

자기냉동

Magnetic Refrigeration

정 상 권

Sang Kwon. Jeong

미국 MIT 핵융합연구소



· 1962년 생
· 자기냉동, 저온공학, 열전달 및 냉동공학, 초전도자석(superconducting magnet)의 연구 개발 및 응용 분야에 관심을 가지고 있다.

1. 서 론

가스를 기계적으로 압축하면 그 가스의 온도가 올라가고, 외부와 열평형을 이루고 있는 고압의 가스가 갑자기 일을 하며 팽창을 하면 온도가 내려간다. 이렇게 잘 알려진 압축식 냉동기의 원리처럼, 어떠한 물질은 자기적으로(magnetically) 압축과 팽창을 시켜 그 온도 변화를 일으킬 수 있는데, 즉 Curie 온도(자성체가 ferromagnetism으로부터 paramagnetism으로 천이하는 온도) 부근의 상자성체(paramagnet)는 강한 자기장을 걸어 줌으로써 온도를 높일 수 있고, 또한 자기장을 낮춤으로써, 그 물질 스스로의 온도는 낮아지고, 주위로 부터 열을 흡수하게 할 수 있다. 이러한 원리로부터 탄생된 자기냉동(magnetic refrigeration)은 물질의 자기열 효과(magneto-caloric effect)를 이용하여 저온을 생성시키는 방법으로서, 대개 지난 60년간 보통의 압축식 냉동기로는 불가능한 1K(약 -272°C) 이하의 극저온을 만들기 위하여 개발되었다. 그러나, 최근 10여년 동안은, 자기 냉동기의 높은 열역학 효율

과 기계적 내구성이 인정되어, 1K 이상의 온도범위, 심지어는 상온까지도 온도범위를 확장시켜서, 공학적으로 중요한 의미를 갖는 연속작동용 자기냉동기에 관한 연구도 진행되고 있다.

자기냉동의 필요성을 언급하기 위하여 다음과 같이 일반적인 냉동(refrigeration) 혹은 냉각(cooling)의 목적과 응용분야를 먼저 살펴보기로 한다.

(1) 물질을 낮은 온도로 유지함으로써 미생물의 번식을 방지. 즉, 음식물, 고기, 혈액, 생체조직, 정자, 꽃가루, 씨, 효소 등의 저온 보관

(2) 산소와 질소 분리를 위한 공기 액화, 천연가스로 부터의 헬륨(helium)분리 같은 가스분리를 위한 냉각 액화.

(3) 인간의 쾌적한 생활조건을 마련하는 공기조화

(4) 추진체용 고에너지 밀도저장을 위한 액체 수소등의 고압저온 액화

(5) 물질의 근본적인 성질을 바꾸어 초전도성(superconductivity), 초유체성(superfluidity)을 가능하게 하기 위한 냉각

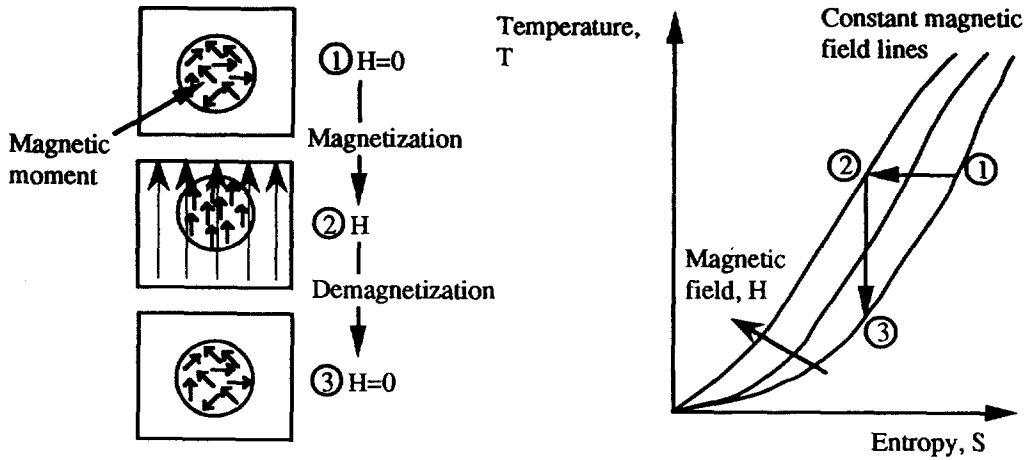


그림 1 단순단열비자화(open cycle adiabatic demagnetization) 냉각법

(6) 외부의 열적교란(thermal background noise)을 줄여 소자의 감지성을 높이기 위한 소자냉각(적외선소자, X-선 감지기 등).

(7) 국부 냉각을 이용한 수술 방식(cryosurgery).

(8) 우주의 환경조건을 모사하는 우주모사(space simulation).

(9) 레이놀즈 수(Reynolds number)를 높이기 위한 저온풍동(cryogenic wind tunnel).

(10) Maser, Laser 등 전자회로의 성능향상을 위한 전자장치 냉각

(11) 입자 가속기의 고에너지 입자 탐지를 위한 냉각 장치

위에 열거한 여러 응용분야 중, 자기 냉동은 원칙적으로 목적하는 온도에서, 자기열효과를 갖는 적당한 물질만 있으면, 모든 분야에서 가능하지만, 아직은 압축식 냉동보다 더 장점이 많은 극저온의 (5), (6) 응용분야에서 더 많은 연구가 되고 있다고 볼 수 있다.

