

극저온 냉동기(V) : 자기 냉동기

Cryogenic Refrigerators (V) : Magnetic Refrigerators

김 영 인
Y. I. Kim
생산기술연구원 기술개발본부 교수



- 1949 년생
- UCLA 대학원 졸업
- 극저온 시스템에서의 열전달을 전공하였으며 저온냉동, 빙축열, 흡수식냉동기 등에 관심을 가지고 있다.

장 호 명
H. M. Chang
홍익대학교 기계공학과 교수



- 1960 년생
- M.I.T. 대학원 졸업
- 극저온 냉동기에서 열, 물질전달을 전공하였으며 극저온냉동기, 초전도시스템, LNG응용기술등에 관심을 가지고 있다.

5. 자기 냉동기

5.1 서 론

현재 상업적으로 널리 사용되고 있는 극저온 냉동기에 관련된 주요 기술 및 응용사례는 앞서 연재한 네 편의 원고에 이미 소개되었고, 본 글은 극저온 냉동기의 마지막 편으로 자기 냉동기에 관한 핵심기술과 현재의 개발현황을 기술하고자 한다. 본래의 계획으로는 제 5편에서 자기 냉동기와 더불어 맥동관 냉동기 등 기타 여러가지의 극저온 냉동기를 다루려 했으나, 본 특집호에 별도 원고가 채택되어 자기 냉동기에만 국한하기로 한다.

자기냉동기는 아직 산업용으로 광범위한 응용분야를 갖고 있지는 못하다. 그러나, 유체를 반드시 냉매로 사용하지 않으므로 유체의 조작

이 어려운 온도범위에서의 냉동이나 압축기를 사용할 수 없는 상황에서의 냉동에 이용할 수 있는 장점 때문에, 1970년대 부터 세계 여러 곳에서 활발한 연구 개발이 진행되고 있다.

역사적으로 볼 때, 자기 냉동방식은 헬륨을 압축 및 팽창하는 방법으로 도달하기 어려운 1K 이하의 냉동을 수행하기 위하여 개발이 시작되었다.⁽¹⁾⁽²⁾ 그러나 최근에는 4K, 20K⁽³⁾⁽⁴⁾, 80K⁽⁵⁾ 등 여러 온도영역에서의 냉동을 수행하기 위해서 적절한 자성재료, 사이클 구성, 그리고 시스템의 제작등에 많은 연구가 수행중이다. 심지어는 상온인 300K 근처⁽⁵⁾에서의 냉동기나 열펌프에도 응용된 바가 있으며, 그 경제성에 관한 조심스런 논의가 일부에서 제기되고 있다.

저자들이 알고 있는 한, 국내에서는 자기냉동에 관한 연구 사례는 아직 단 한 건도 없었다.

국외에서는 광범위한 온도 분야에서의 자기냉동 및 관련분야에서 이미 수백편의 논문이 발표된 바 있고, 특히 1980년대 후반부터는 더욱 기술의 발전속도가 증가하고 있다.⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾ 저자들은 앞으로 국내에서도 응용가능성이 높은 적외선 센서(infrared sensor)등 일부 첨단기기용의 냉동기로나 기체의 액화나 음식보존등 일반 산업용 냉동기로서 자기냉동기의 개발이 활발해 지기를 기대하면서 본 원고를 집필한다.

본 글에서는 자기냉동기의 원리 및 개발현황을 소개하고자 한다. 이를 위하여 우선 물질의 자기적 성질을 간단히 정리하고, 역사적 개발과정과 최근의 개발현황을 간략히 기술하기로 한다.

5.2 상자성 및 강자성

물질의 자기적 성질중, 특정 조건에서의 특정 물질에만 존재하는 성질로 상자성(paramagnetism)과 강자성(ferromagnetism)이 있다. 대부분의 물질은 전자들의 자기적 영향이 서로 상쇄되어 자성을 갖지 않는다. 반면에 일부 물질은 이 영향이 서로 상쇄되지 않고 자기 모멘트(magnetic moment)를 갖고 있다가, 외부에서 자기장이 부가되면 쌍극자들(dipoles)이 자기장의 방향에 따라 정렬하여 자화되는 성질을 보인다. 이러한 물질을 상자성체라 한다.

상자성체에서 정렬되는 쌍극자 모멘트의 크기를 자화(magnetization), M 이라 하는데* 그 크기는 외부에서 가해진 자기장의 크기, B ,에 비례하고 절대온도, T ,에 반비례한다. 즉,

$$M = C \frac{B}{T} \dots\dots\dots (5.1)$$

이는 자기장의 크기가 작은 영역에 대해 실험적으로 입증된 Curie의 법칙이다. 식 (5.1)에서 C 는 상수이다. 그러나 실제로 M 은 자기장이 증가함에 따라 무한히 증가하지 않고 그림 5.1과 같이 최대 자화값으로 수렴하게 된다. 그림 5.1은 상자성체인 chromium potassium alum에 있어서 최대자화값과 비교된 자화의 크기를 B/T 의 함

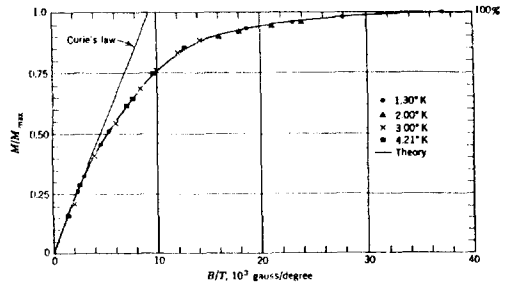


그림 5.1 자기장의 크기와 온도에 따른 상자성체의 자화

수로 나타내고 있다. B/T 의 단위는 1000gauss/K로 매우 큰 단위임을 주의해야 한다.

외부에서 자기장을 부가하여 상자성체가 자화되었을 때, 에너지가 자성체에 전달된다. 이 전달은 조직적인 에너지 전달(organized energy transfer)이므로 일(work)로 간주되며, 그 크기는

$$\delta W = -B \cdot dM \dots\dots\dots (5.2)$$

으로 쓸 수 있다. 부호는 자성체가 외부로 행하는 일을 양으로 채택하였다. 따라서 상자성체를 시스템으로 하여 열과 자기적 일의 출입이 정적으로 있을 때 시스템의 에너지 변화 dU 는

$$dU = T \cdot dS + B \cdot dM \dots\dots\dots (5.3)$$

으로 표시된다. 여기서 S 는 자성체의 엔트로피이다. 따라서 식 (5.3)은 평형상태에서 물질치간의 관계식이 되며, 마치 압력이 P , 체적이 V 인 압축성 유체에 대해

$$\delta U = T \cdot dS + P \cdot dV \dots\dots\dots (5.4)$$

과 유사한 관계에 있다. 또한 엔탈피, H ,와 일정 자기장 비열, C_B , 도

$$H = U - B \cdot M \quad dH = T \cdot dS - M \cdot dB \dots\dots\dots (5.5)$$

* 보통은 단위 체적당 자화로 정의되나 여기서는 전체 자화로 한다.

$$C_B = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_B \dots\dots\dots (5.6)$$

으로 구할 수 있다. 기타 Maxwell관계식들은 Bejan⁽⁹⁾에 자세히 나타난다.

