평활관 및 마이크로 그루브가 있는 미니어쳐 관에서 이산화탄소의 증발열전달

정 시 영
서강대학교 기계공학과(syjeong@sogang.ac.kr)

연구배경

몬트리올의정서를 통해 1989년부터 본격적으로 시작된 냉매에 대한 규제는 나날이 강화되고 있다. 오존층 파괴의 주범이었던 CFC(염화불화탄소)계열의 냉매를 대체하기 위해 오존층 파괴지수(ODP: Ozone Depletion Potential)가 0인 HFCs(수소불화탄소)계열의 냉매가 개발되었지만, 지구온난화 문제가 새롭게 대두되면서 이 역시 규제를 받기 시작했다. 1995년 도쿄의정서를 통해 HFCs는 CO_2(이산화탄소), CH_4(메탄), N_2O(아산화질소) SF_6(육불화황), PFCs(과불화탄소)와 더불어 6대 지구온난화 물질로 분류되었다. 최근 우리나라의 온실가스 배출량 증가추세를 살펴보면 CH_4나 N_2O의 배출량은 점차 감소, CO_2는 꾸준히 증가하고 있지만 그 추세가 점차 감소하는 모습을 보인다. 하지만 HFCs의 배출량은 그 변화가 급격하게 진행되고 있기 때문에 앞으로 지구온난화를 유발하는 주요 원인이 될 수 있다고 판단된다. 최근 네덜란드 환경평가청과 미국 국립해양대기청의 연구결과에 따르면 HFCs의 배출량이 현재와 같은 추세로 증가할 경우 2050년에 지구온난화 효과의 45%가 HFCs로 인해 발생할 것이라 예측된다.

〈표 1〉 국내 6대 지구온난화물질 배출량

년도	CO_2	CH_4	N_2O	HFCs	PFCs	SF_6
1990	257.7	43.8	3	1	NA	NA
1995	401.4	34.5	13.9	5.1	NA	6.3
1996	438.9	35.5	14.5	5.8	0.9	17
1997	465.4	34.7	15.3	7.1	2.1	11.5
1998	399.9	30.5	15.7	4.9	2.3	6
1999	435	30.6	16.3	8	1.9	10.7
2000	466.1	29.1	16.9	8.4	2.3	11.7
2001	481.8	29	16.6	5.8	2.1	18.5
2002	502.8	29.1	16.4	8.6	2.1	15.6
2003	511.8	28.5	19.9	6.4	2.3	17.4
2004	518.5	27.4	22.8	6.5	2.7	15.9
2005	526	23.8	20.8	6.6	2.8	16.7
2006	533.6	23.8	18.7	6	2.7	17.8
2007	554.6	24.4	11.7	7.3	2.9	19.2

자료: 에너지경제연구원 (단위: 백만 tCO_2)

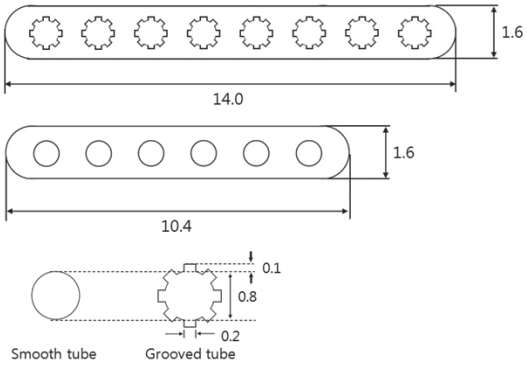
HFCs를 대체하기 위한 연구는 지금도 활발히 이루어지고 있으며 그것을 대체할 물질로 HFO계열의 합성냉매와 CO_2를 포함한 자연냉매들이 주목 받고 있다. HFO계열의 냉매 중 HFO-1234 yf는 지구온난화지수(GWP: Global Warming Potential)가 4에 불과해 주목 받고 있지만, 현재 생산성과 가격 면에서 단점을 안고 있다. 자연냉매의 경우 근본적으로 오존층 파괴 및 지구온난화문제로부터 완벽하게 자유롭다는 장점을 가지고 따라서 회수 및 재생을 할 필요도 없다. 하지만 열역학적 특성을 변