역사적으로 고찰해 보면, 1926년에 처음으로 Giauque¹⁾와 Debye²⁾가 자기냉동 방법을 제시하였고 1933년에 Giauque와 Mac-Dougall³⁾이 처음으로 자기 냉동을 이용하여

1K 이하의 온도에 도달하였다. 대부분의 1950년도 이전의 연구는 그림 1에서 보는 바와 같이, 절대 온도 영도(0K)에 도달하고자 하는 순수과학적인 노력으로서, open cycle을 이용한 단열냉각 방식을 추구하였다. 한편 1950년 이후부터는 공학적인 응용을 목적으로, Closed cycle을 형성하는 자기 냉동기에 관한 연구가 진행되었는데, 중요한 연구업적으로는, 1954년에 초전도 열스위치(superconducting thermal switch)를 사용한 Heer⁴⁾, 자기냉매를 강한 자장주위에서 회전시키는 방식을 취한 Pratt⁵⁾(1977), Steyert⁶⁾(1978), 왕복형(reciprocating) 자기 냉동기를 개발한 Barclay⁷⁾(1979), Grenoble팀⁸⁾(1981), AC(alternating current) 초전도 자석을 이용한 정체식(static) 자기 냉동기의 Hakuraku⁹⁾(1985), Numazawa¹⁰⁾(1993) 등이 있으며, 모두 단순 Carnot cycle 개념에 기반을 둔 자기 냉동기들이었다. 이와 더불어 제4장에서 자세히 설명할 재생식(regenerative) 자기 냉동기는 1966년에 Van Geun¹¹⁾에 의하여 처음 제안된 이후, 1986년 Taussig¹²⁾는 AC 초전도 자석과 얇은 판 형태의 자기냉매를 이용하여 4.2K용 자기 냉동기를 연구하였고, 1994년 Jeong¹³⁾은 packed bed 형태의 직

렬식(tandem) 자기냉매 시스템으로 1.8K용 자기 냉동기를 개발하였다.

2. 자기 냉동의 원리

2.1 자기 열역학(magneto-thermodynamics)

자기 냉동의 원리가 되는 자기열효과(magneto-caloric effect)를 이론적으로 서술하기 위하여¹⁴⁾ 다음과 같은 일반적 열역학 관계식을 고려해 본다.¹⁵⁾¹⁶⁾

$$dU = TdS - PdV + \sum \mu_i dN_i + \mu_0 V H dM \quad (1)$$

윗 식에서 U는 시스템의 내부 에너지, T는 시스템의 온도, S는 시스템의 엔트로피, P는 시스템의 압력, V는 시스템의 체적, μ_i 는 시스템을 구성하는 물질 i의 화학전위(chemical potential), N_i 는 시스템을 구성하는 물질 i의 몰수, μ_0 는 진공에서의 자기 투자율(magnetic permeability of free space, $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$), H는 자기장의 세기, 그리고 M은 자화성(magnetization)이다. 단일 고체로 구성되어 있고, 화학반응을 수반하지 않는 단순자성체에 대한 열역학적 내부에너지 변화는 다음과 같이 간단하게 표시될 수 있다.

$$dU = TdS + \mu_0 V H dM \quad (2)$$

한편, 이러한 물질의 엔트로피 변화는 온도와 자기장의 함수로써,

$$dS = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_H dT + \left(\frac{\partial S}{\partial H} \right)_T dH, \quad (3)$$

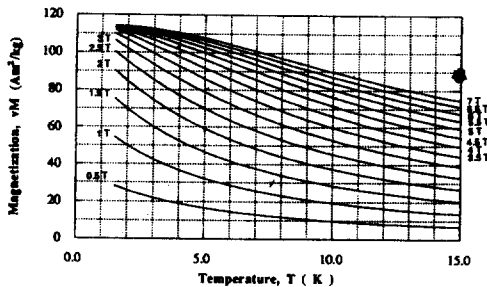


그림 2 GGG($\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$)의 자화성(magnetization)과 온도와의 관계 ($1T = 10,000 \text{ gauss}$)

$$dS = \frac{C_H}{T} dT + \mu_0 V \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_H dH \quad (4)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 이 때 상자화 비열(constant magnetic field specific heat),

C_H 는 $T \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_H$ 로 정의되며

$$\left(\frac{\partial S}{\partial H} \right)_T = \mu_0 V \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_H \quad (5)$$

라는 Maxwell 관계식¹⁶⁾이 이용되었다.

윗 식으로부터 자기장의 변화에 따른 자성체의 단열온도 변화를 다음과 같이 계산할 수 있는데,

$$dT = -\frac{T}{C_H} + \mu_0 V \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_H dH \quad (6)$$

그림 2에서 보는 바와 같이 자기냉매(magnetic refrigerant)에 사용되는 물질의 자화성(magnetization)은, 일정한 자기장에서 온도가 낮을 수록 커지기 때문에

$\left(\left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_H < 0 \right)$, 자기장이 감소하면 단열

조건에서 자기냉매의 온도 또한 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 2의 GGG라는 물질은 10K 이하에서, 이러한 자기열효과(magneto-caloric effect)가 큰 상자성체로서 극저온 냉동(cryogenic refrigeration)에 응용되는 자기냉매(magnetic refrigerant)이다.

2.2 자기냉동기와 압축식 냉동기의 비교

그림 3은 압축식 냉동기와 자기 냉동기의 cycle 과정을 도식적으로 나타낸 것으로 (b)에서 보듯이 자기 냉동 cycle은 다음 4 기본 과정을 거치게 된다.

