

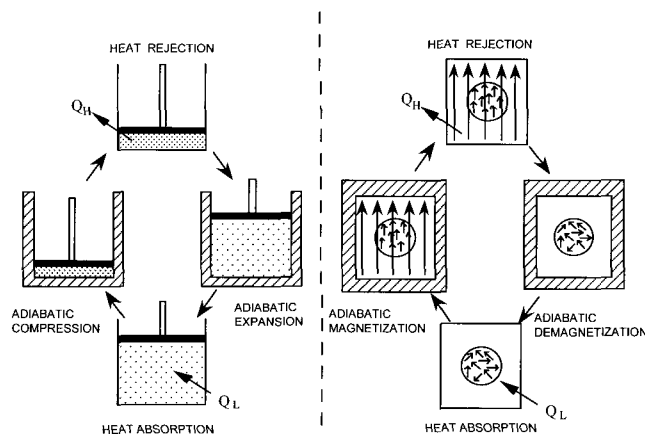
## 자기 냉동기 (Magnetic refrigerator)

정 상 권  
한국과학기술원 기계공학과

## 1. 서 론

자기 냉동 (magnetic refrigeration)은 일반적으로 극저온 냉동기에 많이 사용되는 냉매인 헬륨 가스와 같은 특정 유체를 사용하지 않고, 상자성 (paramagnetic) 고체의 자기열 효과 (magnetocaloric effect) 를 이용하여 극저온을 생성시키는 방법이다. 따라서 이러한 기술은 대개 지난 70 년간 보통의 압축식 냉동기로는 불가능한 0.1 K 이하의 극저온을 만들기 위하여 연구 개발되었다. 그러나, 최근 20 여년 동안은, 자기 냉동기의 높은 열역학적 효율을 활용하고자 0.1 K 이상의 극저온 온도 범위에서, 심지어는 상온 (300 K 부근)까지도 자기 냉동기의 온도 범위를 확장시키고 있다.

자기 냉동은 그림 1 과 같이 가스의 압축-팽창 과정을 상자성체 (paramagnetic material) 또는 강자성체 (ferromagnetic material)인 고체 냉매의 자화-비자화 과정으로써 대체한 것이며, 일반 가스 압축식 냉동기의 비가역 과정인 J-T 팽창 과정이 없으므로, 본질적으로는 높은 열역학적 효율을 달성할 수 있다. 즉 고체 냉매의 자화-비자화 과정은 전자기적인 압축-팽창 과정이라고 할 수 있다. 물론 모든 자성체가 이러한 자기열 효과(magnetocaloric effect)를 가지는 것은 아니며, 대개 큐리 온도 (Curie temperature; 강자성체로부터 상자성체로 또는 그 반대로 전이하는 온도) 부근에서 이러한 성질을 가지게 되며, 자기 냉매로서 사용 가능한 대표적인 물질 들을 표 1은 보여 주고 있다. 초기에 개발된 자기 냉동 (magnetic refrigeration) 또는 자기 냉각 (magnetic cooling) 장치는 단일 과정 (one-shot process) 으로서 절대 온도 0 K 에 근접하기 위한 노력이었으며, 그 후에 공학적 또는 상업적인 목적을 위해서는 연속적인 열역학 사이클로서 작동하는 냉동 방식이 개발되었다. 본고는 자기 냉동에 대한 기본



가스 압축식 냉동 사이클 : 자기 냉동 사이클

그림 1. 가스 압축식과 자기 냉동 사이클의 비교

개념, 역사적인 개발과정, 주요 요소 기술, 응용 분야 등에 대하여 알아보기로 한다.

## 2. 자기 냉동의 기본 개념

자기 냉동의 기본 개념은 그림 1의 내용을 좀 더 자세히 살펴보면 이해할 수 있다.

## (1) 단열 자화 과정

자기 냉매는 외부로부터 공급된 자기장에 의하여 내부 자기 모멘트가 한 방향으로 정렬하게 되면서 온도가 증가한다. 즉 가스의 단열 압축 과정과 동일하다.

## (2) 열방출 과정

단열 자화 과정 동안 자기 냉매에서 발생한 열은 외부와의 열전달에 의하여 상온 부근의 높은 온도에서 방출되게 된다.

## (3) 단열 비자화 과정

자기 냉매에 공급된 자기장을 제거하게 되면 내부 자기 모멘트는 원래의 무질서한 상태로 돌아가게 되면서 온도가 감소한다. 즉 이것은 가스의 단열 팽창 과정과 동일하다.

