

고온초전도 전자기 마그넷을 위한 새로운 개념의 냉각 시스템

이 해 근

Francis Bitter Magnet Laboratory

Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139

1 서 론

전기를 자기형태로 변환시켜 자장을 발생시키는 전자기마그넷은 현재까지 여러 많은 산업분야에서 사용되어 왔다. 초전도 재료가 이용되기 전에는 일반적으로 값이 저렴하고 비교적 전기전도도가 좋은 구리선을 이용하여 상전도마그넷을 제작, 사용하였으며 1930년도에는 MIT의 Francis Bitter에 의하여 처음으로 원형의 구리관을 적층하여 만든 10-테슬라급의 소위 "Bitter Magnets"으로 불리는 수랭식 상전도마그넷이 선을 보이게 되었고 그후 25-테슬라급의 Bitter Magnets도 개발되었다. 1961년에 Kunzler에 의하여 마그넷 제작용 저온초전도의 개발로 인하여 초전도를 이용한 마그넷 제작이 시작되었고 이로 인하여 초전도발전기가 제작되었다. 그후 1970년대에는 다심선 Nb₃Sn과 NbTi의 이용으로 초전도마그넷 제작이 활발하게 진행되었고 MIT의 Francis Bitter Magnet Laboratory(이하 FBML로 약칭함)에서는 Nb₃Sn과 NbTi로 만든 초전도마그넷과 Bitter Magnets를 중합하여 만든 "Hybrid magnets"이 처음으로 선을 보이게 된다. 이후 1982년에는 세계 최초로 30-테슬라급의 Hybrid II 가 제작되어 세계 최고의 고자장 마그넷으로 기네스북에 오르게 된다. 1970년대 후반과 1980년대 초반에 걸쳐 FBML에서는 상업용 NMR/MRI마그넷 개발이 시작되어 1980년대 후반에는 이미 600-MHz NMR마그넷 제작에도 성공하였으며 이후 지속적인 초전도마그넷의 개발은 원자력분야에도 영향을 미치게 되어 Fusion용 마그넷과 초전도 입자가속기 등의 개발 또한 속속 이루어지게 된다[1].

1980년대 후반부터 불어닥친 고온초전도 열풍으로 마침내 초전도마그넷 분야에도 새

로운 국면을 맞게된다. 고온초전도마그넷 개발은 이전까지 저온초전도마그넷에서 냉매로 사용되는 값비싸고 취급이 용이하지 않은 액체헬륨에서 상대적으로 값이 싸고 환경 친화적인 액체질소의 사용이라는 점에서 초전도 마그넷의 실용화에 일대 혁신을 가져다주었다. 뿐만 아니라 고온초전도마그넷은 고온초전도체를 사용하기 때문에 전기적 손실 없이도 기존의 구리선을 이용하는 상전도 마그넷 또는 영구자석에 비하여 더 높은 자장을 발생시킬 수 있고 또한 고온초전도코일의 영구전류 특성을 이용하면 전기를 자기형태로 저장할 수가 있는 장점도 가지게 되었다.

현재 개발되고 있는 고온초전도마그넷은 냉각방법으로는 냉동기를 부착한 전도냉각이나 액체질소를 사용하는 직접냉각 등이 있고 초고자장 마그넷 응용의 경우 액체헬륨을 사용하는 경우도 있다. 그러나 이러한 방법들은 고온초전도마그넷의 설치 장소에 반드시 전원과 냉매 공급장치가 시스템과 연결된 채로 있어야 하기 때문에 차량이나 선박 혹은 야외에서 강한 자장을 필요로 하는 곳에 사용하는데는 많은 제약이 따른다. 그러나 최근 MIT의 FBML에서는 한국전기연구소(KERI)의 초전도연구팀과 공동으로 고화질소 냉각기술을 이용한 별도의 냉매 공급 없이도 일정 기간동안 사용할 수 있는 새로운 개념의 고온초전도마그넷 시스템을 개발하고 있다. 저온초전도체와는 달리 고온초전도체는 넓은 온도영역에서 초전도 특성을 유지한다. 이러한 특성을 이용하여 냉각체의 온도가 설정한 동작온도 범위를 넘어서기 전까지는 외부 전원과 냉각 시스템에서 분리한 채로 운반이 가능하며 영구전류모드(persistent mode)로 운전하여 초전도마그넷이 여자된 상태로 일정기간 동안 별도의 냉매 공급 없이도 야외에서도 사용할 수 있으며 물론 고체질소의 온도가 상승하였을 경

저온공학 분야 특집

우 재냉각과 재충전이 가능한 포터블 고온초전도마그넷 시스템이다[2,3]. 본고에서는 이 포터블 고온초전도마그넷 시스템에서 필수 불가결한 고화냉매 냉각시스템에 대하여 그 기본원리와 디자인하는 데 있어 사전에 꼭 필요한 열 분석 및 그 실제 응용에 대하여 간략하게 살펴보고자 한다.