(1) 단열자화과정(adiabatic magnetization process)

외부로 부터의 자기장 증가로 인하여 자기 냉매 내의 자성 모멘트가 자기장 방향으로 질서를 잡음

(2) 고온열방출과정(heat rejection process)

자기열 효과로 인해 더워진 자기냉매는 외부로 열을 방출

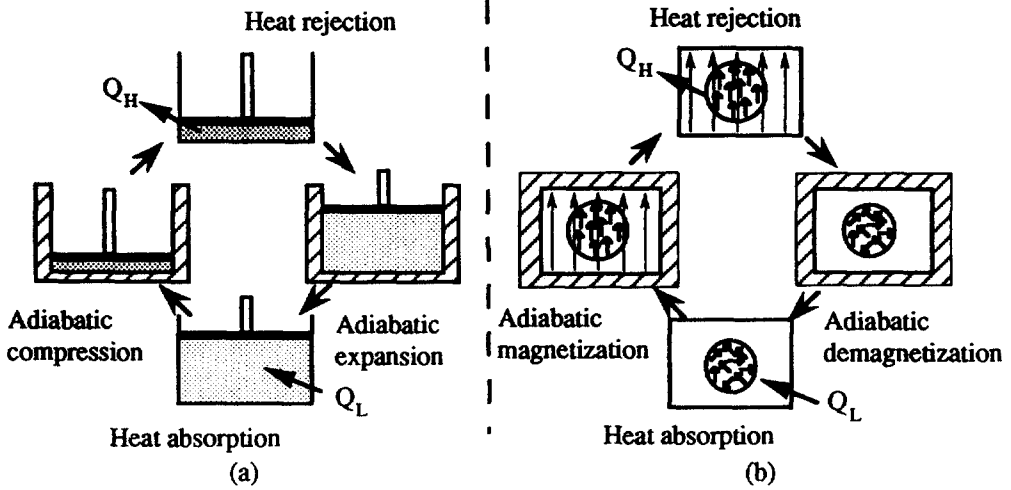


그림 3 압축식 냉동기(a)와 자기냉동기(b)의 도식적 비교

(3) 단열비자화 과정(adiabatic demagnetization process)

자기장의 세기가 감소함에 따라 자성모멘트는 다시 본래대로 무질서하게 됨

(4) 저온 열흡수과정(heat absorption process)

단열비자화과정으로 인해 차가워진 자기 냉매는 외부로부터 열을 흡수.

이러한 과정들은 압축식 냉동기의 단열압축과정, 고온 열방출과정, 단열팽창과정, 저온 열흡수과정과 매우 흡사하며, 두 냉동방식은 표 1에서와 같은 근본적인 상응관계가 있다.

표 1 압축식 냉동기와 자기냉동기의 상응관계

| Vapor Compression Refrigeration | Magnetic Refrigeration |
|--|---|
| Pressure(P) Volume(V) | Magnetic field(H) Magnetic moment ($-\mu_0 vM$) |
| Mechanical compressor | Magnetic compressor |
| Mechanical restriction of refrigerant's molecular motion | Magnetic restriction of refrigerant's magnetic moment |

3. 자기 냉동기의 실제 시스템 구성

앞 장에서 살펴 본 이상적인 자기 냉동기는 실제로 그림 4에서 보는 것과 같은 기본적인 중요 요소들로써 구성이 된다. 즉, 성공적인 자기 냉동기를 설계, 제작하는 데에는, 다음에 열거하는 구성요소들에 대한 충분한 사전지식과 연구검토가 필요하다.

(1) 자기 냉매(magnetic refrigerant)

자기열 효과를 발생시키는 자기 냉동의 핵심구성요소로서 냉동의 온도범위에 따라서 상자성체(paramagnet) 혹은 Curie 온도 주위의 강자성체(ferromagnet or ferrimagnet)가 사용될 수 있다. 자기 냉매의 재료에 관한 연구자료는 그 양이 무척 방대하므로,

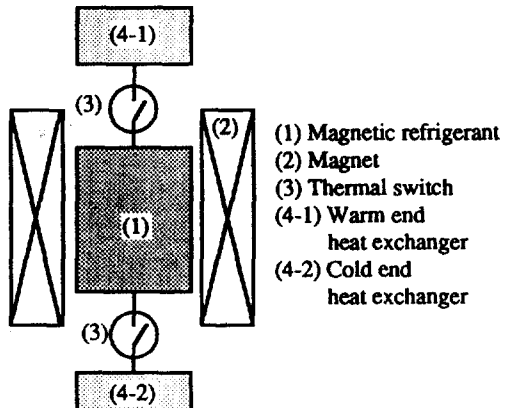


그림 4 실제 자기 냉동기의 기본 구성요소

관심이 있는 독자는 참고문헌 (17)~(19)을 참고하기 바란다.

(2) 자석(magnet)

높은 자기열 효과를 발생시키기 위하여 강한 자기장을 발생시키는 보통의 전자석(electromagnet) 혹은 초전도 자석(superconducting magnet)이 사용되며 전체 냉동 시스템의 효율을 향상시키기 위하여, DC(direct current) 및 AC(alternating current) 손실이 적은 초전도 자석(superconducting magnet)²⁰⁾이 현재 선호되고 있다. DC 자석이 사용되는 경우에는 자기 냉매의 자기장 변화를 위하여 자석과 자기냉매 사이의 상대적인 위치변화가 필요하다. 이러한 방식의 자기 냉동기는 자석의 운용(power control)이 용이한 반면, 상당히 큰 자기력(magnetic interaction force)을 이겨내기 위하여, 자석 혹은 자기 냉매에 대한 복잡한 기계적 장치가 필요하다.^{5)~8)} AC 자석이 사용되는 경우는 모든 자기(magnetic) 시스템이 정지되어 있으므로 기계적 장치는 훨씬 간단하지만, 불필요한 전력 손실을 줄이면서 자석에 전력을 공급하고 재생(regeneration)하는 효율적인 전원장치(power supply) 및 그 제어장치가 요구된다.

(3) 열스위치(thermal switch)

열밸브(thermal valve)라고 불리우기도 하며, 수력학의 체크밸브(check valve) 혹은 전기의 diode, SCR(Silicon Controlled Rectifier)처럼 한 방향으로의 열교환을 위한 장치이다. 단열자화(adiabatic magnetization) 또는 단열비자화(adiabatic demagnetization) 과정동안, 외부와의 열교환을 차폐시키고, 그 외의 과정동안은 자기냉매로부터 고온부, 저온부 열교환기와 순조로운 열교환을 성취하기 위하여 기계적,^{10), 21)} 자기적²²⁾, 유체적^{23), 24)} 등 여러가지 형태의 열스위치(thermal switch)가 고안되고 있다.