표 1. 자기 냉동에 적용 가능한 물질과 그의 상변화 온도

Substance	T <sub>c</sub> *(K)	Characteristic
Dy <sub>3</sub> Ga <sub>5</sub> O <sub>12</sub> ( DGG )	0.37	high thermal conductivity, good for Ericsson cycle ( 2 K ~ 12 K )
Gd <sub>3</sub> Ga <sub>5</sub> O <sub>12</sub> ( GGG )	0.85	high thermal conductivity, excellent magnetic refrigerant below 10 K
Gd <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	< 1	lighter than GGG, good for temperatures below 1.8 K
Dy <sub>2</sub> Ti <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	1.35	available in powder form, temperature range ( 4.2 K~20 K )
HoPO <sub>4</sub>	1.39	RXO <sub>4</sub> ** family
TmVO <sub>4</sub>	2.15	RXO <sub>4</sub> ** family, high thermal conductivity
Dy <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> ( DAG )	2.53	high thermal conductivity, better than GGG above 10 K
DyVO <sub>4</sub>	3.0	promising in Ericsson type machine between 2 K and 20 K
TmAsO <sub>4</sub>	6.0	RXO <sub>4</sub> ** family, good material in the temperature range 5 to 10 K
ErNi <sub>2</sub>	6.7	promising material in the wide temperature range below 35 K
ErAl <sub>2</sub>	11.7	useful for compound material for Ericsson type machine above 15 K
HoNi <sub>2</sub>	12.3	promising material in Ericsson type machine above 35 K
EuS	16.0	promising material in Ericsson type machine above 20 K
DyNi <sub>2</sub>	19.3	promising material in the wide temperature range below 35 K
Gd <sub>5</sub> Ge <sub>4</sub>	~20	first order phase transition material
HoAl <sub>2</sub>	26.8	useful compound material for Ericsson type machine above 15 K
DyAl <sub>2</sub>	55.9	useful for Ericsson type machine between 20 K and 77 K
Ho <sub>5</sub> Si <sub>4</sub>	76	ferromagnetic rare-earth intermetallic compound
GdNi <sub>2</sub>	85	promising material in the wide temperature range below 35 K
Dy <sub>5</sub> Si <sub>4</sub>	140	ferromagnetic rare-earth intermetallic compound
GdAl <sub>2</sub>	164	low hysteresis material
Dy	180	first order phase transition material
Gd <sub>3</sub> In	213	ferromagnetic rare-earth intermetallic compound
Tb <sub>5</sub> Si <sub>4</sub>	225	ferromagnetic intermetallic first order phase transition material
Gd <sub>5</sub> Si <sub>2</sub> Ge <sub>2</sub>	260	first order phase transition material
Gd <sub>3</sub> Al <sub>2</sub>	287	ferromagnetic rare-earth intermetallic compound
Gd	293	useful for room temperature heat pump
MnP	298	magnetic material for room temperature
Gd <sub>5</sub> Si <sub>4</sub>	336	magnetic material for room temperature

\* Phase transition temperature \*\* Rare earth material, X = V, As or P

(4) 열흡수 과정

단열 비자화 과정에 의하여 자기 냉매의 온도는 매우 낮아졌으므로, 이제 저온인 외부로부터 열을 흡수할 수 있게 된다.

특히, 자기 냉동에서 열역학적 효율이 높아질 수 있는 이유는, 단열 비자화 과정이 외부로부터 전자기적인 일을 해주는 과정이기 때문에, 냉매 자신의 내부 에너지를 감소시키고 등엔트로피 과정으로 모사할 수 있기 때문이다.

한편, 자기 냉동에 대한 학문적인 배경을 알아보고자, 간단한 열역학 개념을 도입하여 정량적으로 그 냉각 효과를 어떻게 예측할 수 있는지를 설명하면 다음과 같다. 일반적으로

열역학 제 1 법칙에 의하면, 물질의 내부 에너지 변화는 주위와의 열전달, 시스템의 부피 변화에 의한 일 출입, 화학 반응에 의한 성분 변화, 전자기적인 일 출입으로 나타낼 수 있다.

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

여기서 U 는 내부 에너지, S 는 엔트로피, P 는 압력, V 는 부피, H 는 자기장, M 은 단위 부피 당의 자화량,  $\mu_i$  는 i 종의 화학 포텐셜,  $\mu_0$  는 진공에서의 자기 투과성 (magnetic permeability)이다. 자성 냉매는 주로 고체이고 화학 반응은 일어나지 않음

므로, 식 (1)은 다음과 같이 단순화되며,

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

자기 시스템의 엔트로피 변화를 온도와 자기장의 변화로서 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} dS &= \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_H dT + \left( \frac{\partial S}{\partial H} \right)_T dH \\ &= \frac{C_H}{T} dT + \mu_0 V \left( \frac{\partial M}{\partial T} \right)_H dH \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 열역학의 맥스웰 관계식에 의하면,  $\left( \frac{\partial S}{\partial H} \right)_T = \mu_0 V \left( \frac{\partial M}{\partial T} \right)_H$  로서, 식 (3) 으로부터, 자기장 변화에 의한 가역적 단열 온도 변화는 다음과 같이 표현된다.