2. 고화냉매 냉각방식의 기본원리 및 개요

초전도마그넷을 사용하는 데 있어서 기본적으로 필요한 조건 중에 하나는 운전 중에 시스템을 허용되는 동작온도범위 안으로 계속 냉각, 유지시키는 것이다. 저온초전도의 경우 허용되는 동작온도범위는 거의 1 K에 불과하며 동작온도는 초전도의 임계온도보다 낮은 특정온도만을 갖게 되므로 이 경우 고화냉매 냉각기술을 이용하기에는 별로 큰 장점이 없다. 그러나 고온초전도체의 경우에는 완전히 다른 상황이 된다. 왜냐하면 고온초전도체는 넓은 온도영역에서 초전도 특성을 유지하기 때문에 넓은 동작온도범위(거의 50 K)를 가지며 이때 온도조절이 가능하고 열 용량이 큰 고화냉매(예를 들면 고체질소)를 이용할 수 있게 되고 따라서 마그넷을 넓은 온도범위에서 사용 가능하게 한다. 고화냉매 냉각기술을 이용한 초전도마그넷의 또 다른 장점은 마그넷을 영구전류모드로 운전하여 영구자장을 발생시킬 경우 한번 여자시켜 자장을 발생시키면 따로 냉각을 위한 냉동기나 다른 어떤 냉매 공급 없이도 장시간 자장을 유지할 수 있는 일종의 영구자석 형태의 초전도마그넷을 만들 수 있다는 점이다.

2.1 고화냉매 냉각시스템

고화냉매 냉각시스템에서 냉매를 고화시키는 방법으로는 GM냉동기를 사용하는 방법도 있겠으나 여기서는 간편하면서도 손쉬운 액체 헬륨을 순환시켜 냉매를 고화시키는 방법에 대하여 논하기로 하겠다.

개략적인 고화냉매 냉각시스템의 개념도(그림 1)에서 보여지는 바와 같이 냉각체(COLD BODY)를 둘러싼 상온용기(ROOM TEMPERATURE ENCLOSURE)와 냉각체 사이에는 복사열 침입을 최소화하기 위해 진공구조에서 초절연층을 둔다. 냉각체는 기본적으로 초전도 마그넷과 냉매로

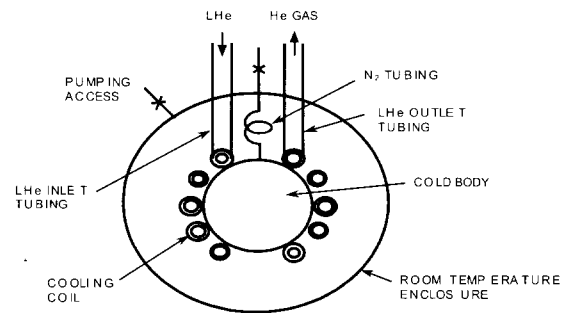


그림 1. 고화질소 냉각시스템의 개략도
(모든 전기관련 항목은 표시하지 않았음)

구성되며 냉각 코일(COOLING COIL)은 냉매를 고화시키기 위한 액체 헬륨을 순환시키는 것으로 냉각체 바깥에 부착하든지 냉각체 안쪽에 부착할 수 있다. 액체헬륨 주입튜브(LHe INLET TUBING)는 액체헬륨을 주입하는 도입부이고 액체헬륨 배출튜브(LHe OUTLET TUBING)는 액체헬륨이 순환과정에서 생기는 헬륨가스를 공기 중으로 빠져 나오도록 유도하는 배출구로서 헬륨이 순환하지 않을 때에는 상온 부의 두 끝은 닫혀 있게 되며 또한 냉각체를 지지하는 역할도 겸한다. 질소 튜브(N₂ TUBING)은 질소를 고화시킬 때 또는 고화질소가 다시 기화 될 때 냉각체 내부 공간으로 질소가스가 출입할 수 있도록 한다.

냉각체가 상온에 있을 때 냉각코일을 통하여 액체 헬륨을 순환시키면 질소의 액화나 고화가 이루어 질 수 있다. 예를 들어 액체 헬륨을 담은 저장용기는 가장 편리한 냉각원이다. 냉각의 초기 과정 동안 질소튜브는 상온의 고압질소탱크와 연결되어있다. 또한 질소튜브는 액체질소를 곧바로 냉각체에 채울 수 있도록 내부튜브와 외부튜브로 이루어진 이중튜브를 사용할 수 있다.(그림 1에는 나타내지 않았음) 이러한 구성은 냉각체내의 질소를 77 K로 응축시키는데 액체헬륨을 사용하지 않아도 되므로 냉각시간과 비용을 줄일 수 있다. 그러나 77 K에서 초기 동작온도로(예를 들면 20 K) 액체질소를 고화하여 냉각시키기 위해서는 냉각코일을 통한 액체헬륨의 순환이 꼭 필요하다. 냉각체 온도가 상승되었을 때, 마그넷이 영구전류 모

드로 여자된 상태로 단순히 냉각코일을 통한 액체헬륨의 순환에 의해 시스템을 초기 동작 온도로 재 냉각시킬 수 있다. 시스템은 자장센서와 두 개의 열전대를 갖추게 된다. 자장센서는 상온 부에 부착되고 열전대는 냉각체에 부착된다. 그리고 시스템에 연결된 각종 신호선은 전도 열유입을 최소화하기 위해 가늘고 길게 설치하는 것이 바람직하다. (그림 1에는 이러한 센서들을 나타내지 않았음).

