

삼중효용 흡수식 냉동기 기술 개발

삼중효용 흡수식 냉동기의 기본 원리, 사이클 구성 방법 및 특성, 제품 개발을 위한 핵심 기술에 대하여 알아본다.

정시영/총무이사

서강대학교 기계공학과(syjeong@sogang.ac.kr)

서 언

현재 널리 사용되는 흡수식 냉동기는 대부분이 이중효용(double effect) 기기이며 그 동안의 많은 기술 축적과 연구개발의 결과, 성능이 향상되어 최근 일본에서 출시되는 신제품은 냉방 COP가 약 1.3을 넘어서고 있다. 그러나 이중효용 흡수식 냉동기로서는 도달 가능한 COP에 한계가 있기 때문에 2-3년 전부터 삼중효용 흡수식 냉동기에 대한 연구가 일본 등에서 활발히 진행되고 있다.

삼중효용 흡수식 냉동기는 이중효용 흡수식 냉동기의 개념을 한 단계 발전시킨 것으로 발생기에 가해지는 열량의 세 배 단위에 해당하는 냉매증기의 발생을 얻을 수 있기 때문에 삼중효용(triple effect)이라 한다. 삼중효용 사이클에서는 이중효용 사이클에 비하여 COP가 크게 향상되어 약 1.6 정도의 값을 기대할 수 있다.

삼중효용 흡수식 냉동기 사이클을 구성하는 방법은 여러 가지를 생각할 수 있는데 여기에서는 삼중효용 흡수식 냉동기의 기본 원리와 현재까지 제안된 몇몇 사이클의 특성을 살펴보고 이어 삼중효용 흡수식 냉동기를 개발하기 위해 필요한 기술에 대하여 알아보 고자 한다.

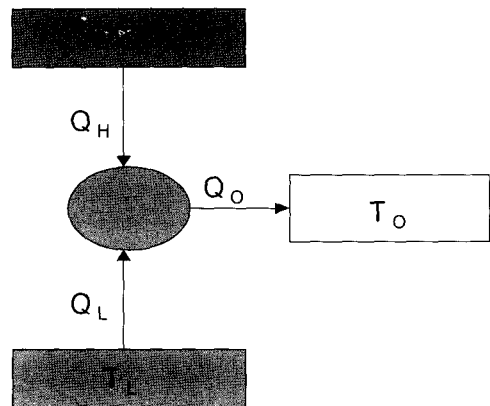
삼중효용 흡수식 냉동기의 원리

흡수식 냉동기는 고온의 열원으로 부터 에너지를 공급받아 작동되는 열구동 냉동기이다. 흡수기와 응

축기로부터 동일한 온도에서 열의 방출이 이루어지며 열교환 과정에서의 외부 열원과의 온도 차이가 무한히 작다는 가정을 하면 열구동 냉동기 사이클은 그림 1과 같이 표시된다. 이 사이클은 고온부(T_H)에서 열량 Q_H 를 공급받아 저온(T_L)에서 Q_L 의 열량을 얻으며 중온(T_0)에서 열량 $Q_0(=Q_C+Q_A)$ 를 방출한다. 이러한 이상적인 흡수식 냉동기의 냉방성능계수(COP)는 다음과 같이 표시된다.

$$COP = \frac{Q_L}{Q_H} = \frac{(1 - \frac{T_0}{T_H})}{(\frac{T_0}{T_L} - 1)} \quad (1)$$

위의 식을 살펴보면 흡수식 냉동기의 성능계수(COP)를 높이기 위해서는 냉수의 온도(T_L)을 높이



[그림 1] 이상적인 흡수식 냉동기 사이클

고, 냉각수의 온도(T_o)를 낮추며, 재생기에서의 열공급 온도(T_H)를 높이는 것이 필요하다. 여기에서 냉수와 냉각수의 온도는 주변 여건에 의하여 주어지므로 약간의 변화($1\sim 2^\circ\text{C}$)를 얻는 것 이상은 불가능하다.