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

일반적인 자성체에서, 온도 변화에 따른 자화량 (magnetization) 변화는 음(-) 이므로, 위 식으로부터 우리는 자기장이 변화할 때 얼마나 큰 온도 변화를 야기시킬 수 있는지, 자기장과 열적인 상호 에너지 변환량을 정량적으로 계산해 낼 수 있다.

### 3. 자기 냉동의 발전 과정

자기 냉동 또는 냉각의 원리는 20 세기 전에도 알려져 있기는 하였으나, 가장 의미있는 역사적인 사건은 1933 년 W. F. Giauque 에 의해서 1 K 이하의 온도를 실험적으로 달성한 것이라 할 수 있다[1]. 사실상 Giauque 는 절대 온도 0 K에 도달하는 것이 불가능하다는 열역학 제 3 법칙에 흥미를 가지면서, 더 낮은 온도를 생성시킬 수 있는 방법을 개발하였고, 이를 이용하여 극저온에서의 엔트로피에 대한 연구를 수행하면서 1949 년 노벨 화학상을 수상하였다. 1933 년 이후 과학계에서는 자기 냉각의 원리를 이용하면서 더 낮은 온도에 도달하고자 하는 노력이 경주 되었으며, 현재까지 실험적으로 도달한 가장 낮은 온도는  $10^{-8}$  K 정도라 할 수 있다. 이러한 단순 냉각 방식과는 달리, 1950 년 이후에는 공학적인 목적을 위하여, 연속으로 작동할

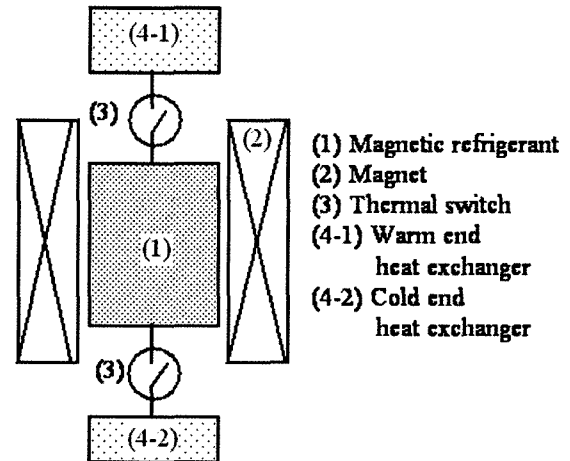
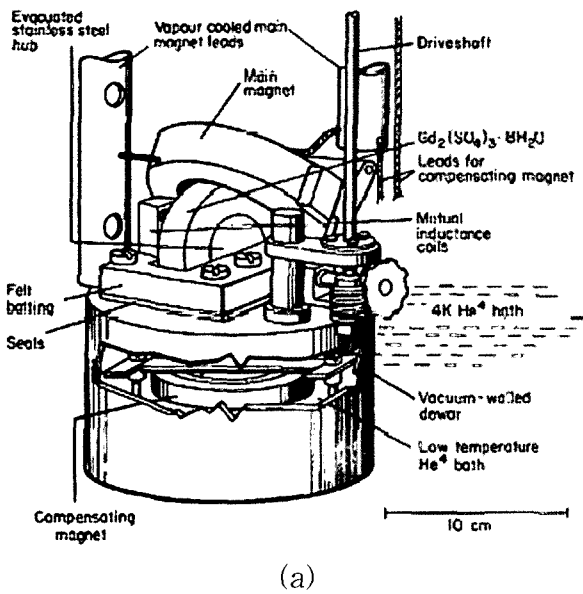


