

증기압축 냉동사이클의 대체기술에 대한 고찰

현재 가장 널리 사용되고 있는 증기압축 방식의 기술 적용 한계의 극복 또는 증기압축 방식과 결합하여 그 효용성을 증대시킬 가능성이 있는 대체기술에 대한 현황을 소개하고자 한다.

김 용 찬 / 편집이사

고려대학교 기계공학과(yongckim@korea.ac.kr)

황 윤 제 / 편집위원

LG전자(hyj@lge.com)

머리말

2004년 증기압축 냉동사이클을 이용한 가정용 및 상업용 공조기 세계시장 규모는 5000만대를 넘어 지속적으로 성장하고 있다. 세계시장 규모가 말해 주듯 증기 압축 방식 에어컨은 사용하기 편리하고 저렴한 가격으로 인하여 인류에게 가장 보편적인 냉난방 방식으로 인식 되어져 왔으나 지속적인 생산기술의 발달과 고효율, 저소음화 기술개발 등으로부터 멀지 않은 장래에 국가나 기업간의 기술 차별점이 존재하지 않는 "기술 포화상태"에 도달할 것으로 생각된다. 따라서, 다양화 및 복합화, 그리고 에너지 절약적이고 환경친화적 제품개발의 요구 등에 맞추어 제품의 국제적인 경쟁력을 확보하기 위해서는 증기압축 냉동사이클을 대체하거나 복합적인 방식을 이용하여 냉난방 기술 경쟁력을 갖출 수 있는 상업화 연구가 절실히 요구된다.

기존에 여러 종류의 대체기술들이 제시되어 있지만, 일부는 아직도 실용화가 어려운 기술도 있고, 일부는 기술이 점차 발전되어 상업화 가능성이 높은 기술들도 존재한다. 따라서 향후 연구개발을 위하여 우선적으로 실현 가능한 기술과 미래기술을 분류할 수 있다면 단계적인 연구의 방향을 설정할 수 있다. 이를 토대로 새로운 제품개발 전략을 작성하여 꾸준히 연구해 나간다면 냉난방기기 시장에서 국가 경쟁력을 확보하고 시장 주도권을 잡을 수 있으리라 예

상된다. 전 세계적으로 많이 연구가 되고 있고 미래에 실현 가능성이 높은 대체기술들에 대하여는 관점의 차이에 따라 많은 논의가 있을 수 있으나 여기에서는 표 1과 같이 분류하여 접근하고자 한다. 본 연구에서는 자기냉동, MHHP 및 CPL에 대하여 구체적으로 기술의 특성, 응용분야, 구현가능성에 대하여 설명하고, 나머지 기술은 기술난이도, 효율, 가격 등에 대하여 종합적으로 간단히 비교하고자 한다.

<표 1> 미래 대체기술의 분류

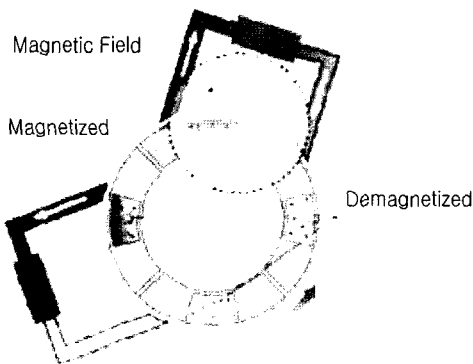
대체기술	
Vapor Compression System	Rankine Cycle HP
Mechanical Work	Stirling Cooler
	Malone Refrigeration
	Brayton Refrigeration
Electric / Magnetic	Thermoelectric Refrigeration
	Magnetic Cooling
Chemical	Metal Hydride Heat Pump
Acoustic	Thermoacoustic Refrigeration
IAQ	Desiccant System (solid, liquid)
Phase Change	Heat Pipe
	Capillary Pumped Loop
Auxiliary Device	Ejector
	Vortex Tube

자기냉동(Magnetic Cooling)

자기 열량효과를 이용하는 자기냉동시스템은 증기 압축 냉동시스템의 핵심 부품인 압축기 및 화학냉매를 사용하지 않기 때문에 기계적인 손실들이 발생하지 않고 오염 물질 또한 발생하지 않는다는 장점이 있으므로 몇 가지 기술적인 문제를 극복하고 시장에서의 경제성을 갖춘다면 상업적으로 큰 잠재력을 지녔다고 할 수 있다. 자기냉동은 자성재료에 자기장을 걸어주면 가열되고, 자기장을 제거하면 냉각되는 자기열량효과를 이용해서 냉동효과를 생산하는 것이다.