2.2 Heat capacitor

냉각체 안에 넣어 줄 heat capacitor 즉 냉매를 선택하는 것이 시작단계에서 매우 중요하다. 물론 냉매로서 고화질소 이외에 다른 것을 이용할 수도 있겠으나 가능하면 마그넷의 재냉각주기(RRTP)를 늘리는 것이 실제 응용에 많은 이점이 따르므로 사용될 냉매의 선택은 필수적이다. 만약 자기부상 열차 또는 선박, 해군함정, 우주왕복선 같은 모션이 큰 시스템에 사용할 경우 기체나 고체상태의 냉매가 바람직하겠다. 왜냐하면 만약 액체상태의 냉매를 사용할 경우 시스템이 움직일 때마다 냉매가 요동치게 되므로 전체 시스템이 불안정하게 될 것이기 때문이다. 실제로 고체상태의 냉매는 아래와 같은 냉매로 사용하기에 필요한 조건을 만족하게 되며 이로서 고체냉매의 사용은 절대적이다.

부 동작온도($T_{op(max)}$)의 온도범위에서 냉매의 엔탈피는 클수록 좋고 특별히 무게당 엔탈피(specific entalpy) 값이 큰 것이 이롭다. (2) 냉매의 용융점은 적어도 상부동작온도($T_{op(max)}$)보다 커서 동작하는 동안 냉매의 상이 변화되지 말아야 한다. (3) 냉매의 비등점은 보통 상온 이상인 것이 좋다. 이것은 시스템이 상온 온도로 상승 할 경우 이때 냉매가 기화되어 생기는 냉각체 안에서의 압력증가를 막을 수 있기 때문인데, 냉각 시에는 이 점은 별로 큰 문제가 되지는 못하며 반대로 우리는 이 점을 이용할 수 있다. 예를 들면 고화질소를 사용하는 경우 상온에서 냉매를 가스 상태로 주입하여 냉각체 안에서 액상으로 만들고 이어서 고화 시킨다면 액체상태의 냉매를 시작단계부터 주입하는 경우 보다는 편리할 수도 있기 때문이다. 위의 조건 중에 제일 중요한 것은 엔탈피가 큰 냉매를 선택하는 것이라 할 수 있겠다.

참고로 저온공학분야에서 많이 사용되는 몇 가지 대표적인 재료들의 밀도와 체적 및 무게당 엔탈피 값들을 표 1에 요약하여 놓았다[1]. 동작온도를 20 K에서 40 K, 20 K에서 50 K, 그리고 20 K에서 60 K의 세 가지 경우로 분류하여 계산된 엔탈피 값만을 살펴 볼 경우 고화질소가 냉매로서 가장 좋을 수 있다. 동작온도를 20 K에서 40 K로 선택 할 경우 마그넷 권선 부피만큼

표 1. 대표적인 저온재료들의 밀도와 엔탈피 값

Material	Density	Enthalpy : Volumetric [J/cm ³] / Specific [J/g]		
	[g/cm ³]	동작온도범위 [K]		
		20 - 40	20 - 50	20 - 60
Steel	7.87	2.20 / 0.28	5.51 / 0.70	11.0 / 1.40
Ice	1	4.56 / 4.56	8.06 / 8.06	13.4 / 13.4
Silver	10.5	9.48 / 0.90	19.2 / 1.83	31.9 / 3.04
Dry Ice	1.63	9.38 / 5.75	17.8 / 10.9	28.1 / 17.2
Solid Ar	1.71	15.7 / 9.20	25.7 / 15.0	36.4 / 21.3
Solid N ₂	0.84	26.4 / 31.4	38.2 / 45.5	51.2 / 61.0

냉매의 선택 조건은 다음과 같은 (1) 동작온도범위 즉 초기 동작온도($T_{op(min)}$)와 상

냉각 시스템 안에 질소를 고화 시킨다면, 단지 전체 시스템의 무게를 약 10%만 증가시

키고도 시스템의 열용량을 약 3배로 만들 수 있음을 알 수 있다. 또한 고체질소의 비열은 중량기준으로 은(Ag)의 약 30배 정도가 되고 액체헬륨의 증발잠열보다는 대략 10배 이상으로 크기 때문에 다른 어떤 냉매보다 코일을 장시간 냉각하는데 유리하다. 다만 질소를 냉매로 사용 할 경우에는 앞서 열거한 세 번째 냉매의 선택조건에 위배가 되나 냉각 시스템에 pressure relief valve를 설치하여 냉매가 기화될 때 발생하는 압력증가를 막음으로 해결 할 수 있다.

2.3 동작온도범위

일반적으로 시스템을 운전하기 위해 허용되는 동작온도범위는 사용하는 고온초전도의 임계온도와 임계전류에 따라 그 선택의 폭이 정하여 진다.

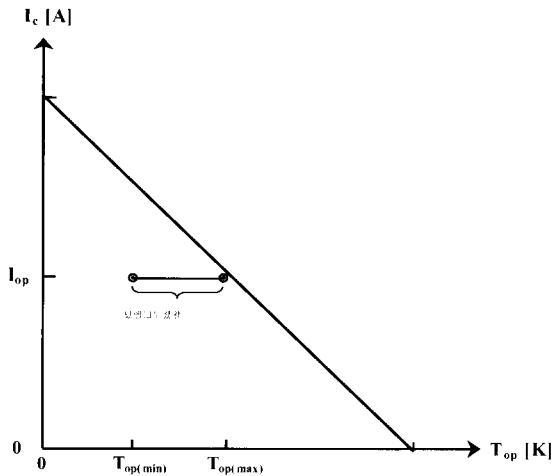


그림 2. 고온초전도체의 임계전류와 동작온도와의 상관곡선. 동작온도범위는 동작전류(I_{op})에 의하여 결정됨을 알 수 있다.

