

경사진 헬리컬 코일형 가스냉각기의 관형상에 따른 CO₂ 냉각 열전달 특성

손 창효, 오 후규*

부경대학교 냉공공조공학과

Cooling Heat Transfer Characteristics of CO₂ on Tube Geometry of Inclined Helical Coil Type Gas Coolers

Chang-Hyo Son, Hoo-Kyu Oh[†]

*Department of Refrigeration and Air-Conditioning Eng., Pukyong National University,
Pusan 608-739, Korea*

(Received May 23, 2007; revision received August 23, 2007)

ABSTRACT: The cooling heat transfer coefficient of CO₂ (R-744) for tube and coil diameter (CD), inclined angle of tube and coil pitch of inclined helical coil type copper tubes were investigated experimentally. The main components of the refrigerant loop are a receiver, a variable-speed pump, a mass flow meter, a pre-heater and a inclined helical coil type gas cooler (test section). The test section consists of a smooth copper tube of 2.45 and 4.55 mm inner diameter (ID). The refrigerant mass fluxes were varied from 200 to 800 [kg/m²s] and the inlet pressures of gas cooler were 7.5 to 10.0 [MPa]. The heat transfer coefficients of CO₂ in inclined helical coil tube with 2.45 mm ID are 5~10.3% higher than those of 4.55 mm ID. The heat transfer coefficients of 41.35 mm CD are 8~32.4% higher than those of 26.75 mm CD. Comparison between 45° and 90° of coil angle, the heat transfer coefficients of 45° are higher than those of 90°. For coil pitch of gas cooler, the heat transfer coefficients of inclined helical coil gas cooler with coil pitch of 5 mm are similar to those of 10 and 15 mm.

Key words: CO₂ heat pump(이산화탄소 급탕기), Gas cooler(가스냉각기의 설계), Heat transfer coefficient of CO₂(이산화탄소의 열전달), Inclined helical coil type heat exchanger (헬리컬 코일형 열교환기)

기호설명

- A : 전열면적 [m²]
d : 관직경 [m]
D : 코일의 직경 [m]
G : 질량유속 [kg/m²s]

- h : 열전달 계수 [kW/m²K]
κ : 열전도도 [kW/mK]
L : 길이 [m]
P : 압력 [Pa]
Q : 전열량 [kW]
q : 열유속 [kW/m²]
T : 온도 [K]
t : 전열관 두께 [m]
△z : 소사첨부 길이 [m]

* Corresponding author

Tel.: +82-51-620-1501; fax: +82-51-620-1501

E-mail address: headam@pknu.ac.kr

아래첨자

<i>gc</i>	: 가스냉각기
<i>i</i>	: 관내경
<i>in</i>	: 입구
<i>loc</i>	: 국소값
<i>o</i>	: 관외경
<i>out</i>	: 출구
<i>pc</i>	: 유사임계점
<i>re</i>	: 냉매
<i>sb</i>	: 소시험구간(부)
<i>w</i>	: 관벽면

1. 서 론

프레온계 냉매에 의한 지구환경 문제로 인해 많은 관심을 받고 있는 CO₂는 자연냉매로서 여러 가지 장점뿐만 아니라, 임계압력이 7.38 MPa로 높고 임계온도가 31.1 °C로 무척 낮은 특징을 가지고 있다. 이로 인해 CO₂ 가스 냉각과정은 초임계 압력에서 운전되므로 상변화 과정없이 냉매온도만 크게 감소하게 된다. 이와 같이 CO₂를 이용한 열펌프 시스템의 가스 냉각기는 기존 열펌프 시스템의 응축기와는 큰 차이가 있으며, 여름철 가스냉각기 내 CO₂와 대기가 열교환할 때 CO₂는 임계점 보다 높은 온도가 된다. 그러므로 CO₂용 가스냉각기는 큰 온도 감소를 고려해야 하며, 효율적인 에너지 사용을 위한 방안을 모색하여야 한다.