그림 2. 자기 냉동기의 주요 구성 요소

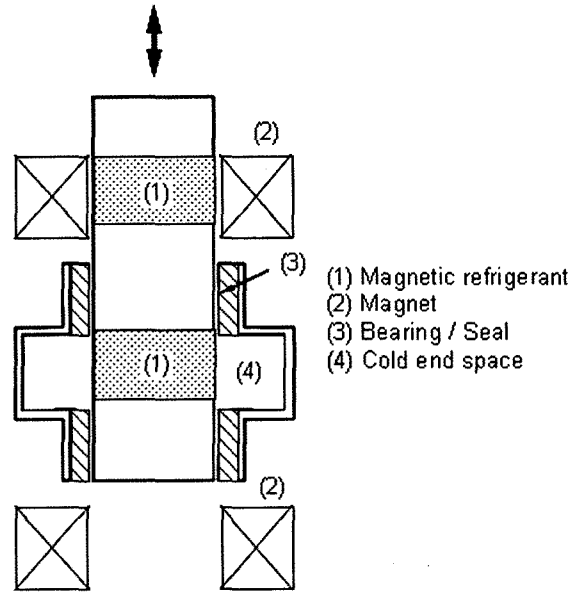
수 있는 자기 냉동기에 대한 연구가 시작되었는데, 이 때 가장 중요한 문제 중의 하나는 자기 냉매와 외부와의 효율적인 열 스위치였다.

그림 2 에서 보는 바와 같이, 자기 냉동기에서 필수적인 열 스위치는 사이클의 특정 시간 동안 on/off 동작을 효과적으로 수행하여야 한다. 1954 년 Heer 등과[2] 1962 년 Zimmerman 등은[3] 초전도 납(Pb)을 이용한 정체식 열 스위치를 고안하였으며, 1953 년 Collins 등과[4] 1993 년 Numazawa 등은[5] 기계적인 열접촉식 열 스위치, 1984 년 Nakagome 등과[6] 1985 년 Hakuraku 등은[7] 써모사이편을 이용한 열 스위치를 사용하였다.

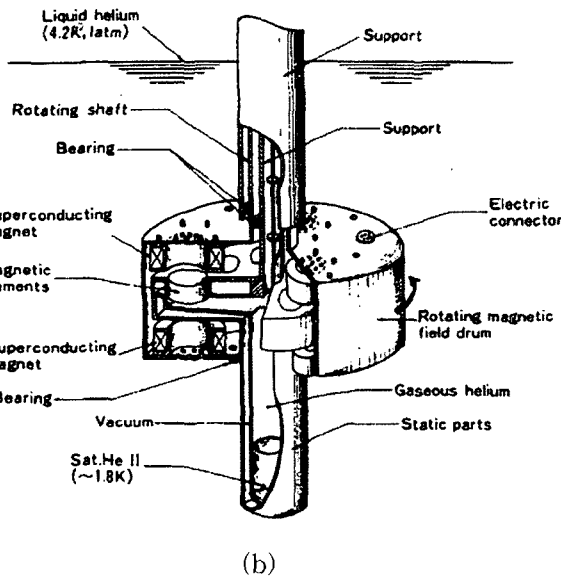
Pratt 등과[8] Hakuraku 등은[9] 각각 1977 년과 1978 년에, 그림 3 과 같이 자기 냉매와 자석이 서로 상대적인 회전운동을 하는 회전형 자기 냉동기를, Barclay 등과[10] Delpuech 등은[11] 냉매와 자석이 상대적인 직선 운동을 하는 왕복형 자기 냉동기를 1979 년 1981 년에 개발하였다(그림 4). 한편, 1985 년의 Hakuraku 등과[7] 1993 년 Numazawa 등에[5] 의한 연구에서는, 정지된 초전도 자석의 전류를 조절하여, 자기 냉매와 자석의 상대적인 움직임을 제거하였다. 여기까지 열거한 자기 냉동기의 연구에서는, 자기 냉매를 하나의 덩어리로서 사용하며, 공간적으로 균일한 온도 분포를 가지고 작동하는 자기 카르노 사이클 (magnetic Carnot cycle) 개념을 추구하였다는 것이 공통점이다. 그러나, 그림 5 (a)에서 볼 수 있듯이, 이러한 개념의 문제점은, 우리가 쉽게 생성시킬 수 있는 자기장의 변화 폭에서는,



(a)



(1) Magnetic refrigerant  
(2) Magnet  
(3) Bearing / Seal  
(4) Cold end space

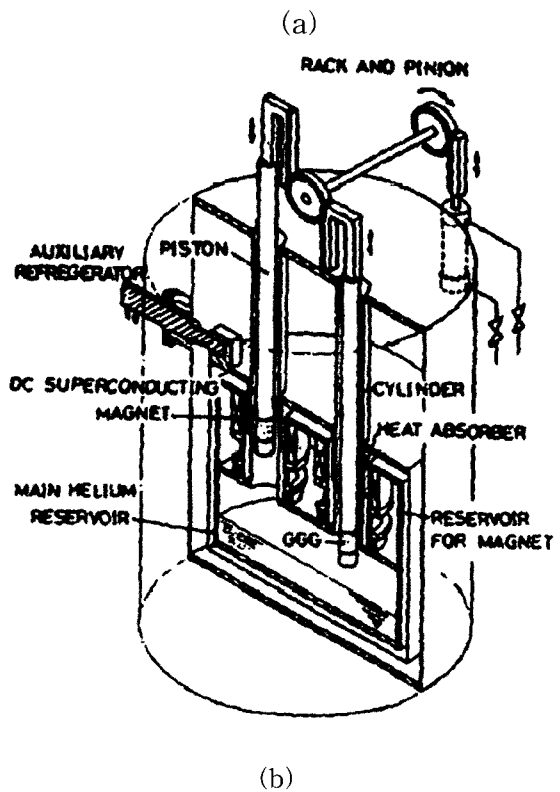


(b)

