

온수제조용 CO₂ 히트펌프의 가스쿨러 열전달 성능 해석

권정태¹, 이창경¹, 백동석¹, 권영철^{2*}
¹호서대학교 기계공학과, ²선문대학교 기계공학과

Analysis of Heat Transfer Performance of a Gas Cooler of CO₂ Heat Pump for Water Heating

Jeong-Tae Kwon¹, Chang-Kyung Lee¹, Dong-Seok Baek¹ and Young-Chul Kwon^{2*}

¹Department of Mechanical Engineering, Hoseo University

²Department of Mechanical Engineering, Sunmoon University

요약 본 연구에서는 ϵ -NTU 방법을 사용하여 CO₂ 히트펌프 가스쿨러의 열전달 성능을 해석하였고, 공개된 실험결과와 비교하였다. CO₂ 히트펌프 가스쿨러의 열전달률, 냉매측/순환수측 출구온도를 EES로 계산하였다. 해석은 시험부를 하나의 구간으로 설정하여 냉매와 순환수측 입출구의 평균온도를 물성치로 적용한 평균해석과 시험부를 50구간으로 나누어 각 구간에서의 출구온도를 다음 구간의 입구온도로 사용한 국소해석으로 진행되었다. 실험결과로부터 평균 해석보다는 국소해석의 결과가 실험값을 더 만족하였으며, 열전달률은 0.3~1.1%, 순환수측 출구온도는 1.31~1.88%, 냉매측 출구온도는 3.12~5.18% 정도의 오차를 보였다.

Abstract This study presents a prediction method for heat transfer performance of a gas cooler of CO₂ heat pump using ϵ -NTU method, and compared the results with the experimental data from the open literature. The heat transfer rate, refrigerant side outlet temperature and water side outlet temperature were calculated by using EES(Engineering Equation Solver)program in multi-tube-in-tube type CO₂ heat pump gas cooler. Analysis was performed in two methods : The first method performed without dividing into the test section by applying an analysis of the mean properties(mean analysis). The second method, tube length divided into 50 sections, was applied to the local properties(local analysis). From the present study, a good agreement at the local analysis was obtained between the analytical and experimental results by 0.3~1.1%, 1.31~1.88% and 3.12~5.18% for heat transfer rate, water and refrigerant side outlet temperatures, respectively.

Key Words : CO₂, EES, Gas cooler, Heat pump, Heat transfer

기 호 설 명

d	: 관 직경	[m]
f	: 마찰계수	[-]
h	: 대류열전달계수	[kW/m ² K]
L	: 관 길이	[m]
\dot{m}	: 질량유량	[kg/s]
N	: 관 개수	[-]
Nu	: Nusselt 수	[-]
Pr	: Prandtl 수	[-]
\dot{Q}	: 열전달률	[kW]
Re	: Reynolds 수	[-]

UA : 열관류율 [W/K]

하첨자

a	: 가정	
cw	: 순환수	
i	: 내경	[m]
in	: 입구	
m	: 평균	
o	: 외경	[m]
out	: 출구	
re	: 냉매	

이 논문은 2011년도 교육과학기술부·지식경제부와 한국산업기술진흥원에서 시행한 2단계 산학협력중심대학육성사업의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

*Corresponding Author : Young-Chul Kwon(Sunmoon Univ.)

Tel: +82-10-8523-0923 email: yckweon1@sunmoon.ac.kr

Received September 11, 2012

Revised (1st July 25, 2013, 2nd September 4, 2013)