이러한 방안으로 경사진 헬리컬 코일형 열교환

기를 생각할 수 있다.⁽¹⁾ 경사진 헬리컬 코일형 열교환기는 설치면적이 작고 성능이 우수하지만 압력강하가 크기 때문에, 밀도가 낮은 CO₂를 경사진 헬리컬 코일형 열교환기에 적용할 경우 압력강하를 상당히 줄일 수 있을 뿐만 아니라 직관에 비해 컴팩트한 구조와 높은 열전달을 얻을 수 있다.⁽²⁾ 이에 대한 종래의 연구를 살펴보면, 현재까지 CO₂를 경사진 헬리컬 코일형 가스냉각기에 적용하고자 한 시도는 있으나⁽³⁾ 아직 실용화한 사례가 없을 뿐만 아니라 기초 연구는 물론 실험데이터도 상당히 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구는 CO₂용 열펌프 시스템에서 가장 중요한 요소기기 중의 하나인 가스 냉각기의 설계에 헬리컬 코일을 적용하기 위한 기초 자료를 제공하고자 하는 것이다. 이를 위해 CO₂용 열펌프에 적용할 수 있는 경사진 헬리컬 코일관의 관직경, 코일직경, 코일 경사각도 등의 변화에 따른 초임계 CO₂ 냉각과정 중의 열전달 특성에 대해서 실험적으로 고찰하여 CO₂용 가스냉각기의 기초적 설계자료를 제공하는 것이 본 논문의 목적이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험장치로써 냉매 순환루프와 냉각수 순환루프로 구성되고, 각각의 루프는 냉매펌프와 냉각수 펌프에 의하여 순

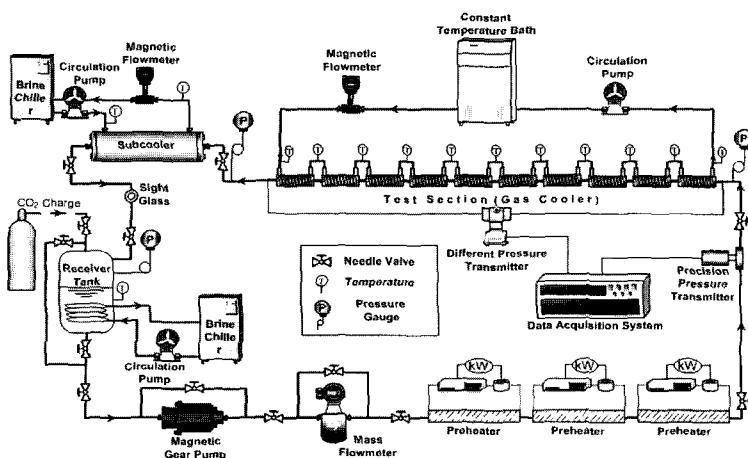


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for cooling heat transfer with CO₂.

환되는 강제 순환루프이다. 냉매 순환루프는 냉매 펌프, 예열기, 질량 유량계, 절대압 측정기, 가스 냉각기, 보조 용축기, 수액기 등으로 이루어져 있다. 냉각수 순환루프는 항온조, 냉각수 순환펌프, 체적식 유량계 등으로 구성되어 있다.

Fig. 1에서와 같이 냉매의 순환경로를 살펴보면, 수액기를 나온 냉매액은 마그네틱 기어 펌프에 의해서 질량 유량계로 들어가고, 이때 질량 유량계에서는 냉매의 유량과 밀도를 측정한다. 예열기로 들어온 냉매액은 가변 전압조정기에 의해 가열되어 초임계 상태의 냉매증기로 상변화된다. 이때 유량조절밸브와 바이пас에 의해서 일정유량으로 조절되고, 조절된 냉매증기는 가스냉각기로 들어가서 열원수와 대향류로 열교환한다. 가스냉각기를 나온 냉매액은 수액기를 거쳐서 재순환한다. 또한 냉매와 열교환하기 위해서 냉동기 칠러에서 일정온도로 조절된 열원수는 냉각수 순환펌프와 질량 유량계를 지나 일정유량으로 조절된 후, 내관과 외관사이의 공간으로 냉매의 흐름과 반대방향으로 흐르게 되어 있다.