그림 2는 전형적인 초전도체의 임계전류 (I_c)와 동작온도(T_{op})와의 상관관계를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 동작온도범위는 인가시킬 동작전류(I_{op})에 의하여 결정된다. 즉 바꿔 말하면 동작전류는 선택되는 동작온도범위에 의하여 결정되는데 이것은 동작되는 전체의 온도범위에서 초전도체가 초전도상태를 계속 유지하게 함을 목적으로 한다. 물론 초전도마그넷의 경우, 인가되는 전류에 의하여 형성하는 자기장의 양에도 고려해야 하므로 이 경우 동작온도의 선택에

더 많은 신중을 기하여야 한다. 그러므로 테슬라급의 고자장 마그넷에 사용할 경우 사전에 시뮬레이션을 통하여 충분히 안전한 동작온도범위를 선택하는 것이 바람직하다.

2.4 재냉각 기간(Recooling-to-Recooling Time Period, RRTP)

마그넷을 둘러싼 고화질소의 온도가 열유입 등으로 상승하여 상부 동작온도($T_{op(max)}$)에 까지 이르게 되면 주기적으로 재냉각이 필요하게 된다.

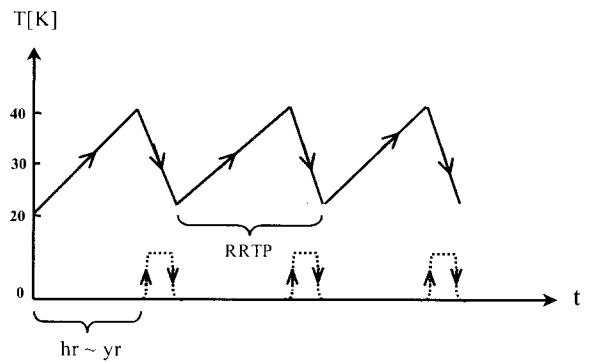


그림 3. 시간에 따른 주기적인 재냉각 기간(RRTP)과 고화냉매의 재냉각을 위한 액체헬륨의 주입율(점선).

그림 3에서 보여지는 바와 같이 이 때의 주기를 시스템동작기간 또는 재냉각 기간(Recooling-to-Recooling Time Period, RRTP)이라 하며 이것은 고화질소 냉각기술에 있어서 매우 중요한 파라미터가 된다. 그림 3은 또한 고화냉매를 재냉각 시킬 때 필요한 액체헬륨의 임의의 주입율을 점선으로 나타내고 있다. 분명히 재냉각 기간이 크면 클수록 시스템을 운전하는 데 그 만큼 편리하고 유리하게 될 것이나 용도에 따라서 짧게는 시간단위로부터 길게는 몇 달 또는 몇 년에 이르기까지의 재냉각 기간이 되도록 냉각시스템을 사전에 디자인하여 사용할 수 있다. 예를 들면 자기부상열차, 선박, 우주왕복선 같은 on-board system 같은 경우에는 동작기간이 적어도 하루에서 심지어는 몇 년이 될 것이며 이 때의 재냉각 기간(RRTP)은 1) 사용되는 냉매의 종류, 2) 동작온도범위에서 냉각체의 총엔탈피, 3) 동작온도범위, 그리고 4) 마그넷시스템 내부에서의 총 열손실(heat dissipation) 등에 의

존하게 된다[1].

냉매의 heat capacity를 C_{cb} 시스템 외부로부터 들어오는 총 열유입을 Q_{in} 라 하면 냉각제 안에서의 power balance는 다음 식으로 주어진다.

$$C_{cb}(T) \frac{dT_{op}}{dt} = Q_{in}(T) \quad (1)$$

여기서 dT_{op} 는 동작온도범위이므로 초기 동작온도, $T_{op(min)}$ 로 부터 시작하여 상부 동작온도, $T_{op(max)}$ 까지 식 (1)의 양변을 적분하여 식 (2)를 유도하면 동작기간 (Δt_{op}) 즉 재냉각 기간(RRTP)을 예측할 수 있다.

$$RRTP \equiv \Delta t_{op} = \int_{T_{op(min)}}^{T_{op(max)}} \frac{C_{cb}(T)}{Q_{in}(T)} dT_{op} \quad (2)$$

$$= \frac{\Delta H_{cb}(T_{op(min)}, T_{op(max)})}{\langle Q_{in} \rangle}$$

식 (2)에서 $\langle Q_{in} \rangle$ 는 동작온도범위에서의 평균 열유입 값이며 $\Delta H_{cb}(T_{op(min)}, T_{op(max)})$ 는 냉매의 초기 동작온도와 상부 동작온도에서의 엔탈피 차이를 의미하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \Delta H_{cb}(T_{op(min)}, T_{op(max)}) \\ &= H_{cb}(T_{op(max)}) - H_{cb}(T_{op(min)}) \end{aligned} \quad (3)$$

그러므로 식 (2)에서 보이는 바와 같이 시스템의 동작기간을 늘리기 위한 방법으로는 다음과 같은 것을 생각해 볼 수 있겠다: 1) 동작온도범위 즉 ΔT_{op} 를 가능하면 크게 만든다. 2) 가능하면 엔탈피 차이 즉 $\Delta H_{cb}(T_{op(min)}, T_{op(max)})$ 가 큰 냉매를 사용한다. 그리고 3) 극저온 냉각시스템을 디자인할 때 시스템 안으로 들어오는 전체 열유입을 최소화하는 방법을 취한다. 이 때에는 기계적, 저온학적, 그리고 전자기적인 모든 방법이 포함될 것이다. 지금부터 우리는 외부로부터 여러 경로로 시스템 안으로 들어오는 열유입에 대하여 좀 더 자세히 살펴보고자 하겠다.

