

흡수사이클의 작동유체 개관

정기석 (한국원자력연구원 핵융합공학기술개발부)

분석자 서문

흡수사이클이란 냉동 및 난방을 위한 화학물질인 냉매의 증발 및 회수를 위하여 흡수제를 사용하는 과정을 말한다. 대표적인 흡수제는 물-암모니아에서의 물, 또는 LiBr-물에서의 LiBr이다. 이때 장치가동에 필요한 에너지로 태양열, 천연가스, 공장 폐열을 쓸 수 있다. 일반적인 컴프레서 냉동의 경우와 달리 흡수사이클에서는 냉매의 증발이 냉동을 일으킨다. 흡수사이클에는 히트펌프, 흡수냉각기 및 흡수변환기가 있는데, 작동유체는 그 성능 및 효율에 큰 영향을 준다[1]. 본 분석보고서에서는 흡수사이클의 원리를 자세히 설명하고, 작동유체 관련 기술현황을 분석하였다.

1. 흡수사이클 개요

전세계적으로 냉난방은 전기수요의 큰 부분을 차지하고 있다. 건물냉방은 전기에 의하여 작동되며 합성유체를 사용하여 온실가스를 방출한다. 미국의 경우, 건조물의 전기사용이 전체 전기수요의 72%, 탄소배출의 40%에 이르며, 이 중 5%가 냉방을 위한 것이다[2].

열을 한 곳에서 다른 곳으로 이동하는 방식에 의하여 작동하는 히트펌프는 천연가스, 태양열, 및 폐열에 의해 작동하기 때문에 전기 공급에 의존하지 않고 작동할 수 있다. 효율적인 공간 냉방 및 난방을 제공하는 것 외에도, 히트펌프는 온수를 생산할 수 있다.

히트펌프는 외기가 공조공간보다 차가운가 또는 더운가에 따라 공조공간을 난방 또는 냉방할 수 있다. 히트펌프를 난방용으로 쓰면 에어컨이나 냉장고와 같이 기본적으로 냉방형태의 사이클로 작동하지만, 열을 주변환경에 방출하는 대신 공조공간에 방출한다. 이 경우, 일반적으로 히트펌프는 더 차가운 외부 공기나 지하로부터 열을 흡수한다[3].

넓게 보면 컴프레서 작동에 의한 에어컨 및 냉동기도 히트펌프라고 할 수 있으나, 히트펌프라는 말은 차가운 외기보다 더 따뜻해야 하는 공간을 난방하기 위하여 쓰이는 장치를 말하며, 열원보다 더 온도가

높은 곳으로 열에너지를 전달하는 장치이다. 즉, 히트펌프는 자연적인 열 흐름의 방향과 반대되는 방향으로 열에너지를 이동시킨다.

흡수냉동기는 냉동장치 가동을 위한 에너지를 공급하기 위하여 태양열, 기름, 공장이나 지역난방장치의 폐열 등을 이용한다. 예를 들어, RV 차량에서 LPG 연소열로 작동하는 흡수냉동기가 식품저장에 이용된다. 흡수냉동은 또한 가스터빈이나 물가열로부터의 폐열을 써서 건물을 공기조화하는 데도 쓰일 수 있다.

흡수냉동기와 컴프레서 냉동기의 차이는 냉매가 기체에서 액체로 변화하는 방법에 있다. 흡수냉동기는 냉매기체를 흡수하여 다시 재생할 때 열이 필요하고, 컴프레서같은 가동부가 필요 없다. 컴프레서 냉동기는 압축된 실온의 액체가 급속히 팽창하는데 따른 열흡수와 뒤이어 증발기에서의 증발에 의한 열흡수를 이용한 것이다. 쓰이는 냉매도 컴프레서 냉동기는 HCFC나 HFC를 쓰는데, 흡수냉동기는 주로 암모니아나 물을 쓴다.

흡수냉동기의 시초는 1700년대로 거슬러 올라간다. 황산과 물이 든 두 개의 용기를 연결하여 진공으로 만들고, 황산용액이 물이 든 용기에서 물 증기의 증발을 일으켜 이를 흡수, 물의 열을 빼앗고, 이에 따라 물이 냉각되어 얼음을 만들 수 있음이 알려져 있었다[1, 4]. 이렇게 해서 1810년에 황산을 포함하는 용기와 연결된 순수한 물을

얼음으로 만들었다. 산이 물 증기를 흡수함에 따라 물의 온도가 감소하여, 물의 표면에 얼음이 생겼다. 이 장치의 문제는 부식과 진공용기에 공기가 새어 들어가는 것이었다. 1859년에 Ferdinand Carr는 물-암모니아를 작동유체로 쓰는 장치를 특허 냈고, 이 특허에 의한 장치는 얼음을 만들고 식품을 저장하는데 쓰였다. 이는 초기 냉동기술개발의 기본설계로 사용되었다.

1950년대에, 산업용으로 브롬화리튬(LiBr)- 물을 작동유체로 쓴 장치가 도입되었다. 수년 후, 이중효과 흡수장치가 도입되어 고성능의 열가동 냉동사이클을 위한 공업표준으로 사용되었다.

2. 흡수냉동의 작동원리

흡수냉각은 3단계로 이루어진다[5].

1. 증발: 저압에서 액상의 냉매가 증발하며 주변으로부터 열을 빼앗아 냉동기로 작용한다.
2. 흡수: 기체상태의 냉매가 다른 액체에 흡수되며 분압이 낮아져, 냉매의 추가 증발이 이루어진다.
3. 재생: 냉매가 포함된 액체를 가열하여 냉매를 증발시켜 뽑아내고, 이 냉매증기를 열교환기를 거쳐 응축시켜 액체로 만들어 다시 증발기로 보낸다.