2.2 시험부

Fig. 2에서처럼, 본 실험에서 사용한 가스냉각기는 내관으로 냉매가 흐르고, 내관과 외관사이의 환상구간으로 열원수가 흐르는 이중관식 경사

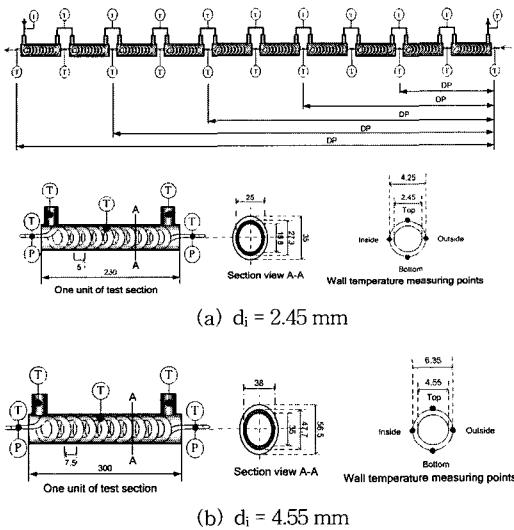


Fig. 2 Schematics diagram of inclined helical coil type gas cooler.

진 헬리컬 코일형 열교환기이다. 두 종류의 경사진 헬리컬형 가스냉각기의 내경은 4.55 mm(외경 6.35 mm)와 2.45 mm(외경 4.25 mm)의 평활 동관이다. 가스냉각기의 전체길이는 300 mm와 230 mm의 소시험부 10개인 3000 mm와 2300 mm이다. 가스냉각기 소시험부내 경사진 헬리컬 코일관의 길이는 1000 mm와 800 mm로 전열관 전체 길이는 10,000 mm와 8000 mm이고, 곡률반경은 35 mm와 18.8 mm이다. 셀의 내경은 56.5 mm와 35 mm의 PVC관을 사용하고, 경사진 헬리컬 코일의 피치는 7.5 mm와 5 mm이다.

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 경사진 헬리컬 코일에서 냉매온도는 각각의 소시험부 별로 11개 지점, 관내 벽면 온도 측정은 각각 소시험부의 중심부에서 원주방향으로 90°간격마다 상부, 측부, 하부의 3지점에서 측정하였다. 그리고 등간격으로 구분된 소구간 사이에 30 mm의 간격을 두어서 냉매온도를 측정하였는데 이 구간에서 측정된 온도는 열원수의 대류에 의한 영향보다는 전도에 의한 영향이 지배적이지만, 소시험부 간격을 최소화하여 측정오차 범위를 최소화할 수 있도록 하였다. 냉각수 온도는 각각의 소시험부 입·출구에서 측정하였다. 또한 압력측정은 가스냉각기 앞에 설치된 절대압 측정기로 측정한 후, 시험구간 입·출구 각 지판에 고압용 부르돈식 압력계와 차압계를 설치하여 가스냉각 과정중에 압력강하를 측정한다. Table 1은 본 연구의 실험조건을 정리한 것이고, Table 2는 실험장치의 계측기 사양을 나타낸 것이다.

3. 냉각 열전달 특성

3.1 관직경의 영향

Fig. 2에 나타낸 것처럼 내경 2.45와 4.55 mm

Table 1 Experimental conditions for cooling heat transfer of CO₂

Refrigerant	R-744(CO ₂)	
Test section	helical coil copper tube	
d _i (d _o), [mm]	4.55(6.35)	2.45(4.55)
G _{re} , [kg/m ² s]	200, 400, 600, 800	
P _{gc, in} , [MPa]	7.5 ~ 10.0	
T _{cw, in} , [°C]	15	

Table 2 Specification of measuring instruments

Absolute pressure transducer	
Model	Druck, PTX611
Range	0~160 bar
Accuracy	± 0.04% F.S.
Differential pressure transmitter	
Model	Druck, STX2100
Range	0~3 bar (static pressure : 140 bar)
Accuracy	± 0.1% F.S.
Refrigerant pump	
Model	Micropump, Series 5000
Mass flow range	0~13.5 L/min
Maximum system pressure	103 bar (1500 psi)
Mass flow meter	
Model	Oval, CT9401
Range	0~6 kg/min
Maximum system pressure	100 bar
Accuracy	± 0.1%
Power meter	
Model	Yokogawa, WT110-253401
Range	0~600V, 0~300A
Accuracy	Voltage : ± 0.2% F.S. +0.2% reading Current : ± 0.3% F.S. +0.3% reading ± 0.05A(Clampmeter)

