이고 피치는 7.5 mm로 동일한 두 개의 다른 열교환기로 실험되었다.

실험을 수행하여 시험구간내의 온도와 압력이 실험 조건에 도달한 후 2분 이상 평형상태로 유지될 때 실

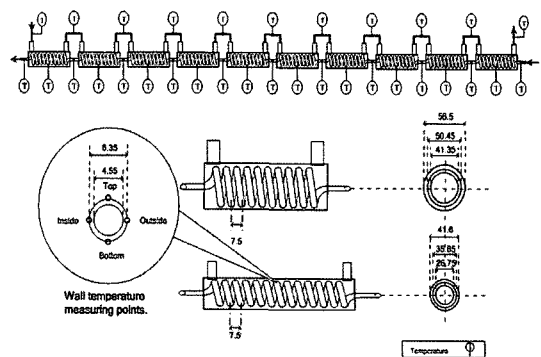


Fig. 2. Schematics diagram of helical coil type gas cooler.

**Table 1.** Experimental conditions.

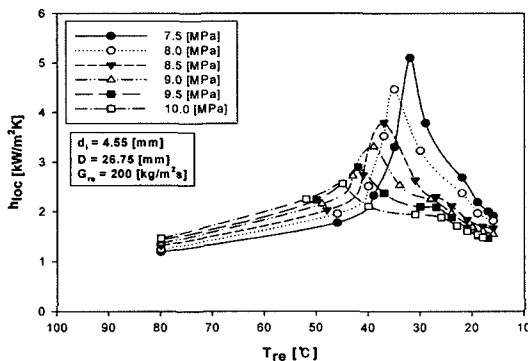
Refrigerant	R-744(CO <sub>2</sub> )
Test section	Helical Coil Tube
d <sub>i</sub> (d <sub>o</sub> ) [mm]	4.55(6.35)
Coil diameter [mm]	41.35, 26.75
G <sub>re</sub> [kg/m <sup>2</sup> s]	200, 400, 600, 800
P <sub>gc, in</sub> [MPa]	7.5~10.0
T <sub>cw, in</sub> [°C]	15

험을 시작하였다. 즉 냉매온도와 압력, 질량유속, 냉매 유량, 냉각수의 온도 및 유량 등을 조절시켜 시스템이 정상상태가 유지됨을 확인한 후에 측정하였으며, 실험 조건이 바뀔 때마다 이러한 과정을 반복하였다. 그리고 실험 데이터 측정이 완료되면 다시 냉매 유량과 냉각수 유량을 조절하여 반복실험을 하였다. 또한 온도, 압력 및 유량 등을 측정하기 위한 검출신호는 데이터 변환기를 통하여 컴퓨터에 입력시켜 처리하였다. Table 1 은 본 연구의 실험조건을 정리한 것이다.

### III. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 냉각압력의 영향

Fig. 3과 같이 질량유속이 동일한 경우, 가스냉각기의 입구영역에서 냉매 온도변화에 따른 비열 차이가 작으므로 열전달계수의 차이가 크지 않다. 그러나 가스냉각기의 중간부 즉, 유사임계 온도부근에서는 냉매 온도 변화에 따른 비열 차이가 급격히 변하므로 국소 열전달계수는 크게 증가하다가 감소한다. 그리고 가스냉각기의 후반부에서 CO<sub>2</sub>의 온도변화에 따른 비열 차이가 상당히 작으므로 열전달계수의 차이는 작다. 가스냉각기의 입구와 출구 부분에서는 유사임계 온도부근과는



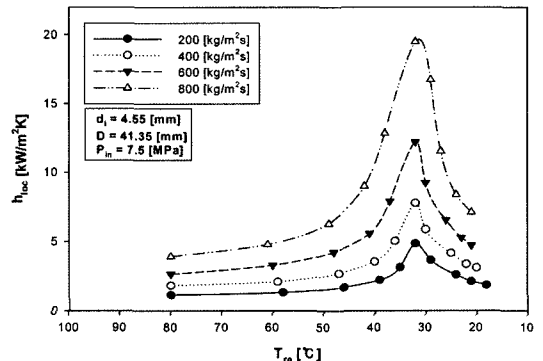
**Fig. 3.** Heat transfer coefficients with refrigerant temperature under cooling pressures of 26.75 mm coil diameter.