3. 냉각시스템 디자인 시에 필요한 열분석

고립된 초전도마그넷 시스템에서 생기는 가능한 열손실은 다음의 4가지 원인으로 요약할 수 있다: 1) 전자기 효과에 의한 마그

넷 권선부 내에서 발생한 열손실, 2) 복사에 의한 열유입, 3) 대류에 의한 열유입, 4) 전도에 의한 열유입. 열손실의 원인들을 정량적으로 분석하기 위하여 우리는 여기서 시스템이 단순한 구형의 권선 형태를 갖는다고 가정하자. 비록 구형의 권선 체적이 이론적으로 해석하는 데 있어서 편리하다 할지라도 실제로는 마그넷이 중심에 보아를 갖고 있어야 실질적인 이용이 가능함을 강조하고 싶다. 그러나 구형의 권선 형태는 열분석 시에 이용되는 2차항 공식의 처리 문제로 곤란해지는 경우를 최소한으로 피할 수 있고 시스템의 중요한 파라메타만을 강조하는데 용이하기 때문에 본고에서는 이 방법을 사용하고자 한다.

3.1 전자기에 의한 열손실

초전도마그넷의 경우 도체와 도체끼리의 연결부분에서의 접촉저항과 초전도 자체의 index number 즉 n지수에 의한 손실을 제외하고는 시스템이 일정한 자장에서 운전할 경우 전자기 효과에 의한 열손실은 없다고 보며 특히 영구전류모드를 이용하는 초전도 마그넷의 경우 사전에 도체들의 연결부분이 실제로 초전도 집합이라 가정하게 되며 따라서 이때의 열손실은 무시할 정도가 될 것이다.

3.2 복사에 의한 열유입

일반적으로 열전도 복사이론은 다음과 같은 스테판-볼츠만 복사이론에 따르게 된다.

$$q_r = e_r \sigma_{SB} T^4 \quad (4)$$

여기서 q_r 은 온도 T[K]의 표면으로부터의 복사열유속[W/m²], e_r 은 온도 T에서의 전체 복사율, σ_{SB} 는 스테판-볼츠만 상수로 5.67×10^{-8} W/m²K⁴이다. 저온부 T_{cl} 과 고온부 T_{wm} 를 갖는 하나의 표면에서 평행판재형상의 복사율이 각각 $[e_r]_{cl}$ 과 $[e_r]_{wm}$ 일 때 유효전체 복사율 $[e_r]_{cw}$ 은 다음의 식으로 나타낼 수 있겠다.

$$[e_r]_{cw} = \frac{[e_r]_{cl} [e_r]_{wm}}{[e_r]_{cl} + [e_r]_{wm} - [e_r]_{cl} [e_r]_{wm}} \quad (5)$$

위의 식은 대부분의 평행판재형, 실린더형, 구형의 크라이오스탯 경우 뿐 아니라 서

로 다른 면적의 두 개의 표면을 갖는 비평행 판재 형상의 경우에서도 충분히 설명 가능하다. 이 이유는 첫째로 대부분의 크라이오스 탱은 두 표면사이의 거리 간격은 일반적으로 특정표면길이보다 훨씬 작기 때문이고, 둘째로 외부로 유입되는 복사열 계산 시 이러한 근사한 가정들로 인해 생길 수 있는 오차는 공식에 사용될 부정확한 표면 복사율 때문에 생길 수 있는 오차보다도 훨씬 작기 때문이다. 또한 (4)번 식은 다음의 식과 같이 수정될 수 있다.

$$q_{rd} = [e_r]_{cw} \sigma_{SB} (T_{wm}^4 - T_{cl}^4) \quad (6)$$

그러므로 식 (6)에 의하여 외경 R의 구형 마그넷 시스템의 경우 시스템에 대한 총 복사 열유입, Q_{rd} 은 다음과 같이 된다.

$$Q_{rd} = 4\pi R^2 [e_r]_{cw} \sigma_{SB} (T_{wm}^4 - T_{cl}^4) \quad (7)$$

3.3 대류에 의한 열유입

저온부 $T_{cl}[K]$ 에 하나의 판과 고온부 $T_{wm}[K]$ 에 다른 또 하나의 판을 갖는 평행 판재 형상의 경우, 압력 $P_g[Pa]$ 의 잔류 헬륨가스에 의하여 대류적 열 전달에 의하여 고온부 판재에서 저온부 판재로의 열유속 ($q_g [W/m^2]$)은 진공 압력 P_g 가 10^{-4} torr 이하일 때 다음과 같이 주어진다.

$$q_{cv} = \eta_g P_g (T_{wm} - T_{cl}) \quad (8)$$

$\eta_g [W/m^2 Pa K]$ 은 T_{wm} 과 T_{cl} 뿐만 아니라 조화계수에 의존하는데 조화계수 값은 헬륨의 경우 상온에서는 0.3에서 4.2 K에서는 1로 변한다. 만일 적용 온도 범위가 $T_{wm} = 300 K$, $T_{cl} = 80 K$ 인 경우 q_{cv} 값은 $P_g = 10^{-5}$ torr에서 $11 mW/m^2$ 가 된다. 따라서 외경 R의 구형 시스템의 경우 P_g 가 10^{-5} torr에서 시스템에 대한 총 대류 열유입, $Q_{cv}[W]$ 은 다음과 같다.

$$Q_{cv} = 4\pi R^2 (1.1 \times 10^{-2}) \quad (9)$$

3.4 전도에 의한 열유입

상온인 시스템 외부에서 극저온 상태인 시스템 내부로 열전도에 의하여 생기는 열유

입은 다음의 두 가지 경우에 의하여 발생된다. 첫째는 주로 액체헬륨 주입튜브와 헬륨 배출튜브와 같은 지지구조에 의하고 둘째는 질소를 주입하는 튜브를 통하여 일어난다.