또 하나의 특수한 자기적 성질은 강자성이다. 강자성은 오직 다섯가지(*Fe, Co, Ni, Gd, Dy*)의 원소와 이들을 포함한 합금에서만 나타나는 성질로, 이웃한 원자사이의 상호작용으로 강한 자기모멘트를 형성함으로써 나타난다. 이 상호작용은 순수한 양자효과(quantum effect)로 고전물리학으로는 간단히 설명할 수 없는 현상이다. 그러나 강자성 물질이 특정한 온도 이상으로 가열되면, 그 상호작용이 소멸되어 강자성을 잃고 단순한 상자성체가 되는데 이 온도를 Curie 온도라 한다. 예를 들어, 철의 Curie 온도는 1043 K이다.

5.3 자기냉동기의 발달 과정

상자성체를 자화하여 가열하거나 소자(demagnetization : 자기장을 제거)하여 냉각하는 원리는, 유체를 압축하여 가열하고 팽창하여 냉각하는 원리와 마찬가지로 이미 19세기 말에 알려졌다. 그러나 체계적인 장치를 고안하여 자기냉동기를 사용하게 된 것은 액체 헬륨으로 1 K의 온도를 얻은 후, 더 낮은 온도에 도달하기 위한 물리학자들의 시도에 의해서였다. 1926년, William F. Giauque와 Peter Debye는 각각 독자적으로, 그리고 우연히도 거의 같은 시기에 1K 이하에 도달하는 자기냉동기를 고안하였다.

Giauque와 Debye의 냉동방식에는 자성체로 황화가돌리늄(gadolinium sulfate)을 사용하였는데, 이 자성체는 1K 이하에서 Curie의 법칙을 매우 잘 따른다. 이 냉동기의 원리는 그림 5.2에 보여진다.

외부의 자기장이 없는 상황에서 상자성체는 상태 1과 같이 자기모멘트가 무작위(random) 방향으로 위치하여 자화되지 않고 있다. 이 상태를 온도-엔트로피(*T-s*)선도상에 표시하면, 혼란한 상태이므로 상대적으로 큰 엔트로피를 가

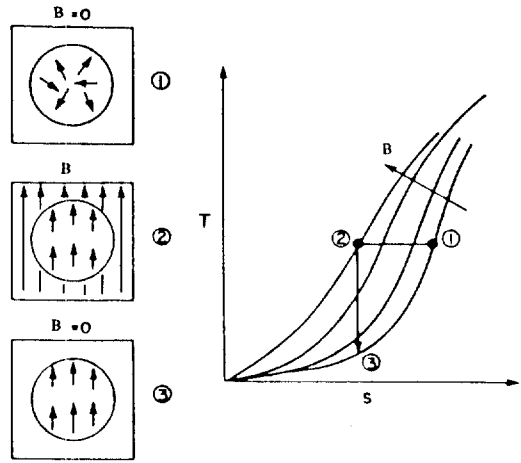


그림 5.2 등온자화 및 단열소자에 의한 냉각

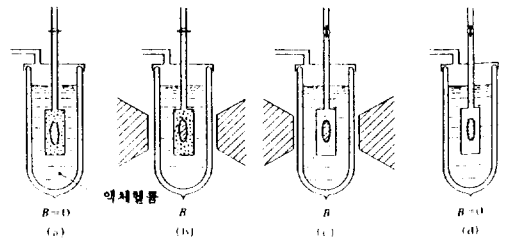


그림 5.3 Giauque의 실험방법

지며 자기장이 0인 곡선상에 위치한다. 선도에서의 곡선들은 같은 자기장 크기에서의 상태들을 연결한 곡선이며 그림의 표시와 같이 왼쪽 또는 오른쪽으로 갈수록 자기장의 크기가 증가한다. 여기에 온도를 일정하게 유지하며 자기장을 부가하면 상태 2와 같이 자기모멘트가 한 방향으로 정렬하면서 엔트로피가 감소한다. 이 과정은 선도상에서는 왼쪽으로 수평이동하는데, 마치 압축성유체의 등온압축과 같은 효과로 외부에서 일이 전달되며 같은 온도를 유지하기 위해 외부로 열이 방출되는 과정이다. 가해지던 자기장을 열의 출입이 없이 제거하면 자성체가 엔트로피의 변화없이 더 낮은 온도(상태 3)로 냉각되는 과정이 바로 저온에 도달하는 원리이다. 이 과정은 마치 압축성유체의 단열팽창과 같은 효과를 갖는다.

1933년에 Giauque는 이러한 방법으로 액체헬륨온도에서부터 0.25K에 도달하는데 성공하였

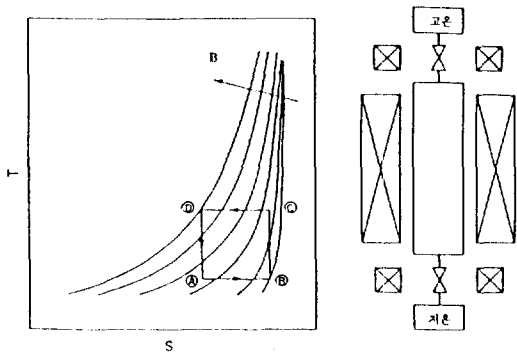


그림 5.4 초전도 밸브를 이용한 Carnot사이클 자기 냉동기

다. 이 실험에서 자기장을 생성하는데 저항식 전자석을 사용하였다. 이 실험을 수행하는 방법은 그림 5.3에 나타내었다. 등온자화는 (a)에서 (b)의 상태로 외부의 액체헬륨과 열전달을 수행하며 이루어 지고, 단열소자는 상자성체와 외부사이를 진공으로 단열하여 (c)에서 (d)의 상태로 이루어 진다. 이후 이 방법은 다단식(cascade)으로 응용되어 0.00001K까지 도달하는데 기초가 되었다.