그림 1은 Astronautics사에서 개발한 자기냉동 방식의 개념도이다. 링처럼 보이는 것이 회전하면서 자기 열량효과를 만드는데, 재료가 자기장내에서는 자기화되어 가열되고, 자기장을 벗어나면 냉각되어 주위로부터 열을 흡수하고, 다음 자기장에 들어가면 자기화 된다. 이러한 과정을 반복하면서 냉동효과를 얻는다. 위에서 말하는 자기 열량효과란 가돌리늄(gadolinium)과 같은 자성재료가 자기장 속으로 들어가면 자기화(magnetized)되며, 자유롭게 존재하던 자성 재료들의 원자배열이 강제적으로 정렬되어 가열의 원인이 되고, 자성재료가 자기장을 벗어나면 원자들은 다시 무질서(randomize)하게 되고 주변으로부터 열을 흡수할 수 있게 되어 냉동효과를 창출하는 것을 말한다.

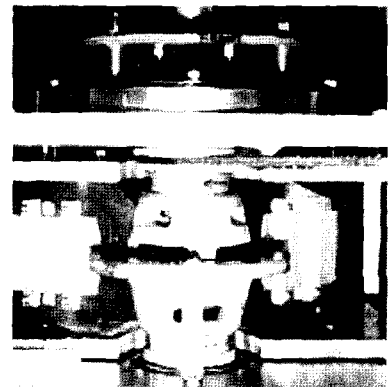
자기냉동 원리는 1920년대에 처음 밝혀졌는데 당



[그림 1] 자기냉동 개념도

시 초전도 자석으로 강한 자기장을 걸어 냉각효과를 얻는 장치가 개발됐지만 초전도 자석이 -263℃의 극저온에서 작동하기 때문에 활용도가 낮았다. 이에 비해 Ames 연구소는 1996년 가돌리늄 합금이 상온에서 자기냉동 효과를 보인다는 것을 밝혀내 상용화에 한발 더 다가갈 수 있게 되었다. 자기냉동기술 최초의 응용은, 청정연료로 사용하기 위해 수소가스를 액체로 응축시키는데 사용되었을 것으로 생각되는데 수소의 액화는 총 15단계의 냉각단계를 가진 냉동기들이 있어야 하고, 20 K (-253℃) 정도의 온도로 만들어야 한다. 즉 자기냉동기술이 실용화 된다면, 수소액체 생산에 필요한 큰 온도 차이를 쉽게 만들 수 있을 것이다. 이러한 자기냉각을 사이클에 적용하는 경우를 생각해 보면, 자성재료가 열역학적으로 어떤 특성을 갖는가가 중요하게 된다. 즉, 이상기체의 경우와 유사하게 이상적인 자기 상태량들은 온도 변화에 따른 엔트로피의 변화가 자기 강도에 관계없이 일정한 기울기로 변한다면 자기열량 효과를 유용하게 이용할 수 있다.

자기냉동의 적용 예로서 미국 에너지성(DOE) 주관으로 Ames Laboratory(K. Gschneidner Jr), Astronautics Corp. of America(C. Zimm) 공동으로 연구가 진행되고 있다. 그림 2는 Astronautics사에서 제작한 시제품의 형상이고 표 2는 그 결과를 나타낸 것으로 전체적으로 3.0의 성능계수를 가진다. 그러나 이러한 방식이 상용화되기 위해서는 아직도 많은 연구 과제가 남아 있는데 주로 영구적인 자성



[그림 2] Magnetic refrigerator

을 띄는 금속의 개발, 저렴한 가격의 재료 개발, 설계의 효율성문제 극복, 자성재료 내의 효과적인 열교환 및 가정용으로 사용할 경우 자기장이 인체에 주는 영향에 대한 연구 등이다. 그러나 Astronautics사에서 자체적으로 개발한 AMR 이라는 냉장고용 시제품출현과 DOE지원 연구가 계속되고 있는 것으로 보아, 기존의 냉장고와 에어컨 같은 제품에서도 사용이 가능할 날이 멀지 않았음을 알 수 있다.⁽¹⁾ 즉, 자성재료에 대한 연구와 위에 제시한 몇 가지 기술적인 문제를 극복하면, 제품(음식)저장 및 프로세서, 에어컨디셔닝(liquor distilling, grain drying, waste seperation, treatment systems) 등과 같은 영역에서 활용이 기대된다. 또한, Anokin 등에 의하면, 하드 자기디스크의 substrate냉각에도 효과적이라고 한다.⁽²⁾ 자기냉동과 가스냉동을 혼합한 하이브리드 극저온 냉동기(hybrid cryogenic refrigerator)관한 연구를 수행한 Yayama 등에 의하면, 이 두 가지 기술을 혼합하여 보다 향상된 냉동력을 확보할 수 있을 것으로 전망하였다.⁽³⁾ 일본 교토대학 대학원 공학연구과의 와다히로후미는 실내온도에서 자기열량 효과가 큰 자성체로 망간, 비스, 안티몬의 화합물을 제시하였는데 이것으로 실온에서 사용 가능한 자기냉동 기술이 가까운 시간 내에 실용화 될 수 있는 가능성을 보여 주었다.⁽⁴⁾ 또한 도시바 등은 영구자석을 사용해 영도이하까지 내릴 수가 있는 “자기냉동시스템”을 세계 최초로 개발했다고 2002년 10월자 일본 전기 신문에 발표하였다. 이러한 동향으로 부터 자

기냉동기술이 가까운 미래에 상용화되어 증기압축 방식을 일부 대체할 날이 멀지 않았음을 알 수 있다.