흡수냉동장치의 작동유체는 냉매와 흡수제로 이루어진 2성분 용액이다. 그림 1(a)에서, 두 개의 용기를 뿔 용기가 서로 연결되어 있다. 왼쪽 용기는 액체 냉매를

담고 있고, 오른쪽 용기는 흡수제-냉매의 2성분 용액을 담고 있다. 오른쪽 용기의 용액은 왼쪽 용기로부터 냉매를 흡수하여 압력을 감소시킨다. 냉매증기가 흡수되는 동안, 증발의 결과 남은 냉매의 온도가 내려간다. 이는 왼쪽 용기 내부에 냉동효과를 야기한다. 동시에 오른쪽 용기의 용액은 냉매가 흡수됨에 따라 점점 묽어진다. 이를 흡수과정이라고 한다. 대개 흡수과정은 발열과정이어서, 흡수능력을 유지하기 위하여 열을 외부로 방출해야 한다.

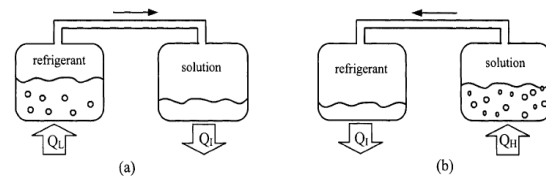


그림 1. (a) 오른쪽 용기에서 흡수가 일어나고, 이는 다른 용기의 냉각을 야기한다. (b) 외부 열원으로부터 열을 공급하면 오른쪽 용기에서 냉매가 분리된다.(출처: Srihirin 등[4])

냉매가 포화되어 흡수과정을 계속할 수 없으면, 묽어진 용액에서 냉매를 분리해야 한다. 이 분리과정에 열이 필요하다. 그림 1(b)에 보인 바와 같이 용액으로부터 냉매를 빼내기 위하여 열을 오른쪽 용기에 가해준다.

그러나 이 과정들이 동시에 일어날 수 없으므로, 냉동효과는 연속적으로 일어날 수 없다. 따라서, 흡수냉각사이클은 그림 2에 보인 두 과정의 조합이다. 흡수냉동장치의 성능계수(Coefficient of Performance, COP)는 아래와 같이 주어진다[4]:

$$COP = \frac{\text{cooling capacity obtained at evaporator}}{\text{heat input for the generator} + \text{work input for the pump}}$$

펌프의 일 입력은 generator에 대한 열 입력에 비해 무시할 수 있다.

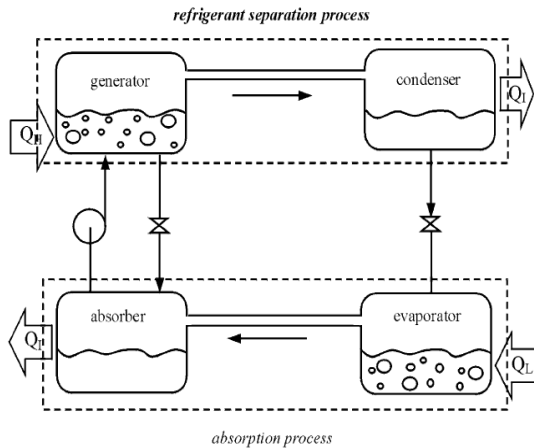


그림 2. 그림 1의 두 과정으로 이루어진 연속 흡수냉각 사이클. (출처: Srihirin 등[4])

Sun 등[1]에 따르면, 전체 흡수사이클은 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 Strong solution은 흡수제를 말한다. 물-암모니아의 경우, 물은 흡수제로서 작용하고 암모니아는 냉매로서 작용하므로, 이 경우 Strong solution은 흡수제(물)를 말한다. LiBr-물의 경우, LiBr이 흡수제이고 물이 냉매이다. 따라서 이 경우 Strong solution(흡수제 용액)인 LiBr의 함량이 높다. 즉, Strong solution에서는 냉매의 함량이 작다. 흡수기(Absorber)에 들어가는 흡수제(Strong solution) 용액은 증발기와의 압력차이 때문에 냉매증기를 흡수한다. 냉매를 흡수하면 흡수제는 weak solution(냉매 포함 용액)이 되고, 이는 펌프에 의하여 생성기(generator)로 들어간다. 생성기에서는 냉매포함용액을 가열하여 냉매증기가 얻어지고, 이는 생성기와 응축기(condenser)의 일정압력을 유지하기 위하여 응축기에서 응축된다.

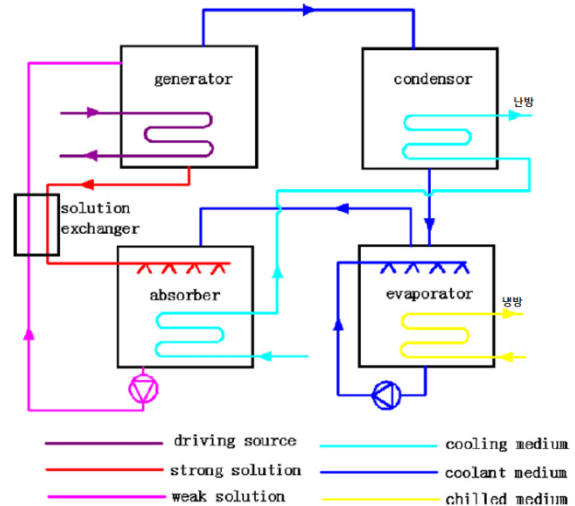


그림 3. 흡수사이클의 기본구조(출처: Sun 등[1])

응축기에서의 응축열을 난방에 이용할 수 있고, 증발기에서 흡수되는 열에 의하여 냉각되는 유체를 써서 냉방을 할 수 있다. 따라서 하나의 장치로 난방과 냉방이 가능한데, 이 때 난방과 냉방을 선택할 수 있도록 적절한 배관이 필요하다.