Accepted November 7, 2013

1. 서론

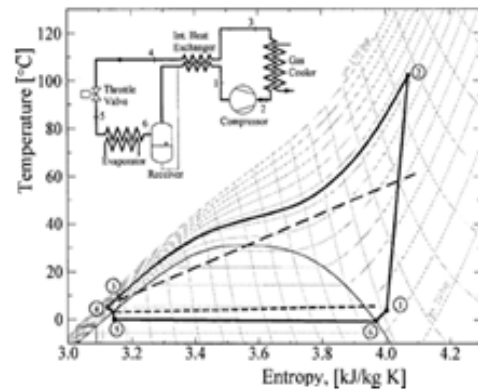
산업발전 및 심각한 환경문제로 인한 오존층 파괴 및 온실효과의 우려가 증가하고 있는 가운데 냉동장치 및 히트펌프에 사용되는 CFCs와 HCFCs는 물론 대체물질인 HFCs의 사용에 제동이 걸리게 되면서 친환경적인 자연냉매에 많은 관심을 가지게 되었다. 친환경적인 자연냉매 중 이산화탄소는 Table 1에서 알 수 있듯이 가연성과 독성이 없으며 지구 온난화에 대한 추가 영향이 없고 비열과 열용량이 크며 냉매로서의 열역학적 성질 및 기계적 성질도 우수하다. 또한 낮은 동점성계수 및 높은 열전도도는 열전달 거동에 유리하여 많은 관심을 받고 있다. 그러나 임계온도는 매우 낮은 반면, 임계압력이 매우 높아 이를 시스템에 적용할 경우에는 임계압력 이상의 고압측과 임계압력 이하의 저압측으로 이루어진 초임계 사이클(Supercritical cycle)에서 작동한다는 단점이 있기 때문에, 이산화탄소를 냉매로 사용하는 냉동공조기의 설계에 많은 어려움을 제공한다. 임계압력 부근에서는 열전달 물성치가 크게 변하여 기존냉매와는 다른 열전달 거동을 보여준다[1,2].

본 논문에서는 급탕용 이산화탄소 히트펌프의 가스쿨러 성능특성을 고찰하기 위하여 EES (Engineering Equation Solver) 프로그램을 이용하여 해석하였다. 타당성 검증을 위하여 기존연구의 실험결과 값과 비교하였다. 그리고 초임계 사이클 상에서 성능계수를 좌우하는 가스쿨러 최적화 설계의 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 해석

2.1 연구 배경

이산화탄소를 냉매로 사용하는 경우에는 압력이 매우 높아 초임계 사이클에서 작동되므로 가스쿨러를 지날 때 Fig. 1에서 나타나듯이 포화곡선을 벗어나 운전이 이루어지며, 상의 구분이 명확하지 않고 물성치의 변화를 예측하기 힘들기 때문에 가스쿨러의 최적화가 어려우며 그에 따른 안정적인 성능계수를 도출하기에 상당한 어려움이 있다는 문제점이 있다.



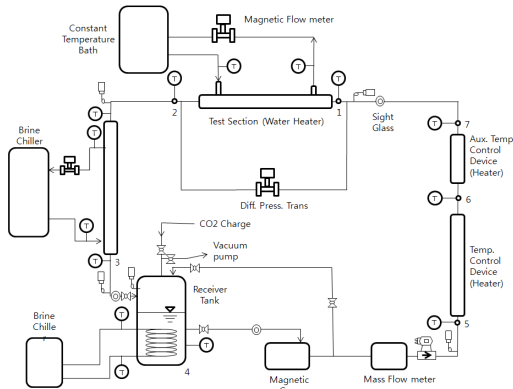
[Fig. 1] T-s diagram showing the transcritical CO₂ cycle used for water heating[4]

[Table 1] Characteristics of Refrigerants[3]

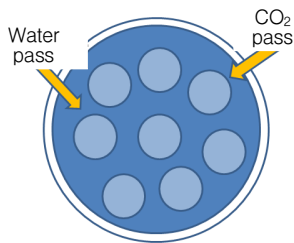
Refrigerants	R-12 CFC	R-22 HCFC	R-134a HFC	R-410A HFC-HFC(50/50)	R-717	R-290	R-744
Chemical components	CCl ₂ F ₂	CHClF ₂	CH ₂ FCF ₃	CH ₂ F ₂ /CHF ₂ CF ₃	NH ₃	C ₃ H ₈	CO ₂
ODP/GWP	1/7100	0.05/1500	0/1200	0/1730	0/0	0/3	0/1
Flammability /Toxicity	N/N	N/N	N/N	N/N	Y/Y	Y/N	N/N
Price (relative value)	1	1	3-5	5	0.2	0.1	0.1
Molecular weight [Kg/kmol]	120.9	86.5	102.0	72.6	17.0	44.1	44.0
Boiling point[°C]	-29.8	-40.8	-26.2	-52.7	-33.3	-42.1	-78.5
Critical temperature[°C]	112.0	96.2	101.2	72.1	132.3	96.7	31.1
Critical pressure[MPa]	4.16	4.99	4.07	4.95	11.33	4.24	7.38
Refrigerating capacity [kJ/m ³]	2734	4356	2868	6763	4382	3907	22545