액체헬륨 주입튜브와 헬륨 배출튜브로 인한 총 전도 열유입은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{tb} = 2k_{ss} A_{tb} \frac{(T_{wm} - T_{cl})}{L} \quad (10)$$

여기서 k_{ss} 와 A_{tb} 는 열 전도도와 T_{wm} 과 T_{cl} 사이의 튜브의 전체면적을 나타낸다. L은 T_{wm} 과 T_{cl} 사이의 길이이다. A_{tb} 는 마그넷 시스템의 무게 M_{sy} 와 관계가 있기 때문에 다음과 같은 식으로 다시 나타낼 수 있다.

$$A_{tb} = \frac{M_{sy} g}{\sigma U_{ss}} \quad (11)$$

여기서 g 는 중력상수이고 σU_{ss} 는 튜브 재료인 스테인레스 강의 최대인장강도이다. 이때 마그넷시스템의 무게, M_{sy} 를 마그넷시스템의 체적과의 관계로 다시 변형시키면 다음과 같다.

$$M_{sy} = \frac{2\pi R^3}{3} (\rho_{Ag} + \rho_{N_2}) \quad (12)$$

식 (12)에서는 시스템 체적의 반은 은과 같은 권선부에 의하여 점유되고 나머지 반은 고체질소에 의하여 점유된다는 가정이 전제되었다. 여기서 ρ_{Ag} 와 ρ_{N_2} 는 각각 은과 고체 질소의 밀도이다. 결론적으로, 식 (10)~(12)을 조합하면 구형 시스템에서의 총 전도 열유입, Q_{sp} 는 다음의 식으로 표현된다.

$$Q_{sp} = \frac{4\pi g k_{ss}}{3\sigma U_{ss}} (\rho_{Ag} + \rho_{N_2}) (T_{wm} - T_{cl}) R^2 \quad (13)$$

질소튜브에 의한 총 전도 열유입, Q_{rf} 는 또한 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다

$$Q_{rf} = k_{ss} A_{ss} \frac{(T_{wm} - T_{cl})}{l_{ss}} \quad (14)$$

여기서 A_{ss} 와 l_{ss} 는 각각 질소튜브로 사용되는 스테인레스 강의 단면적과 길이를 나타낸다. 만약 임의적으로 A_{ss} 를 충분히 작게

그리고 l_{ss} 를 충분히 길게 선택하여 Q_{sp} 에 비하여 Q_{rf} 를 아주 무시할 정도로 작게 만들 경우 열 분석 시에 질소튜브로 인한 전도 열 유입, Q_{rf} 은 고려하지 않아도 될 것이다.

3.5 전체 열유입

앞서 살펴본 식 (7), (9), (13)들에 의하여 외경 R을 갖는 구형 시스템에 대한 전체 열유입 Q_{in} 은 아래의 식과 같이 주어지며 여기서 우리는 전체 열 침입, Q_{in} 은 외경 R의 제공에 비례함을 알 수 있다.

$$Q_{in} \approx Q_{rd} + Q_{cv} + Q_{sp} = 4\pi [e_r]_{cw} \sigma_{SB} (T_{wm}^4 - T_{cl}^4) + 1.1 \times 10^{-2} + \frac{gk_{sp}}{3\sigma U_{ss}} (\rho_{Ag} + \rho_{N_2})(T_{wm} - T_{cl}) R^2 \quad (15)$$

3.6 엔탈피 계산

표 2는 초기 동작온도 20 K와 상부 동작온도 40, 50 그리고 60 K사이의 동작온도범위에서의 은의 체적 엔탈피 (ΔH_{Ag})와 고체질소의 체적 엔탈피(ΔH_{N_2})를 나타낸다. 비엔탈피를 체적 엔탈피로 변환할 때 은과 고체질소의 밀도인 $10,500 \text{ kg/m}^3$ 와 900 kg/m^3 을 각각 사용하였다. 외경 R, 체적의 반이 각각 은 권선부와 고체질소로 이루어진 구형 시스템에서 동작을 위한 전체 엔탈피 ΔH_{sy} 는 다음의 식과 같다.

$$\Delta H_{sy} = \frac{2\pi}{3} (\Delta h_{Ag} + \Delta h_{N_2}) R^3 \quad (16)$$

표 2. 은과 고체질소의 엔탈피 데이터

T_{op} [K]	Δh_{Ag} [MJ/m ³]	Δh_{N_2} [MJ/m ³]
20 ~ 40	9.5	22.0
20 ~ 50	19.3	34.0
20 ~ 60	32.0	57.0

3.7 동작기간 계산

$$\Delta t_{op} = \frac{(\Delta h_{Ag} + \Delta h_{N_2}) R}{6 \left\{ [e_r]_{cw} \sigma_{SB} (T_{wm}^4 - T_{cl}^4) + 1.1 \times 10^{-2} + \frac{gk_{sp}}{3\sigma U_{ss}} (\rho_{Ag} + \rho_{N_2})(T_{wm} - T_{cl}) \right\}} \quad (17)$$

외경 R을 갖는 구형 시스템의 동작기간 즉 재냉각 기간(RRTP), Δt_{op} 는 식 (15)와 (16)를 식 (2)에 대입하여 얻은 식 (17)을 통하여 구할 수 있다.

