



CO₂ 냉매의 증발열전달 특성

CO₂ 냉매를 이용한 증발 열전달 특성을 설명하고 국내외의 연구 현황과 향후 연구방향에 관하여 고찰하고자 한다.

정시영

서강대학교 기계공학과 (syjeong@sugang.ac.kr)

환경친화적인 냉매를 탐색하는 과정에서 자연냉매 CO₂는 1990년대 초에 많은 사람들의 관심을 다시 끌게 되었고, 그 이후 구미 선진국 위주로 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 CO₂는 탄화수소계 냉매가 안전상의 이유로 사용되기 어려운 차량용 냉방 시스템과 온수제조용 열펌프 시스템에 대하여 많은 연구가 이루어져 왔으며 최근에는 가정용 냉난방 시스템에 대한 연구도 진행되고 있다.

CO₂를 냉매로 사용하는 냉동 시스템에 있어서 증발기는 시스템의 중요한 구성 요소이므로 제품 개발을 위해서는 증발기에서의 열전달 및 압력손실 특성에 대한 연구가 선행되어야 한다. CO₂의 증발 열전달에 있어서 작동매체인 CO₂의 비체적, 비열, 점성계수, 표면장력 등의 물성치가 크게 변화하므로 기존에 널리 사용되던 냉매의 증발열전달과는 상당히 다른 결과가 나타난다. 예를 들면 기존의 냉매에서는 건도가 증가함에 따라 열전달계수가 증가하는 것으로 알려져 있으나 CO₂의 경우에는 오히려 열전달계수가 감소하는 것으로 보고되고 있다. 이처럼 CO₂는 증발열전달 과정에서 기존 냉매의 경향으로부터 예측하기 힘든 결과가 나타나므로 다양한 형상의 증발기에 대하여 실험적으로 압력손실과 열전달계수를 구하는 연구는 성공적인 CO₂ 냉동 시스템의 개발을 위하여 필수 불가결하다.

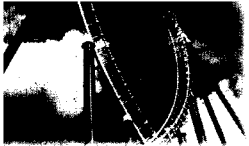
본고에서는 CO₂ 냉동 시스템의 개발에 도움이 될 수 있도록 지금까지 국내외에서 수행된 CO₂ 증발 열전달에 관한 문헌조사를 통하여 연구결과들을 비교, 분석하고 향후의 연구 방향을 제시하고자 한다.

CO₂ 냉동 시스템용 증발기

현재 CO₂는 냉매의 특성상 주로 차량용 냉방 시스템과 온수제조용 열펌프 시스템에 적용되고 있다. CO₂를 이용하는 냉난방 시스템은 작동 압력이 기존 시스템에 비하여 월등하게 높으므로 증발기에 사용되는 열교환기도 내압성이 우수하여야 한다. 지금까지의 연구, 개발된 CO₂ 냉동 시스템의 증발기에는 핀-튜브 열교환기, 마이크로튜브 열교환기, 이중관식 열교환기, 셸-튜브 열교환기 등이 사용되었다.

핀-튜브 열교환기

그림 1은 일본에서 최근 개발된 온수제조용 열펌프 시스템으로 증발기(실외기)에 기존의 실외기에 사용하던 핀-튜브 열교환기가 적용되었다. 사용된 동관의 외경은 약 6.35 mm (1/4")이고 압력을 고려하여 기존에 사용되던 관보다 관벽의 두께를 증가시켰다.



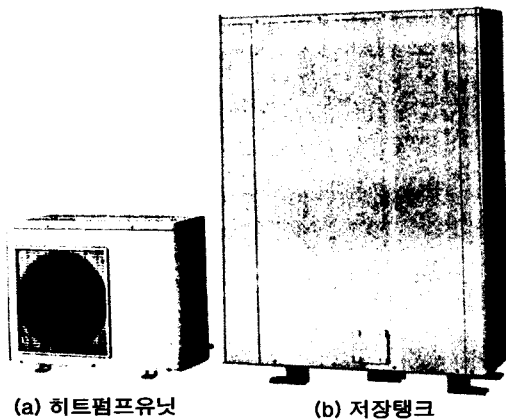
마이크로튜브 열교환기

그림 2는 CO₂ 시스템에 적용 가능성이 높은 알루미늄 압출 마이크로 튜브의 단면의 형상과 치수를 보여주고 있다. 이 그림의 마이크로튜브는 외국에서 CO₂ 냉난방 시스템에 실제 사용된 제품으로 본 연구실에서 연마공정을 거쳐 단면을 촬영한 것이다. 이러한 알루미늄 압출관은 튜브 하나의 직경이 수백 마이크로인 경우가 많아 마이크로튜브로 불리며 내압성이 우수하기 때문에 CO₂ 냉동시스템에서 증발기뿐 아니라 가스쿨러에도 사용되고 있다.