1950년대와 1960년대에는 정상상태의 사이클을 운전하면서 지속적으로 0.2K의 냉동을 수행하는 냉동기가 개발되었는데, 그 중 대표적인 것이 Zimmerman 등에 의한 것으로 그림 5.4에 그 원리가 보여지고 있다. 이 냉동기에는 상자성체로 ferric ammonium alum을 사용하였고 Carnot사이클이 그 기본이 되었다. 순서로 등온소자(A-B), 단열자화(B-C), 등온자화(C-D), 단열소자(D-A)의 과정으로 구성된다. 압축성 물질을 이용한 Carnot사이클과 마찬가지로의 원리로, 등온소자과정이 낮은 온도에서 냉동을 수행하는 과정이고 등온자화과정이 상대적으로 높은 온도에서 열을 방출하는 과정이다.

이 냉동기에서는 고온부와 저온부에서 열전달을 제어하기 위해 초전도 밸브(superconducting valve)를 사용하였다. 이 밸브는 임계자기장이하에서는 초전도 상태가 되어 우수한 열전도가 이루어 지고 임계자기장을 초과하면 열전도가 크게 감소하여 열스위치(thermal switch)의 역할을 한다. 초전도밸브는 0.26K에서 0.1mW의

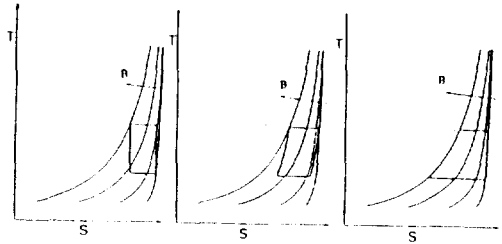


그림 5.5 FS 선도상의 Carnot, Stirling, Ericsson 사이클

냉동을 지속적으로 수행하는 핵심이 되었다.

1970년대 이후에는 1K이하의 온도보다는 약 10K내지 20K에 열을 방출하면서 4K에서 수 W의 냉동을 수행하는 냉동기의 개발이 주류를 이루고 있다. 이 배경에는 본 원고의 제 3편에 소개된 GM(Gifford-McMahon) 냉동기의 상업적 출현과 초전도 자석의 본격적 응용과 관련이 있다. GM냉동기로 20K까지는 대체로 수월히 냉동이 가능하고 4K정도에서 작동하는 노비움-티타늄(nobium titanium) 등의 초전도체를 가공한 초전도자석의 수요가 여러 분야에서 나타났기 때문이다. 이러한 온도영역의 자기 냉동기는 열역학 구성상 크게 Carnot사이클, Stirling사이클, Ericsson 사이클등으로 나누어 지는데, 그림 5.5의 T-S선도상에 비교되어 있다. 이 중에서도 Carnot사이클 형태의 자기냉동기가 그 주류를 이루고 있으며 Ericsson사이클 형태 및 그 응용사이클은 최근에 많은 관심을 끌게 되었다.

Carnot사이클 형태의 자기냉동기중 앞서 소개한 Zimmerman등의 초전도밸브를 이용한 방식은 자기장 용량에 한계가 있기 때문에, 자석이 움직이거나 자성체가 움직이는 방식이 많이 개발되었다. 그 대표적인 경우로 프랑스의 그레노블연구소(CEN)⁽⁸⁾의 double-acting왕복동 냉동기가 있다. 이 냉동기는 그림 5.6과 같이 상자성체인 GGG(gadolinium gallium garnet, 화학식 : $Gd_3Ga_5O_{12}$)두 개를 하나의 구동장치에 연결하여 유압시스템으로 작동된다. 그림과 같이 왕복행정의 상사점에 위치했을 때, 상부의 자성체는 고온에서 등온자화되고 하부의 자성체는 저온에서 등온소자된다. 반대로 하사점에서는 상부의 자성체가 소자, 하부의 자성체가 자화

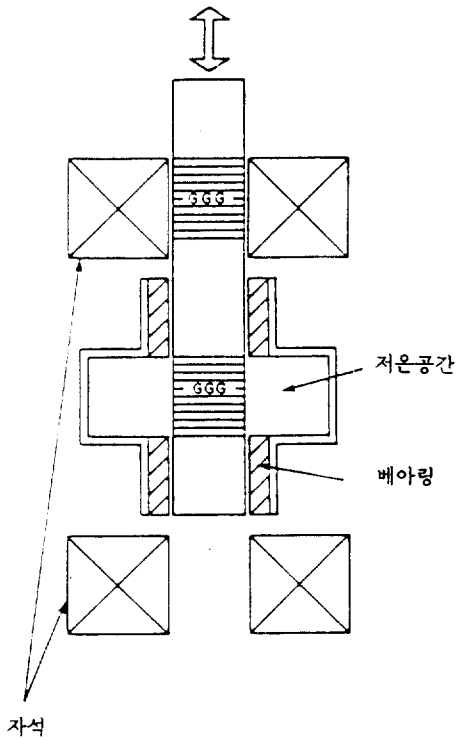


그림 5.6 double-acting 왕복동 Carnot사이클 냉동기

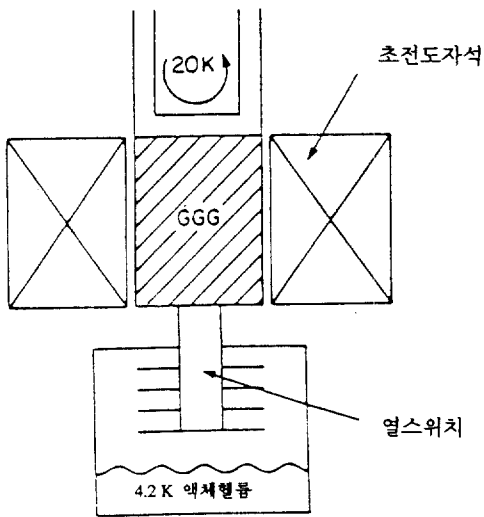


그림 5.7 열스위치를 이용한 Carnot사이클 냉동기

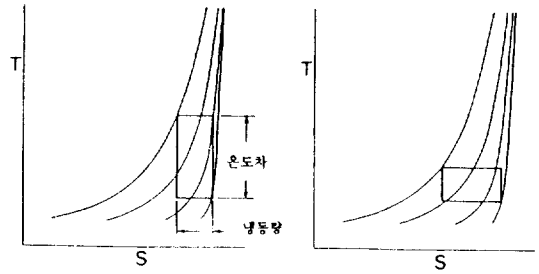


그림 5.8 최대자기장의 크기가 같을 때 Carnot 사이클의 온도차 및 냉동량

되며, 그 사이의 과정에서 자성체들은 단열된 베어링을 지나며 단열 자화 또는 소자된다. 이 냉동기는 상당히 좋은 성능을 보여 주었으나 베어링부의 마찰과 밀봉의 문제가 제기되었다.

