

# 이산화탄소의 증발열전달 특성

최 준 영 · 한국산업기술시험원 기계소재부, 책임연구원

e-mail: ty67@ktr.re.kr

이 글에서는 고려대학교, 서울대학교, 한국산업기술시험원, SINTEF, Graz Univ. 등 국내외에서 수행된 CO<sub>2</sub> 증발열전달에 관한 문헌조사를 통하여 연구결과들을 비교한다.

CO<sub>2</sub>의 증발열전달에 있어서 작동매체인 CO<sub>2</sub>의 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 CO<sub>2</sub>의 경우에는 오히려 열전달계수가 감소하는 것으로 보고되고 있다. 이처럼 CO<sub>2</sub>는 증발열전달 과정에서 기존 냉매의 경향으로부터 예측하기 힘든 결과가 나타나므로 지금까지 국내외에서 수행된 CO<sub>2</sub> 증발열전달에 관한

문헌조사를 통하여 연구결과들을 비교하였다.

## 고려대학교

고려대학교에서는 수평관에 대하여 CO<sub>2</sub>와 R-134a의 증발열전달 특성에 관한 연구를 수행하였다. 이 연구에서는 전체적으로는 CO<sub>2</sub>의 증발열전달계수가 R-134a에 비하여 큰 것으로 나타났으며 열유속이 증가함에 따라 열전달계수는 약간 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 CO<sub>2</sub>의 경우에 드라이아웃 현상이 상당히 저건도 영역에서부터 발생하여 열전달계수가 감소하지

만 저건도 영역에서는 핵비등이 R-134a보다 3.5배 정도 크기 때문인 것으로 해석될 수 있다. 이 연구에서는 이전의 연구에서도 확인된 바와 같이 CO<sub>2</sub>의 경우에는 상당히 낮은 건도 영역에서 드라이아웃 현상이 발생하기 때문에 이에 대한 정확한 예측이 중요하다는 결론을 제시하고 있다.

## 서울대학교

서울대학교에서는 수평관과 수직관에 대한 증발열전달 특성에 관한 연구를 수행하였다. 수평관 실험에서는 건도가 증가함에 따라 열전달계수가 감소하는 것으

로 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. 저자들은 CO<sub>2</sub>에 대하여 관성력과 표면장력의 비를 나타내는 Weber 수와 중력과 표면장력의 비를 나타내는 Bond 수를 고찰하여 이들의 값이 기존 냉매인 R-22나 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 상관식은 실험결과와 상당히 오차가 큰 것으로 나타났다. 이는 기존의 상관식으로는 임계점 부근에서 증발 과정을 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 수직관이 수평관에 비하여 열전달계수가 상당히 우수한 것으로 나타났다. 수평관에서는 이산화탄소의 낮은 점

성과 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.

### 한국산업기술시험원

한국산업기술시험원에서는 CO<sub>2</sub>의 증발특성을 파악하기 위해서 평활관, 마이크로핀관, 동관, 마이크로채널관 등을 직접 가열 방식으로 실험을 수행하였다. 평활관의 증발 열전달 특성은 관경이 작을수록 열유속이 클수록 포화온도가 높을수록 열전달계수가 크게 측정되었고, 특정 열유속과 질량유속에서 열전달계수가 급격히 감소하는 드라이아웃 현상을 확인하였다. 이러한 결과는 국내 타 연구 결과와 잘 일치한다. 또한 CO<sub>2</sub>의 증발 열전달 특성 중 특이한 것은 질량유속에 크게 영향을 받지 않는다는 것이다. 이는 고려대학교의 연구결과와 상반되지만 SINEF의 결과와는 동일하다. 마이크로핀관의 경우 평활관에 비해 높은 열전달계수를 나타내고 있으며, 전반적인 열전달 특성은 일치하지만 저건도 영역에서 드라이아웃이 발생하지는 않았으며 드라이아웃이 평활관보다 지연되는 것을 확인하였다. 이러한 사실은 근거할 때