화시키기 힘들다는 점과 가연성, 독성에 대한 영향을 고려해야 한다는 단점이 있다. 현재 자연냉매 중 HC(탄화수소)계열의 냉매가 널리 쓰이고 있지만, 가연성이 강해 사용에 많은 제약을 받고 있다. HC계열의 냉매 뿐 아니라 대부분의 자연냉매가 가연성 혹은 독성을 가지고 있지만, CO_2는 그것이 없다는 장점을 가지고 있다. 뿐만 아니라 부피당 냉방능력이 크다는 장점도 가지고 있다. 하지만 높은 임계압력과 낮은 임계온도를 가지기 때문에 그것을 냉매로 사용하는 시스템을 제작하는데 어려움이 있다. CO_2를 냉매로 사용하는 시스템에 요구되는 압력은 420 bar로, 기존의 냉방장치에 요구되는 압력보다 매우 높다. 따라서 시스템을 구성하는 각 요소들을 제작하기 위한 새로운 설계가 필요하다. 그 중 증발기는 내경을 줄임으로 높은 내압성을 확보하는 것이 가능하다. 증발관의 내경이 작아지면 높은 압력을 견디는데 유리할 뿐 아니라 내벽과 냉매간 접촉면적이 증가하는 장점을 얻게 된다. 때문에 작은 내경을 가지는 관을 이용해 증발기를 만들기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있으며 현재는 내경이 1 mm가 안 되는 증발관에 대한 연구가 널리 이루어지고 있다.

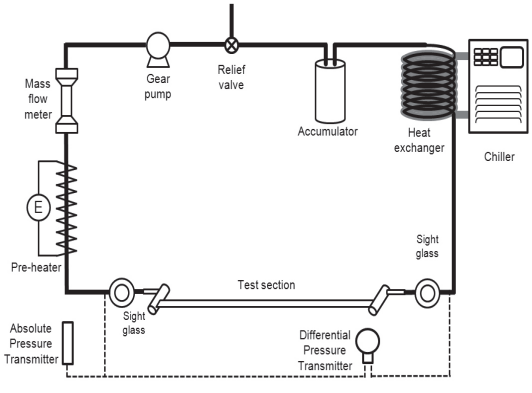
이러한 배경에서 본 연구에서는 실험을 중심으로 직경 0.8 mm의 원형 미니어쳐 채널을 포함하는 알루미늄 압출관이 CO_2용 증발기로 적합한지 확인하고자 하였으며, 더 나아가 그것의 성능 향상을 위해 마이크로 그루브가 형성된 관을 제작해 그 영향을 평가하였다.

연구방법

본 연구는 미니어쳐 채널 증발관과 마이크로 그루브가 포함된 미니어쳐 채널 증발관 내부를 흐르는 CO_2의 증발 열전달계수(HTC: Heat Transfer Coefficient)를 측정함으로, 각 증발관의 성능을 평가, 비교함을 목적으로 수행되었다. CO_2를 순환시키며 증발, 응축을 시키는 실험장치를 구성하였으며 **그림 1**을 통해 표현하였다. 실험장치 내부를 흐르는 CO_2는 1100 mm 길이의 증발기에서 기화되고 냉각기와 연결된 열교환기를 지나며 응축이 된다. 증발관 내부의 CO_2는 포화상태이기 때문에 압력을 측정함으로 온도를 확인할 수 있었으며 그 값을 0, 5, 10℃로 맞추어 실험결과를 얻었다. 응축이 된 상태의 CO_2가 기어펌프와 유량계를 통하게 함으로써 내부 유량을 조절할 수 있도록 하였다. 증발기에 고전류를 흘려주어 가열함으로 내부의 CO_2를 증발시켰으며, 외벽에 열전대를 설치하여 온도를 측정하였다. 증발관 외벽의 온도와 정상상태 열전달을 가정하여 관 내벽의 온도를 구한 뒤, 그 값과 냉매의 온도를 비교해 증발열전달계수를 확인



[그림 1] 미니어쳐 채널 증발관과 그루브관의 단면



[그림 2] 실험장치 구성도

하였다.