또 다른 형태의 Carnot사이클 냉동기는 일본의 Kakagome 등⁽¹⁰⁾이 개발한 4K와 20K사이에서 작동하는 냉동기를 들 수 있다. 이는 그림 5.7과 같이 액체 헬륨온도의 냉동부하와 자성체(GGG) 사이에 특수한 열스위치를 연결한 구조를 갖는다. 열스위치에서는 자성체의 온도가 액체온도보다 낮으면 확장표면(extended surface)에 기체가 응축하여 매우 우수한 열전달이 이루어지고, 자성체의 온도가 증가하면 낮은 열전도도의 기체가 그 표면 주위에 정적으로 머무르게 되어 미량의 열전달만 이루어지는 작동을 한다. 이 냉동기로 4.2K에서 6.25W의 냉동을 수행하였는데, 같은 온도에서 작동하는 이상적인 Carnot냉동기의 성능계수의 50%에 달하는 우수성을 보여 주었다.

이러한 Carnot사이클 형태의 냉동기로 큰 온도차 사이의 냉동을 수행하려면 성능계수가 감소함은 물론, 자화하는데 필요한 자기장의 크기도 증가해야 하는 어려움이 따른다. 그림 5.8은 최대 자기장의 크기가 일정할 때, 온도차가 큰 경우와 작은 경우를 T-S선도상에 도시적으로 보여준다. 작동 온도차가 클수록 냉동량이 작아짐을 알 수 있다. 최대자기장의 크기는 초전도 자석을 사용하여 크게 증가시킬 수 있으나 초전도상태가 유지되는 임계전류밀도의 한계로 인해 제한적이다. 자성체의 크기가 매우 작아도

생성할 수 있는 자기장의 크기는 보통 10tesla(1 tesla=10,000gauss)를 초과하지 못한다. 이러한 이유로 최근에는 더 큰 온도영역의 냉동을 위해 자성물질을 열재생기로 사용하는 재생형 자기 냉동기의 개발이 활발해지게 되었다.

5.4 최근의 개발 현황

자기 냉동기의 개발과 관련하여 최근 4·5년간 동안 중점적으로 연구된 분야를 정리하면,

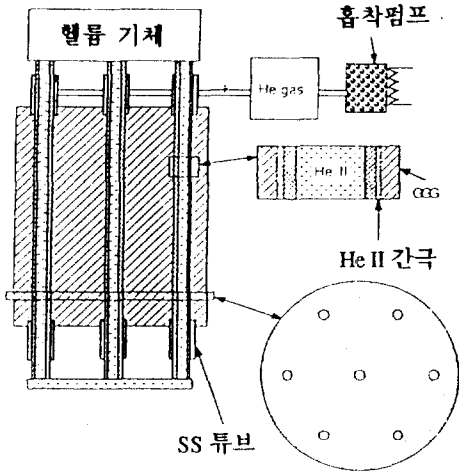


그림 5.9 2K HeII 스위치

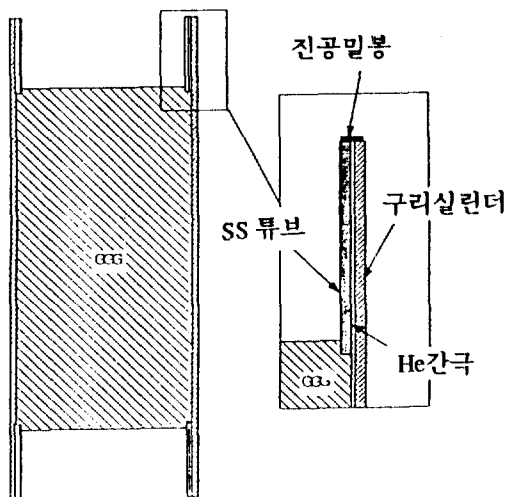


그림 5.10 10K He 스위치

열스위치의 개발, 열재생사이클 형태의 냉동기 개발, 자기 재생기 응용, 새로운 자성물질의 개발, 응용 범위의 확대 및 실용화등으로 요약할 수 있다. 이 다섯 가지의 분야는 서로 중첩되어 있는 부분이 있으나 설명의 편의상 구분된 것이다.

5.4.1 열스위치의 개발

자기냉동기에서 가장 중요한 부분이라면 무엇보다도 자성체와 냉동부 또는 열방출부와의 열전달 제어이다. 앞절에서 언급한 바와 같이 자성체가 왕복운동 또는 회전운동을 하면서 주기적으로 열전달을 수행하거나 단열되는 형태의 개발과 아울러 새로운 형태의 열스위치 개발도 활발하다.

미국 항공우주국(NASA)의 Helvensteijn와 Kashani⁽¹¹⁾가 개발중인 열 스위치 중 약 2K와 10K이상에서 작동하는 스위치가 각각 그림 5.9 및 5.10에 보여지고 있다. 2K 열스위치는 헬륨을 약 2.17K이하로 냉각하였을 때 나타나는 초유체

초전도자석

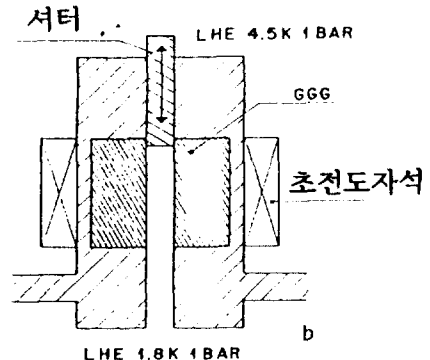
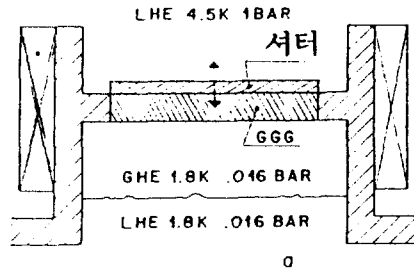


그림 5.11 단열서터를 이용한 열스위치

(superfluid)인 헬륨 II의 대단히 높은 열전도도를 이용한다. 작은 간극에 헬륨II를 공급하거나 제거함으로써 스위치의 역할을 수행하는데 헬륨의 조절은 흡착펌프의 일종인 활성탄소펌프(ACP : activated carbon pump)에 의하여 행하여진다. 10K 열스위치도 자성물질(GGG)과 실린더 사이에 작은 간극을 설치하여 헬륨을 공급하거나 제거하여 열전달을 조절한다.

프랑스의 그레노블연구소의 Seyfert⁽⁸⁾ 등은 그림 5.11과 같이 4.5K의 헬륨과 자성체(GGG) 사이에 단열재를 섯터로 제작하여 주기적으로 작동하는 열스위치를 제작하였다. 그림 5.11의 첫째 경우는 원판형 섯터를 자성체표면에 접촉하도록 상하운동을 하는 구성이고, 둘째 경우는 원통형 섯터를 자성체 내부 공간에 왕복하는 구성이다. 이러한 스위치의 단점으로는 섯터와 자성체간의 간극이 약 10 μ m정도로 매우 작게 제작해야 하는 점이 지적되고 있다.