향후 열교환기 설계에 적용하기 위해서는 평활관보다는 마이크로핀관을 사용하는 것이 효율증대에 이점을 가지게 될 것을 분석되어진다. 마이크로채널관의 경우, 다른 여러 관에 비해 높은 열전달계수를 나타내지만 압력강하량이 매우 크게 관찰되었다. 이는 열교환기에 적용 시 고려하여야 할 것으로 보인다. 또한 알루미늄으로 형성된 마이크로채널관은 CO<sub>2</sub>의 높은 작동압력을 견딜 수 있도록 설계되어야 할 것이다.

### SINEF

SINEF는 CO<sub>2</sub> 냉동시스템에 대하여 일찍부터 활발한 연구를 수행하여 왔으며 증발열전달에 관련해서도 기존 관과 마이크로튜브를 대상으로 많은 연구 결과를 발표하였다. 1997년에 발표된 연구는 기존의 냉매에 사용되는 것과 비슷한 직경의 수평관(7mm)에서 CO<sub>2</sub>의 건도, 열유속, 질량유속 및 증발온도가 열전달계수에 미치는 영향에 대하여 다루고 있다. 증발온도 -25℃에서는 열전달계수는 건도에 따라 거의 변화가 없고, -10℃에서는 건도에 따라 증가하는 경향을 보인다. 그러나 5℃에서는 건도가 증가함에 따라 오히려 열전달계수가 감소하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 증발온도가 증가하면서 Weber 수와 Bond 수가 증가하기 때문에 드

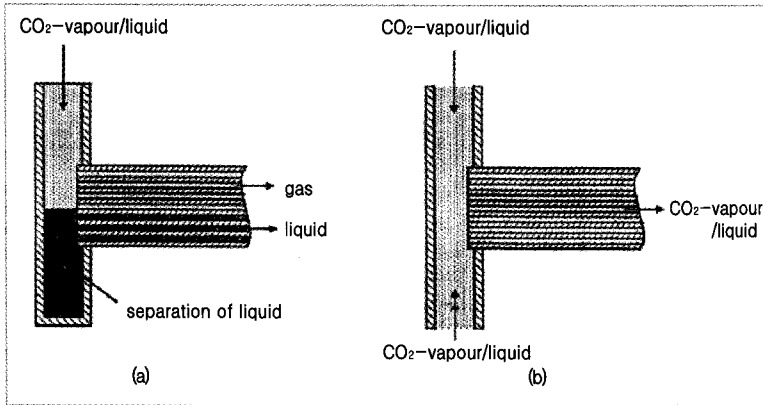


그림 1 마이크로튜브에서 냉매 분배의 개선 방안(SINTEF)

라이아웃이 쉽게 발생한다는 서울대학교의 연구결과와도 잘 일치한다. SINTEF에서는 기존 관뿐 아니라 마이크로튜브에 대한 증발열전달 연구도 수행하였다. SINTEF에서 사용한 마이크로튜브는 동일한 내경을 갖는 25개의 채널로 구성되어있다. 이 실험에서는 마이크로 튜브를 직접 가열하는 것이 곤란하기 때문에 마이크로채널 주위에 열전달매체를 흘려 튜브를 가열하는 방법을 사용하였다. 이러한 경우 관벽의 온도를 정확하게 측정하는 것이 힘들기 때문에 이 연구에서는 관벽 온도를 측정하지 않고 Wilson Plot 방법을 이용하여 열전달계수를 계산하였다. 이 연구에서 특징적인 결과로는 건도 0.5 근처에서 열전달계수가 15,000W/m<sup>2</sup>K에서 5,000W/m<sup>2</sup>K 이하로 급격히 감소한다는 것이다. 또한 마이크로채널 열교환기에서는 냉매의 분배문제가 심각하게 나타날 수 있는데 이를 개선하기 위하여

SINTEF에서는 그림 1처럼 냉매의 입구를 양쪽으로 배치(b)하는 것을 제안하였다.