2.2 기존 연구 실험결과

본 해석에서는 EES를 이용한 가스쿨러의 성능해석 및 기존 실험결과와의 비교를 수행하였으며, 기존논문의 이산화탄소를 냉매로 사용한 가스쿨러에 대한 실험사양 및 실험결과 값을 그대로 이용하여 해석을 수행하고 그 결과 값을 비교하였다[5]. 해석수행은 2가지 방법으로 수행되었으며 첫 번째 방법은 시험부의 관 전체를 하나의 구간으로 하여 실험에 사용된 냉매 및 순환수측 입·출구의 평균온도로 물성치를 적용하여 해석하는 방법(평균해석)이며, 두 번째 방법은 시험부 관 전체를 균등하게 총 50구간으로 나누어 각 구간에서의 출구온도를 다음 구간의 입구온도로 적용하는 방법으로, 물성치는 이전 구간의 출구온도로 적용하여 해석(국소해석)을 수행하였다. 50구간으로 나눈 이유는 시험부 관전체를 50구간보다 더 세분화 하여 해석했을 경우에도 결과의 차이가 거의 없었기 때문이다. 해석의 기준이 된 실험으로는 Kim [5]의 이산화탄소용 다중관식 가스쿨러에 대한 연구결과를 이용하였고 실험장치는 Fig. 2와 같다. 가스쿨러는 Fig. 3과 같이 1개의 순환수 관에 8개의 냉매가 대향류로 열교환되며, Table 2는 실험에 사용된 가스쿨러 형상, 운전조건 및 실험결과 값을 보여준다.



[Fig. 2] Schematic diagram of Kim et al. experimental apparatus[5]



[Fig. 3] Geometry of Kim et al. gas cooler[5]

[Table 2] Specification of gas cooler and experimental result of Kim et al. [5]

Parameter	Experimental result	
	1	2
Refrigerant		
D _i	3.1[mm]	4[mm]
D _o	4[mm]	8[EA]
N	7.5[m]	17.05[mm]
L	17.05[mm]	19.05[mm]
D _i		
D _o		
Coolant		
T _{in} [°C]	10.05	9.98
T _{out} [°C]	100.1	100.5
T _{out} [°C]	28.2	28.5
\dot{m} [g/s]	70	70.2
T _{in} [°C]	17	17.1
T _{out} [°C]	70.4	69.8
\dot{m} [g/s]	72.8	74.3
\dot{Q} [kW]	16.3	16.3

2.3 해석 방법

성능예측 프로그램에서 순환수측 열전달계수는 난류의 경우에 Dittus-Boelter 상관식 (1)을, 층류의 경우에 Oh와 Son[6]이 실험데이터를 최소제곱 회귀법으로 구한 상관식 (2)을 이용하여 해석을 수행하였고, 냉매측의 열전달계수는 Gnielinski 상관식 (3)을 사용하였다. 식 (4)는 상관식 (3)의 마찰계수이다[7].