3. 흡수냉각장치의 작동유체

흡수냉각장치의 성능은 작동유체의 화학적, 열역학적 성질에 크게 좌우된다. 흡수제-냉매 조합은 사이클의 작동온도 범위에서 잘 섞여야 하고, 혼합물이 화학적으로 안정하고 독성이 없어야 하며, 폭발성이 없어야 한다. 이 외에도 다음 조건들을 갖추어야 한다[1]:

1. 끓는점 상승(같은 압력에서 순수한 냉매와 혼합물 사이의 끓는점 차이)은 가능한 한 커야 한다.
2. 생성기(generator)와 흡수기(absorber) 사이에 낮은 순환속도를 유지하기 위하여, 냉매는 흡수제 안에서 높은 증발열과 높은 농도를 가져야 한다.
3. 열 및 물질전달에 영향을 주는 전달특성, 즉 점성, 열전도도, 확산계수가 좋아야 한다.
4. 냉매와 흡수제 모두 부식성이 없어야 하고, 환경친화적이며 저렴해야 한다.

많은 작동유체가 제안되었는데, Marcriss의 흡수제에 대한 조사에 따르면 40개의 냉매와 200개의 흡수제가 있다[6]. 그러나 일반적으로는 물-암모니아 및 LiBr-물이다. 한편, 미국의 PNNL(Pacific Northwest National Lab)에서는 기존의 것들보다 냉각효과가 3배 더 크고 냉각속도는 20배 더 빠른 흡수제를 개발하고 있다. PNNL은 이 새로운 흡수제를 써서 재래식에 비하여 훨씬 작고 2배의 에너지 효율을 가지며 재료비용이 덜 들고 제작시간이 짧은 냉각기를 만들기를 기대하고 있다[2].

3.1. 암모니아 냉매

흡수 냉각 장치가 발명된 후, 물-암모니아(NH_3)가 냉각 및 가열목적으로 널리 쓰였다. 암모니아(냉매) 및 물(흡수제)은 넓은 온도 및 압력 범위에서 상당히 안정하다. 암모니아는 큰 증발열을 갖는데, 이는 장치의 효과적인 성능을 위하여 필요하다. 암모니아의 어는점은 -77°C 이어서 낮은 온도에서 작동이 가능하다. 암모니아와 물이 모두 증발성이 있어서, 순환장치는 암모니아와 같이 증발하는 물을 제거하기 위한 정류기(rectifier)가 필요하다.

정류기가 없으면 물이 증발기(evaporator) 내부에 쌓여 장치의 성능을 악화시킨다. 물이 암모니아와 섞이는 것을 줄이기 위하여, LiBr을 첨가한 3성분 혼합물로 된 흡수회트 펌프는 COP가 2성분의 경우보다 약간(0.05) 작지만, 정류기에 들어가는 냉매의 물 함량이 2성분계보다 훨씬 적어 유리하다. 또한 물-암모니아에 NaOH를 첨가하면 생성기에서 암모니아의 분리를 증진시키고 가동온도를 낮추며 COP가 20% 정도 증가한다. 이 장치의 단점은 높은 압력과 독성, 구리 및 구리합금에 대한 부식성이다. 그러나 물-암모니아는 환경친화적이고 저렴하다.

3.2. 물 냉매

물을 냉매로 쓴 경우의 대표적인 것은 LiBr을 흡수제로 사용하는 경우이다. 흡수냉각계통에 LiBr-물 조합을 사용하는 것은 1930년대에 시작되었다[7]. LiBr-물

장치의 장점은 LiBr이 비휘발성 흡수제라는 것(따라서 냉매와 흡수제를 분리하는 정류기가 불필요)과 물(냉매)의 증발열이 매우 크다는 것이다. 그러나 물을 냉매로 사용하면 저온을 0°C 이상으로 제한해야 한다. 물이 냉매이므로 장치는 진공에서 가동해야 한다. 높은 농도에서는 용액이 결정화할 수 있는데, 결정화를 막기 위하여 다른 염을 첨가하기도 한다[1]. 이 장치도 일부 금속에 대해 부식성을 갖고 가격이 비싸다.

3.3. 기타

불화탄소 냉매도 연구되었는데, 유기용매에 대한 용해도가 큰 이유로 R22와 R21이 널리 제안되었으며, 이들 용매로는 Dimethyl Ether of Tetraethyl Glycol (DMETEC)과 Dimethyl Formide(DMF)가 있다[8-14].

혼한 LiBr-물 흡수장치는 냉각한 수평의 관위의 낙하하는 용액막으로 냉매 증기를 흡수시키는 것이다[15-22]. 이런 형태의 흡수기에서 흡수과정 중에 열이 동시에 액막으로부터 제거되어 흡수속도는 증가한다. Rotex가 고안한 다른 방법은 냉각한 회전원판의 액막에 증기상의 냉매를 흡수하는 것이다. 이런 구조의 흡수기는 보통의 낙하방법보다 효율이 좋아 장치의 크기가 작아도 된다[23,24].

4. 흡수냉각 사이클의 설계 예

4.1. 단일효과 흡수장치

단일효과 흡수장치(Single-effect absorption system)는 가장 간단하고 널리 쓰이는 디자인이다. 작동유체에 따라 두 가지 형태가 있다. 그림 4는 LiBr-물같이 비휘발성 흡수제를 쓰는 단일효과 장치를 보인다. 생성기에 공급된 고온의 열은 용액으로부터 냉매를 증발하는 데 쓰이고 응축기에서 주변으로 방출되며, 아울러 흡수기로부터 나오는 용액을 가열하는 데 쓰인 다음 주변으로 방출된다. 따라서 생성기에서의 고온 열이 흡수기와 응축기에서 소비되어

비가역성이 야기된다. 이러한 비가역성을 줄이기 위하여 그림 4와 같이 용액 열교환을 도입한다. 열교환기는 생성기에서 나오는 고온용액으로부터의 열을 써서 흡수기로부터의 용액이 생성기로 들어가기 전에 예열되도록 한다. 따라서 생성기에서 열 입력이 감소하여 COP가 증가한다. 더욱이, 열이 덜 방출되므로 흡수기의 크기를 줄일 수 있다.