마이크로 튜브는 CO₂ 시스템이 요구하는 고압에서의 안전성을 보장해 줄 뿐만 아니라 고효율, 고집적 증발기를 가능하게 한다. 왜냐하면 CO₂를 냉매로 사용하는 시스템에 있어서는 단위온도 강하에 대하여 기존냉매 보다 5~10배의 압력 손실이 허용되므로 마이크로 튜브의 적용이 가능하기 때문이다. 외국의 한 연구에 의하면 기존 냉매(R22)를 사용하는 흰-튜브 증발기에 비하여 CO₂를 사용하는 위 그림의 마이크로 튜브 증발기는 냉매측 열전달 면적은 약 2배, 공기측 열전달 면적은 1.2배 정도로 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다.

이중관식 열교환기

그림 3에 표시된 이중관식 열교환기도 몇몇 시스템

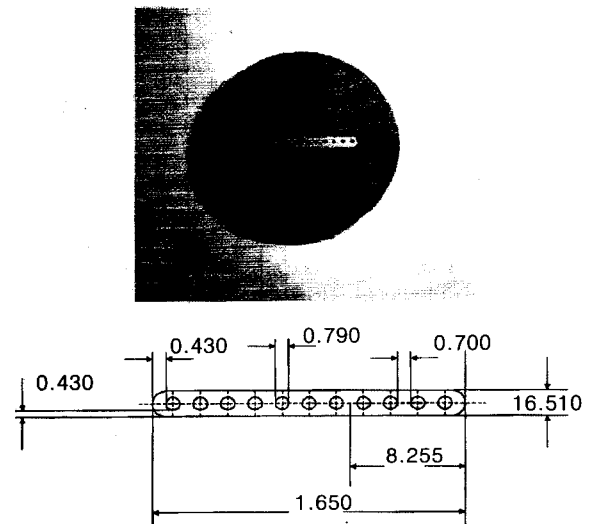


(a) 히트펌프유닛 (b) 저장탱크
[그림 1] Mitsubishi사의 CO₂온수급탕 열펌프시스템

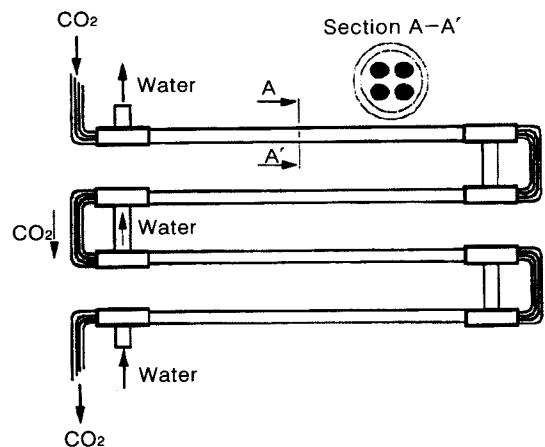
에서 증발기에 사용되었는데 주로 내측 튜브에는 CO₂ 냉매가 흐르고 주변의 환형 유로에는 냉수가 흐르는 형태로 구성되어 있다. 이중관식 열교환기의 경우 이 그림에 나타난 것처럼 내부에 다수의 튜브를 사용하는 방식도 사용되었다.

셀-튜브 열교환기

셀-튜브 열교환기는 CO₂ 냉동 시스템에서는 널리



[그림 2] CO₂냉동 시스템용 알루미늄 압출 마이크로튜브의 단면



[그림 3] 온수급탕기에 사용된 이중관식 증발기(Maryland)



사용되지 않고 있으나 한 연구에 적용된 적이 있다. 이 연구의 열펌프 시스템은 필요한 식품공장에 냉수(증발온도 -5 ℃, 90 kW)와 온수(10 → 80 ℃, 130 kW)를 동시에 공급하며 특이한 점은 가스쿨러와 증발기 모두 CO₂ 냉매가 튜브 측이 아닌 셸 측으로 흐른다는 것이다. 냉수를 튜브로 흐르게 하여 냉수측의 열전달계수를 증가시키기 위해서 이러한 배치를 택하였으며 CO₂ 압력을 견디기 위하여 셸의 직경을 최소로 줄여 설계하였다.

국내외 연구 현황

CO₂ 냉매의 증발열전달에 대한 연구는 최근 수년간 활발히 진행되어 왔다. 표 1에는 최근까지 수행된 CO₂ 냉매의 증발열전달에 대한 몇몇 연구가 요약되어 있다. 이 표에 표시한 연구 이외에도 상당히 많은 연구가 진행되고 있으나 모두 수록하지는 못하였고

수행된 연구 내용을 기관 별로 소개하겠다.