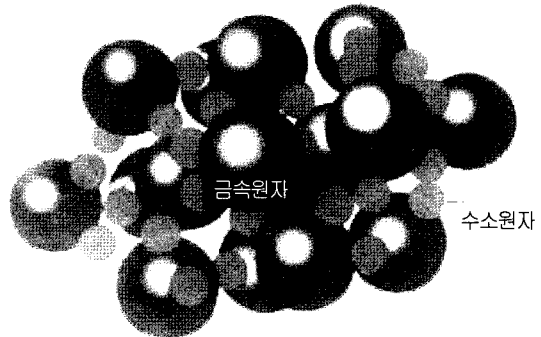
수소저장 합금 히트 펌프 (Metal Hydride Heat Pump : MHHP)

MHHP는 수소저장 합금에서 수소의 흡수 및 방출시 일어나는 흡열반응과 발열반응을 이용하여 냉방 및 난방에 이용하는 장치로서 현재 증기압축 냉난방 시스템의 일부 대체영역에 대하여 연구 중이다. MHHP는 수소저장 합금에 큰 영향을 받기 때문에 MHHP의 특성 및 제품화의 타당성을 검증하기 전에 수소저장 합금의 특성에 대해서 알아볼 필요가 있다.

수소는 상온에서 기체상태이므로 저장하거나 운반하기 위하여 200 kg/cm² 정도의 고압 용기를 사용하여 액체수소로 만들어야 하는데, 저온까지 냉각시키는 에너지가 필요하고, 저장에는 매우 비싼 초저온 용기가 필요하게 되므로 수소를 금속에 저장하는 방법을 생각하게 되었다. 수소 원자의 크기는 원자 가운데 가장 작아 그림 3처럼 합금 원자가 만드는 격자 틈새에 들어갈 수가 있다. 이 수소 화합물은 수소와 금속 원자가 강력하게 결합되어 있기 때문에 매우 높은 에너지를 주어야만 수소를 방출시킬 수 있는 반면 대부분의 금속은 수소와 잘 결합하지 않는다. 만약 수소와의 결합력이 큰 금속과 결합력이 약한 금속으로 합금을 만들어 수소와 반응시키면 수소

<표 2> Astronautics사 시제품의 사양 및 주요 성능

Stage/property	Freezer	Refrigerator	Total
Cold side temp(°F)	-12	-1	-12
Hot side temp(°F)	-1	32	32
Fluid	Ethylene Glycol	H2O	N/A
Pump work rate(W)	1.3	6.4	7.7
Cooling power(W)	40.0	127.0	120.0
Heat rejection(W)	47.0	160.0	160.0
Electric Power Required, W	6.7	32.7	39.4
COP	6.0	3.85	3.0
Efficiency of Carnot, %	51.4	49.0	N/A



[그림 3] 수소저장 합금 구조

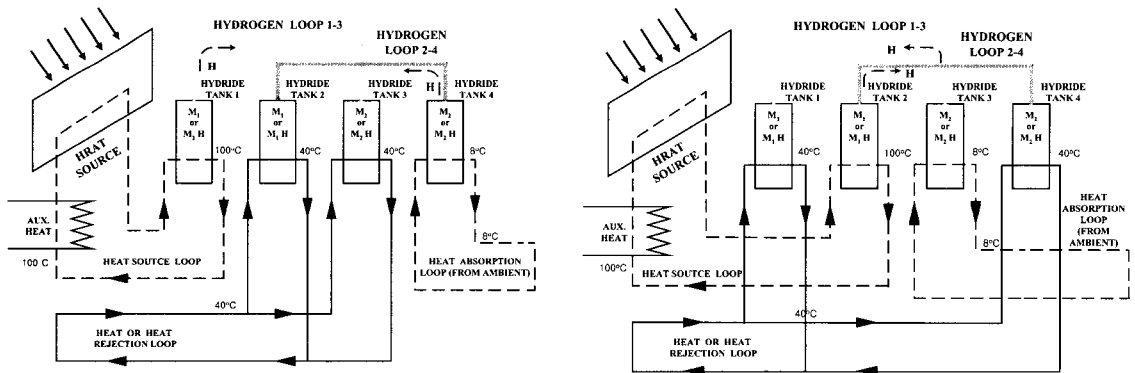
는 결합력이 큰 것과 약한 것으로부터 동시에 영향을 받기 때문에 수소는 매우 느슨한 형태로 이 합금과 결합을 하게 되며 이런 상태에서 압력의 변화를 주어 쉽게 수소가 흡수되거나 방출되도록 하는 것이다. 이런 원리로부터 수소저장 합금은 반드시 서로 다른 두 가지 성질을 갖는 금속으로 만들어지는데 상용화에 가장 가까운 것은 티탄-철 합금, 란탄-니켈 합금, 마그네슘-니켈 합금, 티탄-망간 합금이다.