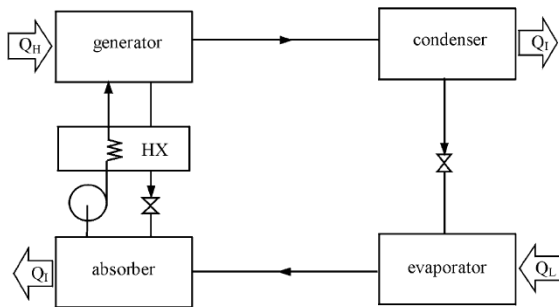


그림 4. 생성기(generator)에서 열입력을 감소시키는 용액열교환기(HX)를 갖춘 단일효과 LiBr-물 흡수냉각장치(출처: Sriksirin 등[4])

물-암모니아 같이 증발성 흡수제가 쓰이면 장치는 “정제기” (rectifier)라고 하는 추가의 구성품이 필요한데, 이 장치는 응축기(condenser)에 들어가기 전에 냉매를 정제(purify)한다. 흡수제(물)가 휘발성이므로, 물은 암모니아(냉매)와 같이 증발한다. 정제기가 없으면 물이 증발기 내부에 응축하여 쌓이고 장치의 성능을 떨어뜨린다.

4.2. 흡수 열변환기 (Absorption heat transformer)

흡수냉동사이클은 저온, 중온, 고온의 세 가지 열저장소와 열을 교환한다. 흡수장치가 냉동기나 히트펌프로 작동하면, 구동열은 고온 열저장소로부터 공급된다[4]. 냉동효과는 저온레벨에서 일어나고, 중온 레벨에서 열이 배출된다. 냉동기의 경우, 유용한 열전달은 저온에서 일어난다. 히트펌프의 경우, 유용한 열교환은 중간온도에서 일어난다. 보통 열펌프의 경우 주변온도는 낮은 온도 저장소로 쓰이고, 냉동기의 경우에는 중간온도 저장소로 쓰인다.

흡수 사이클의 한 방법으로, “흡수

열변환기” (absorption heat transformer), 또는 “역 흡수 히트펌프(reverse absorption heat pump)”가 있다. 이 시스템은 중간온도 열저장소(reservoir)로부터의 열을 구동열로 이용하는데, 이 열은 보통 산업적 폐열로부터 온다. 이 장치는 저온 레벨에서 주변으로 열을 방출한다. 흡수 열변환기는 작동유체를 순환하기 위해 필요한 일 외에 다른 열입력 없이 폐열을 고온레벨로 업그레이드한다.

그림 5에 흡수 열변환기의 개략도를 보였다. 이 사이클은 단일효과 흡수사이클과 유사하다. 차이는 응축기와 증발기 사이에 팽창장치가 설치되고, 증발기가 펌프로 대체된 것이다. 냉매 분리를 위하여 비교적 저온의 폐열을 생성기에 공급한다. 응축기로부터의 액체 냉매를 고압으로 증발기에 펌핑해 보낸다. 증발기에서 생성기를 가동할 때 쓰인 저온 폐열을 써서 냉매를 증발시킨다.(흡수 열변환기는 보통 생성기와 증발기 온도가 같도록 운전된다.) 그러면 증기상의 냉매는 흡수기에서 용액에 흡수되고, 이 때 고온에서 열이 방출된다. 열변환기를 써서 태양열이나 산업폐열같은 저온 열을 고온 열로 바꿀 수 있다.

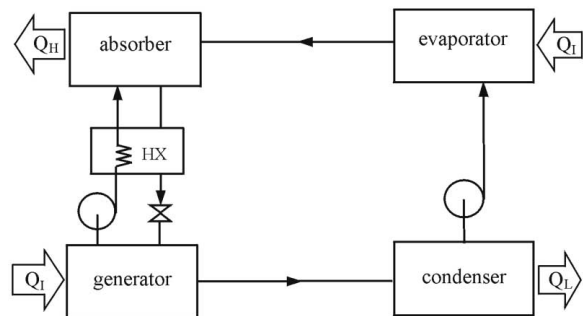


그림 5. 흡수 열변환기는 생성기에서 폐열을 흡수한다. 폐열을 흡수하기 위하여 액체냉매를 증발기로 펌핑한다. 흡수기로부터 유용한 고온의 흡수열이 얻어진다.(출처: Sriksirin 등[4])

4.3. 다중효과 흡수냉각 사이클(Multi-effect absorption refrigeration cycle)

고효율 사이클의 주 목적은 고온 열원이 있을 때 장치의 성능을 높이기 위한 것이다. 다중효과는 고온 레벨에서 배출된 열이 저온에서 추가의 냉각효과를 얻기 위하여

저온 레벨의 열 입력으로 쓰이도록 사이클을 구성하는 것이다. 이중효과 흡수냉각 사이클은 1956-1958년에 도입되었다[25]. 그림 6은 LiBr-물을 쓴 시스템을 보인다. 외부 열원으로부터의 고온 열은 1차 효과 생성기에 공급된다. 생성된 증기상태의 냉매는 2차 효과 생성기에서 고압으로 응축된다. 발생하는 열은 1차 효과 생성기에서 오는 용액으로부터 추가의 냉매증기를 만드는 데 쓰인다. 이 구조는 직류 이중효과 흡수장치라고 볼 수 있다.