고려대학교

고려대학교에서는 수평관에 대하여 CO₂와 R-134a의 증발열전달 특성에 관한 연구를 수행하였다. 이 연구에서는 전체적으로는 CO₂의 증발열전달계수가 R-134a에 비하여 큰 것으로 나타났으며 열유속이 증가함에 따라 열전달계수는 약간 증가하는 것으로 나타났다(그림 4). 이러한 결과는 CO₂의 경우에 드라이아웃 현상이 상당히 저건도 영역에서부터 발생하여 열전달계수가 감소하지만 저건도 영역에서는 핵비등이 R-134a보다 3.5배 정도 크기 때문인 것으로 해석될 수 있다. 그림 5는 질량유속이 증가함에 따라 열전달계수가 상당히 큰 폭으로 증가하는 것을 보여주고 있다. 이 연구에서는 이전의 연구에서도 확인된 바와 같이 CO₂의 경우에는 상당히 낮은 건도 영역에서 드라이아웃 현상이 발생하기 때문에 이에 대한 정

<표 1> CO₂ 증발열전달에 관한 국내외 연구

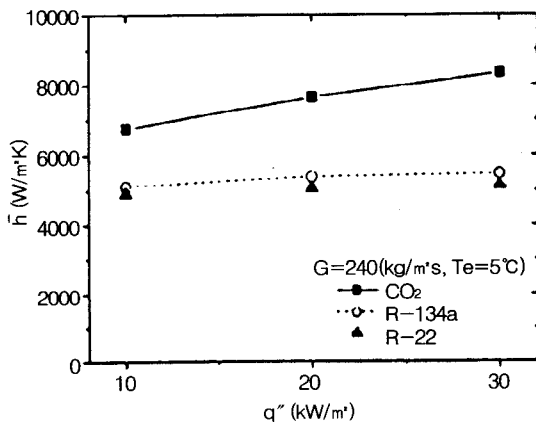
연구(년도) 제목, 수행기관명, 연도	열교환기				증발온도(℃)	질량유속(kg/m ² s)	열유속(W/m ²)	열전달계수(W/m ² K)
	재료	ID (mm)	관벽두께 (mm)	관길이 (m)				
① 수평원관 내에서 R-134a와 CO ₂ 의 증발열전달 특성에 대한 비교연구, 고려대, 2001	SUS	6	1	1.6	5 ~ 10	170 ~ 340	10,000 ~ 20,000	5,000 ~ 9,000
② 이산화탄소 증발 열전달 특성에 관한 실험적 연구, 서울대, 2001	SUS	7.75	0.9	5	0 ~ 10.5	212 ~ 530	12,000 ~ 27,000	5,000 ~ 10,000
③ 이산화탄소의 수직원관 내 증발 열전달 특성에 관한 연구, 서울대, 2001	SUS	4.55	0.9	1.9	-3.8 ~ 4.3	427 ~ 540	40,000 ~ 52,000	12,000 ~ 18,000
④ Heat transfer and pressure drop for in-tube evaporation of CO ₂ , IIR Conf. SINTEF, 1997	Al	7	1.5	1.0	-25 ~ 5	200 ~ 400	3,000 ~ 9,000	6,000 ~ 14,000
⑤ Heat transfer and pressure drop for flow of supercritical and subcritical CO ₂ in micro channel tubes, SINTEF, 2000	Al	0.787 MPE		0.54	0~20	200 ~ 600	5,000 ~ 20,000	3,000 ~ 15,000
⑥ CO ₂ as working fluid for heat pumps Graz Univ., 1998	Cu	12	1.5	5.7x2 (직선)		358 ~ 681	20,000 ~ 40,000	2,000 ~ 5,000
⑦ CO ₂ as working fluid for heat pumps Graz Univ., 1998	Cu	10	1	13.4 (twist 1) 23.6 (twist 2)	-10 0 10	350 ~ 1,200	16,000 ~ 35,000 (twist 1) 8,000 ~ 16,000 (twist 2)	2,500 (m=350) ~ 5,000 (m=900)
⑧ Water heater, Mitsubishi, 2001	Cu	6.35 (OD)						
⑨ Experimental evaluation of CO ₂ water heater, Univ. of Maryland, 1998	Cu	6.22	1.65	0.6 x 4				



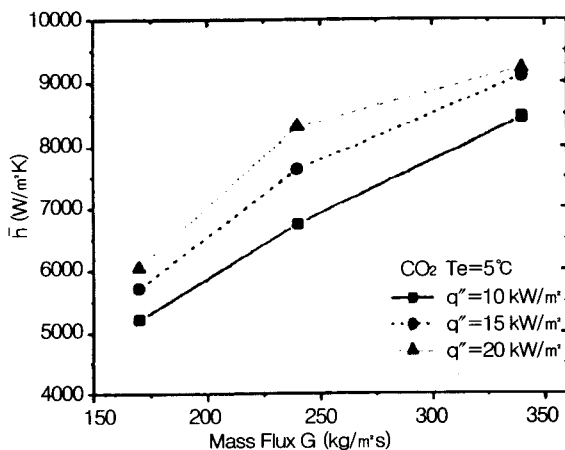
확한 예측이 중요하다는 결론을 제시하고 있다.