그림 3. 회전형 자기 냉동기

- (a) 자기 냉매 회전형 (Pratt et al. 1977 [8])
- (b) 자석 회전형 (Hakuraku et al. 1986 [9])

자기 냉매의 자기열 효과가 공학적인 응용 목적을 위해서는 너무 작다는 것이다. 따라서, 가스-압축식 냉동 방식에서도, 주어진 압력 변화 폭에서 저온부와 고온부의 온도 차이를 크게 하기 위하여 재생기 개념이 도입되었듯이, 자기 냉동에서도 재생식 자기 냉동 사이클 (regenerative magnetic refrigeration cycle)에 대한 연구가 1966년 Van Geuns에 의하여 처음 시작되었다[12]. 재생식 자기 냉동 사이클에서는 자기 냉매가 일반 재생 냉동기와 마찬가지로 공극을 많이 포함하는



(b)

그림 4. 왕복형 자기 냉동기

- (a) 단기동 왕복형 (Delpuech et al 1981 [11])
- (b) 이중 기동 왕복형 (Nakagome et al .1985 [41])

구조를 가지며, 그 사이를 열전달 매체가 지나게 된다. 다만 자기 냉매로 이루어진 재생

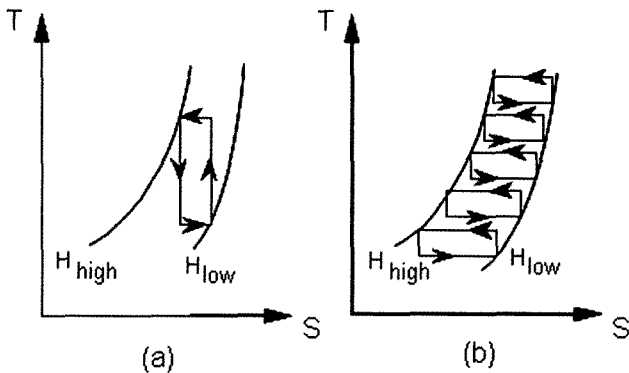


그림 5 자기 냉동 사이클의 비교  
 (a) 단순 카르노 사이클 방식  
 (b) 재생식 또는 다단 카르노 사이클 방식

기는 외부 자기장의 변화에 따라서 능동적으로 열을 흡수 또는 방출할 수 있기 때문에, 기존의 재생기를 수동적 재생기 (passive regenerator)라고 부른다면, 자기 냉매 재생기는 능동적 재생기 (active regenerator)라고 할 수 있다. 재생식 자기 냉동기의 가장 큰 장점은 주어진 자기장의 변화 폭 내에서 카르노 사이클 보다 더 큰 온도 범위를 만들어 낼 수 있다는 것이며, 능동적 재생기 (active regenerator)라는 명칭은 스틸링, GM 냉동기와 같은 재생식 냉동기의 관점에서 보았을 때 합당한 것이고, 축방향의 온도 분포를 가지는 자기 냉매 자체를, 독립적인 냉동기로 고려한다면, 이러한 자기 냉동 방식은 그림 5 (b) 처럼 다수의 단계별 카르노 사이클의 집합체라고 생각할 수 있다. Van Geuns 이후에 Taussig 등은 [13] 1986 년, 얇은 GGG 자기 냉매 조각을 이용하여 4.2 K 용 재생식 자기 냉동기에 대한 이론적인 해석과 실험 연구를 수행하였고, 1994 년 Jeong 등은 [14] 지름 0.8 mm의 GGG 구를 사용하여 두 개의 동일한 자기 재생기를 180°의 위상차로 작동시켜 1.8 K 용 냉동기를 개발하였다.