이 연구에서 도출된 또 하나의 새로운 사실은 질량유속의 증가가 항상 열전달계수의 증가를 가져오는 것이 아니라는 사실이다. 이 실험은 입출구의 건도를 일정하게 유지하기 위해서 열유속을 조절하면서 실시하였다. 실험 결과 질량유속이 200kg/m<sup>2</sup>s에서 300kg/m<sup>2</sup>s로 증가하는 경우에는 열전달계수가 약간 증가하지만 그 이상으로 질량유속을 증가시키면 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.

## Graz University

Graz University에서는 증발기 성능 시험 장치를 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 연구에서는 관벽에 열전대를 심는 방법으로 관벽의 온도를 측정하여 열전달계수를 구하였다. 직관형 증발기에 대한 실험결과를 보면 열전달계수는 건도에 따라 약간 감소하는 형태로 나타나며 증발온도가 높아짐에 따라 열전달계수도 향상되는 것을 알 수 있다. 코일형 증발기(Twist1)에 대한 열전달계수는 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 윤향유의 영향에 기인하는 것으로

판단하고 있다. 냉동 시스템의 증발기에서 윤활유는 열전달계수를 감소시킨다는 것은 잘 알려진 사실이지만 CO<sub>2</sub>의 경우에는 그 영향이 다른 냉매에 비하여 더 크게 나타나는 것으로 생각되는 만큼 앞으로 윤활유의 영향에 대한 많은 연구가 필요하리라 생각된다.

## CO<sub>2</sub> 증발기

전형적인 CO<sub>2</sub> 증발기의 압력 범위는 35~70bar 정도로 일반적인 냉매보다 약 10배 정도 압력이 높다. 그러므로 유체 물성치와 최적 냉매측 질량유속 그리고 압력강하는 일반적인 데이터와 다르다. 적절하게 설계된 CO<sub>2</sub> 증발기와 기준 HFC/HCFC 증발기를 비교하면 CO<sub>2</sub> 시스템의 압력 수준이 높을지라도 폭발 에너지(Pxv)는 비슷하다. 따라서 CO<sub>2</sub> 시스템에서는 내부체적을 크게 줄일 수 있다.

액상 상태의 CO<sub>2</sub>는 고전도성이고, 동점성계수가 낮고, 비열이 크기 때문에 열전달에 바람직하다. 액체대 기체 밀도비가 낮기 때문에 CO<sub>2</sub> 증발기에서 분배 문제는 그리 염려하지 않아도 된다. 왜냐하면 고압의 2상 냉매유동은 저압의 냉매보다 균등하게 행동하기 때문이다. 감소된 표면장력도 어떤 비등영역에서는 증발 열전달 계수를 개선시키는 역할을 할 수 있다. Bredesen, Knudsen 등이 순수 CO<sub>2</sub>의 관내 증

발에 대해 열전달계수를 측정해 준 값은 일반적으로 기존의 상관식을 사용하여 계산한 값보다 약 2배 정도 크게 나타난다. 추론할 수 있는 가능한 이유 중의 하나는 Shah, Gungor and Winterton 등의 상관식에는 액체표면장력의 Bredesen 등이 제시한 실험 데이터는 고밀도 공조용 증발기보다 관직경이 크고, 열유속과 질량유속이 작은 범위에 대한 것이었는데, 열유속이 6~9kW/m<sup>2</sup>, 질량유속이 200~400kg/m<sup>2</sup>s의 범위에서 열전달계수는 8~14kW/m<sup>2</sup>K로 측정되었다. 기존의 상관식과 실험데이터를 잘 맞출 수 있는 작업과 더불어 보다 정확한 새로운 CO<sub>2</sub> 증발 상관식을 찾기 위한 작업이 진행 중에 있다. 또한 향후 수행되어야 할 연구는 관경이 작고, 열유속과 질량유속이 더 큰 영역에 대한 데이터를 확보하는 것이다. 압력강하와 관련해서 Fuchs의 상관식을 사용하면 계산한 값과 잘 일치하였으며, 윤활유의 종류, 윤활유의 농도가 열전달과 압력강하량에 미치는 영향에 대해서 연구가 수행되어야 한다.