서울대학교

서울대학교에서는 수평관과 수직관에 대한 증발열 전달 특성에 관한 연구를 수행하였다. 수평관 실험에서는 그림 6과 같이 건도가 증가함에 따라 열전달계수가 감소하는 것으로 나타났으며, 특히 관 상부의 열전달계수가 건도의 증가에 따라 급격히 감소하는 경향을 보인다. 건도 증가에 따라 관 상부에서 급격히 열전달계수가 감소하는 현상은 수평관에서 중력에 의하여 관 상부의 액막이 부분적으로 깨지는 드라이아웃에 기인하는 것으로 저자들은 설명하고 있다. 저자



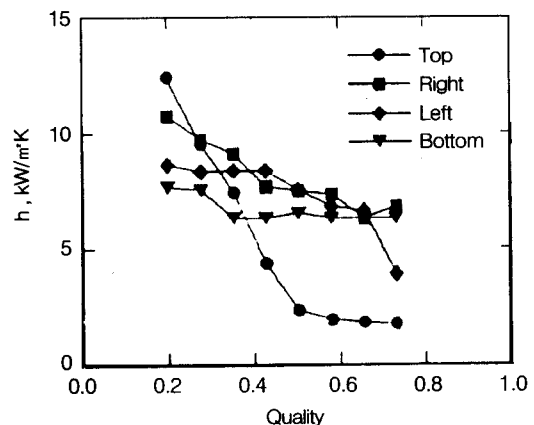
[그림 4] 열유속에 따른 CO₂와 R-134a의 증발열전달계수



[그림 5] 질량유속에 따른 CO₂와 R-134a의 증발열전달계수

들은 CO₂에 대하여 관성력과 표면장력의 비를 나타내는 Weber 수와 중력과 표면장력의 비를 나타내는 Bond 수를 고찰하여 이들의 값이 기존 냉매인 R-22 나 R-134a에 비하여 상당히 큰 것을 확인하였다. 이는 이산화탄소가 다른 냉매들에 비해 그만큼 약한 표면장력으로 인해 액막을 유지하기 힘들다는 것을 나타내며 이러한 경향은 증발온도가 증가하면서 더 커지는 것으로 나타났다. 또한 기존의 냉매에 적용하던 증발열전달 상관식들은 실험결과와 상당히 오차가 큰 것으로 나타났다. 이는 기존의 상관식으로는 임계점 부근에서 증발과정을 거치는 이산화탄소의 열전달계수를 예측하는 것이 힘들다는 것을 의미하며 따라서 앞으로 이산화탄소의 증발열전달 계수를 예측할 수 있는 새로운 상관식의 개발이 필요하다는 결론을 내렸다.

수직관에 대한 증발열전달 실험에서는 그림 7과 같이 수직관이 수평관에 비하여 열전달계수가 상당히 우수한 것으로 나타났다. 수평관에서는 이산화탄소의 낮은 점성과 표면장력으로 인해 초기부터 관 상부의 액막이 파열되어 열전달계수의 감소가 나타나는 반면, 수직관에서는 원주방향으로는 중력의 영향을 받지 않기 때문에 액막이 고르게 분포되어 증발초기에는 열전달계수가 상당히 크게 나타난다.