최근의 자기 냉동 분야에서의 연구는 두 가지로 구분될 수 있는데, 첫째는 수소 에너지 경제와 관련하여 수소 액화용 자기 냉동기, 둘째는 자기 냉동기의 대상 온도를 상온까지 확장시킨 상온용 자기 냉동기이다. 일본은 WE-NET (World Energy Network) 프로그램과 관련하여 수소 액화용 자기 냉동기에 대한 기본 연구를 캐나다와 함께 공동으로 시작하였는데 [15], Ohira 등은 1996 년 처음

으로 GGG 를 이용하여 20 K의 수소 액화용 자기 냉동기를 연구하였으며 [16], Kamiya 등은 [17] 2005 년 20 % 가돌리늄을 포함한 다결정 DGAG (poly crystal 20 % Gadolinium doped Dysprosium Aluminum Garnet) 를 사용하여 수소를 액화시켰다. 그러나 이러한 연구는 상온에서부터 수소의 액화점 (20 K) 부근까지 다른 방식으로 수소를 예냉한 후에 단순 카르노 방식 자기 냉동기로서 액화를 시킨 것이므로, 앞으로의 연구는 자기 냉동기로서 얼마나 넓은 범위의 온도를 담당할 수 있는지가 주요 관심사이다. 현재의 기술로서 상온부터 20 K 까지의 온도 영역을 모두 담당할 수 있는 자성 냉매는 존재하지 않기 때문에, 자기 냉동기의 작동 온도 대역은 현실적으로 액체 질소 온도 (77 K) 이하로 제한하여 연구가 이루어지고 있다. 또한 자기 냉동기의 작동 온도 범위를 부분적으로 넓히기 위해서는 능동적 재생 방식을 채택하여야 할 것 이며, 재료 자체의 자기열 효과 (magnetocaloric effect) 를 높이기 위하여 1 차 상변화 (1st order phase transition) 물질이 기존의 2 차 상변화 (2nd order phase transition) 물질 대신 선호되고 있다.

상온 자기 냉동에 대한 연구는 2005 년에 열린 IIF-IIR 국제 상온 자기 냉동 학회 (IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature)의 연구 초록을 보면 상세히 알 수 있는데 [18], 미국의 Astronautics 사는 상온 에어컨 용으로 자기 냉동기를 개발하고자 하고 있다 [19]. 동사에서는 3 kg의 가돌리늄 (Gd)을 사용하여 5 T의 자기장 변화로써 25 K의 온도차를 만들었고, 10 K의 온도차 범위에서는 600 W의 냉각 능력을 보여 주었다 [20]. 캐나다의 Rowe 등은 [21] 5 T를 발생시키는 초전도 자석을 이용하여 한 개에서 세 개 까지 자기 냉매 조합 (Gd,  $Gd_{0.74}Tb_{0.26}$ , and  $Gd_{0.85}Er_{0.15}$ )을 층으로 구성하여 자기 냉동기의 특성을 파악하였으며 [21-23], 이러한 다층 구조로써 85 K까지의 온도차를 구현한 바 있다. 그러나 특수한 목적을 제외하고 상온 자기 냉동기의 상업화를 위해서는 초전도 자석을 사용하는 시스템은 어려운 것이기 때문에, 희토류계의 영구 자석을 이용하여 1.5 T 정도의 자기장 변화

로써 상온 자기 냉동기를 구현하고자 하는 노력이 더 현실적이라 할 수 있다. Zimm 등은 자기 냉매를 자석 주변에서 회전시키고 열전달 매체로서는 물을 사용하여 24 K의 온도차를 확보하였다[24]. 이 장치는 4 Hz의 회전 주파수로써 작동하였으며, 또한, 가돌리늄(Gd)과  $Gd_{0.94}Er_{0.06}$ 의 복합 다층 구조를 가진 자기 냉매 부분을 순수 가돌리늄(Gd) 또는 1차 상변화(1st order phase transition) 물질인  $La(Fe_{0.88}Si_{0.12})_{13}H$ 와 비교한 연구를 수행하였다. 다른 연구자들도 유사한 회전 구조 또는 왕복형 자기 냉동기에 대한 연구를 보고하고 있다[25-28].

#### 4. 자기 냉동 기술의 전망

본고에서는 유체를 사용하는 대신 고체의 냉매를 이용하여 온도를 내리는 자기 냉동에 대한 기본적인 원리, 연구 발전 과정을 소개하였다. 초기에 개발된 자기 냉동기는 유체를 이용하여 냉각 효과를 볼 수 없는 매우 낮은 온도를 생성시키고자 하는 것이었다. 현재 자기 냉동의 응용이 가장 확실시 되는 분야는 우주 관측으로서, SIRTF (Space Infrared Telescope Facility)의 적외선 관측 장비이며 [29] 미국, 일본, 유럽에서 우주로 보낼 ADR (Adiabatic Demagnetization Refrigerator) 장치를 몇 가지 상자성염(ferric ammonium alum 포함)을 사용하여 제작하고 있다. 또한, 실험실에서 50 mK 정도의 극저온을 이용하여 실험을 해야 할 경우, 대부분 사용하기 어려운 희석 냉동기를 사용해 왔었는데, 최근에는 ADR 장치를 상업화하는데 성공하여 훨씬 간편하게 극저온 실험을 할 수 있게 되었다[30].