5.4.2 열재생사이클 형태와 냉동기 개발

앞에서 설명한 바와 같이 Carnot사이클 형태의 자기냉동기로는 넓은 온도 영역에서의 작동이 어려우므로 열재생형(thermal regenerative) 냉동기의 개발이 많이 시도되고 있다. 일본 동경공업대의 Matsumoto 등⁽¹²⁾은 열재생형 Ericsson사이클의 자기냉동기 개발상황을 보고한 바 있다. 이 냉동기는 자성체로 상자성물질 대신 강자성물질을 사용하는데, 자성체의 개발에 관한 언급은 뒤에 다시 하기로 한다.

그림 5.12는 강자성체의 엔트로피-온도(S-T) 선도에 이상적인 Carnot사이클과 Ericsson 사이클을 비교하고 있다. 같은 자기장의 변화를 이용할 때, Ericsson 사이클은 더 큰 온도차에서의 냉동을 수행할 수 있고 따라서 엔트로피의 변화를 더 효율적으로 사용함을 알 수 있다. 이상적인 Ericsson사이클은 등자기장 가열(1-2), 등온자화(2-3), 등자기장 냉각(3-4), 등온소자(4-1)로 이루어진다. 여기에서 가열과 냉각과정은 외부와의 열교환을 통해 이루어지지 않고, 열재생기를 이용하여 방열 및 축열을 통하여 이루어진다.

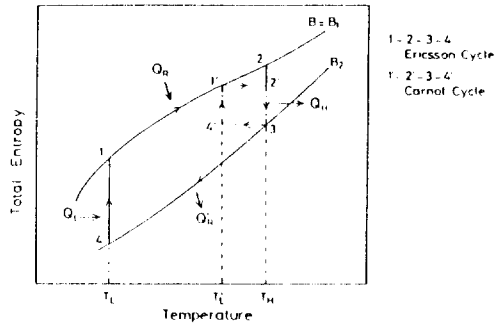


그림 5.12 S-T선도상에서 같은 자기장의 변화로 작동되는 Carnot 사이클과 Ericsson 사이클

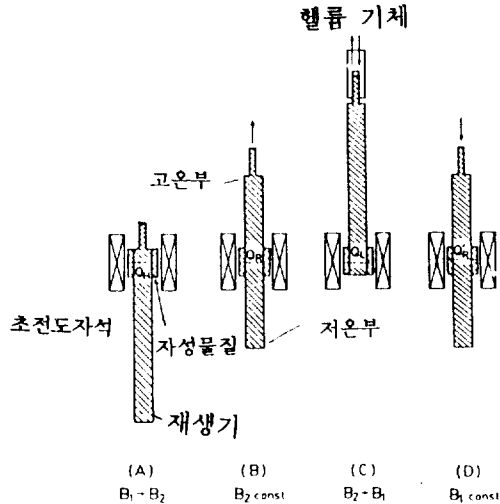


그림 5.13 Ericsson 사이클 냉동기의 작동원리

일정한 자기장하에서 자성체의 비열은 식 (5.5)와 (5.6)을 이용하여

$$C_B = T \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_B \dots\dots\dots (5.7)$$

이므로, S-T선도에서 등자기장곡선의 기울기에 비례한다. 그림 5.12에 나타난 강자성체는 자기장의 크기에 따라 비열의 크기가 다르므로, 완전한 열재생은 가능하지 않다. 따라서 Ericsson 사이클을 작동하기 위해서는 상당히 복잡한 자기장의 조절이 필요하다. 자기장의 조절의 필요성은 그림 5.12의 엔트로피 차이로도 설명할 수 있다. 열역학의 제 2법칙의 관점에서 방출되는

엔트로피($S_2 - S_3$)는 냉동부하로 부터 흡수되는 엔트로피($S_1 - S_2$)보다 크거나 같아야 하는데, 그림과 같은 자성체는 그렇지 못하므로 완전한 열재생은 불가능하기 때문이다. 이 원리는 마치 제 4편에서 다룬 대형 헬륨냉동기에서 저압과 고압의 비열차때문에 완전한 열재생이 불가능한 원리와 같다고 할 수 있다.

Matsumoto등이 개발중인 Ericsson 사이클은 그림 5.13과 같다. 초전도자석과 자성체는 정지하고 있으며 열재생기는 주기적으로 움직이는 구성을 갖고 있다. (A)와 같이 재생기가 최저 위치에 정지한 상태에서 자성체는 자화되면서 온도가 상승하며 열을 외부로 방출하고, (B)와 같이 재생기가 상향운동을 하면서 자성체를 냉각한다. 재생기는 열용량이 큰 물질로 상부에서 높은 온도, 하부에서 낮은 온도가 되는 온도구배를 갖고 있다. (C)와 같이 최고위치에서 소자되면 온도는 감소하며 열을 흡수하여 냉동을 수행한 후, (D)와 같이 하향운동을 하면서 자성체의 열을 가열한다. 그림 5.14는 실험용 냉동기의 개략도이다.

이 냉동기에서 열재생물질은 가공을 쉽게 하기 위하여 납에 안티몬(antimony)을 함유하여 사용하였다. 자성체는 Curie 온도가 51K정도인 $DyAl_{2.2}$ 으로 제작하였는데, 최고 5 tesla의 자기장으로 무부하 상태에서 50K이하의 온도에 도달하였다. 냉동기의 운전과정을 자성체의 S-T 선도상에 표시한 것이 그림 5.15이다. 사이클 주기는 약 4분 40초로 냉동기가 상당히 느리게 작동하고 있으나, 두 개의 등온과정이 온도가 일정하기보다는 오히려 엔트로피가 일정한 과정 즉, 단열과정에 더 가까운 모양이다. 이는 느린 작동에도 불구하고 자화 및 소자과정에서 자성체의 열전달이 충분히 좋지 않았기 때문이다. 결과적으로 볼 때, 냉동사이클은 오히려 Brayton사이클의 형태가 이루어 졌다.