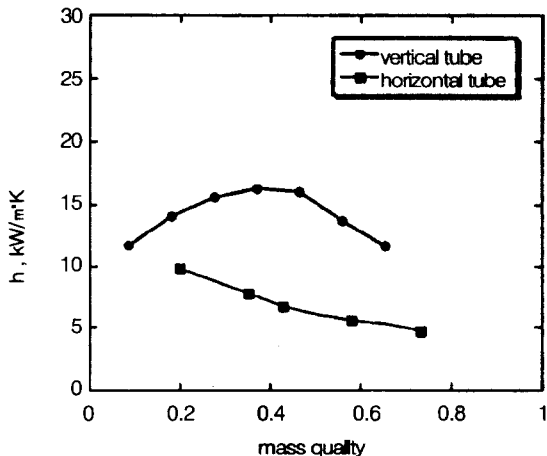
[그림 6] 건도에 따른 수평관에서의 CO₂ 증발열전달계수



SINTEF

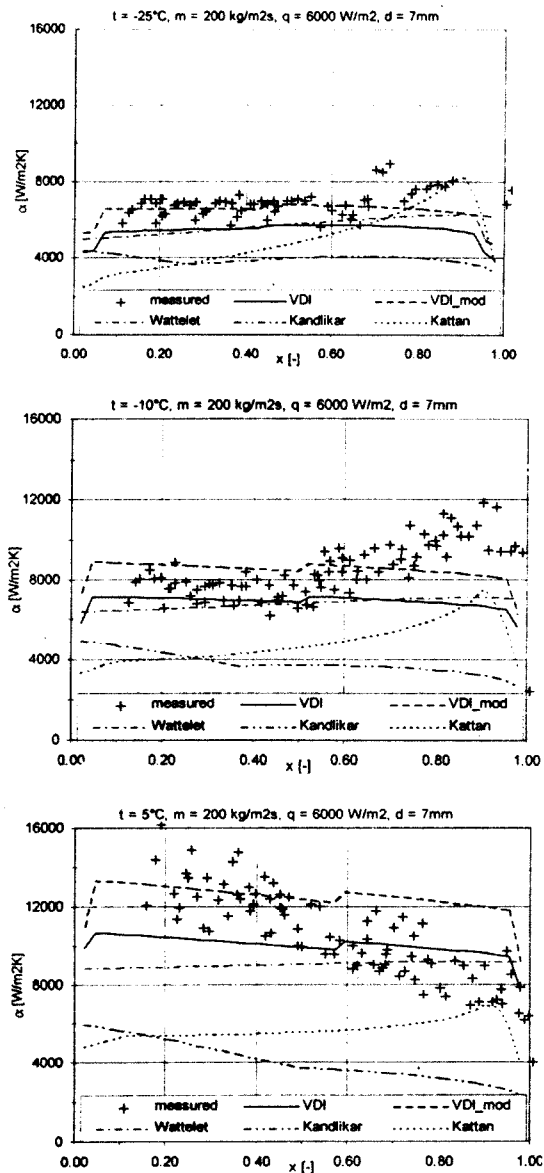
노르웨이의 SINTEF는 CO₂ 냉동시스템에 대하여 일찍부터 활발한 연구를 수행하여 왔으며 증발열전달에 관련해서도 기존관과 마이크로튜브를 대상으로 많은 연구 결과를 발표하였다. 1997년에 발표된 연구는 기존의 냉매에 사용되는 것과 비슷한 직경의 수평관(7 mm)에서 CO₂의 건도, 열유속, 질량유속 및 증발온도가 열전달계수에 미치는 영향에 대하여 다루고 있다. 그림 8은 다른 조건은 동일하게 유지하고 증발온도만을 변화시켰을 때 이것이 열전달계수에 미치는 영향을 나타내고 있다. -25 °C에서는 열전달계수는 건도에 따라 거의 변화가 없고, -10 °C에서는 건도에 따라 증가하는 경향을 보인다. 그러나 5 °C에서는 건도가 증가함에 따라 오히려 열전달계수가 감소하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 증발온도가 증가하면서 Weber 수와 Bond 수가 증가하기 때문에 드라이아웃이 쉽게 발생한다는 서울대학교의 연구결과와도 잘 일치한다.

SINTEF에서는 기존관 뿐 아니라 마이크로튜브에 대한 증발열전달 연구도 수행하였다. SINTEF에서 사용한 마이크로튜브는 그림 2에 표시된 것과 동일한 내경을 갖는 25개의 채널로 구성되어있다. 이 실험에



[그림 7] 수평관과 수직관에서의 CO₂ 증발열전달계수의 비교

서는 마이크로 튜브를 직접 가열하는 것이 곤란하기 때문에 마이크로채널 주위에 열전달대체를 흘려 튜브를 가열하는 방법을 사용하였다. 이러한 경우 관벽의 온도를 정확하게 측정하는 것이 힘들기 때문에 이 연구에서는 관벽 온도를 측정하지 않고 Wilson Plot 방



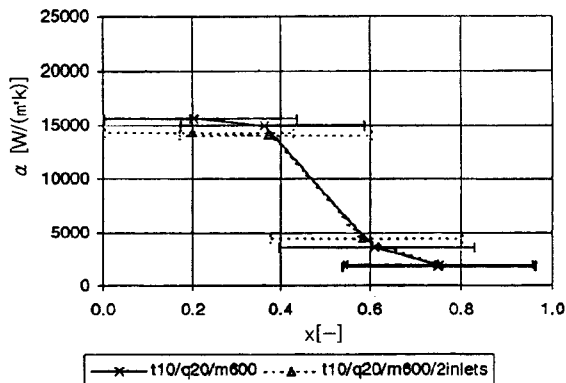
[그림 8] 증발온도에 따른 CO₂ 증발열 전달계수의 변화 (SINTEF)



법을 이용하여 열전달계수를 계산하였다. 이 연구에서 특징적인 결과로는 그림 9에 나타난 것처럼 건도 0.5 근처에서 열전달계수가 15,000 W/m²K에서 5,000 W/m²K이하로 급격히 감소한다는 것이다. 또한 마이크로채널 열교환기에서는 냉매의 분배문제가 심각하게 나타날 수 있는데 이를 개선하기 위하여 SINTEF에서는 그림 10의 b)처럼 냉매의 입구를 양쪽으로 배치하는 것을 제안하였다.

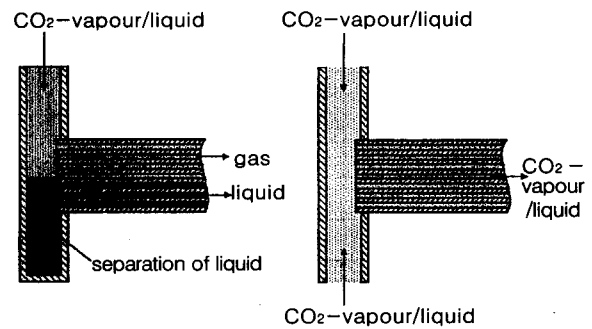
이 연구에서 도출된 또 하나의 새로운 사실은 질량 유속의 증가가 항상 열전달계수의 증가를 가져오는 것이 아니라는 사실이다. 이 실험은 입출구의 건도를 일정하게 유지하기 위해서 열유속을 조절하면서 실시하였다. 실험 결과 질량유속이 200 kg/m²·s에서 300 kg/m²·s로 증가하는 경우에는 열전달계수가 약간 증가하지만 그 이상으로 질량유속을 증가시키면 그림 11에 나타난 바와 같이 열전달계수는 급격히 감소한다. 이것은 기존 냉동기의 증발기에서 질량유속이 증가함에 따라 일반적으로 열전달계수가 증가한다는 사실과 반대의 경향을 나타낸 것으로 아직 그 이유가 정확하게 설명되고 있지 못하고 있다. SINTEF에서는 이러한 현상이 질량유속이 증가함에 따라 벽면에서 드라이 아웃이 발생하고 냉매액이 유로의 중앙부로 유입되어 나타나는 것으로 추측하고 있다.