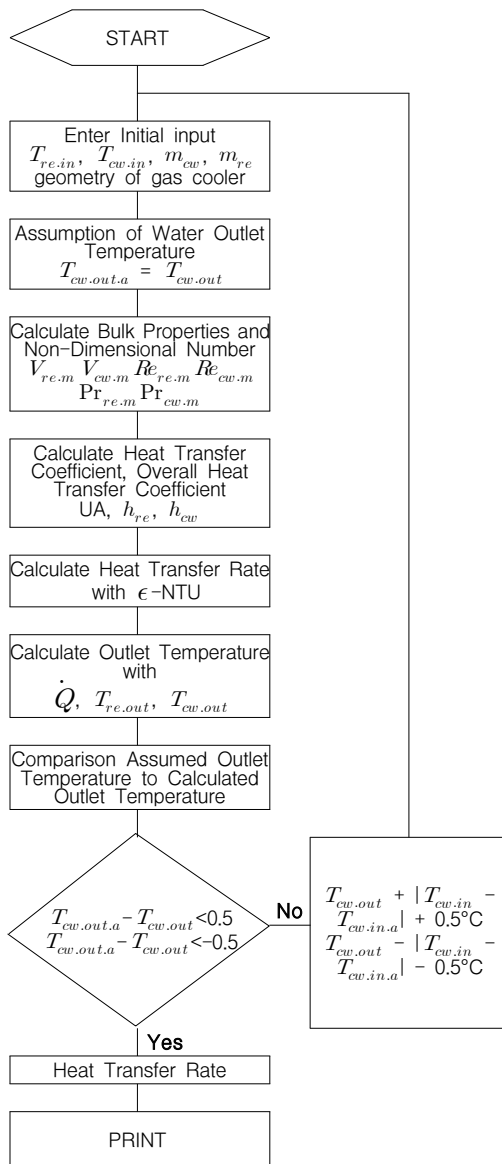
$$Nu_{cw} = 0.023 Re_{cw}^{0.8} Pr_{cw}^{0.3} \quad (1)$$

$$Nu_{cw} = 0.01138 Re_{cw}^{1.558} Pr_{cw}^{-3.249} \quad (2)$$

$$Nu_{re} = \frac{f_{re}/8 \cdot (\sqrt{Re_{re}} - 1000) \cdot Pr_{re}}{12.7 \cdot \sqrt{f_{re}/8} \cdot (Pr_{re}^{2/3} - 1) + 1} \quad (3)$$

$$f_{re} = (1.58 \cdot \ln(Re_{re}) - 3.28)^{-2} \quad (4)$$

Fig. 4는 해석 알고리즘과 계산과정을 간단히 설명한 순서도이다. 해석수행 알고리즘은 순환수측을 기준으로 하여 열전달 및 냉매의 출구온도를 계산하였다. 대향류 해석수행을 평행류와 같이 열교환시키는 경우, 순환수측의 출구온도가 냉매측의 출구온도보다 높아질 수 없기에 순환수측의 입구온도를 가정하여 순환수측의 출구온도를 계산하였다. 이때, 계산된 값이 가정한 값과 일정 값(본 계산 시에는 0.5°C) 이상 차이가 발생하면 다시 가정한 값에 - 또는 + 하여 반복 계산하도록 하였다.

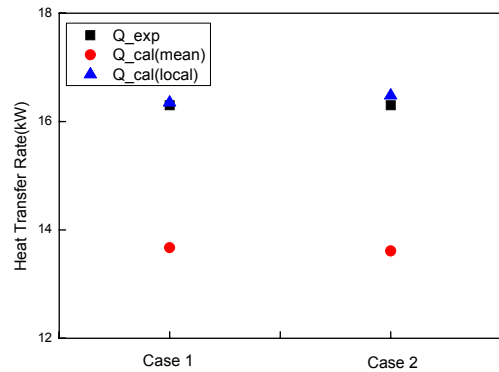


[Fig. 4] Analysis algorithm of a gas cooler

3. 해석 결과

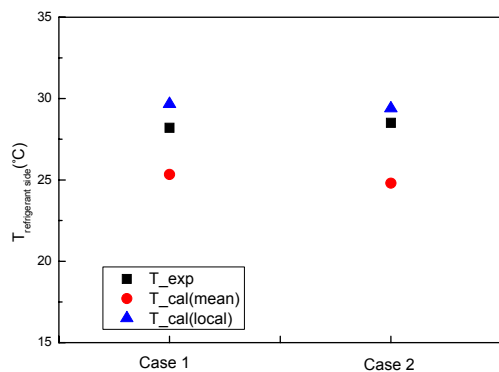
본 연구의 목적은 CO₂ 히트펌프의 실제 실험결과를 해석해 낼 수 있는 기법을 개발하는 것으로서 해석값과 직접비교 가능한 실험 결과값을 계산하기 위하여 해석코드를 개발하였다. Fig. 5, Fig. 6, 그리고 Fig. 7은 가스쿨러의 열전달량과 냉매 및 순환수측 출구온도에 따른 기존연구 실험값과 순환수측을 이용하여 얻은 평균과 국소의 두 가지 해석결과를 보여주고 있다. Fig. 5는 전열량에