(4) 열교환기(heat exchanger)

자기 냉동기와 냉동을 필요로 하는 외부로부터의 열흡수를 위한 저온부 열교환기

(cold end heat exchanger), 외부로의 열방출을 위한 고온부 열교환기(warm end heat exchanger)의 효율적 설계는, 목적하는 냉동효과를 얻기 위한 자기 냉동기의 개발에 또한 중요한 일이다. 특히 AC 자석이 사용되는 경우에는 와도전류(eddy current)에 의한 열발생을 최소화시키는 방법이¹³⁾ 고려되어야 할 것이다.

4. 자기 냉동기의 종류와 응용

4.1 자기 냉동기의 온도 범위

자기 냉동기는 기본적으로, 서론에 언급하였듯이, 냉동을 필요로 하는 모든 분야에 응용이 될 수 있으며, 다음과 같이 응용 온도범위를 구분하여 보겠다.²⁵⁾

(1) 0.1~1.5K

천체 물리학에서 주로 쓰이는 원격외선 방사열계(far infrared bolometer), X선 감지기(X-ray spectrometer) 등의 성능(signal to noise ratio)은 온도가 낮아질수록 향상되므로, 특히 우주의 낮은 중력(microgravity) 상태에서, 극저온을 발생시킬 수 있는 자기냉동기의 개발²⁶⁾이 중요하다. 냉각부하는 약 $10\mu W$ 정도로 매우 작으나, 정밀한 온도제어가 요구되는 응용분야로서, Mn-NH₄, Fe(NH₄)(SO₄)₂·12H₂O 명반(alum) 등을 자기냉매로 사용하여 SIRTTF(Space Infrared Telescope Facility) 목적으로 만든, 단열비자화 냉동기가 중요한 예이다.

(2) 1.5~4.2K

이 온도 범위에서의 가장 큰 냉동목적은 초유체(superfluid) 헬륨을 생산하는 것으로, 이를 이용하여 (1)에서 언급한 소자²⁷⁾ 또는 초전도자석(superconducting magnet)을 냉각하는 것이 중요 응용분야이다. 냉동부하의 범위는 10mW에서부터 수 Watt 까지 다양하며, 자기 냉매로서는 GGG(Gd₃GasO₁₂)가 가장 많이 쓰이며,^{8)~10), 12), 13)} Gd₂(SO₄)₃·8H₂O를 사용한 시스템도^{5)~7)}

연구되고 있다.

(3) 4.2~20K

이 온도 범위의 자기 냉동기는 주로, 압축식 냉동기의 Joule-Thomson 팽창과정을 대체함으로써 내구성이 뛰어난 일체시스템(hybrid system)을 구성하여 액체 헬륨을 생산하려는데 목적을 두고 있다. 0.5 내지 수 Watt의 냉동능력을 갖는 여러가지 형태의 자기 냉동기가 연구개발되었으며,^{9), 10), 12)} 대부분 GGG를 이용하는 시스템이나, DAG(Dy₃Al₅O₁₂)의 사용에도¹⁰⁾ 볼 수 있다.

(4) 20~77K

77K은 액체 질소의 비등점으로, 이 온도 범위의 자기 냉동기는 (3)에서 언급한 냉동기의 방출열을 냉동 부하로 생각하는 다단식(cascade) 냉동기 또는 수소액화기(hydrogen liquefier)가 중요한 응용분야이다. 자기 냉매의 선택에서는 상자성체 보다도 여러가지 Curie 온도를 갖는 강자성체의 혼합물이 선호되며,^{19), 28), 29)} 재생식(regen-

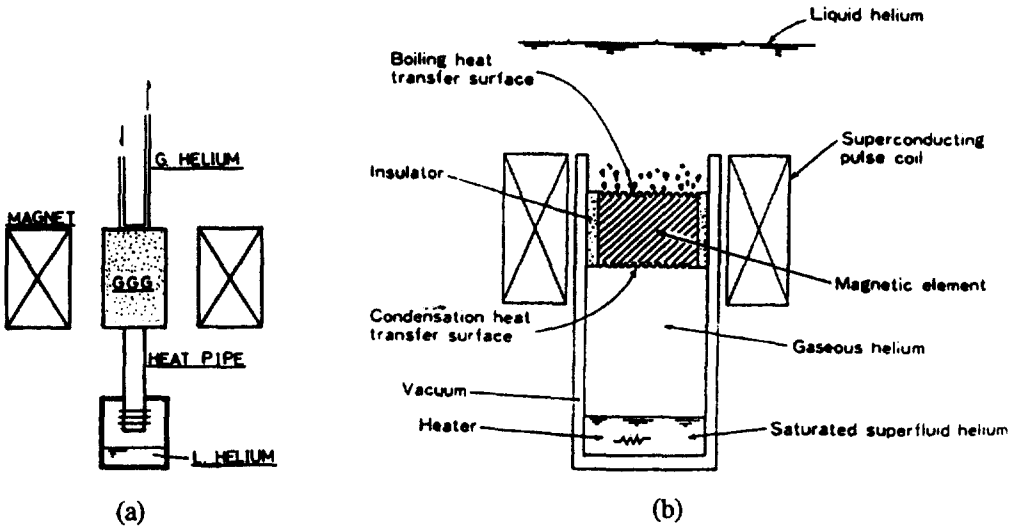
erative) 자기 냉동기가 바람직한 방식으로 제안되고 있다.

(5) 상온부근

상온에서 작동하는 자기 냉동기는 기존의 R-12, R-22 같은 프레온 냉매를 쓰는 압축식 냉동기의 대안으로서 공기조화 및 일반적인 냉동목적으로 응용될 수 있다. 상온부근에서는 Gadolinium이 가장 적합한 자기 냉매로 현재 알려져 있으며,³⁰⁾ 냉동부하는 수 Watt에서 수 Kilo Watt이지만, 지금까지 저온분야에 비하여 별로 연구가 활발하지 않았던 온도범위이기도 하다.