정반대로 가스냉각기의 냉각압력이 증가할수록 CO<sub>2</sub>의 국소 열전달계수는 증가하는 경향으로 나타났다.

가스냉각기의 입구압력이 낮은 7.5 MPa인 경우, 열전달계수의 최대값은 가스냉각기의 후반부에서 발생하고, 가스냉각기의 입구압력이 높은 10.0 MPa인 경우, 열전달계수의 최대값은 가스냉각기의 중반부에서 발생한다. 이는 가스냉각기 냉각압력이 낮을수록 유사임계 온도가 낮기 때문에, 가스냉각기의 후반부에서 CO<sub>2</sub> 냉매 온도가 유사임계 온도에 도달하고, 가스냉각기의 냉각압력이 높은 경우, 유사임계 온도가 높기 때문에, CO<sub>2</sub> 냉매온도가 유사임계 온도에 빨리 도달하게 된다. 그리고 냉매 질량유속이 동일한 경우, 가스냉각기의 압력변화에 따른 열전달계수는 압력이 7.5 MPa일 때 가장 높고, 압력이 10.0 MPa일 때 가장 낮게 나타난다. 이는 가스냉각기 냉각압력이 7.5 MPa일 때, 유사임계 온도가 31.7°C이고, 최대 비열값이 145.7 kJ/kgK로 가장 높고, 가스냉각기 냉각압력이 10.0 MPa일 때, 유사임계 온도가 44.7°C이고, 최대 비열값은 7.902 kJ/kgK로 가장 낮기 때문이다.

#### 3.2. 질량유속의 영향

Fig. 4와 같이, 일정한 압력하에서 질량유속이 증가할수록 CO<sub>2</sub>의 국소 열전달계수는 증가한다. 이는 질량유속이 증가할수록 CO<sub>2</sub>의 Reynolds 수가 증가하여 열전달이 향상되기 때문이다. 일정한 가스 압력하에서 질량유속에 따른 열전달계수의 증가는 각각의 유사임계 온도 지점에서 현저하게 나타난다. 헬리컬 코일관내 CO<sub>2</sub>의 질량유속에 따른 열전달계수의 증가는 가스 냉각압력이 낮은 7.5 MPa에서 가장 높고, 냉각압력이 높은 10.0 MPa에서 가장 낮다. 이는 각각의 유사임계 영역에서 질량유속에 따른 비열 변화가 냉각압력이 낮은 7.5 MPa일 때 가장 크고, 냉각압력이 높은 10.0 MPa



**Fig. 4.** Heat transfer coefficients with refrigerant temperature under mass fluxes of coil diameter 41.35 mm.

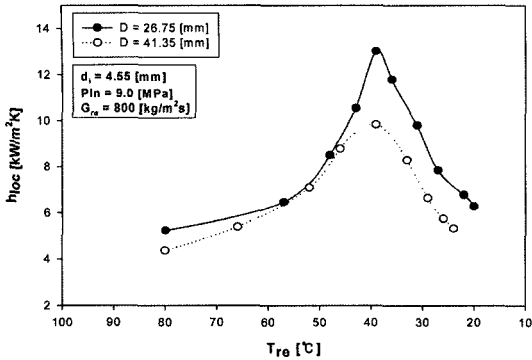


Fig. 5. Comparison of heat transfer coefficients on the coil diameter of 26.75 mm and 41.35 mm at the same gas cooler.