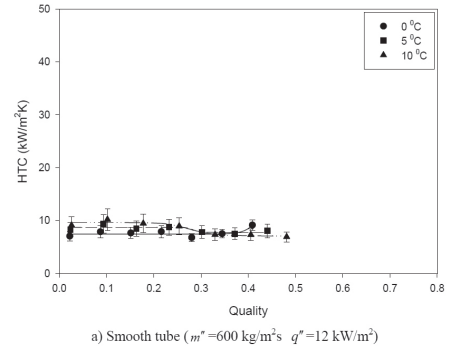
$$HTC = \frac{q''}{T_{wi} - T_{sat}}$$

(q''=열유속[kW/m^2], T_{wi}=증발관 내벽의 온도,T_{sat}=냉매의 포화온도, 그루브관에 가해지는 열유속은 평활관에 가해진 열유속을 기준으로 함)

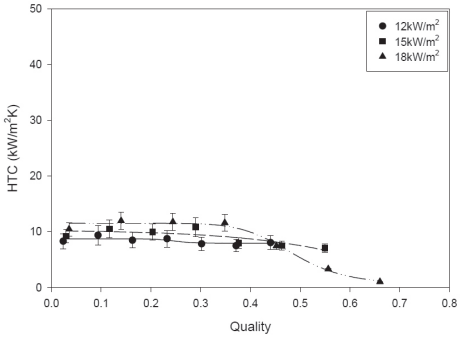
원형 구멍으로 이루어진 증발관과 그루브가 형성된 증발관을 사용하여 동일한 실험을 수행하였다. **그림 2**는 각 증발관의 단면 형상을 보여준다.

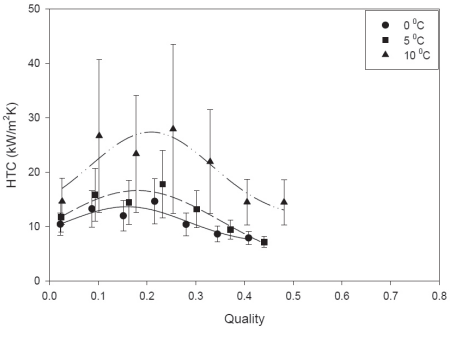
연구결과

그림 3~그림 5를 통해 증발관 내부 CO_2의 열전달계수를 나타내었다. 열전대가 부착된 지점의 열전달계수를 건도에 따라 표시하였고 그것의 회귀곡선을 그려보았다. 각 실험조건에 따라 실험결과의 건도 범위는 0.33에서 0.66으로 상당한 차이를 보이는데 이는 실험에 사용된 증발관의 길이가 고정되었기 때문이다. 증발기 출구에서의 건도는 CO_2의 질량유량, 열유속에 따라 크게 변화하였으며 증발온도에 의해서도 약간 변화하였다. **그림 3**은 증발온도에 따른 열전달 계수의 변화를 보여준다. 평활관과 그루브관에서 동일하게 증발온도가 증가할수록 열전달계수가 증가하는 경향을 보이지만, 그루브관에서 더욱 크게 증가하는 경향을 보인다. 그루브관 내에서 열전달계수는 건도가 0.2인 영역에서 가장 크게 나타나고 이후 큰 폭으로 감소하는 경향이 확인되었다. **그림 4**는 열유속의 증가에 따른 열전달계수의 변화를 보여준다. 평활관 내에서 열전달계수는 건도가 0.4인 영역까지 일정하