반면에 구동 열원으로 가스나 유류를 사용하는 경우에는 연소가스의 온도는 충분히 높게 올릴 수 있다. 그러므로 실제로 문제가 되는 것은 어떻게 사이클을 구성하여 저온열원 온도와 열 방출 온도를 동일하게 유지하며 연소가스로부터 열을 받는 고온 재생기의 온도를 증가시키는가 하는 것인데 흡수식 냉동기에서는 이 문제를 다중효용 사이클을 적용하여 해결한다. 표 1에는 전형적인 냉난방 운전조건에서 이상적인 일중효용(single effect), 이중효용(double effect), 그리고 삼중효용(triple effect) 흡수식 냉동기 사이클의 성능을 식 (1)을 이용하여 비교하였다.

표 1을 보면 동일한 저온열원 온도(T_L)와 열방출 온도(T_o)에서 구동열원의 열공급의 온도가 증가하면 이상적인 냉방 COP가 크게 향상되는 것을 알 수 있다. 실제 흡수식 냉동기의 COP는 여러 가지의 비가역적인 손실 요소 때문에 이상적인 COP에 비해 상당히 낮아지게 되는데 현재 생산되는 일중효용 제품의 경우에 이상적인 사이클의 약 55~59% 정도의 성능을 보인다고 할 수 있다. 이중효용 흡수식 냉동기의 경우에는 현재 국내 제품(COP = 1.0)은 이상적인 사이클의 48%에 불과한 성능을 보이고 있고 일본의 고효율 제품(COP = 1.3)은 이상적인 사이클의 63% 정도까지 도달한 것을 알 수 있다. 실제 흡수식 냉동기 제품에서는 연소와 같은 비가역과정이 존재

하고, 열교환기의 크기에 제한이 있으며, 마찰 손실이 존재하므로 본 저자의 견해로는 이상적 사이클의 70% 정도가 실제 기기에서 도달할 수 있는 최대치로 생각된다. 만약 70%를 효율 개선의 한계치로 가정한다면 이중효용 흡수식 냉동기에서 얻을 수 있는 최대 COP는 1.45가 될 것이다.

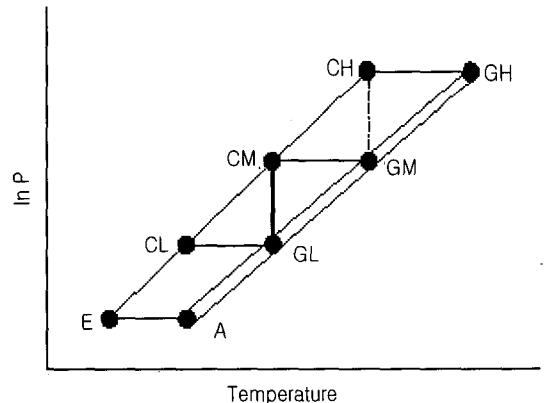
이처럼 이중효용 흡수식 냉동기로서는 개선 가능한 COP에 한계가 있으므로 이 이상의 COP 개선을 위해서는 삼중효용 흡수식 냉동기의 도입이 필요하다. 삼중효용 흡수식 냉동기가 성공적으로 개발되어 이상적인 COP의 60% 정도의 성능을 나타낸다고 가정한다면 냉방 COP는 약 1.61 정도의 값을 가질 수 있고 70%라면 1.88까지 COP를 높일 수 있다.

삼중효용 흡수식 냉동기 사이클

삼중효용 사이클은 여러 가지 방법으로 구성할 수 있으나 그림 2에 나타난 것과 같이 LiBr/H₂O 이중효용 흡수식 냉동기에 하나의 고온부를 추가한 사이클이 가장 널리 연구되고 있다. 이 사이클의 작동 방식을 보면 고온재생기에서 발생된 증기는 고온응축기(CH)에서 응축하면서 바로 아래 단의 중온재생기에 열을 가해주고 여기에서 발생된 증기는 다시 중온응축기에서 응축하면서 다음 단의 저온재생기(GL)를 가열한다. 고온응축기, 중온응축기(CM), 저온응축기(CL)에서 응축된 냉매는 증발기(E)에서 증발하며 냉동 효과를 얻는다. 작동 조건은 농용액의 농도는 약 64%, 희용액의 농도는 약 58% 정도이고