일 때 가장 작기 때문이다. Fig. 4에서 알 수 있듯이, 일정 압력하에서 질량유속 변화에 따른 CO<sub>2</sub>의 국소 열전달계수는 각각 유사임계 온도인 31.7, 34.5, 37.2, 42.3, 44.7°C에서 최대값을 가진다. 그리고 냉매온도가 감소함에 따라 유사임계 온도이상에서는 열전달 계수가 증가하며, 유사임계 온도이하에서는 다시 감소하는 경향을 나타내고 있다.

3.3. 코일직경의 영향

Fig. 5는 코일직경이 26.75 mm와 41.35 mm인 헬리컬 코일관내 CO<sub>2</sub> 냉각 열전달계수의 최대값은 39.8°C (P<sub>in</sub>=9.0 MPa)에서 나타나고, 코일직경이 상대적으로 작은 코일직경이 26.75 mm인 관의 열전달계수가 코일 직경이 41.35 mm인 관에 비해서 높은 것을 알 수 있다. 이에 대해 Dean[3]은 De=(Re(d<sub>i</sub>/D)<sup>0.5</sup>)수가 증가되면 벽면에서의 단면에 대한 경계층이 형성되어 바깥쪽 근처의 경계층으로 유체가 유입되고 안쪽면에서는 유체가 배출되어, 매우 큰 De수를 가지게 되면 매우 많은 유체가 바깥쪽 경계층내로 유입되어 경계층의 두께가 바깥쪽에서 얇아지게 되고 안쪽면에서는 두꺼워지며, 이와 함께 중심의 바깥쪽면으로 밀리게 되어 열전달이 향상된다고 하였다.

3.4. 기존 냉각 열전달 상관식과의 비교

헬리컬 코일관내 CO<sub>2</sub>의 냉각 열전달 실험으로 획득한 결과를 Bringer-Smith[4], Petuhkov[5], Petrov-Popov[6], Gnielinski[7], Pitla 등[8], Fang[9] 등에 의해서 제안된 상관식과 비교하였다. 실험값과 비교한 결과, 초임계 영역에서 제안된 상관식들 중 Pitla 등의 상관식은 관벽과 냉매온도에서 평가된 물성치를 Gnielinski 상관식에 대입하여 평균한 것으로 관벽과 냉매온도에 따른 물

Table 2. Deviations of measured and calculated heat transfer coefficients.

Correlations	D=26.75 (mm)	D=41.35 (mm)
	$\sigma_{avg}$ (%)	$\sigma_{avg}$ (%)
Petuhkov <i>et al.</i> (1961)	62.3	49.9
Bringer-Smith (1957)	68.5	51.6
Petrov-Popov (1985)	71.1	54.6
Gnielinski (1994)	60.3	45.7
Pitla <i>et al.</i> (1998)	45.8	37.9
Fang (2000)	57.6	43.7

성치 변화를 잘 반영하고 있기 때문에 본 실험값과 가장 좋은 일치를 보인다.

가스냉각기내에서 측정된 열전달 계수( $h_{exp}$ )와 상관식으로 예측한 열전달 계수( $h_{cal}$ )의 비교는 측정값 기준으로 아래의 식으로 오차를 계산하였다.

$$\sigma_{avg} = \frac{1}{N} \left( \sum_{n=1}^N \frac{h_{exp} - h_{cal}}{h_{exp}} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$\sigma_{abs} = \frac{1}{N} \left( \sum_{n=1}^N \left| \frac{h_{exp} - h_{cal}}{h_{exp}} \right| \right) \times 100 \quad (3)$$

여기서 N은 측정된 데이터의 개수,  $h_{exp}$ 는 실험으로 측정된 국소 열전달계수,  $h_{cal}$ 는 예측식으로 계산한 국소 열전달계수이다. 위의 식을 바탕으로 측정된 실험값과 계산한 예측값을 비교한 결과, 코일직경이 26.75 mm와 41.35 mm인 헬리컬 코일관에서 모두 Pitla *et al.*의 상관식이 가장 근접하였고, 각각 절대 평균오차는 45.8%와 37.9%로 나타났다.