수소저장 합금으로부터 수소를 얻으려면 합금과 접하는 수소 가스의 압력을 올려 주거나, 가스 온도를 내려주면 된다. 한 예로 [Mg-5%Ni] 즉, 니켈을 5% 함유한 마그네슘 합금의 경우 불과 100 g 밖에 안 되는 합금을 380°C에서 3기압 이상의 수소 가스에 닿게 하면 수소 가스를 80리터나 흡수하게 된다. 금속의 수소화는 열의 이동을 수반하는 가역반응이므로 이러한 특성을 이용하면 냉난방시스템에 응용을 생각할 수 있다. 즉, 수소저장합금 장치에 열을 보내면, 수소를 방출하므로 방출시킨 수소를 다른 장치에 저장해 두었다가 필요할 때에는 수소저장 합금의 장치로 보내어 흡장시키면 발열하기 때문에 송풍장치와 짝지우면 난방장치가 된다. 반대로, 수소저장 합금에서 수소를 방출시키면 흡열(=냉각)반응이 일어나 냉방을 위한 냉원원이 된다. 또한, 수소저장 합금의 종류를 달리하여 여러 가지 단계의 온도로 이루어진 열원을 얻을 수 있는 장점이 있다.

그림 4는 수소저장 합금을 이용한 히트펌프의 개념도를 보여준다. MMHP의 경우 수소 이송의 구동력으로 태양열을 비롯한 폐열을 이용한다. MMHP는

두 개의 서로 다른 수소저장 합금을 한 쌍으로 하여 한쪽은 열을 받아들여 수소를 방출하고 다른 한쪽은 방출된 수소를 흡수하면서 열을 방출하게 되므로 방출된 열을 난방열로 이용할 수 있게 되는 것이다. 그림 4에서 수소저장 탱크 1과 2는 서로 같은 종류의 수소저장 합금을 이용하여 만들어진 것이고 탱크 3과 4 역시 탱크 1, 2와 다른 서로 같은 종류의 수소저장 합금을 이용하여 만들어진 것이다. 그림에서 보듯이 탱크 1은 고온의 폐열을 흡수하여 수소를 방출하게 되고 방출된 수소는 수소 이송관을 통해 탱크 2로 이동하게 된다. 탱크 2는 수소를 흡수하면서 40°C 정도의 열을 방출하게 되고 이 열을 이용하여 난방장치로 이용하게 된다. 동시에 탱크 4는 외기로부터 열을 흡수하여 수소를 방출하게 되고 방출된 수소는 탱크 2로 이동하게 된다. 이 부분에서도 역시 탱크 2에서 방출된 열을 이용하여 난방으로 이용할 수 있다. 시간이 지남에 따라 탱크 1과 4에 저장되어있던 수소의 양은 점차 줄어들고 수소의 이송량 역시 감소하게 된다. 따라서 탱크 2와 3에서 발생하는 난방열이 감소하게 된다. 이 때 폐열을 탱크 2로 보내고 탱크 3을 대기로 노출시키면 같은 원리로 탱크 1과 4에서 난방열을 얻을 수 있게 된다.

MHHP는 어느 정도의 불연속성을 갖지만 지속적인 난방열을 공급할 수 있다. 그러나 MHHP는 열에 의해 수소를 이송시키기 때문에 구동력이 약하며 수소저장 합금내의 수소를 50~60%밖에 이용할 수 없을 뿐 아니라 응답특성 역시 빠르지 못하여 임의로 운전조건을 변경시키기가 용이하지 못하므로 압축



[그림 4] MMHP의 사이클 구성 예⁽⁵⁾

기를 이용하여 수소를 이동시키는 방법이 고안되었다. 그림 5는 압축기에 의해 구동되는 MHHP (compressor driven MHHP, CDMHHP)의 개략도를 나타낸다. MHHP가 Regeneration Hydride와 Refrigeration Hydride의 서로 다른 수소저장 합금으로 구성되는 반면에 CDMHHP는 고온부와 저온부가 모두 동일한 수소저장 합금으로 만들어진다. 따라서 연속적인 냉방 또는 난방열을 얻기 위해서 MHHP는 2쌍의 수소 저장 합금의 순차적인 운전이 필요한 반면 CDMHHP는 간단한 밸브조작에 의해서 연속적인 냉방 또는 난방운전을 할 수 있다.