4.2 정체식(static)과 동태식(dynamic) 자기 냉동기

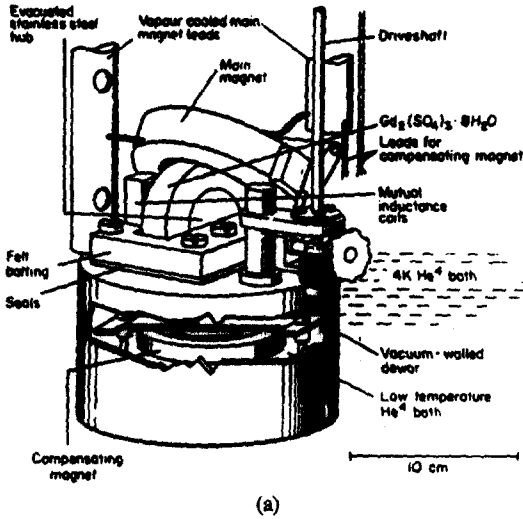
정체식(static) 자기 냉동기는 자기 냉매와 자석의 움직임이 수반되지 않고, AC 자석을 이용하여 자기 냉매의 자화-비자화(magnetization-demagnetization) 과정을 이룩한다. 그림 5의 (a)는 Nakagome³¹⁾ 등에 의하여 개발된 자기 냉동기로서 GGG를



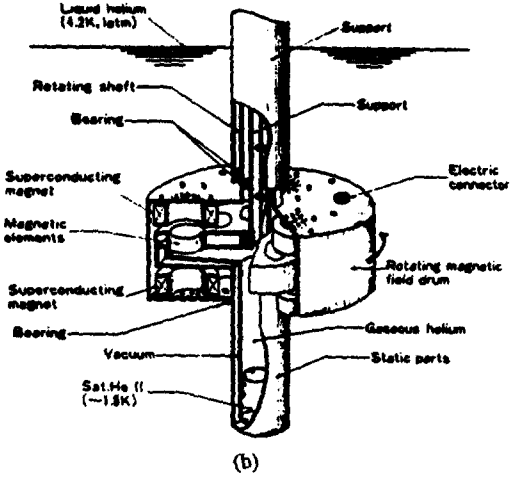
(a) 열 파이프(heat pipe)를 열 스위치(thermal switch)로 이용한 4.2K 용 자기 냉동기(Nakagome 등, 1984)

(b) 초유체 헬륨(superfluid helium) 생산을 위한 1.8K 용 자기 냉동기(Hakuraku 등, 1985)

그림 5 정체식 자기 냉동기(static magnetic refrigerator)

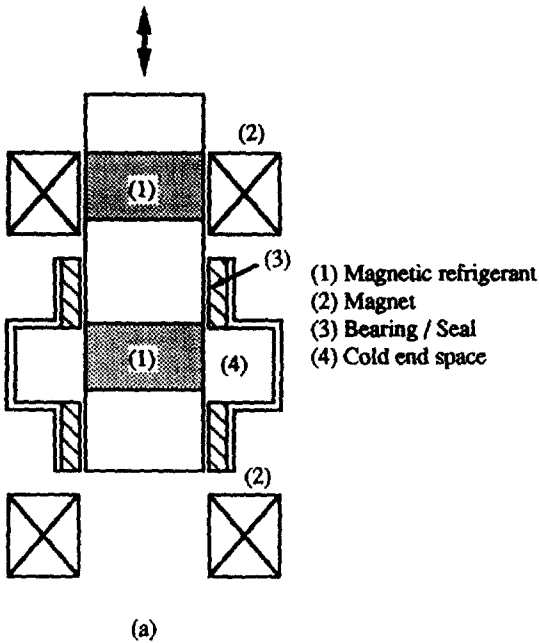


(a) 회전 자기냉매 방식의 2K 용 자기 냉동기(Pratt 등, 1977)

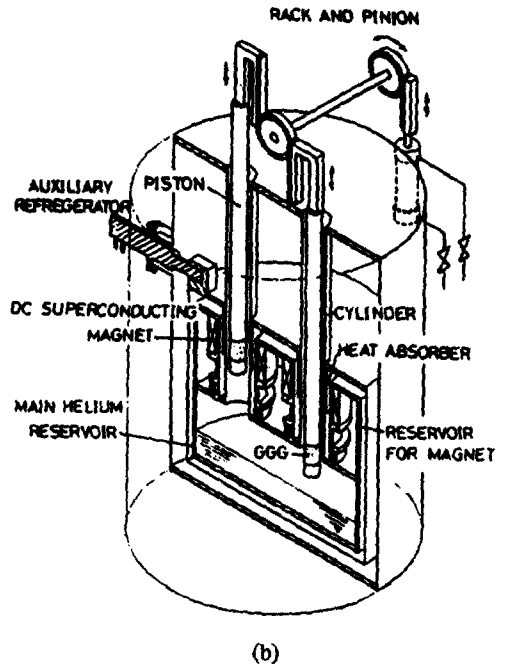


(b) 회전 자석방식의 1.8K 용 자기 냉동기 (Hakuraku 등, 1986)

그림 6 회전식 자기 냉동기(rotating magnetic refrigerator)



(a) 1.8K 용 이중 왕복식(double acting reciprocating) 자기 냉동기(Delpuech 등, 1981)



(b) 4.2K 용 이중 실린더 왕복식(two-cylinder reciprocating) 자기 냉동기(Nakagome 등, 1985)

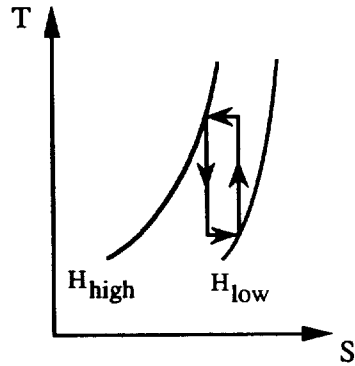
그림 7 왕복식 자기 냉동기(reciprocating magnetic refrigerator)

이용하여 4.2K의 액체 헬륨을 생산해 내며, 열파이프(heat pipe)와 가스 헬륨을 열스위치(thermal switch)로 사용하였다. (b)는 Hakuraku⁹⁾ 등에 의하여 만들어진 1.8K의 초유체(superfluid)를 생성시키는 장치이다. 자기 냉매의 위·아래 표면에서 증발 또는 응축되는 헬륨을 이용하여 유체적으로 일방향 열교환(rectified heat transfer)을 모색하였다.