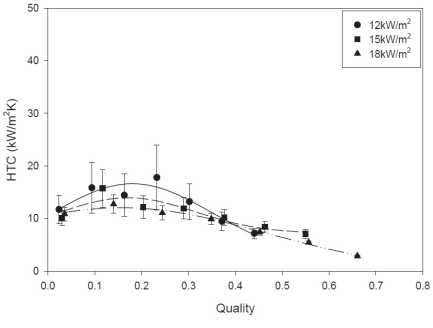


a) Smooth tube (m''=600 kg/m^{2}s q''=12 kW/m^2)

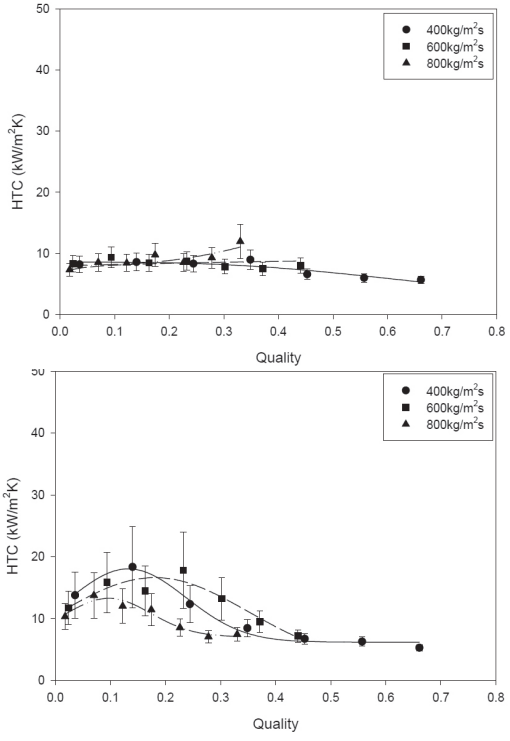




[그림 3] 증발온도와 건도에 따른 평활관과 그루브관의 증발열전달계수 변화

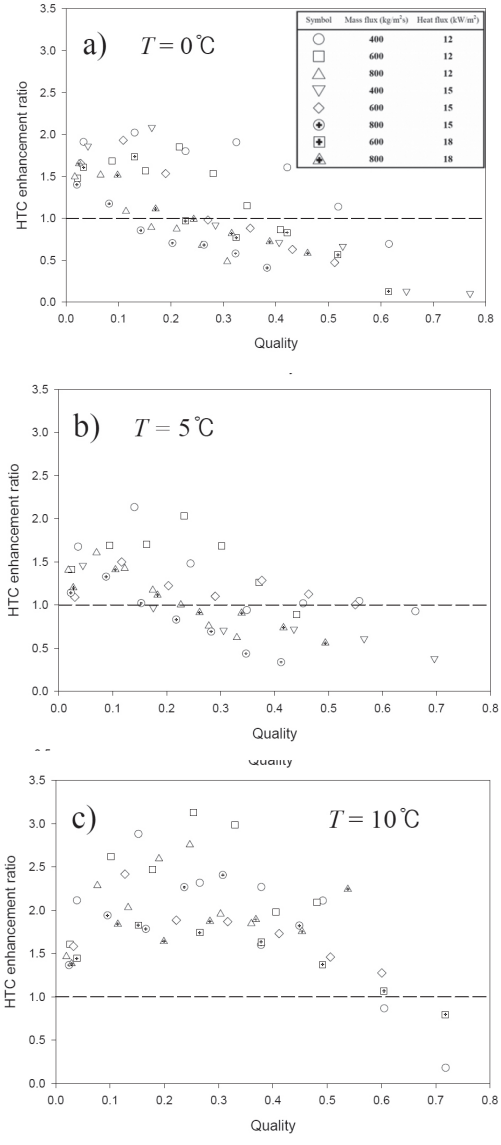


[그림 4] 열유속과 건도에 따른 평활관과 그루브관의 증발열전달계수 변화



[그림 5] CO_2의 질량유량과 건도에 따른 평활관과 그루브관의 증발열전달계수 변화

게 유지되다가 그 이후 영역에서 감소하는 경향이 확인되었다. 그루브관에서는 앞서 보인 데이터와 마찬가지로 건도가 0.2인 영역에서 열전달계수가 가장 큰 값을 보이는 것이 확인되었으며, 그 이후 값이 큰 폭으로 감소하는 것이 확인되었다. **그림 5**는 질량유량의 값이 600 kg/m²s일 때를 기준으로 하고 그것이 변할 때 나타나는 열전달계수의 경향을 보여준다. 평활관에서는 질량유량의 증가에 따른 열전달계수의 변화가 크게 나타나지 않았다. 그루브관에서는 질량유량이 800 kg/m²s일 때 열전달계수의 값이 가장 적은 경향을 보였다. 질량유량이 400 kg/m²s으로 가장 적을 때는 저건도 영역에서 가장 높은 열전달계수를 보이지만 그 값이 건도가 0.15인 영역을 지나며 큰 폭으로 감소하는 경향을 보였다. **그림 6**은 건도에 따른 열전달계수의 향상비를 온도의 변화에 따라 보여준다. 열전달계수



[그림 6] 증발온도와 건도에 따른 그루브관의 열전달계수 향상비

의 향상비는 다음과 같이 정의된다.

$$HTC\ enhancement\ ratio = \frac{h_{grooved}}{h_{smooth}}$$

열전달계수는 최대 3.2배까지 증가하는 것이