CDMHHP의 운전특성을 간단히 살펴보면 운전시간이 증가함에 따라 수소의 이송량이 감소하고, 이로 인해 출력용량이 감소하므로 운전의 최적 주기를 찾아 설계해야 한다. 또한, 초기 충전량이 증가함에 따라 수소의 이송량도 증가하여 용량이 증가하지만, 충전량이 너무 많을 경우 고압축의 압력이 과도하게 높아져 압축기의 체적효율을 감소시키기 때문에 오히려 용량이 감소하게 되는 특성이 있다. MHHP의 장점은 구동부분이 없어 고장이 적다는 것이고 단점으로는 연속적인 운전이 불가능하고 설계점 이외의 용량변화에 대응하기가 힘들다는 것이다. 뿐만 아니라 응답특성이 빠르지 않기 때문에 소형시스템의 직접적인 냉난방장치로는 부적절하다고 할 수 있다. 하지만 발전소 및 기타 폐열을 이용하여 중대형 규모의 냉난방장치로는 충분히 적용 가능성이 있다. 특히 흡수식 열펌프 등을 이용한 난방시스템의 경우 획득 가능한 고온수의 온도가 크게 제한되지만

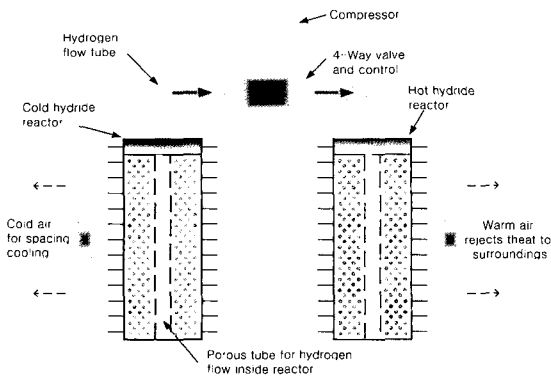
MHHP의 경우는 높은 온도의 고온수를 쉽게 얻을 수 있다.

CDMHHP는 압축기 구동에 의한 강제적인 수소의 이송을 통해서 냉난방 열을 획득하는 장치로서 일반적인 증기압축시스템과 가스구동 열펌프시스템과 비교할 수 있는데 냉방의 경우 일반적인 증기압축시스템과 거의 비슷하거나 더 높은 성능계수를 보이며 난방의 경우도 마찬가지다. 가스구동 열펌프와 비교하면 냉방의 경우는 비슷한 수준이나 난방의 경우는 가스구동 열펌프의 경우 폐열을 난방의 열원으로 사용할 수 있기 때문에 가스구동 열펌프에 비해서는 효율성이 낮은 측면이 있다. 증기압축시스템이나 가스구동 열펌프의 경우 항상 일정한 상태로 용량이나 공기 온도를 내보낼 수 있지만 CDMHHP의 경우 주기적인 운전을 해야 하며 수소저장합금 내의 수소압력 및 수소량에 따라서 출력이 달라지기 때문에 일정한 값의 출력을 낼 수 없다. 따라서 쾌적성을 고려한다면 공기와의 직접적인 열교환을 통한 냉난방장치로의 이용보다는 물을 가열 또는 냉각하여 공조공간에서 물과 공기를 열교환하는 방식으로 냉난방에 이용하는 것이 바람직하다. 이런 방식을 택할 경우 CDMHHP의 주기적인 운전에도 불구하고 공조공간 내에서는 거의 일정한 상태의 냉난방 열량을 내보낼 수 있다.

이상을 요약하면 MHHP는 대용량 시스템에서 고온의 폐열회수용으로 사용될 수 있으며 CDMHHP는 가정용 소용량 냉난방시스템으로 적용가능하고 현재 사용중인 증기압축시스템 만큼의 용량을 보일 것으로 예상되며 더 좋은 열효율을 보이기 위해서는 고효율 압축기 개발 및 Reactor의 열전도성을 증가시키는 기술이 필요하다. 뿐만 아니라, cycle time, 초기 수소 충전량, reactor의 크기 및 최적의 수소 이송량에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

모세관 구동 루프 (Capillary Pumped Loop)

모세관 구동 루프(capillary pumped loop, CPL)는 증발 잠열을 이용하여 열전달량을 극대화할 수 있어 핀(fin)에 의한 단순 열전도를 이용하는 냉각시스템보다 수십 배의 열전달 효과를 얻을 수 있다. 또한 액체의 증발시 일정 압력하에서 증발온도가 일정하



[그림 5] CDMHHP 사이클 개념도

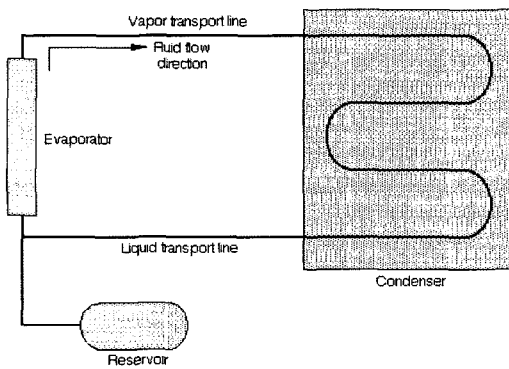
므로 온도조절이 용이한 모세관 효과를 구동력으로 하는 냉난방 시스템에 적합하다.