의 동관으로 제작한 경사진 헬리컬 코일형 가스 냉각기에 대한 전열성능을 비교하기 위해 동일한 냉각압력과 질량유속에서 실험하였다. Fig. 3은 동일한 질량유속과 냉각압력에서 경사진 헬리컬 코일관의 내경 변화에 따라 CO₂의 냉각 열전달 계수를 비교한 것이다. Fig. 3에서와 같이, 경사진 헬리컬 코일관내 CO₂ 냉각 열전달계수의 최대값은 유사임계 온도인 37.2 °C에서 나타나고, 내경 2.45 mm 코일관의 열전달계수가 4.55 mm관에 비해서 약간 높은 것을 알 수 있다. 즉, 냉각압력이 8.5 MPa이고 질량유속이 200 kg/m²s인 경우 5

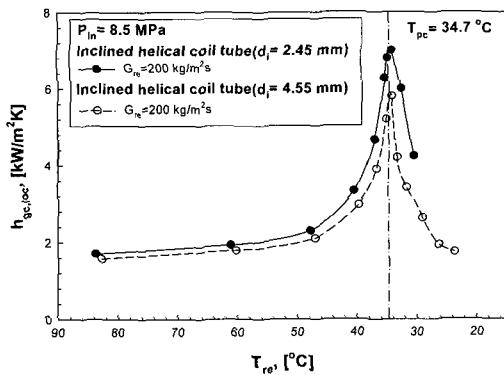


Fig. 3 Comparison of cooling heat transfer coefficients of CO₂ in inclined helical type gas cooler with inner diameter tube of 2.45 and 4.55 mm.

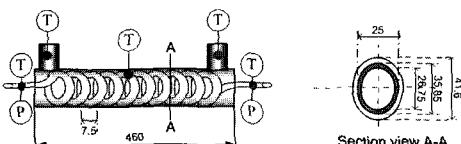
~10.3% 정도 높게 나타났다.

이러한 경향에 대해 Dang⁽⁵⁾은 관경이 작아질수록 냉매온도는 동일하지만 관내벽면 온도가 감소하여 열전달계수는 증가한다고 하였다. 윤 등⁽⁶⁾도 동일한 연구 결과를 발표하였다. 이와 같이 가스냉각기의 관경이 작아질수록 CO₂의 냉각 열전달계수는 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 고압의 CO₂ 냉매를 작동유체로 사용하는 가스냉각기의 전열성능과 내압성 등을 고려할 때, 관직경이 2.45 mm인 경사진 헬리컬 코일형 전열관을 사용하는 것이 유리하리라 생각된다.

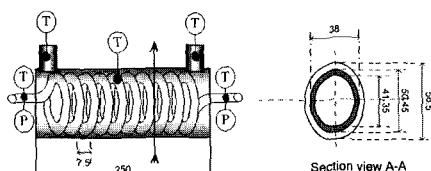
3.2 코일 직경의 영향

코일직경 변화에 따른 CO₂의 냉각 열전달 특성을 비교하기 위해, 내경은 4.55 mm로 동일하고 코일직경은 각각 26.75 mm와 41.35 mm인 경사진 헬리컬 코일형 가스냉각기에 대해 동일한 조건에서 실험하였다. Fig. 4는 코일 직경이 26.75 mm와 41.35 mm인 가스냉각기의 상세도를 나타낸 것으로, 외관(셀)은 각각 내경 41.6 mm, 56.5 mm이고 한 개의 소시험부 길이는 각각 250 mm와 460 mm이다. 내관의 길이는 1000 mm로 10개의 소시험부로 이루어져 있기 때문에 경사진 헬리컬 코일관의 전체 길이는 10000 mm이다. 두 종류의 코일관 피치는 7.5 mm로 동일하다.

Fig. 5는 동일한 질량유속과 냉각압력에서 코일 직경이 다른 두 관의 냉각 열전달계수를 비교



(a) D = 26.75 mm



(b) D = 41.35 mm

Fig. 4 Schematic diagram of inclined helical coil type gas cooler with coil diameter of 26.75 and 41.35 mm.