증발기에 대한 냉매회로와 질량유속은 일정 출구압력에서 최대 허용 포화 온도를 바탕으로 최적화할 수 있다. 그러면 허용할 수 있는 압력강하량은 포화압력 곡선의 기울기에 따른다. 예를 들면 0°C에서 HCFC-22나 HFC-134a같은 냉매는 1K의 온도 강

하당 0.1bar의 압력강하를 허용한다. 반면에 CO<sub>2</sub>는 동일한 온도강하에 대해서 약 9배 정도 큰 압력강하를 허용한다. 또한, 기존 냉매를 사용하는 열교환기에서 CO<sub>2</sub> 증발기를 설계 변경할 때 특히, 콤팩트한 것과 질량을 줄이는 것이 무엇보다도 중요할 때, 최적설계를 달성하기 위해서는 관의 수는 증가시키고, 직경은 작게 하여야 한다. 그리고 높은 질량유속에 적합하여야 하며 또한 높은 압력강하를 허용할 수 있도록 설계되어야 한다. 질량을 줄이고 보다 넓은 공간을 확보하기 위해서는 기존 장비들에 비해 관의 직경을 상당히 감소시켜야 한다. 냉매측의 표면적을 감소함으로써 생기는 열전달 감소효과는 열전달계수가 크기 때문에 서로 상쇄될 수 있다.

CO<sub>2</sub> 증발기에 대한 개발은 가스쿨러 설계와 유사한 방법으로 진행되어 왔다. 특히 자동차 A/C 분야에서 먼저 시도되었다. 1세대 증발기는 기계적인 확관을 통해 만들어진 환-관 구조이며, 2세대 증발기는 적절한 파열압력을 갖는 직경이 작은 원관 구조이다. 그리고 최종적인 증발기의 형상은 용접형 마이크로 채널 증발기 형태로 될 것이다. 하지만, 현재 주거용 공기조화장치에 사용되는 열교환기는 대부분 환-관 열교환기 형태이다. 원관 증발기는 많은 수의 평행한 냉매회로를 갖도록 제작되었으나 냉매분배에 대한