극저온 이든 상온이든 간에 기존의 유체를 대체하는 시스템으로서의 자기 냉동기는 다음과 같은 장단점을 가진다. 첫째, 본질적으로 저속 운전을 할 경우, 가스 압축 냉동기보다 높은 열역학적 효율을 달성할 수 있다. 둘째, 냉동 효과는 자기 냉매의 자기열효과에 직접적으로 영향을 받으므로, 온도 영역에 따라서 냉동 효과를 크게 하기 위해서는 좀 더 나은 자성체의 개발이 요구된다. 셋째, 자석과 자기 냉매의 상대 운동을 통하여 자기장을 변화시키는 장치에서는, 부가적인 기계적 일과 관련된 비 효율성과, 장치의 복잡함이 발생하는

단점이 있다. 넷째, 자석과 자기 냉매의 상대 운동없이 자기장을 변화시키는 장치에서는, 전자석의 전기 에너지를 제어하는 기술이 또한 필요하다. 다섯째, 자기 냉매와 외부의 열교환기 사이에는 효율적인 열 스위치의 설계와 제작이 전체 냉동기의 적절한 작동을 위하여 필수적이다. 여섯째, 단순 카르노 사이클은 자기 냉동기의 시스템 구조면에서 잇 점이 있는 반면, 재생식 사이클은 적절하게 제작이 되었을 경우, 미약한 자기열 효과의 이용을 극대화시킬 수 있다.

이상의 기술적인 장점과 약점을 잘 고려하여, 자기 냉동기의 구성요소에서 발생하는 부가적인 엔트로피 생성을 최소화하면, 머지않은 장래에 틈새 시장에서 더 많은 자기 냉동기의 상업화를 볼 수 있으리라 기대한다.

#### 참고문헌

- [1] W. F. Giauque and D. P. MacDougall, "Attainment of Temperatures Below 1° Absolute by Demagnetization of  $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ ," Phys. Rev. vol. 43, p. 768, 1933.
- [2] C. V. Heer, C. B. Barnes, and J. G. Daunt, "The Design and Operation of a Magnetic Refrigerator for Maintaining Temperatures below 1°K," Rev. Sci. Instr. vol. 25, no. 11, pp. 1088-1098, 1954.
- [3] J. E. Zimmerman, J. D. McNutt, and H. V. Bohm, "A magnetic refrigerator employing superconducting solenoid," Cryogenics, vol.2. No.3, pp. 153-159, 1962.
- [4] S. C. Collins and F. J. Zimmerman, "Cyclic Adiabatic Demagnetization," Phys. Rev. vol. 90, pp. 991 - 992, 1953.
- [5] T. Numazawa, H. Kimura, M. Sato and H. Maeda, "Carnot magnetic refrigerator operating between 1.4 and 10 K," Cryogenics, vol. 33, pp. 547-554, 1993.
- [6] H. Nakagome, N. Tanji, O. Horigami, H. Ogiwara, T.