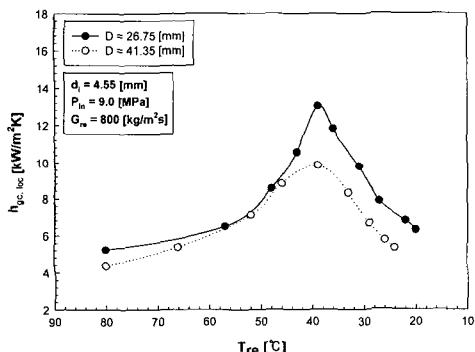
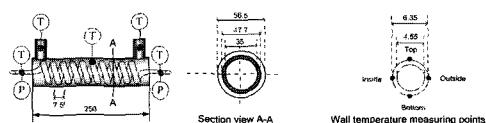


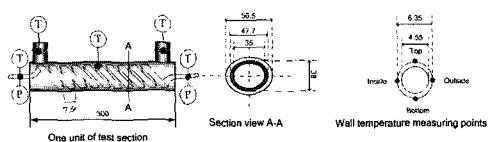
Fig. 5 Comparison of cooling heat transfer coefficients of CO₂ in inclined helical type gas cooler with coil diameter of 26.75 and 41.35 mm.

한 것이다. Fig. 5에서와 같이, 코일 직경이 각각 26.75 mm와 41.35 mm인 경사진 헬리컬 코일관내 CO₂ 냉각 열전달 계수의 최대값은 각각의 입구 압력에서 유사압계 온도인 39.8 °C에서 나타나고, 코일직경이 작은 26.75 mm관의 열전달계수가 코일직경이 41.35 mm인 관에 비해서 높은 것을 알 수 있다.

이에 대해 Dean⁽⁷⁾은 경사진 헬리컬 코일관의 비틀림(torsion)과 뒤틀림(curvature)에 의해 발생되는 2차유동은 관단면 전체에 걸쳐 추가적인 유체 이동(transport)을 일으킨다고 하였다. 이러한 추가 유동은 직관에 비해 열전달과 압력강하를



(a) Inclined angle of tube = 90°



(b) Inclined angle of tube = 45°

Fig. 6 Schematic diagram of inclined helical coil type gas cooler with inclined angle of coil of 45° and 90°.

증가시킨다고 하였다. 즉, Dean의 결과에 의하면 코일 직경이 작을수록 $De (= Re(d_v/D)^{0.5})$ 수가 증가하는 것을 의미하는 것으로, De수가 증가하면 유체의 원심력에 의해 벽면 경계층으로 유체가 유입되고 관중심에서는 유체가 유출된다. 따라서 벽면근처의 경계층 두께는 얇아지고 관중심의 두께는 상대적으로 두꺼워지기 때문에 코일직경이 작아질수록 대류 열전달 계수가 향상된다.

Fig. 5에서 보면, 질량유속이 800 kg/m²s인 경우는 8~32.4% 정도 높게 나타났다. 이는 질량유속이 증가함에 따라 헬리컬 코일관 내 CO₂의 원심력이 커져 벽면과 유체사이의 열교환이 증대되기 때문이다. 가스냉각기 내 CO₂ 냉각과정중에 코일직경 변화에 따른 열전달 계수의 차이는 유사임계온도 보다 높은 영역($T_{re} \geq T_{pc}$)보다 오히려 낮은 영역($T_{re} \leq T_{pc}$)에서 크게 나타난다. 이는 유사임계온도 이후에는 냉매 상태가 액단상으로 변화는 과정으로 액상 유량이 증가하여 원심력 증가에 의한 2차유동이 더 활성화되기 때문이다.

3.3 전열관 경사각도의 영향

전열관의 경사각도 변화에 따른 CO₂ 냉매의 냉각 열전달 특성을 파악하기 위해, 코일의 경사각도는 가스냉각기의 길이방향을 기준으로 하여 45°와 90°인 경우에 대해서 실험하였다. Fig. 6에 나타낸 것처럼 두 종류의 경사진 헬리컬 코일형 가스냉각기 내경은 4.55 mm로 동일하고, 소시험부의 전체 길이는 각각 250과 300 mm이다. 그리

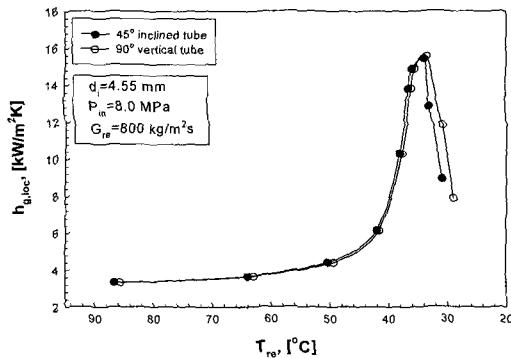


Fig. 7 Comparison of cooling heat transfer coefficients of CO₂ in inclined helical type gas cooler with inclined angle of coil of 2.45 and 4.55 mm.