Ericsson사이클형태의 냉동기는 충분하지 못한 열전달 이외도, 축방향의 전도, 운동부의 마찰, shuttle열전달 손실등으로 아직 만족할 만한 냉동성능을 얻지 못한 상태이다. 그러나 좀 더 큰 온도차에 대한 냉동, 그리고 액체헬륨 온도 이상의 온도에서의 냉동을 수행하기 위한 시도로

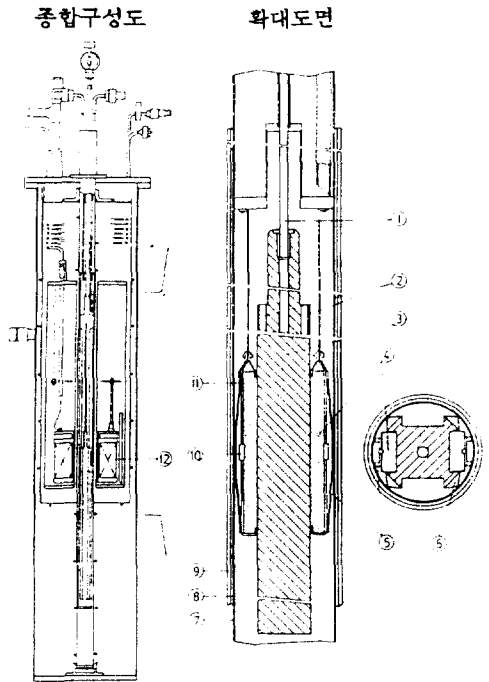


그림 5.14 Ericsson 사이클 냉동기의 구성도 (3 : 재생기, 4 : 자성물질, 12 : 자석)

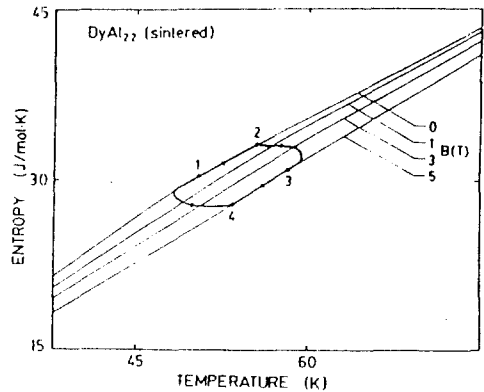


그림 5.15 S-T 선도상에 나타난 Ericsson 냉동기의 운전 상태

계속 연구, 개발할 과제로 평가된다.

이 밖에 Cross 등⁽¹³⁾과 Jaeger 등⁽¹⁴⁾도 Ericsson 사이클 또는 Brayton사이클 형태의 냉동기개발을 위한 기초작업으로, 여러 상자성체 및 강자성체의 자화특성을 이용하여 사이클 해석을 수행한 바 있다.

5.4.3 자기 재생기(magnetic regenerator) 응용

자성체를 열재생 물질로 사용하는 재생기를 자기 재생기라 한다. 그 중에서도 자기장의 크기와 왕복하는 유체의 양을 적절히 조절하는 재생기를 능동적 자기 재생기(AMR : active magnetic regenerator)라 한다. 이 경우에도 냉동을 수행하는 냉매는 자성체, 즉 열재생물질이며 유체는 자성체와의 열교환을 담당하는 매개체에 불과하다.

앞서 설명한 바와 같이, 자기냉동기의 설계에서 가장 어려운 부분이 자성체에서의 열전달 제어이다. 예를 들어, 등은 자화를 수행하기 위해서는 자기장의 크기를 증가시키면서 자성체에서 외부로 열을 방출해야 하는데, 보통의 경우 열전달이 충분히 빠르지 못하므로 등온을 얻지 못하고 온도가 상승한다. 만일 자성체의 표면적을 매우 넓게 제작하고, 자화하는 동안 저온의 유체를 이 표면에 유동시키면 우수한 열전달과 함께 등온이 얻어진다. 이와 같이 자기장의 크기와 유체의 유동을 동시에 제어 하면, 극저온에서의 기계적인 운동이 없으면서도 큰 온도영역의 자기냉동을 할 수 있으며 이를 능동식 자기재생기를 응용한 냉동기라 한다.

M.I.T.의 Tausczik⁽¹⁵⁾은 상자성체인 GGG를 열재생물질로 하고 약 3기압까지의 초임계상태 헬륨의 주기적 유동을 제어하여 약 4K와 5.5K 사이에서 0.4W의 냉동을 수행하는 능동적 자기 재생기를 제작하였다. 그 후, Cogswell⁽³⁾ 및 Smith 등⁽¹⁶⁾은 4.2K와 15K사이에 운전하는 냉동기를 같은 방식으로 설계 및 제작하였으나, 원하는 결과에 아직 도달하지 못하고 있다. 그 중요한 이유로는 외부에서 제어하는 헬륨의 유동이 설계한 재생기 내부유동을 생성하지 못했기 때문이다. 구체적으로 헬륨이 재생기에 일정한 압력을 투입되었을 때 열전달의 영향으로 유동량이 일정하지 못하기 때문이며, 이 상황을 헬륨이 숨을 쉬는(breathing)효과라고 설명한다.

미국 해군 David Taylor연구소의 Green와 Chafe⁽¹⁷⁾는 희토류물질중에서 Curie온도가 각각 293K와 235K인 가돌리늄(Gd)과 테르비움(Tb)을 합성한 강자성체를 재료로 능동식 자기재생

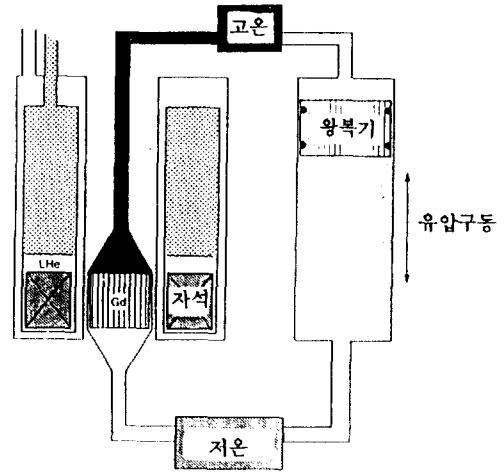


그림 5.16 강자성체를 이용한 능동적자기재생기의 응용

기를 제작하여 시운전하였다. 그림 5.16은 이 냉동기의 구성도이다. 유압식으로 작동하는 왕복기로 헬륨의 유동을 제어하는 구성이다. 이 개발도 아직 완성되지는 않았으며, 만족할 만한 강자성체의 합성이 매우 어려운 작업을 지적하고 있다.

일본의 동경공업대와 Toshiba사의 Li 등⁽¹⁸⁾은 다음 절에 소개하는 새로운 자성물질중 몇가지 희토류물질을 열재생기에 사용하였을 때의 성능을 측정하였다. 이들은 약 4K와 35K사이에서 Curie 온도를 갖는데, 강자성에서 상자성으로 천이할 때 매우 큰 비열을 가지게 되어 본 원고의 제 2편 및 3편에서 각각 소개한 Stirling냉동기나 G-M 냉동기에 열재생물질로 사용하기에 적절하다고 발표했다. 그 중에서도 Er_3Ni 와 $Er_{0.5}Dy_{0.5}Ni_2$ 등은 15K이하에서 납(lead)보다도 훨씬 큰 비열을 갖고 있어서 우수한 열재생물질로 선택되었다. 이러한 물질들의 물성치와 열재생기 재료로의 제작과정은 Beaudry⁽¹⁹⁾ 및 Sahashi 등⁽²⁰⁾에 소개된다.