<표 1> 열공급 온도 변화에 의한 이상적인 흡수식 냉동기의 성능

	일중효용 흡수식 냉동기	이중효용 흡수식 냉동기	삼중효용 흡수식 냉동기
냉각수 온도	40℃	40℃	40℃
냉수 온도	5℃	5℃	5℃
열원 온도	100℃	150℃	200℃
이상적 COP	1.28	2.07	2.69
실제 기기 COP (= 이상적 COP × η)	0.70 - 0.75 (η=0.55 - 0.59)	1.0 - 1.3 (η=0.48 - 0.63)	~1.61 (η=0.6)



[그림 2] 기본 LiBr/H₂O 삼중효용 흡수식 냉동기 사이클

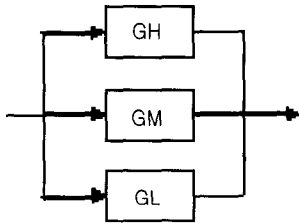


구동 열원을 공급받는 고온재생기의 온도가 200℃ 정도이다.

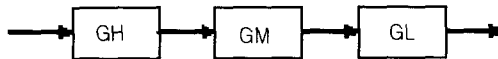
그림 3의 (a)에 표시된 것처럼 병렬 사이클에서는 흡수가 끝난 용액이 나누어져 각각 고온재생기(GH), 중온재생기(GM), 저온재생기(GL)에서 농축된다. (b)에 표시된 직렬 사이클에서는 흡수가 끝난 용액 전체가 차례로 고온재생기, 중온재생기, 저온재생기를 거치면서 농축된다. 병렬형은 COP가 높아지는 장점이 있으나 고온재생기의 온도가 과도하게 증가하는 단점이 있고 직렬형은 이와 반대의 장단점을 갖는다.

일본에서는 이러한 직렬과 병렬의 기본 사이클이

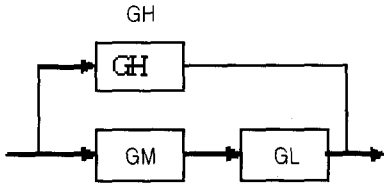
외에 그림 3의 (c), (d), (e)에 표시된 것과 같은 개선된 사이클을 개발하여 COP를 높이면서도 고온재생기의 온도를 가능한 낮추었다. 현재로서는 (e)에 표시된 Kawasaki의 modified reverse flow 방식이 가장 우수한 결과를 얻은 것으로 보고 되고 있다. 이 방식에서는 흡수기에서 나오는 직렬형과는 반대로 용액이 저온재생기로 먼저 들어가게 되며 저온재생기에서 재생된 용액의 일부는 흡수기로 돌아가고 나머지는 중온재생기로 들어간다. 중온재생기로 들어간 용액은 다시 재생되어 일부는 흡수기로 돌아가고 나머지는 고온재생기로 들어가서 재생과정을 한 번 더 거친다.



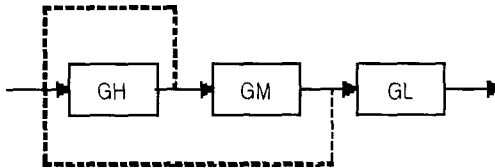
(a) Parallel flow



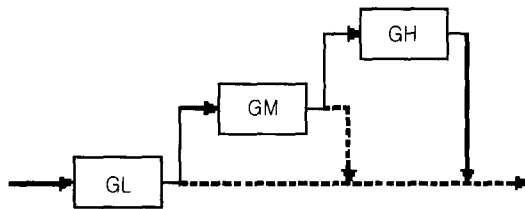
(b) Series flow



(c) Modified series flow



(d) Bypass flow



(e) Modified reverse flow

[그림 3] LiBr/H₂O 삼중효용 흡수식 열펌프 사이클의 용액 분배 방법

삼중효용 흡수식 냉동기 핵심 기술

사이클 시뮬레이션

삼중효용 흡수식 냉동기 사이클처럼 시스템의 요소들이 복잡하게 연결되어 작동하는 장치에서는 동일한 구성 요소를 가지고도 결합 방식에 따라 효율이 상당히 달라질 수 있다. 그러므로 실제로 사이클을 선정하기 위해서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 다양한 사이클에 대하여 성능 예측을 하는 것이 필요하다. 실제 시스템을 실현하기 위해서는 높은 성능도 중요하지만 장치의 구성이 간단할수록 유리하므로 시스템의 개발 시에 이 두 가지 점을 절충하여야 한다.