고 코일관의 피치는 7.5 mm로 같고, 가스냉각기의 셀외경과 내경도 동일하다.

Fig. 7은 전열관의 경사각도가 45°와 90°인 경사진 헬리컬 코일형 가스냉각기내 CO₂의 냉각 열전달 계수를 비교한 것이다. Fig. 7에서와 같이, 코일의 경사각도가 45°인 가스냉각기의 냉각 열전달 계수가 경사각도가 90°인 경우와 거의 동일하거나 약간 상승하는 것으로 나타났다. 특히, 유사임계 온도 영역 이후에서 더욱더 확실하게 상승하는 것을 볼 수 있다. 이는 코일의 경사각도가 45°이 경우에 90°에 비해 냉매축과 냉각수축의 난류촉진 효과가 크기 때문인 것으로 판단되고, 유사임계 온도 이후에서는 코일 하단부의 냉매액 정체 현상이 경사각도 45°인 경우가 90°보다 덜하기 때문인 것으로 생각된다.

3.4 코일 피치의 영향

헬리컬 코일형 가스냉각기 내 CO₂의 냉각 열전달 특성에 대한 코일 피치의 영향을 평가하기 위해, 내경 4.55 mm의 헬리컬 코일형 가스냉각기의 코일 피치를 5 mm, 10 mm, 15 mm로 변화시키면서 실험하였다. Fig. 8에 나타낸 것처럼, 코일 피치만 변화시키고 나머지는 동일한 질량유속과 냉매온도 조건에서 실험하여 Fig. 9와 같은 결과를 얻었다.

Fig. 9는 헬리컬 코일형 가스냉각기의 코일 피치 변화에 따른 CO₂의 냉각 열전달 계수를 비교한 것이다. Fig. 9에서 알 수 있는 것처럼, 코일

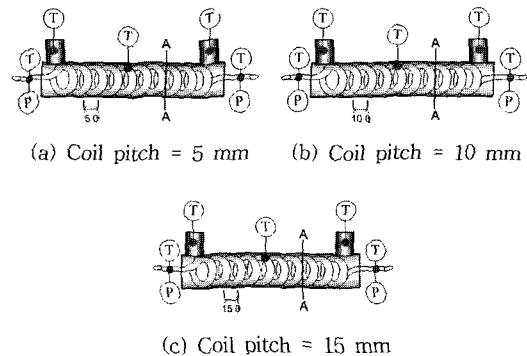


Fig. 8 Schematic diagram of inclined helical coil type gas cooler with coil pitch of 5, 10 and 15 mm.

피치가 증가하더라도 열전달 계수는 거의 변하지 않는다. 이러한 경향은 Cioncolini와 Santini⁽⁸⁾의 연구결과에서도 동일하게 나타났다. Cioncolini와 Santini의 연구결과에 의하면 코일 피치가 코일 반경에 비해 작을 경우 코일의 비틀림 효과로부터 발생되는 유동이 작거나 거의 발생하지 않기 때문이다라고 하였다. Yamamoto 등⁽⁹⁾은 유체의 층류와 난류 영역에서 코일 피치가 큰 헬리컬 코일형 열교환기의 비틀림 효과를 피하기 위해서 실험하였다. 그 결과, 비틀림 변수인 $\beta = \pi / \sqrt{2\delta}$ 이 0.5보다 작은 경우 유동에 대한 비틀림 효과를 무시할 수 있다고 하였다. 따라서 CO₂ 열전달에는 코일 피치의 영향이 거의 나타나지 않는 것으로 생각된다.