따른 기존연구 실험값과 두가지 해석연구로부터 얻은 평균과 국소 해석값을 보여준다. 평균해석은 실험값과 비교 시에 현격한 차이를 보이는 것을 알 수 있었고 오차는 약 16.13~16.5%로 나타났다. 그리고 국소해석에서는 실험값과 잘 일치하는 경향성을 보였으며, 이때의 오차는 약 0.31~1.1%였다.



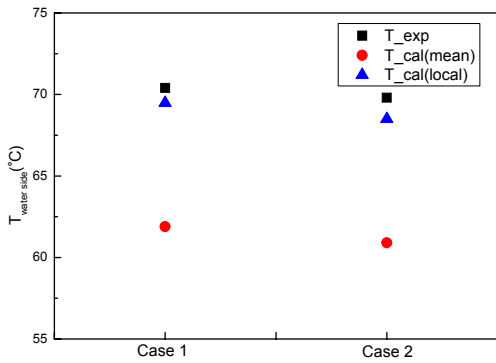
[Fig. 5] Comparison between heat transfer rate obtained by Kim et al. experiment and two analytical results

Fig. 6은 냉매측 출구온도에 따른 기존연구 실험값과 본 연구의 평균과 국소 해석값을 보여준다. 평균해석은 약 10.18~12.95%의 오차를 보였고, 국소해석에서는 약 3.12~5.18%의 오차를 보였다.



[Fig. 6] Comparison between refrigerant side outlet temperature obtained by Kim et al. experiment and two analytical results

Fig. 7은 순환수측 출구온도에 따른 기존연구 실험값과 본 연구의 평균과 국소 해석값을 보여준다. Fig. 5와 Fig. 6과 유사하게 실험값과의 비교 역시 평균해석은 약 12.09~12.75%의 오차를, 국소해석은 약 1.31~1.88%의 오차를 보였다.



[Fig. 7] Comparison between water side outlet temperature obtained by Kim et al. experiment and two analytical results

Table 3은 Kim 등의 실험값과 비교한 두 해석값과 오차를 제시하고 있다. 전반적으로 평균해석에 비해 국소해석에서 정확한 결과를 예측할 수 있다는 것을 확인하였다. 이는 초임계 영역에서의 CO₂는 유사 임계온도 부근에서 물성치가 급변하므로 평균해석으로 해석을 하게 되면 CO₂의 냉각열전달 특성을 보다 정확히 예측하기가 어렵기 때문에 사료된다.

[Table 3] Comparison of the experimental results and the analytical ones

	1	2
$Q_{total\ exp}$ [kW]	16.3	16.3
$Q_{total\ (mean)}$ [kW]	13.67	13.61
Relative error [%]	16.13	16.50
$Q_{total\ (local)}$ [kW]	16.35	16.48
Relative error [%]	0.31	1.1
$T_{re,out\ exp}$ [°C]	28.2	28.5
$T_{re,out\ (mean)}$ [°C]	25.33	24.81
Relative error [%]	10.18	12.95
$T_{re,out\ (local)}$ [°C]	29.66	29.39
Relative error [%]	5.18	3.12
$T_{cw,out\ exp}$ [°C]	70.4	69.8
$T_{cw,out\ (mean)}$ [°C]	61.89	60.9
Relative error [%]	12.09	12.75
$T_{cw,out\ (local)}$ [°C]	69.48	68.49
Relative error [%]	1.31	1.88

4. 결론

급탕용 이산화탄소 히트펌프의 가스쿨러 성능특성을 고찰하기 위하여 기존 연구자의 실험 데이터를 EES에 적용하여 평균해석과 국소해석을 수행하여 기존 실험값과 해석값을 비교하였다.