5.4.4 새로운 자성물질의 개발

자성물질은 자기냉동기의 냉매로써 가장 먼저 선택하여야 할 물질이다. 사이클의 구성에 따라 다소 중요성의 차이가 있겠지만, 일반적으로 (1) 큰 자기모멘트 (2) 적절한 작동온도 (3) 작은

hysteresis손실 (4) 작은 열용량 (5) 큰 열전도 등을 갖추어야 한다. (1) 과 (2) 의 조건은 마치 압축식 냉동방식에서 냉매의 증발잠열과 증발 온도와 비슷한 개념으로 최우선한다고 할 수 있다. (1) 의 조건을 충족시킬 수 있는 물질은 가돌리늄을 포함한 물질등으로 매우 제한되어 있다. 그중에서도 액체헬륨온도인 4K근처 또는 그 이하에서의 성능과 (5) 의 조건, 그리고 단결정(single crystal)으로의 가공성등을 고려하면, 거의 유일하게 GGG($Gd_3Ga_5O_{12}$)로 결정되어 현재까지 대부분의 자기냉동기에 사용되어 왔다.

그러나 자기냉동기의 작동온도가 15K 이상으로 확대되면서 새로운 상자성물질 또는 강자성 물질을 개발하여 냉동에 응용하는 연구가 다수 수행되고 있다. 일본 동경공업대의 Hashimoto등⁽⁷⁾은 15K이상의 온도에서, 이방성 spin을 갖고 있는 물질인 DAG($Dy_3Al_5O_{12}$)로 GGG를 대신할 수 있다고 발표하였다. 그림 5.17은 하나의 S-T 선도상에 두 물질의 등자기장 곡선들을 보여주고 있다. 이 두 물질을 자성체로 하여 그림 5.18과 같은 왕복동식 Carnot사이클 냉동기에 실험하였는데, 이 냉동기의 고온부에는 2단식 GM냉동기가 자기냉동기의 방출열을 흡수하고 있다. 두 물질을 각각 사용하였을 때의 과정이 그림 5.19의 S-T선도상에 나타난다. 이 두 사이클은 같은 냉동온도에서 같은 냉동부하일 때의 상황인데, DAG의 경우가 더욱 큰 온도차에 대해 작동되고 있음을 알 수 있다.

높은 온도의 자기냉동기를 제작할 때의 또

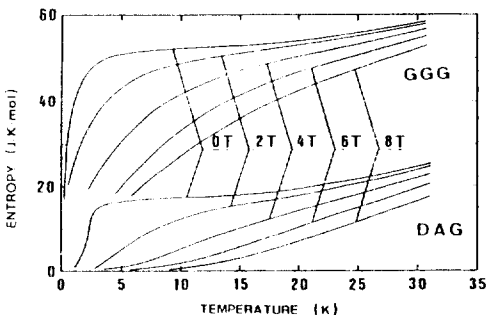
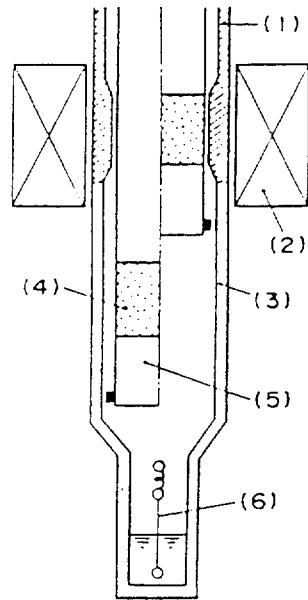


그림 5.17 S-T 선도상에 표시된 GGG와 DAG의 자화특성



- (1) 구리 실린더(GM냉동기 연결)
- (2) 초전도자석
- (3) 진공
- (4) 자성물질
- (5) 피스톤
- (6) 수위 개이지

그림 5.18 자성물질의 비교를 위한 Carnot 사이클 냉동 실험기

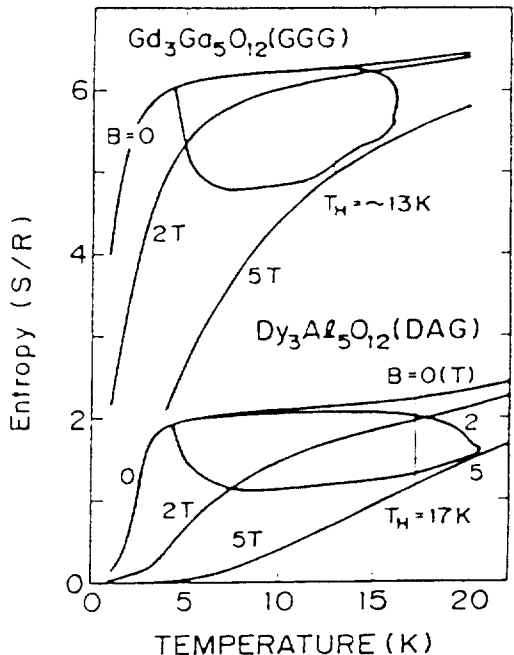


그림 5.19 동일 냉동부하시 GGG와 DAG의 성능비교

한가지 어려운점은 자기장의 크기이다. 액체헬륨 온도 및 그 이하의 온도에서는 초전도 자석을 사용하여 자기장을 형성하므로 4.5tesla까지의 높은 자기장을 얻는데 어려움이 없다. 그러나 20K 이상의 온도에서는 액체헬륨의 냉동이 필요한 초전도 자석을 사용할 수 없기 때문이다. 따라서 Seyfert⁽⁶⁾는 황화에로피움(EuS)등의 강자성체를 추천하고 있다. 향후 20K 이상의 영역에서 자기냉동이 구체적으로 실현되기 위해서는 적절한 강자성물질이 개발이 필요할 것으로 예측된다.