CPL은 미세 중력장(micro-gravity environment)에서 전력의 소모를 감소시키고, 전자시스템에서 발생한 열을 공간 라디에이터로 전송하여 방출하기 위한 시스템으로 미항공우주국(NASA) 루이스연구소(Lewis Research Center)의 Stenger에 의해 처음으로 제안되었다. 본 방식의 작동원리는 그림 6에서와 같이 증발부(evaporator zone), 증기수송관(vapor transport line), 응축부(condenser zone), 액체 수송관(liquid transport line), 저수조(reservoir)로 이루어져 있다. 증발부는 열을 받아 작동유체를 증발시키고 응축부는 열을 방출하고 유체를 응축시킨다.⁽⁶⁾ 증기 수송관은 증발부에서 증발된 증기를 응축부로 운송하고 액체 수송관은 응축부에서 응축된 액체를 증발부로 전달한다. 저수조는 작동유체의 온

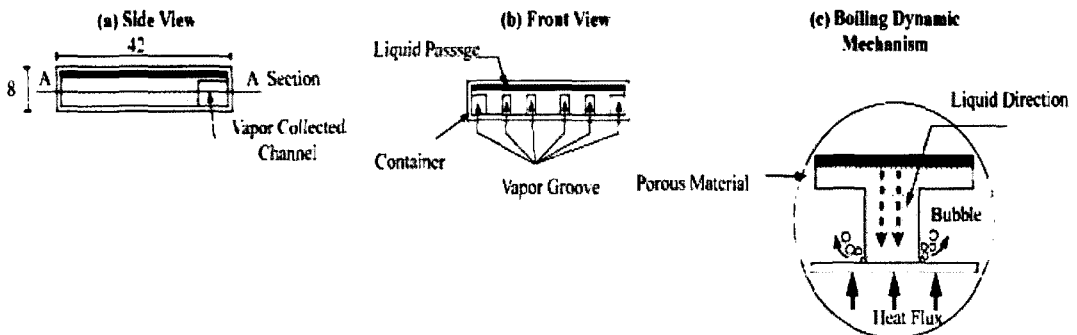
도를 조절하고 액체를 저장한다. 다공 물질을 적용한 냉각장치의 작동원리는 증발부에서 흡열을 할 때 위크(wick)에서 포화액체는 증발하고 그와 동시에 작동유체를 이동시키는데 필요한 모세관 압력을 생성하기 위하여 수증기/액체 표면에서 메니스커스(meniscus)가 생성된다. 증발부에서 생성된 수증기는 응축부로 전달되고 응축부에서는 발열이 일어나 수증기가 응축된다. 응축된 액체는 증발부에서 생성된 모세관 압력을 이용하여 증발부로 주입되는 사이클을 형성한다.

그림 7과 8은 컴퓨터 중앙처리장치(CPU)와 같은 전자장비의 칩을 일정한 온도로 냉각시키기 위한 증발 및 응축 개념도이다.⁽⁷⁾ CPU에서 생성된 열은 증발기 벽으로 전달되어 내부 벽 그루브상의 유체는 기화가 된다. 다공성 물질은 기화가 발생하는 곳의 액상을 흡수하는 데 이용된다. 비등 메커니즘은 그림 7의 (C)와 같다. 여기서, 다공성 물질은 $1.05 \times 10^{-5} \text{ m}$ 의 다공 지름과 $6.0 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 의 투과성을 갖는데 작은 다공성을 선택해야 하는 이유는 이것이 펌핑 효과를 증대시키기 때문이다. 그러나, 펌핑 능력을 증가시키면서, 순환과정 동안의 마찰저항은 감소시켜야 하기 때문에 적합한 다공지름의 선택은 매우 증대하고도 어려운 문제이다.

그림 8은 응축기의 단면을 나타낸다. 그림에서 보듯이 응축기에는 다섯 개의 채널이 있다. 바깥쪽의 2개의 채널은 냉각을 위해 쓰이는 것이고, 나머지 세 개의 채널은 작동유체가 응축기를 통해 지나가도록 설계되어 있다. 응축기와 증발기는 매끄러운 반투명의 지름 3 mm 실리콘 튜브로 연결된다. 열이 순환



[그림 6] CPL 사이클 개념도



[그림 7] CPL 형상과 증발 과정



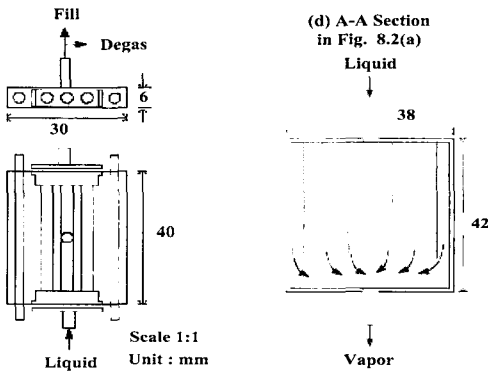
증기압축 냉동사이클의 대체기술에 대한 고찰

루프 안에 유입되면, 다공성의 물질의 접촉면에서 액상의 증발현상이 일어나고 기체상의 통로인 증기 공급관을 통해 흐르고, 결국 응축기로 들어가 열을 방출한다. 응축된 액상의 필름은 액체 공급관을 통해서 다시 증발기로 들어가게 된다.