동태식(dynamic) 자기 냉동기는 자기 냉매와 자석간의 상대적 움직임으로 인하여 자기장의 변화를 야기시키는 방식으로서 크게 그림 6과 같은 회전식 자기 냉동기와^{5), 6), 32)} 그림 7의 왕복식 자기 냉동기로^{7), 8), 33)} 구분할 수 있다. 강한 자기장 내에서의 자성체의 움직임은 매우 큰 힘을 수반하므로 그림 7에서와 같이, 보통 자기 cycle에서 180°의 위상차를 갖는 동일한 두 자기 냉매를 함께 움직여서 그 힘을 상쇄시키도록 설계하였다.

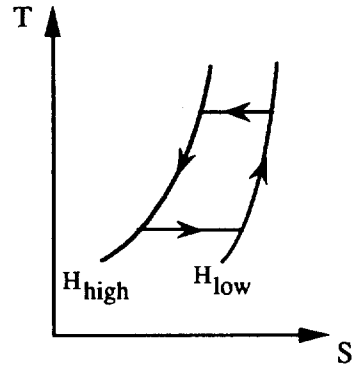
4.3 단순 Carnot cycle 방식과 재생식(regenerative) 자기 냉동기

지금까지 살펴본 자기 냉동기는 단순한 Carnot cycle을 그 기본 열역학 사이클로 이용하는 것이다. 이러한 단순 Carnot cycle은 그림 8-(a)에서 보듯이, 자기 냉매의 열역학 성질 때문에 고온부와 저온부의 온도 범위가 커지면 그 성능이 현저하게 떨어지는 것을 알 수 있다. 즉, 냉동 능력이 격감된다. 그러므로, 압축식 냉동기와 유사하게, 자기 냉동기에서도 그림 8-(b)와 같은 Ericsson 혹은 Stirling cycle 형식의 재생식(regenerative) cycle을 이루어 온도범위를 넓혀 보려는 노력이 진행되어 왔다. 재생식(regenerative) 자기 냉동기는 다시 두 가지로 분류될 수 있는데, 첫째는, 물³⁰⁾ 또는 초임계(supercritical) 헬륨가스¹¹⁾ 같은 유체를 재생기 물질로 사용하는 것이며, 둘째는, 자기 냉매 자체를 냉매뿐만 아니라 재생기로 또한 사용하는 방식(active regener-



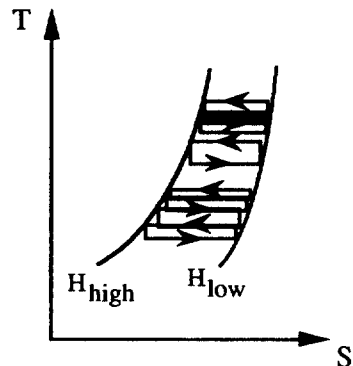
(a)

(a) 단순 Carnot cycle



(b)

(b) 재생식(regenerative) cycle



(c)

(c) 직렬식(cascaded) Carnot cycle

그림 8 여러가지 자기 냉동 사이클(cycle)

ation)이다.³⁴⁾ 특히 후자는 그림 8-(c)에

서 보이는 것처럼, 고온부와 저온부 사이의 온도 범위에서 수많은 sub-carnot cycle을 이루며 상호 열교환을 하도록 설계된다. 이러한 재생식 자기 냉동기에 더욱 관심이 있는 독자는 참고문헌 (12), (34), (35)를 참조하기 바란다.

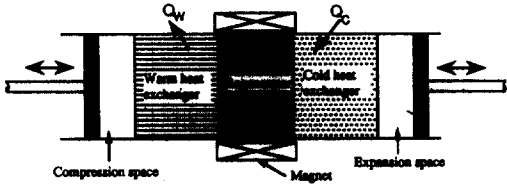


그림 9 자기 증가식 재생기(magnetically augmented regenerator)

4.4 핵자기 냉각(nuclear magnetic cooling)

앞에서 언급한 일반적인 상자성체(para-magnet)의 자기 냉동기도 0.01K 이하의 온도 범위에서는 그 물질의 열역학적 한계성 때문에 더 이상 효과적인 냉각능력을 가져올 수가 없다. 따라서 절대온도 0K에 더 가깝게 다가갈 수 있는 다른 특수한 수단으로서 원자핵의 자기모멘트(nuclear magnetic moment)를 비자화(demagnetization) 시켜 온도를 낮추는 핵자기 냉각(nuclear magnetic cooling) 방법이 개발되었는데, 구리(copper)를 이용하여 최저 $5 \times 10^{-8}K$ 까지 도달한 것으로 알려져 있다.^{36) - 38)}

5. 자기 냉동기의 연구 개발 상황

현재, 극저온 자기 냉동기가 초전도 자석 및 인공 위성에서의 여러 관측 소자의 냉각을 위하여 연구되고 있을 뿐만 아니라, 다음과 같은 분야에도 새로운 관심이 기울어지고 있다.