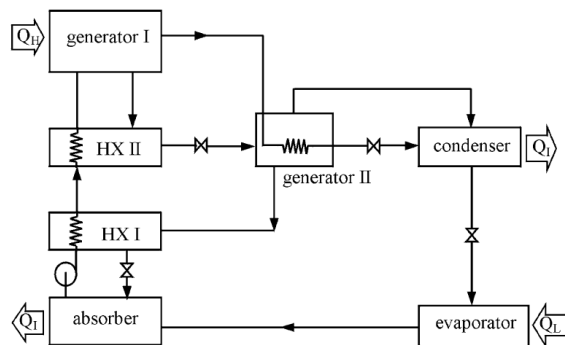


그림 6. 이중효과 LiBr-물 흡수사이클. 냉매증기를 응축하여 나오는 열은 생성기 II의 열 입력으로 쓰인다. 이 사이클은 고압, 중압, 저압의 세 압력레벨에서 작동한다. (출처: Srikinirin 등[4])

Srikinirin 등[4]에 의하면 이 이중효과 흡수시스템의 COP는 $COP_{double} = COP_{single} + (COP_{single})^2$ 이다. 단일효과 흡수 시스템의 COP가 0.6일 때 이중시스템의 COP는 0.96이다. LiBr-물을 물-암모니아로 바꾸면 단일효과 생성기에서 최대 압력은 매우 높아진다.

그림 7은 물/암모니아를 쓴 이중효과 흡수장치를 보인다. LiBr-물을 위한 장치에 비하여, 이 장치에서는 두 개의 개별적 단일효과 사이클의 조합을 볼 수 있다. 두 사이클의 증발기 및 응축기를 하나의 단위로 더하였다. 따라서 이 장치에는 두 압력레벨만 있다. 외부 열원으로부터의 열이 생성기 II에 공급된다. 물이 흡수제이므로, 흡수기에서 결정화의 문제는 없다. 이 구조는 병렬 이중효과 흡수장치라고 볼 수 있다.

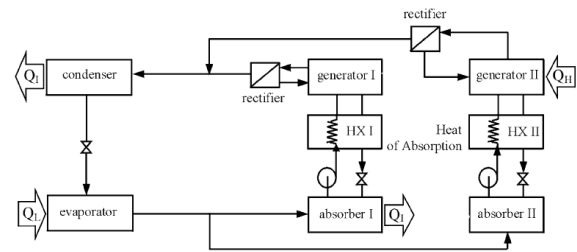


그림 7. 이중효과 흡수사이클은 두 압력레벨에서 작동한다. 흡수기 II에서의 흡수열은 냉각제 분리과정을 위하여 제거기(Desorber) I에 공급된다. (출처: Srikinirin 등[4])

4.4. GAX를 쓴 흡수 냉각사이클

GAX(generator/absorber heat exchanger) 또는 DAHX(desorber/absorber heat exchanger)로 불리는데, 이 장치는 단일효과 흡수장치를 써서 높은 성능을 얻을 수 있다. 앞에 언급한 병렬흐름 이중효과 흡수장치와 유사하게, 이 장치는 병렬 방식으로 작동하는 두 개의 단일 효과 사이클로 이루어져 있다. GAX의 개념은 이러한 2단 이중 효과 흡수 사이클을 단순화하면서도 같은 성능을 얻는 것이다. GAX 아이디어는 1911년에 Altenkirch와 Tenckhoff[26, 27]가 도입했다. 단순화한 구조를 그림 8과 같이 개략적으로 보였다.

흡수기와 생성기는 역류(counter-current) 열교환기로 간주할 수 있다. 흡수기에서는 생성기에서의 물은 용액과 증발기에서의 냉매 증기가 윗부분으로 들어온다. 냉매 증기를 흡수하는 능력을 유지하기 위하여 흡수과정에서 발생하는 열은 제거해야 한다. 흡수기 윗부분에서는 열이 고온으로 방출된다. 아랫부분에서는 용액이 열을 주위에 방출하며 추가로 증기상의 냉매를 흡수한다. 생성기에서는 흡수기에서 오는 냉매가 풍부한 용액이 윗부분으로 들어온다. 여기에서는 흡수기의 윗부분에서 배출된 열에 의하여 가열됨에 따라 용액으로부터 냉매가 증발한다. 생성기 아랫쪽에서는 외부 열원에 의하여 용액이 추가로 건조된다. 그림 8을 보면 추가의 2차 유체가 있는데, 이는 흡수기와 생성기 사이에서 열을 전달하는 데 쓰인다. 따라서 GAX를 써서 단일효과 흡수 시스템이 2단계 이중효과 흡수시스템과 같이 높은 COP를 제공할 수 있다.

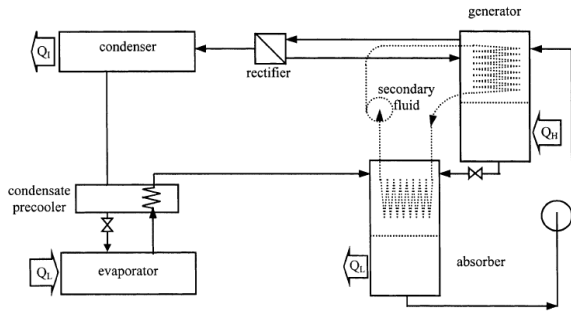


그림 8. 점선의 루프는 흡수기 고온부의 열을 생성기 저온부로 옮기기 위하여 사용되는 2차 유체이다. (출처: Sriksirin 등[4])

4.5. 흡수기 열회수를 동반하는 흡수냉각 사이클

생성기로부터 오는 고온 용액에서 열을 전달하여, 생성기에 들어가기 전에 흡수기로부터 오는 냉매 함유량이 많은 용액을 예열할 수 있다. 흡수기 열 회수에 의하여 냉매함유량이 많은 용액의 온도를 더 높일 수 있다. GAX 장치와 유사하게 흡수기는 두 부분으로 나뉘어져 있으며 열은 서로 다른 온도에서 방출된다. 저온부는 열을 주변으로 방출한다. 그러나 고온부는 그림 9와 같이 고온도 냉매용액을 예열하는 데 쓰인다. 따라서 생성기의 열 입력이 줄어들어 COP를 높인다. 그러나 이 개념의 장치는 아직 구현되지 않았다.