새로운 작동유체

현재 일본에서는 삼중효용 흡수식 냉동기에 LiBr/H₂O를 사용하는 방향으로 개발이 진행되고 있다. 하지만 새로운 사이클을 구현하기 위한 새로운 용액을 사용하여야 하는 경우도 있다. 새로운 사이클에 필요한 새로운 냉매를 선정할 때 기초가 되는 것은 용해도와 증기압 특성이다. 수 년 전 일본의 Hitachi사의 사이클에서는 저온부에는 LiBr/H₂O, 고온부에는 질산염 혼합물(LiNO₃, KNO₃ 등의 혼합물)/H₂O를 사용하여 시스템을 실현하였다.

미국은 1980년도 중반에 이미 몇 가지의 새로운 사이클을 선정하여 이에 맞는 새로운 작동유체에 대한 폭넓은 검토를 수행한 결과, 주어진 사이클에 대하여 적용할 수 있는 다양한 작동 유체에 대한 데이터 베이스를 확립하였으며 새로운 작동유체 개발에도 많은 노력을 하고 있다.

부식 관련 기술

현재 이중효용 기기에서는 고온재생기의 온도가 150~160℃ 정도이지만 대부분의 삼중효용 사이클에서는 고온재생기의 온도가 200℃를 넘는다. 사이클에서의 최고온도가 상승함에 따라 해결해야 할 가장 큰 요소 기술은 고온부식 문제이다. 흡수식 냉동기에서의 부식은 재료 자체가 취약해진다는 문제점 이외에도 부식에 의한 불용축 가스의 발생으로 시스템의 성능을 저하시킨다. 그러므로 이러한 문제를 해결하기 위해서는 고온부식에 강한 적절한 소재의 선정이 필요하다. 또한 부식방지 대책으로서 열교환기

표면에 적절한 코팅 기술 등을 적용하는 것도 생각할 수 있다. 재료 선정과 함께 고온용 부식억제제(Corrosion Inhibitor)의 개발이 필요하다. 현재 널리 사용되는 부식억제제는 Li₂CrO₄, Li₂MoO₄와 LiNO₃의 세 가지인데 이들의 200℃ 이상의 고온에서의 방식 효과는 아직 검증되지 않았으므로 이들의 고온 방식 특성에 대한 연구와 함께 고온 안정성과 방식 효과가 높은 새로운 부식 억제제에 대한 탐색도 필요할 것이다.

고온용 계면활성제

현재 흡수식 냉동기에는 계면활성제로서 노말옥틸알콜이나 2-에틸헥실알콜이 사용되고 있다. 그러나 이 두 물질 모두 200℃ 이상의 고온에서 열분해에 의하여 손실되며 불용축가스를 발생하므로 삼중효용 흡수식 냉동기에는 사용이 불가능할 것으로 생각된다. 그러므로 앞으로 고온에서도 분해되지 않고 성능을 발휘할 수 있는 계면활성제에 관한 연구가 필요하다. 이와 더불어 기계적 방법, 즉 전열면의 형상 가공 등에 의한 열전달 촉진 방법도 연구의 대상이 되고 있다.

결 언

본고에서는 최근 국제적으로 큰 관심을 끌고 있는 삼중효용 흡수식 냉동기에 대하여 기본원리, 사이클 구성방법, 그리고 개발을 위한 핵심기술들을 간단히 살펴보았다. 에너지 절약과 환경보전이라는 관점에서 삼중효용 흡수식 냉동기에 관한 연구는 국내에서도 시급히 활성화되어야 할 분야로 생각되며 이에 관한 연구가 성공적으로 수행되어 삼중효용 흡수식 냉동기의 상용화가 이루어지면 에너지 절약과 경제적인 효과가 크리라고 생각된다. 최근의 국제적인 연구 동향을 볼 때 COP를 더욱 높일 수 있는 삼중효용 흡수식 냉동기에 대한 연구 개발은 이중효용 흡수식 냉동기의 고효율화와 동시에 이루어져야 할 것으로 생각된다. 삼중효용 흡수식 냉동기가 개발되면 에너지 경제 여건에 따라서는 예상보다 급속히 보급이 될 수도 있으므로 이에 대한 기술 개발은 국제적 경쟁력 확보 차원에서도 필수적일 것으로 판단된다. ●