확인되었다. 이 값은 그루브 인한 냉매와 증발관의 접촉면적 증가를 고려하더라도 상당히 큰 값이라 판단된다. 하지만 건도가 증가함에 따라 열전달계수가 감소하는 경향을 보였다. 마이크로 증발관 내 그루브는 내부 접촉면적의 증가효과 뿐 아니라 냉매의 유동 경향에도 영향을 미치는 것이라 여겨진다. 저건도 영역에서는 열전달계수를 증가시키는 역할을 하지만, 냉매의 액막이 파괴되는 드라이 아웃이 비교적 낮은 건도에서 일어나게 하는 역할도 한다 판단된다. 그루브로 인해 열전달계수가 증가하는 경향은 증발온도가 높아질수록 잘 드러났고 이는 증발온도가 증가할수록 낮아지는 CO_2의 표면장력이 주된 원인일 것이라 생각한다.

맺음말

CO_2를 냉매로 이용할 수 있는 시스템 개발의 일환으로 미니어쳐 채널 증발기에 대한 연구를 수행하였다. 특히 그것의 성능을 향상시키기 위해 마이크로 그루브가 형성된 증발관을 제작하여 함께 연구했다. 미니어쳐 채널에 파여진 그루브는 열전달계수를 증가 혹은 감소시켰지만 그 경향이 건도에 따라 뚜렷하게 나타난다는 것이 확인되었다. 일반적으로 평판관은 평행류형 증발기를 만드는데 이용된다. 평행류형 증발기를 구성하는 증발관들은 위치에 따라 각각 일정한 값의 건도를 가지는 냉매를 흘려 보내게 된다. 다시 말해 증발기 입구 쪽에 가깝게 설치된 증발관은 낮은 건도의 냉매를 흘려 보내고, 출구 쪽에 위치한 증발관은 높은 건도의 냉매를 흘려 보내게 된다. 본 연구를 위해 제작된 그루브관은 저건도 영역에서 좋은 성능을 내는 것이 확인되었기 때문에 입구 쪽 튜브로 이용할 경우 열교환기의 성능을 높일 수 있을 것이라 기대된다. 더 나아가 그루브의 형상이 냉매의 유동경향에 영향을 끼침을 고려해 본다면 그루브의 형상을 변화시켜 저건도 영역에서도 높은 열전달계수를 보이는 증발관을 개발할 수 있을 것이라 판단된다.