IV. 결 론

가스냉각기 입구압력의 변화에 따른 열전달 계수는 가스 냉각기내의 CO<sub>2</sub> 압력이 증가할수록 열전달 계수가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한 가스냉각기 입구압력이 높을수록 열전달계수의 최대값이 가스냉각기 전반부에서 발생한다.

질량유속의 변화에 따른 열전달계수는 질량유속이 증가함에 따라 열전달 계수도 증가하였다. 그리고 가스 냉각기내의 CO<sub>2</sub> 압력이 낮을수록 질량유속에 따른 열전달계수의 증가가 크게 나타났다. 코일 직경 변화에 따른 열전달계수는 코일 직경이 26.75 mm인 헬리컬 열교환기가 코일 직경이 41.35 mm인 헬리컬 열교환기 보다 높게 나타났다. 실험으로 구한 헬리컬 코일관내 CO<sub>2</sub>

의 열전달계수와 Bringer-Smith, Petuhkov, Petrov-Popov, Pitla 등, Fang의 상관식으로 예측한 값을 비교한 결과, 전반적으로 기존 상관식들의 예측값과는 큰 차이를 보였고, 실험값은 기존의 상관식으로 계산한 값보다 크게 나타났다. 특히 유사임계 온도 부근에서는 열전달 계수와 상관식들 사이에 더 큰 차이를 보였다. Table 2에서 제시한 상관식들 중에서 Pitla 등의 제안한 상관식이 가장 근접한 것으로 나타났다.

### 참고문헌

[1] Cioncolini, A. and L. Santini, "An Experimental Investigation Regarding the Laminar to Turbulent Flow Transition in Helically Coiled Tubes", *Experimental Thermal and Fluid Science*, (2005)

[2] Yun, B., H.Y. Park, K.C. Yoo and Y.C. Kim, "Air-Conditioner Cycle Simulation Using Tube-by-tube Method", *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, **11**(4), 499-510, (1999)

[3] Dean, W.R., "Notes on the Motion of Fluid in a Curved Pipe", *Philos. Mag.*, **4**, 208-233, (1927)

[4] Bringer, R.P. and J.M. Smith, *AICHE. Journal*, **3**(1), 49-55, (1957)

[5] Petuhov, B.S., "Heat Transfer in a Single-Phase Medium under Supercritical Conditions", *Teplofizika-Vysokikh Temperature*, **6**(4), 732-742, (1968)

[6] Krasonshchekov, E.A. and V.S. Protopopov, "Experimental Study of Heat Exchange in Carbon Dioxide in the Supercritical Range at High Temperature Drops", *Teplofizika Vysokikh Temperatur*, **4**(3), 389-398, (1966)

[7] Gnielinski, V., "New Equation for Heat and Mass Transfer in Turbulent Pipe and Channel Flow", *Int. Chem. Eng.*, **16**, 359-368, (1976)

[8] Pitla, S.S., D.M. Robinson, E.A. Groll and S. Ramadhyani, Heat Transfer from Supercritical Carbon

Dioxide in Tube Flow: A Critical Review, 1998, *HVAC&R Research*, **4**(4), 281-301, (1998)

[9] Fang, X., C.W. Bullard and P.S. Hrnjak, "Heat Transfer and Pressure Drop of Gas Coolers", *ASHRAE Transaction*, **107**(1), 255-266

### 기호설명

A	: heat transfer area
D	: coil diameter
De	: Dean number
d	: tube diameter
G	: mass flowrate
h	: heat transfer coefficient
k	: heat conductivity
L	: tube length
P	: pressure
T	: temperature

### 하첨자

abs	: absolute
avg	: average
cal	: calculate
cw	: cooling water
exp	: experimental value
gc	: gas cooler
i	: inner
in	: inlet
loc	: local
o	: outer
out	: outlet
re	: refrigerant
w	: wall