이 연구에서 도출된 또 하나의 새로운 사실은 질량 유속의 증가가 항상 열전달계수의 증가를 가져오는

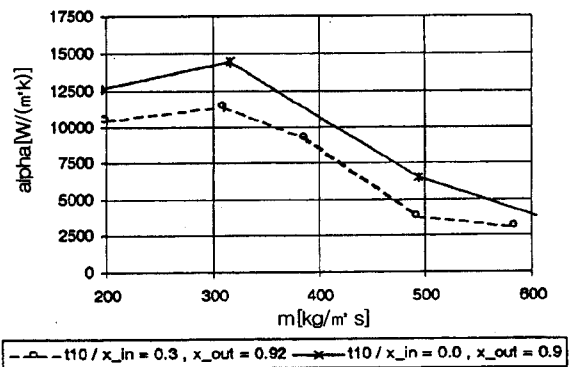


[그림 9] 마이크로튜브에서 건도에 따른 CO₂ 증발열전달 계수(SINTEF)

것이 아니라는 사실이다. 이 실험은 입출구의 건도를 일정하게 유지하기 위해서 열유속을 조절하면서 실시하였다. 실험 결과 질량유속이 200 kg/m²s에서 300 kg/m²s로 증가하는 경우에는 열전달계수가 약간 증가하지만 그 이상으로 질량유속을 증가시키면 그림 11에 나타난 바와 같이 열전달계수는 급격히 감소한다. 이것은 기존 냉동기의 증발기에서 질량유속이 증가함에 따라 일반적으로 열전달계수가 증가한다는 사실과 반대의 경향을 나타낸 것으로 아직 그 이유가 정확하게 설명되고 있지 못하고 있다. SINTEF에서는 이러한 현상이 질량유속이 증가함에 따라 벽면에서 드라이 아웃이 발생하고 냉매액이 유로의 중앙부로 유입되어 나타나는 것으로 추측하고 있다.



(a) (b)
[그림 10] 마이크로튜브에서 냉매 분배의 개선 방안 (SINTEF)

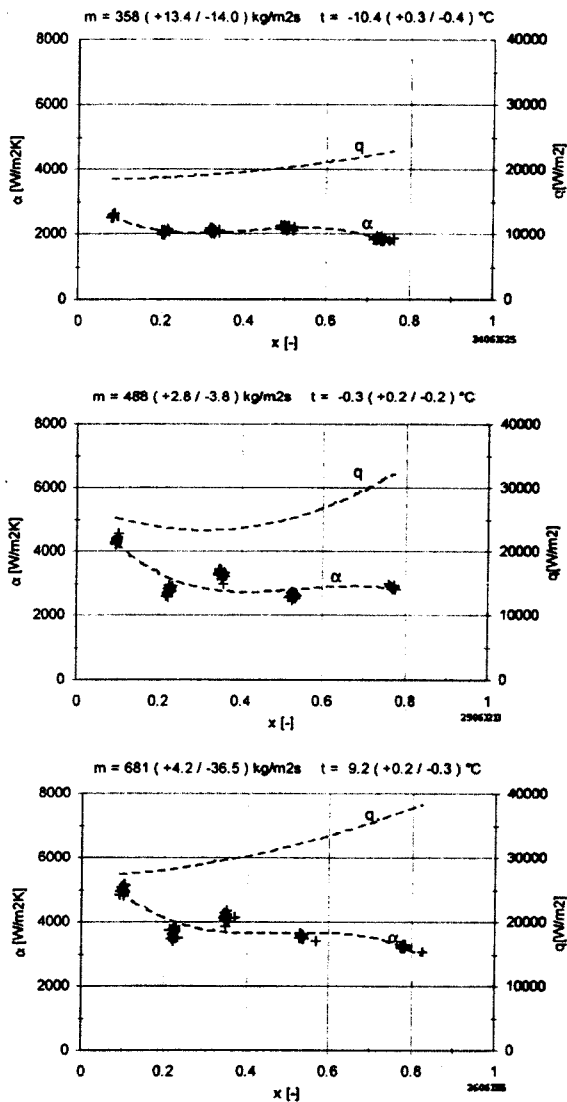


[그림 11] 마이크로튜브에서 질량유속에 따른 CO₂ 증발열 전달계수(SINTEF)