전열량에서 평균해석과 실험값은 약 16.13~16.5%의 큰 오차를 보였지만, 국소해석과 실험값에서는 약 0.3~1.1%의 적은 오차를 보였다. 출구온도에서의 기존연구 실험결과와 본 해석연구 결과와의 비교에서도 평균해석과 실험값 비교 시에 냉매측 출구온도는 약 10.18~12.95%, 순환수측 출구온도는 약 12.09~12.75%의 큰 오차를 보였지만, 국소해석과 실험값의 비교 시에 냉매측 출구온도는 약 3.12~5.18%, 순환수측 출구온도에서는 약 1.31~1.88%의 적은 오차를 보이는 것으로 나타났다. 이로부터 CO₂를 적용하는 시스템의 열전달 특성연구에는 평균해석보다는 국소해석이 더 효과적임을 확인하였다.

본 연구결과는 온수제조용 히트펌프 가스쿨러의 CO₂의 냉각열전달 특성을 정확히 파악하는데 도움이 될 것이며, 해석결과는 CO₂ 히트펌프의 가스쿨러 개발 시에 기초 설계자료로 활용할 것이다.

References

- [1] Y. C. Kwon, D. H. Kim, S. J. Lee, J. Y. Choi, J. H. Lee, "Study on Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Internal Heat Exchanger for CO₂ Heat Pump under Cooling Condition", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering Vol. 20, No.8, pp.517-525, 2008.
- [2] Y. C. Kwon, S. J. Lee, J. Y. Choi, J. H. Lee, "Experimental Study on Evaporation Heat Transfer and Oil Effect in Micro-fin Tube Using CO₂.", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering Vol. 20, No.2, pp.106-112, 2008.
- [3] M. H. Kim, "Overview of Development Trend in Japan at CO₂ Heat Pump for Water Heating", Journal of the KSME, Vol. 31 No. 7, pp. 65-70, 2007.
- [4] P. Nekså, H. Rekstad, G. R. Zakeri and P. A. Schiefloe., "CO₂-heat pump water heater: characteristics, system design and experimental results", Int. Journal of Refrigeration, Vol. 21, No. 3, pp. 172-179, 1998. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-7007\(98\)00017-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-7007(98)00017-6)
- [5] Y. R. Kim, "Design and Performance Test of the Heat Exchanger for Water-heating for Cooling/Heating /water-heating System Using CO₂", 2nd Report of Ministry of Knowledge Economy, p.74-95, 2007.
- [6] H. K Oh, C. H Son, "Experimental Study on Compact type CO₂ Gas Cooler(2)", Journal of the Korean Society of Marine Engineering Vol. 34, No.1, pp.30-36, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2010.34.1.030>

- [7] H. K Oh, C. H Son, "Experimental Study on Compact type CO₂ Gas Cooler(1)", Journal of the Korean Society of Marine Engineering Vol. 34, No.2, pp.259-266, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2010.34.2.259>

권 정 태(Jeong-Tae Kwon)

[정회원]



- 1988년 2월 : 서울대학교 기계공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 포스텍 기계공학과 (공학석사)
- 1999년 2월 : 포스텍 기계공학과 (공학박사)
- 1999년 3월 ~ 2005년 2월 : 남부대학교 자동차기계공학과 교수

- 2005년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

냉동공조, 열전달, 나노유체

이 창 경(Chang-Kyoung Lee)

[정회원]



- 2006년 2월 : 호서대학교 기계공학과 (공학사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 기계공학과 (공학석사)

<관심분야>

냉동공조, 열전달

백 동 석(Dong-Seok Baek)

[정회원]



- 2001년 2월 : 호서대학교 기계공학과 (공학사)
- 2012년 2월 : 호서대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2012년 2월 ~ 현재 : (주)세화하이테크

<관심분야>

냉동공조, 열전달

권 영 철(Young-Chul Kwon)

[정회원]



- 1989년 2월 : 부산대학교 정밀기계공학과 (공학사)
- 1991년 8월 : 포스텍 기계공학과 (공학석사)
- 1996년 8월 : 포스텍 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 9월 ~ 1999년 2월 : 한국전력 전력연구원

- 1999년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

냉동공조, 열전달, 전산해석