CLP 사이클을 요약하면 높은 열제거 효과, 온도조절의 용이함, 별도의 구동부가 필요하지 않음(only capillary force), 냉각장치의 미세화 가능 및 전력소모 및 진동, 소음 감소 (fan 불필요) 등의 장점에 대하여 시스템 설계상의 어려움(초소형), 고액의 제작 비용 (각종 센서 및 고가 자재), 정확한 실험의 어려움

움 (측정장비 및 센서 등의 불확실성) 및 작동유체의 각종 유동한계 등의 단점이 있다. 이를 유사 시스템과 비교하면 표 3과 같다.

최근 CPL에 대한 연구동향은 소형 전자제품 적용으로 초점이 맞추어지고 있다. 규모가 큰 시스템에서의 가능성은 각종 실험에서 나타났으나 소형제품으로 적용성은 아직까지 확실한 결과물이 없는 실정이다. 가장 커다란 이유 중의 하나는 소형화된 CPL 시스템 내에서의 유동에 대한 불확실성이다. 소형제품으로의 적용을 위해서 모세관력에 영향을 미치는 위크의 구조개선, 증발기 부분에서 유동의 역류방지 및 적절한 유량의 유입과 방출을 위한 이론적인 접근이 필요하다. 전체적으로 상품화 관점에서 본다면 우선적으로 구동력을 적절하게 제어할 수 있는 기술력이 필요하며 이를 바탕으로 시스템의 성능을 증대시킬 수 있는 방법에 대한 지속적인 연구 및 실험이 필요하다.



[그림 8] CPL 응축기의 형상

기술의 종합 평가 분석

본 절에서는 전 세계적으로 많은 연구가 진행 중인 실현 가능한 대체기술들에 대하여 기술구현 난이도, 고효율화 가능성, 경제성 등에 대하여 종합적으로 비교 검토하고자 한다.

<표 3> CPL 유사시스템의 비교

	적용범위	장점	단점
Heat Pipe	다양한 적용범위	1. 구동부 불필요 2. 상변화를 이용하기때문에 작은 온도차로도 높은 열전달을 발생	1. 국한된 연구 - Wick 구조/형태 - 액체와 증발기체 간의 향류로 인한 효율향상에 관한 연구
Thermosyphon	CPU 냉각 부터 건물 공조 시스템	1. 증발부와 응축부의분리를 통한 먼 거리 열 이송에 효과 적임	1. 중력을 이용한 구동력을 사용함에 따른 높이의 제약
LHP	소형 시스템	1. Heat Pipe에 비해 유동, 열 저항을 줄일 수 있음 2. 모세관한계 및 비등 한계에 의한 열수송 억제완화 3. 생산과정 단순(력 삽입없음)	1. 체계화 안 된 설계기술 2. 제작에 필요한 정밀가공 기술의 부재 3. 제작에서 경제성 확보를 위한 공정개선의 부재
CPL	소형 시스템	1. 구동부 불필요 2. 냉각장치 미세화가능 3. 전력소모 및 진동, 소음 감소	1. 각종 유동한계 2. 시스템 설계의 어려움 3. 유동해석의 이론적 접근이 어려움

기술구현의 난이도

상품화 단계까지 가기 위해 극복해야 하는 기술과제를 정리하고 그 기술을 극복하기 위해 어느 정도의 어려움이 있을까를 고찰한 결과는 아래 표 4와 같다. 증기 압축 사이클의 난이도를 L(low)로 기준하여 대체기술의 난이도를 상대적으로 평가하였다.

고효율화의 가능성

성능은 소비전력(투입된 에너지)에 대한 냉방능력(흡수한 열량)으로 정의하였고, 비교를 위하여 carnot cycle의 COP에 대한 각 시스템들의 COP 비를 기준으로 고효율화의 가능성을 평가하였다. 표 5는 증기압축 사이클의 효율을 M(moderate)로 기준하여

〈표 4〉 기술구현 난이도

대체기술	개발 필요기술	난이도
Rankine Cycle HP	대체냉매 개발, 고효율 시스템 개발	L
Stirling Cooler	윤활, 베어링문제, 열교환 면적에 따른 불용체적 증가	H
Malone Refrigeration	실링 손실, 고정밀의 가공 요구, 작동유체 개발	H
Brayton Ref.	Compact 열교환기 개발	H
Thermoelectric Ref.	소재개발, 대용량시 낮은 효율문제	M
Magnetic Cooling	초전도 물질 개발 및 값싼 자성재료의 개발	H
MMHP	저가의 수소저장합금과 고효율 압축기 개발	H
Thermoacoustic Ref.	열교환기 면적 확대 및 음향압축기 효율개선	H
Desiccant System	부품 비용(Desiccant, 전열교환기), 재생열원문제	M
Heat Pipe	Wick 및 제작방법 개발, 소형화 시에 양산성문제	M
CPL	Wick 및 제작방법 개발, 특허회피문제	M
Ejector	부하조절이 가능한 ejector 설계, 시스템 매칭	M
Vortex Tube	Vortex tube 사용에 따른 시스템 성능 검증	M