헬리컬 코일형 열교환기의 이점 중의 하나는 제한된 공간 내에 큰 전열면적을 가질 수 있다는 것이다. 전열면적을 극대화하기 위해서는 코일 직경에 대한 코일 피치가 작을수록 유리하기 때문에 Fig. 9의 결과는 헬리컬 코일형 열교환기에 대해 장점으로 작용할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

CO₂용 경사진 헬리컬 코일형 가스냉각기내 열전달에 영향을 미치는 변수인 관직경, 코일 직경, 전열관의 경사각도, 코일피치 등을 변화시키면서 실험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 내경 2.45 mm관인 경사진 헬리컬형 가스냉

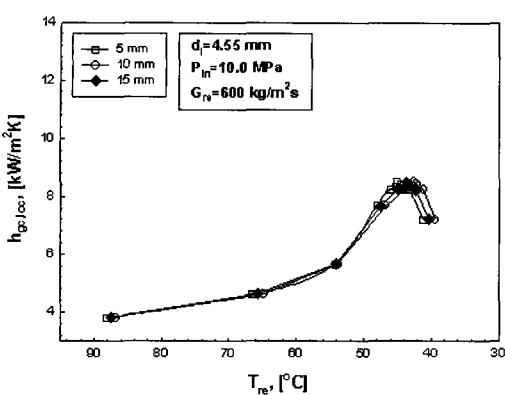


Fig. 9 Comparison of cooling heat transfer coefficients of CO_2 in inclined helical type gas cooler with coil pitch of 5, 10 and 15 mm.

각기내의 냉각 열전달계수는 내경 4.55 mm의 코일판에 비해서 높게 나타났다. 또한, 질량유속과 냉각압력이 같을 경우, 코일직경이 각각 26.75 mm와 41.35 mm인 헬리컬 코일관내 CO_2 냉각 열전달계수의 최대값은 각각의 입구 압력에서 유사임계 온도인 34.5°C 와 44.7°C 에서 나타나고, 코일직경이 상대적으로 작은 26.75 mm관의 열전달계수가 41.35 mm관에 비해서 높은 것을 알 수 있었다.

(2) 코일의 경사각도가 45° 인 가스냉각기의 냉각 열전달 계수가 경사각도가 90° 인 경우와 거의 동일하거나 약간 상승하는 것으로 나타났다. 특히, 유사임계 온도 영역 이후에서 더욱더 확실하게 상승하는 것을 볼 수 있었다. 경사진 헬리컬 코일형 가스냉각기의 코일 피치 변화에 따른 CO_2 의 냉각 열전달 계수를 비교한 결과, 코일 피치가 증가하더라도 열전달 계수는 거의 변하지 않는다.

후 기

이 논문은 산업자원부 차세대 신기술 개발사업의 일환인 “환경친화적 자연냉매인 CO_2 를 적용한 고효율 냉난방 시스템 개발” 사업의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 대해 감사드립니다(과제번호 : 00014863875).

참고문헌

- Yun, B., Park, H. Y., Yoo, K. C. and Kim, Y. C., 1999, Air-conditioner cycle simulation using tube-by-tube method, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 11, No. 4, pp. 499–510.
- Akagawa, K., Sakaguchi, T. and Ueda, M., 1971, Study on gas liquid two-phase flow in helically coiled tubes, Bull. JSME Vol. 14, No. 72, pp. 564–571.
- Yu, T. G., Kim, D. H., Son, C. H. and H. K. Oh, Heat transfer and pressure drop characteristics of supercritical CO_2 in a helically coiled tube, SAREK 2005 Winter Annual Conference, pp. 353–358.
- Lee, H. S., Yoon, J. I., Kim, J. D. and Bansal, P. K., 2005, Condensation heat transfer and pressure drop characteristics of hydrocarbon dioxide, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 49, pp. 1922–1927.
- Dang, C., 2003, Cooling Heat Transfer of Supercritical Carbon Dioxide, The Degree of Doctor of Engineering, The University of Tokyo School of Engineering Department of Mechanical Engineering.
- Yoon, S. H., Kim, J. H. and Kim, M. S. 2004, Experimental studies on heat transfer and pressure drop characteristics during gas cooling process of carbon dioxide in the supercritical region, SAREK, Vol. 16, No. 6, pp. 538–545.
- Dean, W. R., 1927, Note on the motion of fluid in a curved pipe, Phil. Mag., Vol. 4, pp. 208–223.
- Cioncolini, A. and Santini, L., 2005, An experimental investigation regarding the laminar to turbulent flow transition in helically coiled pipes, Experimental Thermal and Fluid Science, pp. 1–14.
- Yamamoto, K., Yanase, S. and Yoshida, T., 1994, Torsion effect on the flow in a helical pipe, Fluid Dyn. Res. Vol. 14, pp. 259–273.