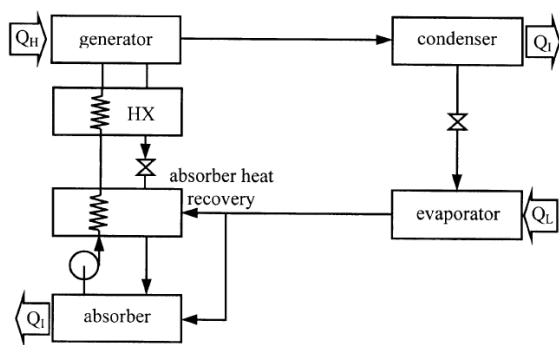


그림 9. 흡수기 열회수 기능을 갖는 사이클. 여기서는 흡수열을 흡수기에서 생성기로 가는 경로를 예열하는 데 쓴다. (출처: Sriksirin 등[4])

4.6. 반효과 흡수냉각 사이클(Half-effect absorption refrigeration cycle)

<http://www.kosen21.org/>

흡수냉각장치는 흡수기가 생성기보다 냉매 함유량이 많을 때에만 작동한다. 온도가 높거나 압력이 낮으면 용액중의 냉매 함유량이 감소한다. 생성기 온도가 낮으면 용액의 순환속도가 증가하여 COP가 감소한다.

반효과 흡수장치(half-effect absorption refrigeration cycle)는 저온 열원을 이용하기 위하여 도입되었다. 그림 10은 반효과 흡수냉각사이클의 개략도를 보인다. 그림에서, 외부 열원으로부터의 고온 열은 두 개의 생성기로 들어간다. 두 흡수기는 열을 주변으로 방출한다. 흡수기 II와 생성기 I은 중간압력레벨에 있다. 단일 효과 흡수 사이클보다 더 많은 열을 방출하므로, 반효과 흡수시스템의 COP는 비교적 낮아서 50%에 머문다. 그러나 이 시스템은 비교적 낮은 온도의 열원으로 작동될 수 있다.

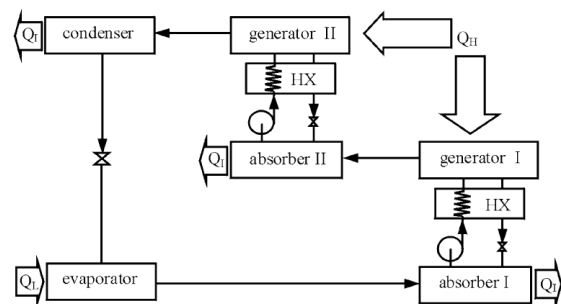


그림 10. 반효과 흡수사이클은 다른 압력레벨에서 작동하는 두 개의 단일효과 사이클의 합이다. (출처: Sriksirin 등[4])

4.7. LiBr+물을 쓴 자가순환 흡수 시스템

흡수냉동시스템의 주 에너지가 열의 형태이지만 순환펌프를 가동하기 위하여 얼마간의 전기가 필요하다. 아무런 순환펌프가 필요하지 않은 냉각시스템이 있는데, 이 시스템에서는 작동유체가 기포펌프(bubble pump)라고 하는 열 사이펀 효과에 의해서 순환된다.

일본의 Yazaki사는 LiBr+물을 써서 단순효과시스템에 근거한 자가순환 흡수냉각 시스템을 소개했다. 물을 냉매로 하고 정수두(hydrostatic head, 靜水頭) 원리를 써서 응축기와 증발기 사이에 압력 차이를 매우 낮게 유지할 수 있다. 기포펌프를 써서

흡수기로부터의 용액을 생성기로 순환할 수 있다. 이 장치의 개략도를 그림 11에 보였다. 기포펌프의 영향으로, 용액은 비등과 펌핑을 동시에 이룬다.

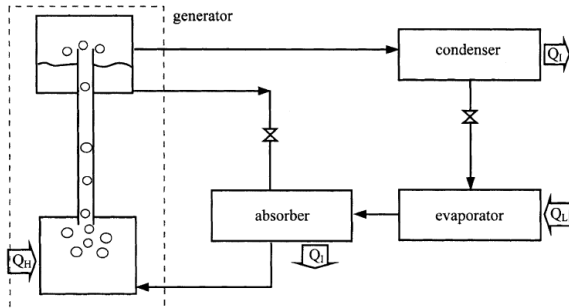


그림 11. 생성모듈에서 기포펌프를 보이는 그림. 생성기로 가는 열 입력은 작동유체의 순환 및 냉매의 증발 모두에 쓰인다. (출처: Srihirin 등[4])

Eriksson과 Jernqvist[28]은 NaOH+물을 써서 자가순환 열변환기를 개발했다. 응축기와 증발기 사이의 높은 온도와 압력차이 때문에 흡수기와 증발기는 응축기와 생성기보다 각각 7m 및 10m 밑에 있다. 이 장치의 가장 낮은 곳과 가장 높은 곳은 14m에 이르며, 이는 장치 안에서 1기압에 해당한다.