5.4.5 응용 범위의 확대 및 실용화

현재 응용되고 있거나 응용가능성이 높아 연구중인 자기냉동의 범위를 온도영역별로 분류하면 (1) 0.1에서 1.5K (2) 1.5에서 4.2K (3) 4.2에서 20K (4) 20에서 77K (5) 300K 근처이다. 영역 (1)은 앞서 소개한 바와 같이 자기냉동의 개발의 동기가 되었으며 현재 우주공간의 천문학 적 측정기기인 bolometer의 냉각에 응용된다. 영역 (2)의 온도는 전형적으로 초유체 헬륨을 생성하는데 응용된다. 초유체는 2.17K이하에서 얻어지는데 이 온도영역에서 초전도자석의 임계전류밀도(critical current density)가 4.2K에서 보다 25% 이상 증가하기 때문에 이미 사용되고 있다. 영역 (3)은 앞에서 여러차례 언급된 바와 같이 현재 가장 관심있는 영역이다. 2단식 GM 냉동기와 연결하여 팽창밸브를 사용하지 않고 액체헬륨온도에 도달할 수 있기 때문이다. 4.2K 정도의 응용분야는 자기공명영상기, 자기부상 열차, 핵융합로 제어, 에너지 저장, 원거리 통신 기기등 매우 다양하다. 영역 (4)의 냉동기는 영역 (3)의 냉동에 관한 예냉기기로써의 의미가 가장 크다고 할 수 있고, 수소의 액화 및 저장으로도 응용될 수 있다. 영역 (5)에서는 폐열 활용을 위한 열펌프 및 일반 공조 냉동기기로써도 가능성의 검토가 신중히 진행 중이다.

끝으로 Barclay등⁽²¹⁾이 제시한 자기냉동기의 손실을 소개하면서, 실용화에 관한 언급을 하려한다. 상업적으로 성공하였을 때 가장 시장성이 높다고 판단되는 앞의 온도영역 (3)에서의 자기냉동기 경우, 현재까지 여러가지의 시도가

있었으나 아직 그 기술이 정착되지는 않았다고 판단된다. 그 이유를 열역학적 손실로 분류하면, 불충분한 열전달, 운동부의 마찰, 유체의 혼합, 열유입, 와류(eddy current)에 의한 가열로 볼 수 있다. 이러한 종류의 손실은 주변기술이 발전하면서 현격히 감소해 왔음을, 우리는 이미 상업적으로 자리를 잡은 전편들의 냉동기 개발 역사를 통해 보아 왔다. 자기냉동기의 짧은 개발 역사를 고려할 때 실용화의 가능성이 작다고 말할 수는 없을 것이다.

5.5 결 어

본 글에서는 물질의 자기적 성질과 자기냉동기의 개발과정을 간략히 소개한 후, 현재 선진 제국에서 연구중인 내용을 정리해 보았다. 저자들은 자기냉동에 관한 전문가가 아니다. 다만 세계적으로 극저온 분야에서 자기냉동의 비중이 매우 커가는 시점에서, 국내에서는 관심이 너무도 미약한 느낌을 자주 가져왔다.

모두 다섯 편에 걸쳐 연재되었던 극저온 냉동기에 관한 글을 마감하면서, 미진한 구성과 내용에 관심을 가져주신 여러 독자께 감사의 말씀을 전한다. 이제 멀지 않은 장래에 한국의 극저온 관련 논문이 국제무대에 등장하기를 간절히 바랄뿐이다.

참 고 문 헌

1. White, G.K., 1979, *Experimental Techniques in Low-Temperature Physics*, 3rd ed., Oxford University Press, New York, pp.219-254.
2. Walker, G., 1983, *Cryocoolers, Part 2 Applications*, Plenum Press, New York, pp.216-251.
3. Cogswell, F.J., 1989, "Cycle Control of a Regenerative Magnetic Refrigerator Operating 4.2K to 15K," M.I.T., Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering
4. Barclay, J.A. and Steyert, W.A., 1982, "Materials for Magnetic Refrigeration between 2K and 20K," *Cryogenics*, Vol.22, pp.22-28
5. Hashimoto, T., Numasawa, T., Shino, M. and Okada, T., 1981, "Magnetic Refrigeration in

- the Temperature Range from 10K to Room Temperature," *Cryogenics*, Vol.21, pp.647-654
6. Barclay, J.A., 1988, "Magnetic Refrigeration : a Review of a Developing Technology," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 33, pp.719-731
 7. Hashimoto, T., Yazawa, T., Kuzuhara, T., Matsumoto, K., Nakagome, H., Takahashi, M., Sahashi, M., Inomata, K., Tomokiyo, A. and Yayama, H., 1988 "Recent Progress in Magnetic Refrigeration Studies," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol.33, pp.733-741
 8. Seyfert, P., 1990, "Research on Magnetic Refrigeration at CEN Grenoble," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 35, Part B, pp. 1087-1096
 9. Bejan, A., 1988, *Advanced Engineering Thermodynamics*, John Wiley & Sons, New York, pp.573-579
 10. Nakagome, H., Tanji, N., Horigami, O., Ogiwara, H., Numazawa, T., Watanabe, Y. and Hashimoto, T., 1984, "The Helim Magnetic Refrigerator I : Development and Experimental Results," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol.29, pp.581-592
 11. Helvensteijn, B.P.M. and Kashani, A., 1990, "Conceptual Design of a 0.1 W Magnetic Refrigerator for Operation between 10K and 2K," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 35, Part B, pp.1115-1123
 12. Matsumoto, K., Ito, T. and Hashimoto, T., 1988 "An Ericsson Magnetic Refrigeration for Low Temperature," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 33, pp.743-750
 13. Cross, C.R., Barclay, J.A., DeGregoria, A.J., S.R. and Johnson, J.W., 1988 "Optimal Temperature-Entropy Curves for Magnetic Refrigeration," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol.33, pp.767-775
 14. Jaeger, S.R., Barclay, J.A., and Overton, Jr., W.C., 1988 "Analysis of Magnetic Refrigeration with External Regeneration," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol.33, pp. 751-755
 15. Tausczik, C.P., 1986, "Magnetically Active Regeneration," M.I.T., Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering
 16. Smith, Jr., J.L., Iwasa, Y. and Cogswell, F.I., 1990, "Material and Cycle Considerations for Regenerative Magnetic Refrigeration," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol.35, Part B, pp.1157-1164
 17. Green, G. and Chafe, J., 1990, "A Gadolinium-Terbium Active Regenerator," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 35, Part B, pp.1165-1174
 18. Li, R., Yshida, O., Hashimoto, T., Kuriyama, T. and Nakagome, H., 1990, "Measurement of Ineffectiveness on Regenerators Packed with Magnetic Regenerator Materials between 4 and 35K," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol.35, Part B, pp.1183-1190
 19. Beaudry, B.J., 1988 "Preparation and Fabrication of Rare Earth Magnetic Materials," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol.33, pp.785-790
 20. Sahashi, M., Tokai, Y., Kuriyama, T., Nakagome, H., Li, R., Ogawa, M. and Hashimoto, T., 1990, "New Magnetic Material R₃T System with Extremely Large Heat Capacities Used as Heat Regenerators," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol 35, Part B, pp. 1175-1182
 21. Barclay, J.A., Jaeger, S.R. and Prenger, Jr., F.C., 1990, "Operational Envelope for Magnetic Refrigerators," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol.35, Part B, pp.1097-1104