여기서 시스템의 동작기간은 외경 R에 직접 비례함을 알 수 있다. 표 3은 $T_{wm} = 293 \text{ K}$, $T_{cl} = 20 \text{ K}$, $k_{ss} = 0.1 \text{ W/mK}$, $\sigma U_{ss} = 1 \times 10^9 \text{ Pa}$ 일 경우 식 (17)에 의한 동작기간(Δt_{op})의 계산치를 나타낸다. 표 3의 Δt_{op} 값은 구형의 마그넷 시스템에 적용되는 것으로 구형의 경우는 체적대 표면적비

표 3. 동작기간 Δt_{op} 계산치

T_{op} [K]	Δt_{op} [day]					
	$[e_r]_{cw} = 5 \times 10^{-4}$			$[e_r]_{cw} = 1 \times 10^{-4}$		
	R=0.10m	R=0.25m	R=0.5m	R=0.1m	R=0.25m	R=0.5m
20~40	39	98	196	59	147	293
20~50	66	165	331	99	248	496
20~60	110	276	552	166	414	829

가 최소로 된다. 그러나 실제 사용되는 마그넷에서는 구형보다 이 비가 커지고 따라서 표 3에 주어진 값들보다 Δt_{op} 값은 크게 줄어들게 될 것이다. 또한 주어진 시스템에서 Δt_{op} 값은 진공상태에 크게 의존하므로 가능하면 시스템이 진공 배기 시스템과 상시 연결되어 있는 것이 바람직하다.

4. 고화질소 냉각시스템의 실제 응용 및 그 전망

고화질소 냉각시스템의 응용은 극저온에 까지 냉각을 필요로 하는 모든 분야에 적용할 수 있을 만큼 다양하다. 실제적으로 현재 까지 제작 사용되고 있는 초전도를 이용한 시스템에는 일반적으로 일정온도에서 동작하도록 고안 되어왔으나 고온초전도와 고화질

소를 사용함으로써 초기단계의 약 20 K에서 최종단계의 63 K까지 넓은 마그넷 동작온도 범위를 확보할 수 있게 된다. 물론 앞서 열거한 열분석을 통하여 시스템으로 칩입하는 전체 열유입을 최소화하며 시스템 안의 진공 상태를 아주 좋게 만드는 것이 중요한 관건이 될 것이나 대형시스템의 경우 약 1년 이상 냉각체의 온도를 동작온도범위 안으로 유지할 수 있다. 또한 반복 냉각이 가능하므로 시스템을 상온에까지 올릴 필요가 없어 열충격 없이 반 영구히 사용 가능하다. 고화질소를 냉각시키는 방법으로는 편리에 의하여 액체헬륨을 사용할 수도 있고 냉동기를 사용할 수도 있으나 액체헬륨이나 냉동기는

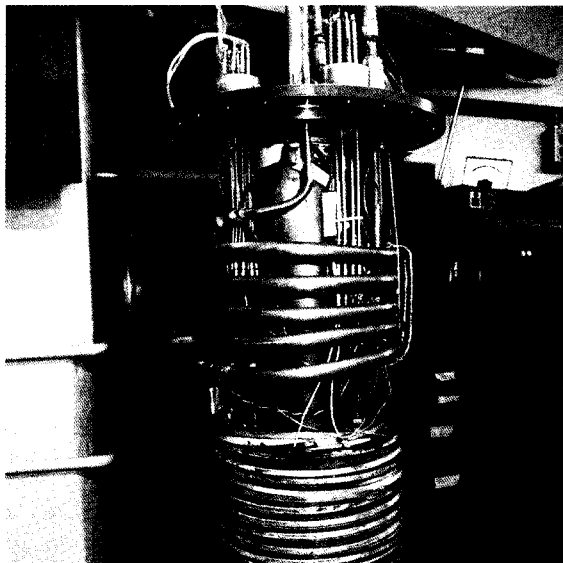


그림 4. MIT의 FBML에서 한국전기연구소(KERI)의 초전도연구팀과 공동으로 개발 중에 있는 포터블 고온초전도마그넷 시스템에 설치된 고화질소 냉각부의 주요 내부 (원통형 copper 외벽이 설치되기 전임을 주지하기 바람). 액체헬륨 순환용 냉각코일과 Bi-2223/Ag 고온초전도선재를 이용한 6개의 더블 팬케이크도 그림 하단에 보인다.

같은 냉각원은 시스템이 동작중일 때 시스템에 연결한 채로 사용할 수도 있고 때에 내도 무방하므로 냉각원은 전체 시스템의 일시적인 구성요소라고 할 수 있다.