- Numazawa, Y. Watanabe, and T. Hashimoto, "The Helium Magnetic Refrigerator I.: Development and Experimental Results," *Adv. Cryo. Eng.*, vol.29, pp.581-587, 1984.
- [7] R. Hakuraku and H. Ogata, "A static magnetic refrigerator for superfluid helium with new heat switches and a superconducting pulse coil," *Japanese J. of Appl. Phys.*, vol.24, No.11, pp.1538-1547, 1985.
- [8] W. P. Pratt Jr, S. S. Rosenblum, W. A. Steyert and J. A. Barclay, "A continuous demagnetization refrigerator operating near 2 K and a study of magnetic refrigerants," *Cryogenics*, vol. 17, pp. 689-693, 1977.
- [9] R. Hakuraku and H. Ogata, "Thermodynamic analysis of a magnetic refrigerator with static heat switches," *Cryogenics*, vol. 26, pp. 171-176, 1986.
- [10] J. A. Barclay, O. Moze, and L. Paterson, "A reciprocating magnetic refrigerator for 2 - 4 K operation: Initial results," *J. Appl. Phys.* vol. 50, pp. 5870 , 1979.
- [11] C. Delpuech, R. Berangerk, G. Bon Mardion, G. Claudet, and A. A. Lacaze, "Double acting reciprocating magnetic refrigerator: first experiments," *Cryogenics*, vol.21, pp. 579-584, 1981.
- [12] J. R. Van Geuns, "A study of a new magnetic refrigerating cycle," *Philips Res. Rep. Suppl.*, vol. 6, Eindhoven, 1966.
- [13] C. P. Taussig, G. R. Gallagher, J. L. Smith, Jr., and Y. Iwasa, "Magnetic Refrigeration Based on magnetically Active Regeneration," *Proc. of the Fourth Int.Cryocoolers Conf.*, pp. 79-88, 1986.
- [14] S. Jeong, J. L. Smith, Jr. and Y. Iwasa, "Tandem magnetic refrigerator for 1.8 K", *Cryogenics*, vol. 34, No. 4, pp. 263-269, 1994.
- [15] W. Iwasaki, "Magnetic refrigeration technology for an international clean energy network using hydrogen energy (WE-NET)," *Int. J. of Hydrogen Energy*, vol. 28,5, pp. 559-567, 2003.
- [16] K. Ohira, S. Matuo, and H. Furumoto, "Characteristics of magnetic refrigerator operating at 20 K," *Proc. of ICEC 16*, p. 403, 1996.
- [17] K. Kamiya, T. Numazawa K. Matsumoto, H. Nozawa, and T. Yanagitani, "Magnetic refrigeration for hydrogen liquefaction," *Proc. Int. Hydrogen Energy Congress and Exhibition*, 2005.
- [18] *Proc. of the 1stInt. Conf. on Magn. Refrigeration at Room Temperature*, Montreux, Switzerland, 2005.
- [19] S. Russek and C. Zimm, "Potential for cost effective magnetocaloric air conditioning systems," *Proc. of the 1stInt. Conf. on Magn. Refrigeration at Room Temperature*, Montreux, Switzerland, 2005.
- [20] C. Zimm, A. Jastrab, A. Sternberg, V. Pecharsky, K. Gschneidner Jr., M. Osborne, and I. Anderson, "Description and performance of a near-room temperature magnetic refrigerator," *Adv. Cryo. Eng.*, vol. 43 pp.1759-1766, 1998.
- [21] A. Rowe, A. Tura, M-A. Richard, R. Chahine, and J. A. Barclay, "An overview of operating experience using the AMR test apparatus," *Adv. Cryo. Eng.* vol. 49, pp. 1721-1728, 2004.
- [22] M-A. Richard, A. Rowe, and R. Chahine, "Magnetic refrigeration: single and multi-material active magnetic regenerator experiments,"

- J. of Appl. Phys., vol. 95. pp. 2146-2150, 2004.
- [23] A. Rowe, A. Tura, J. Dikeos, and R. Chahine, "Near room temperature magnetic refrigeration," Proc. of the Int. Green Energy Conf., Waterloo, Ontario, 2005.
- [24] C. Zimm, A. Boeder, J. Chell, A. Sternberg, A. Fujita, S. Fujieda, and K. Fukamichi, "Design and performance of a permanent magnet rotary refrigerator," Proc. of the 1st Int. Conf. on Magn. Refrigeration at Room Temperature, Montreux, Switzerland, 2005.
- [25] X. Bohigas, E. Molins, A. Roig, J. Tejada, and X. Zhang, "Room temperature magnetic refrigerator using permanent magnets," IEEE Trans. on Mag., vol 36, p 538, 2000.
- [26] N. Hirano, "Room temperature magnetic refrigerator using permanent magnets," Paper K7.002, Presented at the meeting of American Physical Society, Austin Texas, Mar. 2003.
- [27] W. Wu, "Room temperature magnetic refrigeration using a 1.4 Tesla permanent magnet field source," Paper K7.004, Presented at the meeting of American Physical Society, Austin Texas, Mar. 2003.
- [28] B. Yu, Q. Gao, C. Wang, B. Zhang, D. Yang, and Y. Zhang, "Experimental investigation on refrigeration performance of a reciprocating active magnetic regenerator of room temperature magnetic refrigeration," Proc. of the 1st Int. Conf. on Magn. Refrigeration at Room Temperature, Montreux, Switzerland, 2005.
- [29] P. T. Timbie, G. M. Bernstein, and P. L. Richards, An adiabatic

demagnetization refrigerator for SIRTf," IEEE Trans. On Nuclear Science, vol. 36, no. 1, pp. 898-902, 1989.

[30] <http://www.janis.com/p-adr.html>

### 저자이력



정상권 (丁常權)

1962년 8월 16일생, 1985년 서울대 기계공학과 졸업, 1992년 MIT 기계공학과 졸업(공학박사), 1992년 ~1995년 MIT - Plasma Fusion Center 연구원, 현재 한국과학기술원 기계공학과 정교수