Graz University

Graz University에서는 증발기 성능 시험장치를 별도로 구성하지 않고 전체 냉동 시스템에 대한 실험을 실시하였다. 이 기관에서는 한 종류의 직관형 증발기와 두 종류의 코일형 증발기에 대한 실험을 실시하였는데 열교환기는 세 경우 모두 이중관 형식이며 에틸렌글리콜 용액으로 증발기를 가열하였다. 이 연구에

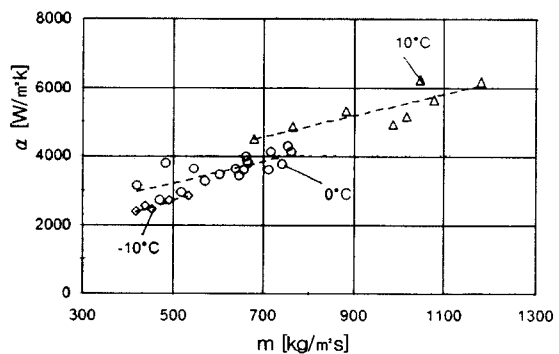


[그림 12] 윤활유가 포함된 CO₂의 증발열전달 계수와 열유속(직관, Graz Univ.)

서는 관벽에 열전대를 심는 방법으로 관벽의 온도를 측정하여 열전달계수를 구하였다. 직관형 증발기에 대한 실험결과가 그림 12에 나타나 있다. 열전달계수는 건도에 따라 약간 감소하는 형태로 나타나며 증발온도가 높아짐에 따라 열전달계수도 향상되는 것을 알 수 있다. 그림 13은 코일형 증발기(Twist1)에 대한 열전달계수를 보여주고 있는데 질량유속이 증가함에 따라 열전달계수가 증가하는 것을 알 수 있으며 다른 코일형 증발기(Twist2)에 대해서도 유사한 결과가 얻어졌다. Graz University에서 행해진 실험 결과에서 가장 눈에 띄는 것은 열전달계수가 다른 연구 결과들에 비하여 반 이하로 낮게 나타났다는 것이다. Graz University의 연구자들은 이렇게 낮은 열전달계수가 주로 증발기에 존재하는 윤활유의 영향에 기인하는 것으로 판단하고 있다. 냉동 시스템의 증발기에서 윤활유는 열전달계수를 감소시킨다는 것은 잘 알려진 사실이지만 CO₂의 경우에는 그 영향이 다른 냉매에 비하여 더 크게 나타나는 것으로 생각되는 만큼 앞으로 윤활유의 영향에 대한 많은 연구가 필요하리라 생각된다.

Mitsubishi

최근 일본에서는 CO₂를 이용한 온수급탕기가 개발되어 판매되고 있다. Mitsubishi를 포함한 5~6개 기업에서 판매하는 CO₂ 온수급탕기는 거의 동일한 구



[그림 13] 윤활유가 포함된 CO₂의 질량유속에 따른 증발열전달계수



조를 지니고 있다 (그림 1). Mitsubishi사의 온수급탕기는 난방능력이 4.5 kW이고 COP는 3.0으로 알려져 있다. 이 제품은 열펌프로 작동하므로 증발기는 외부 공기에 의하여 가열된다. 이 제품의 증발기에 관한 기술적인 자료는 공개되지 않았으나 실제 제품을 살펴보면 6.35 mm(1/4")동관이 4 pass로 배치되었으며 튜브 열 수는 총 56개, 튜브 길이는 600 mm이다. 알루미늄관은 두께는 0.1 mm이며 2 mm 간격으로 부착되어 있다.

University of Maryland

University of Maryland도 역시 온수급탕기 시스템에 관한 연구를 수행하였으며 이 연구에서사용된 가스쿨러와 증발기는 동일한 형상으로 그림 3에 나타난 것과 같은 이중관식 열교환기이다. 이 연구에서는 주로 시스템의 전체 성능이 다루어졌으며 열전달계수는 구체적으로 언급되지 않았다.

연구내용 분석 및 향후 연구방향 고찰

CO₂를 이용한 냉동시스템에 관한 연구는 최근 수년간 국내외에서 활발히 진행되고 있으며 이상에서 살펴본 CO₂의 증발열전달에 관한 연구 내용들은 향후 CO₂ 증발기의 연구 개발에 대하여 몇 가지 중요한 방향을 제시해 주고 있다.

CO₂ 증발기의 재질 및 형상

기존 냉매에 비하여 수 배의 압력 조건에서 운전되는 CO₂ 냉동 시스템에 있어서 증발기도 고압에 적합한 재질과 형상으로 구성되어야 한다. 지금까지 연구에서 동관을 사용하는 경우 관 외경은 1/2"이하이고 관벽의 두께는 관 외경에 따라 다르지만 대부분 1 mm 이상으로 나타났다. 기존 냉매를 사용하는 시스템에서도 증발기에 사용되는 동관의 직경이 점점 작아지는 추세이고 일본에서 개발된 온수급탕기를 참조할 때 앞으로 개발되는 시스템에서도 1/4"(6.35

mm)이하의 동관이 주로 사용될 것으로 판단된다.