* L: Low, M: Moderate, H: High

〈표 5〉 고효율화 가능성

대체기술	효율특성	성능
Rankine Cycle HP	Carnot 사이클의 28%수준(기존 가정용 에어컨)	M
Stirling Cooler	Free Piston Stirling Cooler기술로 높은 효율 달성	L
Malone Refrigeration	고효율, 대용량 공조장치에 적합, 현재 실험실 수준	L
Brayton Ref.	대용량에서 효율이 좋음	L
Thermoelectric Ref.	저효율(Carnot의 1/5~1/10), 소재 개발시 1/2수준	H
Magnetic Cooling	고효율(기계적 손실 없음), Carnot의 50~75%수준	L
MMHP	낮은 COP(열손실), CDMHHP는 경쟁력 존재, 폐열이용가능	M
Thermoacoustic Ref.	유효온도차를 유발하기 위해 높은 압력차 필요	H
Desiccant System	재생열원에 의한 효율저하 → 폐열이용 극복	H
Heat Pipe	열교환기에 적용하여(60% 향상) 시스템효율 향상	M
CPL	미세 체적 유동, wick 소재개발로 효율 향상	M
Ejector	냉매유량 증가 이용 COP향상가능, 부하 대응능력미흡	M
Vortex Tube	냉매유량 증가 이용 COP향상가능, 부하 대응능력미흡	M



<표 6> 가격경쟁력 비교

대체기술	가격경쟁력 특징	비용
Rankine Cycle HP	시장 성숙기(대량 생산)로 가격 경쟁력 유지	H
Stirling Cooler	Moving part가 적으나, 상온에서 열전달 면적 증가 필요	H
Malone Refrigeration	Moving part가 적으나, 고밀도 정밀가공이 필요	H
Brayton Ref.	제조비용, 유회비용이 높고, 대형 열교환기 필요	H
Thermoelectric Ref.	소재비용 높음(용량 대비 가격이 높음)	L
Magnetic Cooling	자성물질 가격이 전체 시스템의 cost를 좌우	L
MMHP	수소저장물질의 가격, 저가의 수소이송 압축기 개발	L
Thermoacoustic Ref.	Acoustic comp.와 resonant cavity가격에 좌우	L
Desiccant System	부품가격 고가(Desiccant Wheel, 전열교환기 등의 가격)	M
Heat Pipe	소재 및 제조비용(소형화 할 때) 높음	M
CPL	Wick 소재개발 및 제조공정 개선으로 cost down가능	M
Ejector	부품 가격으로 cost 소폭상승	H
Vortex Tube	부품 가격으로 cost 소폭상승	H

대체기술의 고효율화 가능성을 상대적으로 나타낸 것이다.

제작비의 경쟁력 확보 가능성

제작비 경쟁력은 시스템을 구성하기 위해 투입되는 비용과 시스템을 설치하는 데에 필요한 비용, 시스템을 유지 및 보수하는 데에 필요한 비용을 모두 포함하는 관점에서 분석하였으며, 상용화되었을 때의 대량생산으로 인한 부품의 가격절감도 고려하여 고찰하였다. 표 6은 증기압축 사이클의 가격경쟁력을 H(high)로 기준하여 대체기술의 제작비경쟁력을 상대적으로 평가하여 나타내었다.

결론 및 향후 전망

모든 요구를 완전히 만족하는 냉동공조시스템이란 불가능하므로 각 용도에 맞는 수 많은 냉동공조 시스템이 존재하게 되었으며 인류는 다양한 기술을 적용, 응용하여 경제성과 편리성을 갖출 수 있는 시스템을 위하여 노력해 왔다. 이번에 소개한 몇 가지 기술과 표에만 언급한 기술이 그나마 조금 더 가까운 미래에 실현될 가능성이 높은 방식이라고 판단하여 중요도를 분류해 보았다. 연구자에 따라 이에 대한 다른 관점이 있을 수 있으며, 환경대응성 및 용량에

따른 경제성 변화 등 추가의 많은 연구가 진행될수록 그 중요도는 바뀔 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

1. http://dyon.postech.ac.kr/~htsc/Intro_SC/docu4/401.html
2. E. V. Anokin, M. M. Yang, M.T. Sullivan, J. L. Chao and J. W. Ager III, "Effects of substrate cooling in hard magnetic disk sputtering process on protective overcoat and magnetic layer properties", PII: S1359-6454(97), 00452-X.
3. H. Yayama, Y. Hatta, A. Tomokiyo, "Hybrid cryogenic refrigerator combining magnetic and gas-cooling system", Physica B 284-288(2000), 2016-2017.
4. <http://www1.kisti.re.kr/~trend/Content491/physics04.html>
5. <http://www.iahe.org/>
6. <http://www.ecn.purdue.edu>
7. The application of a capillary pumped loop for cooling of electronic components, Applied Thermal Engineering, Vol. 21, No. 17, 1739-1754. (❁)