4.8. 확산 흡수 냉각 시스템(Diffusion absorption refrigeration system, DAR)

DAR은 물/암모니아를 쓰는 자가 순환 흡수 시스템의 다른 예이다. 암모니아가 작동유체이므로, 응축기와 증발기 사이에서 압력 차이가 너무 커서 기포펌프로 극복할 수 없다. DAR의 개념은 Platen과 Munters가 제안했는데[29], 그림 12는 이 시스템의 개략도를 보인다. 증발기와 흡수기에 보조기체를 채운다. 따라서 이 장치에는 압력차이와 기포펌프를 적용할 수 없다. 냉각효과는 부분압 원리에 의하여 얻어진다. 증발기와 흡수기에 보조가스가 채워지기 때문에, 증발기와 흡수기의 암모니아 가스 부분압은 증발기 안에 요구되는 온도에 해당하도록 낮게 유지된다. 보조기체는 수소나 헬륨같이 비응축성이어야 한다.

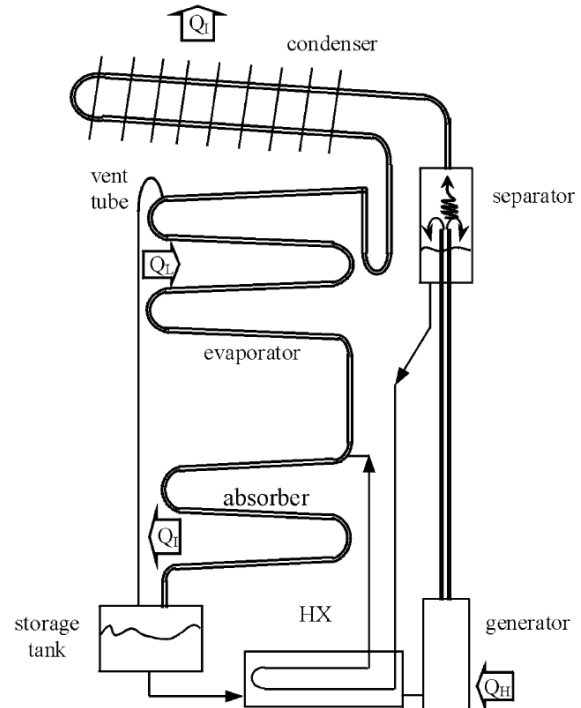


그림 12. 확산 흡수 냉동기(DAR)의 개략도: 이 장치는 작동에 전기가 불필요하여 한때 가정용 냉동기로 널리 쓰였다. 작동유체로서 암모니아/물/보조가스를 채운다. (출처: Srihirin 등[4])

이 장치의 특성은 전기가 없는 곳에서 작동할 수 있다는 것이다. 이 장치는 가정용 냉장고로서 오랫동안 사용되었는데, 가동부가 없어서 유지보수가 필요 없고 소음이 없는 장점이 있다. 그러나 채래식 모델에서 냉각용량이 50W 이하로 매우 작다. 이런 용량으로는 호텔 객실이나 RV차량에 적합하고, 공조 목적으로는 충분하지 않다.

5. 흡수냉동기의 예

아래 그림 13에 가정용 단일압력 흡수냉동기의 예를 보였는데[5], 이 장치는 암모니아, 수소가스 및 물의 세 물질을 사용한다. 표준대기압에서 암모니아는 끓는점이 -33°C 인 기체이지만, 암모니아가 액체에 이르도록 흡수냉동기를 가압한 상태이다. 장치는 밀폐되어 있고, 수소, 물, 및 암모니아가 끊임없이 순환된다.



그림 13. 가정용 흡수냉각기의 보기
(출처: Wikipedia, "Absorption refrigerator")

그림에서 장치의 작동은 다음과 같이 진행된다:

1. 수소가 액체암모니아가 들어있는 파이프에 들어간다.
2. 암모니아+수소가 냉동기 내부의 격실에 들어간다. 부분압 변화가 암모니아를 기화시킨다. 이는 주위에서 에너지를 흡수하여 냉각효과를 야기한다. 암모니아+수소가 내부에서 나와서, 암모니아는 흡수기로 되돌아가서 물에 용해한다. 수소는 자유롭게 상승한다.
3. 암모니아 기체가 응축한다.(수동적 냉각)
4. 뜨거운 암모니아 기체
5. 단열 및 암모니아기체로부터 물의 분리
6. 열원(전기)
7. 흡수기 용기(물+암모니아 용액)

냉각과정은 액체 암모니아가 실온의 증발기에 들어가면서 시작된다. 수소 부분압은 전체 압력을 조절하는데 쓰이는데, 이는 다시 증기압을 조절하고, 따라서 암모니아의 끓는 점을 조절한다. 암모니아가 증발기에서 끓으면 냉동기 내부에서 열을 뽑아내어 필요한 냉각을 제공한다.

다음의 세 단계는 기체암모니아와 수소를 분리하기 위한 것이다. 먼저 흡수기에서 기체혼합물은 상승하는 튜브의 아랫부분에 들어가고, 여기에 위로부터 물이

더해진다. 암모니아가 물에 녹아, 암모니아 용액과 수소의 혼합물이 만들어진다. 수소기체는 흡수기 위에 모이고, 암모니아 용액은 밑으로 흐른다.

두 번째 단계는 암모니아와 물을 분리하는 것이다. 생성기에서 용액에 열을 가하여 물로부터 암모니아를 증류한다. 얼마간의 물 증기와 물방울이 암모니아와 혼재해 있다. 마지막 단계로 분리기에서 이 물을 제거하는데, 이때 혼합물을 구부러지고 장애물이 있는 파이프를 통하여 흘려서 물의 기포들을 부서지게 해서 모아진 물을 생성기로 흘려 보낸다.