알루미늄 압출 마이크로튜브를 사용하는 경우에는 채널의 직경은 1 mm 이하, 길이는 1m 정도이며 채널의 수는 용량에 따라 다르지만 수십 개로 구성되어 있다. 다채널의 마이크로튜브를 사용하는 경우에는 냉매의 균등한 분배가 대단히 중요하다.

스테인레스 강관은 직접 전류를 통하여 가열할 수 있기 때문에 증발열전달계수를 측정하기 위한 실험에는 많이 사용되어 왔으나 가공상의 문제점 등에 의해 실제의 CO₂ 냉동기 제품에는 널리 쓰이지 않을 것으로 판단된다.

증발열전달계수

지금까지 수행된 여러 연구에서 살펴보았듯이 CO₂ 냉매는 증발열전달 특성에 있어서 기존의 냉매와는 상당히 다른 특성을 보이고 있다. 이러한 차이는 많은 부분이 드라이아웃에 관련된 것으로 판단된다. CO₂는 드라이아웃이 발생하는 임계건도가 기존의 다른 냉매에 비하여 상당히 낮기 때문에 증발과정에서 일찍 드라이아웃이 발생하고 그 이후로는 건도가 증가함에 따라 열전달계수가 감소하는 경향을 보인다. 이러한 드라이아웃 현상은 수직관과 수평관에서의 열전달계수의 차이를 가져오고, 마이크로채널관에서는 냉매의 질량유속이 증가하는데도 열전달계수가 감소하는 현상을 나타내는 것으로 판단된다. 향후의 연구에서는 드라이아웃 현상을 고려한 신뢰성있는 열전달관계식이 도출되어야 할 것이다.

CO₂ 증발기 내의 유회유는 증발열전달계수를 크게 감소시키는 것으로 나타났다. 증발기의 정확한 설계를 위해서는 앞으로 유회유의 종류 및 농도가 열전달계수에 미치는 영향이 정량적으로 연구되어야 할 것으로 생각된다.

맺음말

CO₂는 냉매의 물성이 기존의 냉매와 크게 차이가



나기 때문에 증발열전달 과정에서 기존의 열전달 상관식을 사용하기 곤란하다. 앞으로 CO₂ 증발기에 대하여 드라이아웃과 윤활유의 영향을 고려한 연구가 절실히 요구되며 이러한 영향을 고려한 신뢰성 있는 열전달계수 및 압력 손실에 관한 데이터는 성공적인 증발기의 개발에 필수적이다. 이러한 관점에서 최근 국내의 많은 연구 기관에서 다양한 CO₂ 증발기 형상에 대한 심도 있는 연구가 시작된 것은 고무적인 일로 생각된다.

CO₂ 냉동 시스템은 여러 가지 기술적인 어려움에도 불구하고 환경 측면에서의 이점 때문에 차세대의 중요한 냉동 기술로 각광받고 있다. CO₂ 냉동 관련 기술은 구미 선진국에서도 비교적 최근에서야 연구가 시작되었으므로 국내에서도 연구력을 결집하여 노력하면 좋은 연구 성과를 얻고 이 분야에서 기술 우위를 차지할 수 있을 것으로 확신한다.

참고문헌

1. 황준현, 윤린, 김용찬, 2001, 수평관 내에서 R-134a와 CO₂의 증발열전달 특성에 대한 비교 연구, 대한설비공학회 2001 하계학술발표회 논문집, pp.1309 ~ 1313.
2. 조은석, 윤석호, 김민수, 2002, 이산화탄소의 증발열전달 특성에 관한 실험적 연구, 설비공학 논문집, 14권 1호, pp.38 ~ 45.
3. 최종배, 윤석호, 김민수, 2001, 이산화탄소의 수직원관 내 증발열전달 특성에 관한 연구, 대한설비공학회 2001 동계학술발표회 논문집, pp.218 ~ 221.
4. Bredesen, A. M., Hafner, A., Petterson, J., Neksa P., Alflekt, K., 1997, Heat Transfer and Pressure Drop for In-tube Evaporation of CO₂, IIR Conference : Heat Transfer Issues in 'Natural' Refrigerants, University of Maryland, USA, p. 35 ~ 49.
5. Petterson, J., Rieberer, R., Munkejord, S. T., 2000, Heat transfer and pressure drop for flow of super critical and subcritical CO₂ in microchannel tubes, Technical Report TR A5127, SINTEF.
6. Rieberer, R., 1998, CO₂ as Working Fluid for Heat Pumps, Doctoral Thesis, Graz University.
7. Product Catalog for CO₂ Water Heater, 2001, Mitsubishi.
8. Hwang, Y., Radermacher, R., 1998, Experimental Evaluation of CO₂ Water Heater, IIR - Gustav Lorentzen Conference, Oslo, Norway, pp. 321 ~ 328.
9. Aarliien, R., Frivik, P. E., 1998, Experimental Evaluation of CO₂ Water Heater, IIR - Gustav Lorentzen Conference, Oslo, Norway, pp. 341 ~ 350. ●