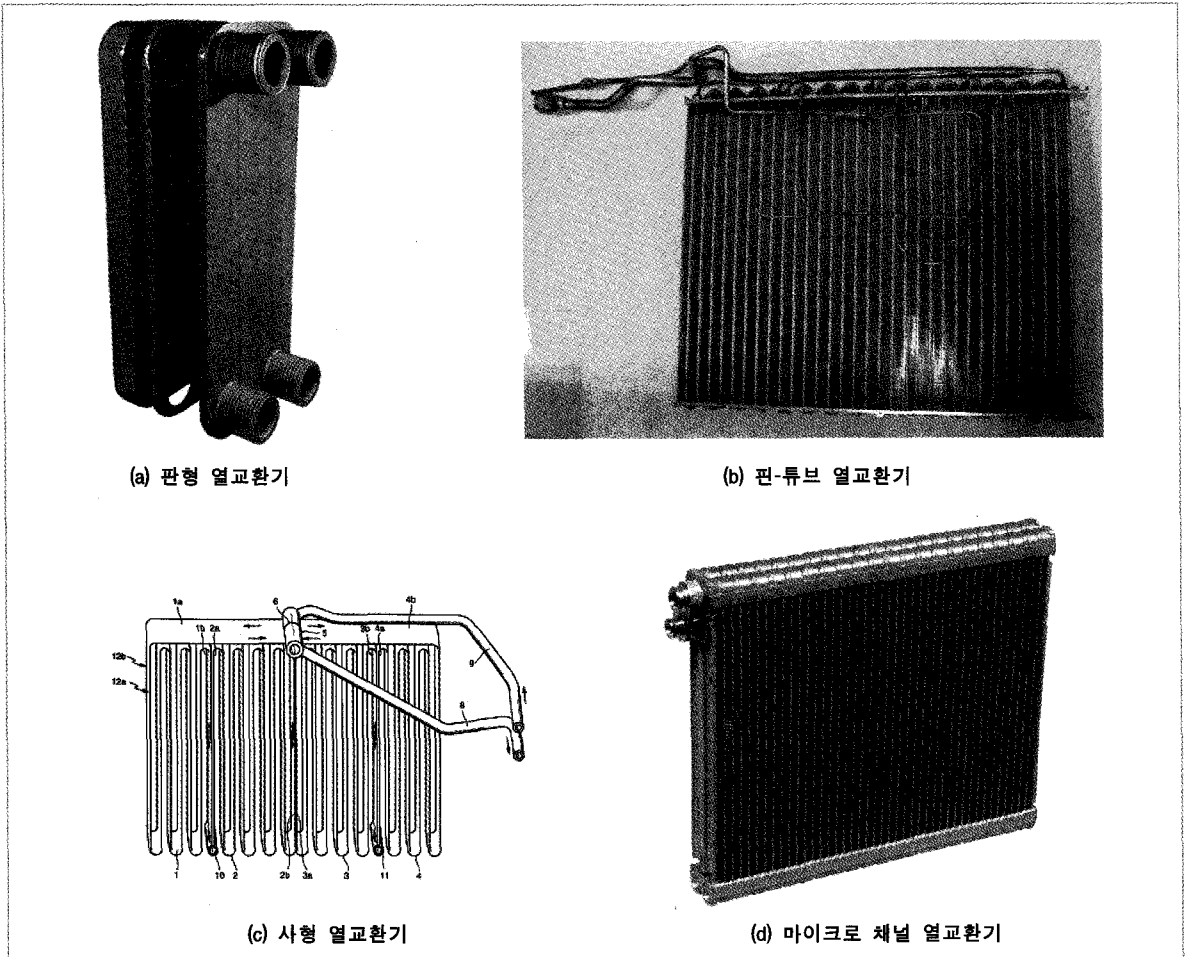


그림 2 CO<sub>2</sub> 증발기의 종류

문제는 발생하지 않았다. 벤추리 형태의 분배기가 교축밸브 뒤에 설치되어 있고, 각 관마다 모세관이 있어 만족할 수 있을 정도의 이상유체 분배가 이루어졌다.

그림 2는 일반적인 시스템에서 CO<sub>2</sub> 증발기로 사용되는 열교환기들의 형상을 보여주고 있다. 그 종류로는 판형(plate type)(a), 핀-튜브형(Fin and tube type)(b), 사형 열교환기(serpentine type)(c)가 사용된다. 사형 열교환

기는 편평한 압출관을 사형으로 구부린 형상이며 관 사이에 주름진 환이 삽입되어 있다. 최근에는 마이크로 채널 열교환기(micro-channel type)(d) 적용에 대한 연구가 이어지고 있다.

고압에 노출된 판표면이 많기 때문에 일반적인 판형 증발기는 고압의 작동조건에서는 적합하지 않다. 그러므로 남은 세 가지 형상의 증발기, 즉 핀-튜브형, 사형 그리고 마이크로 채널에 대해 보

다 집중적인 연구가 필요하다. 핀-튜브형은 기존 프레온계 냉매 시스템에서 가장 많이 사용하던 열교환기로 CO<sub>2</sub> 냉매의 증발특성에 대한 연구가 많이 진행되어져 있어서 증발기 설계에 유용한 자료로 쓰이고 있다. 또한, 기존 연구자들에 의해 몇 가지 사형 열교환기를 제작하여 시험한 결과 만족할 만한 결과를 얻었다. 사형 열교환기의 최대 장점은 헤더의 크기가 작고, 무게가 가볍다