첫째는, 재생식(regenerative) 자기 냉동기를 이용한 가스 액화기,³⁹⁾ 즉, 기존의 압축-팽창식 액화기를 대체하는 231K 용 프로판 액화기, 112K 용 천연가스 액화기, 20K 용 수소액화기 등으로서, Canada의 Victoria 대학에 있는 Barclay 등에 의하여 연구되고 있으며, 둘째는, 상온 냉각용 non-CFC 냉동기로서의 연구개발로 미국의 Ames 연구소, Astronautics³⁹⁾ 등에 의하여 추진되고 있다. 셋째는, 차세대에 등장할 새로운 형태의 자기 냉동기로서 자기 냉동기의 작동 온도범위를 넓히기 위하여 혼합자기 냉매를 사용하는 재생식 자기 냉동

기⁴⁰⁾ 또는 그림 9와 같이 Stirling 저온 냉동기(cryocooler)의 재생기 부분을 자기 냉매로 구성하고, 외부의 자기장변화로써 재생기 효율을 증가시키려는 연구^{41), 42)}가 미국의 MIT(Massachusetts Institute of Technology)에서 진행되고 있다.

6. 결 론

이상으로 자기 냉동기의 원리, 역사적 발달사, 실제 시스템구성, 종류와 응용 및 연구개발상황등에 대하여 간단하게 알아보았다.

지금까지 살펴본 바와 같이 물질의 자기 열효과(magneto-caloric effect)를 이용하여 온도를 낮추는 자기 냉동기는 적합한 자기 냉매의 선택에 따라 보통의 압축식 냉동기보다 더 광범위한 온도 범위에서 작동할 수 있는 냉동기이다. 가역적인(reversible) 자화(magnetization), 비자화(demagnetization) 과정을 거치는 자기 냉동기는 본질적으로 고온부와 저온부의 온도차이가 작은 응용분야에서는 Carnot cycle에 가까운 높은 열역학 효율을 가지며, 움직이는 부분이 적은 까닭으로 기계적 내구성도 뛰어나지만, 그 작동 온도범위를 넓히려면, 재생식(regenerative) 개념, 혼합냉매(mixed refrigerant) 개념 등을 도입하여, 전체 냉동 시스템을 최적화시켜야 하며, 그에 필요한 중요요소에 대한 기술개발은 아직도 연구과제로 남아 있다. 특히 자기냉매와 더불어 자기 냉동기의 핵심요소가 되고 있는 자석부

분은 전체 시스템의 열역학 효율을 높이기 위하여 그 에너지 손실이 최소화되어야 한다. 따라서 현재 활발히 연구가 진행되고 있는 고온 초전도 자석(high temperature superconducting magnet)을 앞으로 자기 냉동기에 응용하는 기술도 상당히 기대된다고 볼 수 있다.

참 고 문 헌

1. Giauque, W.F., 1927, "Paramagnetism and the third law of thermodynamics. Interpretation of the low-temperature magnetic susceptibility of Gadolinium sulfate," J. Am. Chem. Soc. Vol. 49, p. 1870.
2. Debye, P., 1926, "Einege Bemerkungen zur Magnetisierung bei tiefer Temperatur," Ann. Physik, Vol. 81, p. 1154.
3. Giauque, W.F. and MacDougall, D.P., 1933, "Attainment of temperature below 1° absolute by demagnetization of $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$," Phys. Rev., Vol. 43, p. 768.
4. Heer, C.V., Barnes, C.B., and Daunt, J.G., 1954, "The design and operation of a magnetic refrigerator for maintaining temperatures below 1K," Rev. Sci. Instr., Vol. 25, No. 11, p. 1088.
5. Pratt, Jr, W.P., Rosenblum, S.S., Steyert, W.A., and Barclay, J.A., 1977, "A continuous demagnetization refrigerator operating near 2K and a study of magnetic refrigerants," Cryogenics, Vol. 17, p. 689.
6. Steyert, W.A., 1978, "Rotating Carnot-cycle magnetic refrigerators for use near 2K," J. Appl. Phys., Vol. 49, No. 3, p. 1227.
7. Barclay, J.A., Moze, O.Z., and Paterson, L., 1979, "A reciprocating magnetic refrigerator for 2-4K operation: Initial results," J. Appl. Phys., Vol. 50, No. 9, p. 5870.
8. Delpuech, C., Berangerk, R., Bon Mardion, G., Claudet, G., and Lacaze, A.A., 1981, "Double acting reciprocating magnetic refrigerator: first experiments," Cryogenics, Vol. 21, p. 579.
9. Hakuraku, Y. and Ogata, H., 1985, "A static magnetic refrigerator for superfluid helium with new heat switches and a superconducting pulse coil," Japanese J. Appl. Phys., Vol. 24, No. 11, p. 1538.
10. Numazawa, T., Kimura, H., Sato, M., and Maeda, H., 1993, "Carnot magnetic refrigerator operating between 1.4K and 10K," Cryogenics, Vol. 33, p. 547.
11. Van Geuns, J.R., 1966, "A study of a new magnetic refrigerating cycle," Philips Res. Rep. Suppl., Vol. 6.
12. Taussig, C.P., Gallagher, G.R., Smith, Jr., J.L., and Iwasa, Y., 1987, "Magnetic refrigeration based on magnetically active regeneration," Proc. Fourth Int. Cryocoolers Conf., p. 79.
13. Jeong, S. and Smith, Jr., J.L., and Iwasa, Y., 1994, "Tandem magnetic refrigerator for 1.8K," Cryogenics, Vol. 34, p. 263.
14. Hudson, R.P., 1972, Principles and Application of Magnetic cooling, North-Holland Publishing company, Amsterdam.
15. Van Wylen, G.J. and Sonntag, R.E., 1978, Fundamentals of Classical