마지막으로 순수한 암모니아기체를 응축기에 보낸다. 이 열교환기에서는 뜨거운 암모니아 기체를 실온으로 냉각시키고, 따라서 액화되어 사이클을 다시 시작한다.

6. 결론 및 논의

흡수 사이클은 에너지 절약 측면에서 유리한 점 때문에 미래에 중요한 역할을 할 것이다. 따라서 보다 우수한 성능의 작동유체를 개발하는 것이 매우 중요하다. 흡수사이클의 작동유체를 선정하는 기준은 흡수성능, 결정화 문제, 환경적 요인 및 재료적 요구사항이다. 물은 잠열이 크고 환경친화적이어서 많은 경우 흡수사이클의 냉매로 사용된다. LiBr+물, 물+암모니아가 흡수사이클의 주요 작동유체이고, 여기에 첨가제가 중요한 역할을 한다. 태양에너지, 지열 및 저급의 산업폐수에 대해 작동유체로서 HFC가 유망하다.

References

- [1] Jian Sun, Lin Fu, Shigang Zhang, "A review of working fluids of absorption cycles", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16 (2012) 1899–1906.
- [2] "High-Efficiency Adsorption Chillers", Project Title: "High Efficiency Adsorption Cooling Using Metal Organic Heat Carriers", Project Term: "10/1/10-9/30/13, www.pnnl.gov (BEETIT PNNL Final.pdf)
- [3] Wikipedia, "Heat pump"

- [4] Pongsid Srihirin, Satha Aphornratana, Supachart Chungpaibulpatana, "A review of absorption refrigeration Technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5 (2001) 343–372
- [5] Wikipedia, "Absorption refrigerator"
- [6] Marcriss RA, Gutraj JM, Zawacki TS. "Absorption fluid data survey: final report on worldwide data", ORLN/sub/8447989/3, Inst. Gas Tech., 1988.
- [7] Berestneff AA. "Absorption refrigeration", *Mech Eng* 1949;72:216–20.
- [8] Aphornratana S. Research on absorption refrigerators and heat pumps. *Reric Int Energy J* 1995;17(1):1–19.
- [9] Agarwal RS, Bapat SL. Solubility characteristics of R22-DMF refrigerant-absorbent combination. *Int J Refrig* 1985;8:70–4.
- [10] Ando E, Takeshita I. Residential gas-fired absorption heat pump based on R22-DEGDME pair - Part I: thermodynamic properties of the R22-DEGDME pair. *Int J Refrig* 1984;7:181–5.
- [11] Bhaduri SC, Verma HK. P-T-X behavior of R22 with five different absorbents. *Int J Refrig* 1986;9:362–6.
- [12] Bhaduri SC, Verma HK. Heat of mixing of R22-absorbent mixture. *Int J Refrig* 1988;11:92–5.
- [13] Fatouh M, Murthy SS. Comparison of R22-absorbent pairs for vapour absorption heat transformers based on P-T-X-H data. *Heat Recovery Systems and CHP* 1993;13(1):33–48.
- [14] Murphy KP, Phillips BA. Development of residential gas absorption heat pump. *Int J Refrig* 1984;7(1):56–8.
- [15] Choudhury SK, Hisajima D, Ohuchi T, Nishiguchi A, Fukushima T, Sakaguchi S. Absorption of vapors into liquid films flowing over cooled horizontal tubes. *ASHRAE Trans* 1993;99:81–9.
- [16] Matsuda A, Choi KH, Hada K, Kawamura T. Effect of pressure and concentration on performance of a vertical falling-film type of absorber and generator using lithium bromide aqueous solutions. *Int J Refrig* 1994;17(8):538–42.
- [17] Cosenza F, Vliet GC. Absorption in falling water/LiBr films on horizontal tubes. *ASHRAE Trans* 1990;96:693–701.
- [18] Morioka I, Kiyota M. Absorption of water vapor into a wavy film of an aqueous solution of LiBr. *JSME Int J, Series II* 1991;34(2):183–8.
- [19] Kim KJ, Berman NS, Chau DSC, Wood BD. Absorption of water vapour into falling films of aqueous lithium bromide. *Int J Refrig* 1995;18(7):486–94.
- [20] Benzeguir B, Setterwall F, Uddholm H. Use of wave model to evaluate falling film absorber efficiency. *Int J Refrig* 1991;14:292–6.
- [21] Fujita T. Falling liquid films in absorber machines. *Int J Refrig* 1993;16(4):282–94.
- [22] Andberg JW, Vliet GC. A simplified model for absorption of vapors into liquid films flowing over cooled horizontal tubes. *ASHRAE Trans* 1987;93:2454–66.
- [23] Ramshaw C, Winnington TL. An intensified absorption heat pump. *Proc Inst Refrig* 1988;85:26–33.
- [24] Swallow FE, Smith IE. Vapour absorption into liquid films on rotating discs. School of Mech. Eng., Cranfield Institute of Technology, England.
- [25] Vliet GC, Lawson MB, Lithgow RA. Water-lithium bromide double-effect absorption cooling cycle analysis. *ASHRAE Trans* 1982;88:811–22.
- [26] Altenkirch E, Tenckhoff B. Absorptionkältemaschine Zur kontinuierlichen erzeugung von kälte und waerme oder acuh von arbeit., German Patent 278076, 1911.
- [27] Herold KE, Radermacher R, Klein SA. Absorption chillers and heat pumps. CRC Press Inc, 1996.
- [28] Eriksson K, Jernquist A. Heat Transformers with self-circulation: design and preliminary operational data. *Int J Refrig* 1989;12(1):15–20.
- [29] Platen BCV, Munters CG. Refrigerator, US Patent No. 1,685,764, 1928.