는 것이다. 그러나 관에서 액냉매의 분배가 잘 이루어지지 않았다. 이에 대한 해결책을 발견할 수도 있었으나, 마이크로 채널에 대한 연구를 하기로 결정하였다. 이러한 형태의 증발기는 냉매가 각 통로를 지난 후에 매니폴드에서 액냉매를 재분배할 수 있으며, 유로를 따라 냉매 질량유속을 변화시킬 수 있는 유연성이 있다. 해결해야 할 최대 과제는 폭이 넓은 관을 사용하여 증발기에서 필요한 콤팩트하면서도 무게가 가벼운 고압용 매니폴드를 설계하는 것이 있다.

CO<sub>2</sub>를 사용하는 모든 증발기는 기존 증발기와 비교해 보았을 때 성능이 우수하게 나타났다. 마이크로 채널관을 사용하는 증발기의 공기측 면적이 원관을 사용하는 증발기보다 작았지만 단위 체적당 열용량이 좋게 나왔으며, 냉매측 압력강하 역시 낮게 나왔다. 동일한 냉방용량에서 실험을 수행한 결과, 마이크로 채널을 사용한 증발기가 주어진 공기입구 조건과 용량에서 가장 높은 증발 온도, 즉 높은 효율을 보였다.

공기를 냉각시키는 것 이외에 공기조화 장치에서 증발기는 제

습을 위한 기능을 갖도록 설계된다. 제습용량은 주로 표면온도, 증발기 공기부 면적, 응축수를 잘 배출시킬 수 있는 기하학적 형상에 의해 결정된다. 종종 표면온도를 증발온도로 단순화하여 사용하나 실제 표면온도는 열부하, 원효율, 냉매증기과열도, 압력강하에 의한 냉매부 온도강하 등과 같은 인자에 의해 결정된다.

HFC-22와 CO<sub>2</sub>에 대한 가정용 공조기의 실험결과 증발온도가 높다고 제습용량을 낮게 할 필요가 없다는 결과가 도출되고 있다. 비록 증발온도가 2~3K 정도 높아도, 원효율이 높을수록, 냉매온도강하가 낮을수록, 과열도가 작을수록 CO<sub>2</sub> 증발기에서의 물 응축률은 HFC-22와 동일하다. CO<sub>2</sub> 증발기는 증발온도가 약간 높아도 기존 증발기보다 더 많은 응축수를 생성한다. 따라서 제습용량은 냉매측 온도 강하가 낮을수록 더 쉽게 증가함을 알 수 있었다.

### 맺 음 말

- 최적화된 CO<sub>2</sub>용 열교환기는 외형 크기, 무게, 성능 측면에

서 기존 열교환기보다 충분한 경쟁력을 갖고 있다. 관과 매니폴드 크기가 작을수록 기존의 프레온 냉매 열교환기보다 패키지 크기를 줄일 수 있다.

- CO<sub>2</sub> 증발기는 다소 증발온도가 높더라도 기존 프레온계 증가기와 동등하거나, 더 많은 제습능력을 가지고 있다.

- CO<sub>2</sub> 증발기의 개발을 위해서는 CO<sub>2</sub> 증발 열전달 및 압력강하 특성의 연구, 적절한 증발 열전달 상관식의 개발 등의 지속적인 연구가 요구된다. 기계적인 열교환기 설계를 위해서는 크기와 무게를 최소화할 수 있는 최적화가 필요하며, 원가절감을 위한 대량생산이 가능하도록 설계되어야 하고 기존 프레온 열교환기에 비해 작동압력이 높으므로 열교환기 용접부에 대한 파괴압력 개선이 필요하다. 또한 고 효율 콤팩트화를 위하여 마이크로 채널 열교환기 적용이 가능하도록 제작되어야 한다.

- 설계모델 개선을 위해서 유효율을 포함한 냉매측 열전달과 압력강하에 대한 연구가 지속적으로 수행되어야 한다.