- Thermodynamics, 2nd ed., pp. 70-73, John Wiley & Sons, New York.
16. Barron, R.F., 1985, *Cryogenic Systems*, 2nd ed., pp. 284-298, Oxford University Press, New York.
 17. Barclay, J.A. and Steyert, W.A., 1982, "Materials for magnetic refrigeration between 2K and 20K," *Cryogenics*, Vol. 22, p. 73.
 18. Hashimoto, T., 1986, "Recent investigation on refrigerants for magnetic refrigerators," *Adv. Cryog. Eng.*, Vol. 32, p. 261.
 19. Hashimoto, T., Matsumoto, K., Kurihara, T., Numazawa, T., Tomokiyo, A., Yayama, H., Goto, T., Todo, S., and Sahashi M., 1986, "Investigations on the possibility of the RAl_2 system as a refrigerant in an Ericsson type magnetic refrigerator," *Adv. Cryog. Eng.*, Vol. 32, p. 279.
 20. Lue, J.W., Luton, J.N., Schwenterly, S.W., and Wilson, C.T., 1994, "Test results of superconducting AC magnets for magnetic refrigeration experiment," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 30, No. 4, p. 2360.
 21. Collins, S.C., and Zimmerman, F.J., 1953, "Cyclic Adiabatic Demagnetization," *Phys. Rev.*, Vol. 90, p. 991.
 22. Zimmerman, J.E., McNutt, J.D., and Bohm, H.V., 1962, "A magnetic refrigerator employing superconducting solenoids," *Cryogenics*, Vol. 2, p. 153.
 23. Fulton, C.D., Hwang, C.F., Fairbank, W.M and Vilas, J.M., 1960, "Helium heat rectifiers and a simple magnetic refrigerator," *Adv. Cryog. Eng.*, Vol. 2, p. 220.
 24. Kashani, A., Helvensteijn, B.P.M., McCormack, F.J., and Spivak, A.L., 1993, "Helium liquid-and gas-gap heat switches," *Proc. Seventh Int. Cryocoolers Conf.*, p. 355.
 25. Barclay, J.A., 1986, "Magnetic refrigeration : A review of a developing technology," *Adv. Cryog. Eng.*, Vol. 32, p. 719.
 26. Yamamoto, J., Sato, A., and Sahashi, M., 1988, "New design of an adiabatic demagnetization cryostat for space application," *Adv. Cryog. Eng.*, Vol. 33, p. 879.
 27. Hopkins, R.A., Lee, J.H., Oonk, R. L., Miller, C.D., and Nieczkoski, S. J., 1990, "Longlife time stored cryogen systems using refrigerators to reduce parasitic heat input," *Proc. Sixth Int. Cryocoolers Conf.*, Vol. II, p. 153.
 28. Hashimoto, T., Kurihara, T., Sahashi, M., Inomata, K., Tomokiyo, A., and Yayama, H., 1987, "New application of complex magnetic materials to the magnetic refrigerant in an Ericsson magnetic refrigerator," *J. Appl. Phys.*, Vol. 62, No. 9, p. 3873.
 29. Hashimoto, T., Numazawa, T., Shino, M., and Okada, T., 1981, "Magnetic refrigeration in the temperature range from 10K to room temperature : the ferromagnetic refrigerants," *Cryogenics*, Vol. 21, p. 647.
 30. Brown, G.V., 1976, "Magnetic heat pumping near room temperature," *J. Appl. Phys.*, Vol. 47, No. 8, p. 3673.
 31. Nakagome, H., Tanji, N., Horigami, O., Ogiwara, H., Numazawa, T., Watanabe, Y., and Hashimoto, T.,

- 1984, "The helium magnetic refrigerator I : Development and experimental results," *Adv. Cryog. Eng.*, Vol. 29, p. 581.
32. Hakuraku, Y. and Ogata, H., 1986, "Thermodynamic analysis of a magnetic refrigerator with static heat switches," *Cryogenics*, Vol. 26, p. 171.
33. Nakagome, Kuriyama, T., Ogiwara, H., Fujita, T., Yazawa, T., and Hashimoto, T., 1985, "Reciprocating magnetic refrigerator for helium liquefaction," *Adv. Cryog. Eng.*, Vol. 30, p. 753.
34. Barclay, J.A., 1982, "The theory of an active magnetic regenerative refrigerator," 2nd Conference on refrigeration for cryogenic sensors and electronic systems NASA, Goddard Research Center, Greenbelt, p. 375.
35. Jeong, S. and Smith, Jr., J.L., 1993, "Cycle analysis of a regenerative tandem magnetic refrigerator," Sixth Int. Symposium on Transport Phenomena in Thermal Engineering, p. 157.
36. Simon, F.E., Kurti, N., Allen, J.F., and Mendelssohn, K., 1952, *Low Temperature Physics : Four Lectures*, p. 60, Pergamon Press, New York.
37. Symko, O.G., 1969, "Nuclear cooling using copper and indium," *J. Low Temp. Phys.* Vol. 1, p. 451.
38. Kurti, N., Robinson, F.N.H., Simon, F.E., and Spohr, D.A., 1956, "Nuclear cooling," *Nature(London)*, Vol. 178, p. 450.
39. Ashley, S., 1994, "Fridge of the future," *Mechanical Engineering*, Vol. 116, No. 12, p. 76.
40. Jeong, S., Smith, Jr., J.L., Iwasa, Y., and Numazawa, T., 1993, "Experimental investigation of the regenerative magnetic refrigerator operating between 4.2 K and 1.8K," *Proc. Seventh Int. Cryocoolers Conf.*, Vol. II, p. 389.
41. Jeong, S. and Smith, Jr., J.L., 1994, "Magnetically augmented regeneration in Stirling cryocooler," *Adv. Cryog. Eng.*, Vol. 39B, p. 1399.
42. Smith, Jr., J.L. and Nellis, G.F., 1995, "Investigation of a magnetically augmented cryogenic refrigerator," to be published in the *Proc. Eighth Int. Cryocoolers Conf.*