그림 4는 최근 MIT의 FBML와 한국전기연구소(KERI)의 초전도연구팀과 공동으

로 개발 중에 있는 새로운 개념의 포터블 고온초전도마그넷 시스템에 설치된 고화질소 냉각부의 주요내부를 보여준다[2,3]. 원통형 copper 외벽이 설치되기 전임을 주지하기 바란다. 본 마그넷시스템은 고화질소 냉각 기술과 영구전류모드(persistent mode)로 운전할 수 있도록 제작되어 초전도마그넷이 여자된 상태로 일정기간 동안 냉각 시스템에서 분리한 채로 별도의 냉매 공급 없이도 야외에서도 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 물론 고체질소의 온도가 상승하였을 경우 재냉각과 재충전이 가능한 포터블 고온초전도마그넷 시스템이다. 이 시스템은 20 K에서 40 K의 동작범위온도를 갖도록 제작되었으나 사용되는 자장에 따라 더 넓은 온도 범위에서도 사용이 가능하다. 냉각 초기에 질소가스나 액체질소를 고화 시킨 다음 고화된 질소를 초기동작온도(즉 20 K)로 냉각시키기 위한 액체헬륨 순환용 냉각코일과 Bi-2223/Ag 고온초전도선재를 이용한 6개의 더블 팬케이크도 그림 4의 하단에 보인다. 고온초전도마그넷의 보아는 5.5 cm이고 시스템 상온 부의 보아는 1.5 cm로 제작하였다. 초전도마그넷은 층당 70 turn씩 권선한 6개의 더블팬케이크를 서로 적층한 후 코일간 Pb-Sn 솔더를 이용하여 접합하였다. 초전도마그넷은 열유입을 최소화하기 위해서 전류 도입선이 없이 페루프를 형성하여 외부의 자장으로 자화시킬 수도 있으나 본 마그넷의 경우는 직접 여자될 수 있도록 전류 도입선을 설치하였다.

앞서 언급한 바와 같이 질소를 고화 시키고 고화된 질소를 냉각시키는 방법으로는 편리에 의하여 액체헬륨 대신에 냉동기를 사용할 수도 있다. 그 예로서 현재 MIT의 FBML에서 연구가 진행 중에 있는 transient quench/recovery 실험장치의 내부를 그림 5에서 보여준다. Bi-2223/Ag로 만든 테스트 팬케이크의 모습은 사진 하단부에 보이며 이 팬케이크의 내부가 고화질소로 채워진 상태의 개념도는 사진 바로 아래 그림에 보여진다.

이 실험은 transient heating하에서 고화질소가 고온초전도마그넷에 미치는 이점에 대한 연구에 목적을 두고 있다.

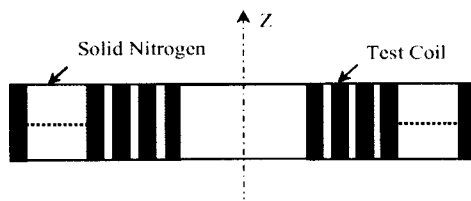
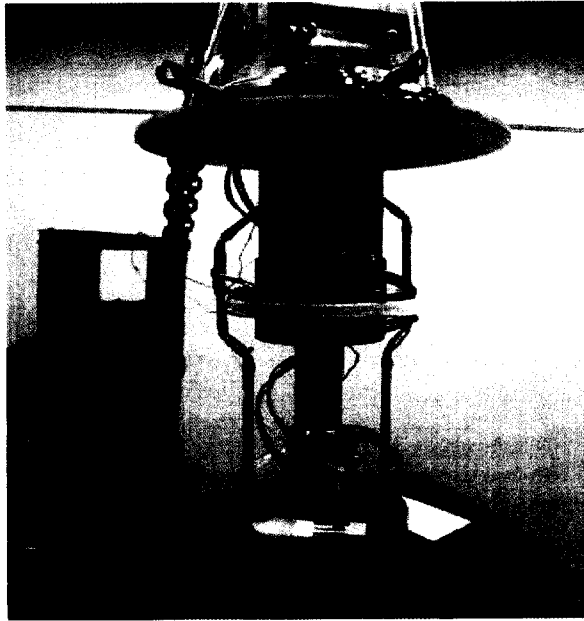


그림 5. MIT의 FBML에서 현재 진행 중에 있는 transient quench/recovery 실험 장치의 내부사진. 고화질소 냉각방법을 사용한 이 시스템은 질소의 고화를 위해 액체헬륨 대신 GM냉동기(사진 상단부에 보임)를 사용하였다. Bi-2223/Ag로 만든 테스트 팬케이크의 모습도 사진 하단 부에 보이며 이 팬케이크의 내부가 고화질소로 채워진 상태의 개념도는 그림으로 보여진다.

열용량이 큰 고화질소가 고온초전도마그넷 시스템의 전체 열용량에 어떤 영향을 미칠 것은 자명하며 이 때의 고온초전도의 quench과 recovery에 대한 거동에 대한 연구의 일환으로 진행 중에 있다.

이밖에도 고화질소 냉각방법을 이용하여 프라이휠 에너지 저장장치 같은 자기부상용 마그넷에 많은 이용이 있을 것이다. 특히 최근 몇 년간 FBML에서 연구 중에 있었던 소위 "Active-maglev" 라고 불리는 Electromaglev 시스템의 경우가 그 한 예라 할 수 있겠다. 이것은 전자기마그네트를 이용한 새로운 개념의 자기부상시스템으로 일반적으로 널리 알려진 초전도 자기부상 방

법으로 벌크형 초전도체위에 영구자석을 띄우거나 반대로 영구자석 위에 초전도체를 띄우는 반면 전자기마그넷 위에 고온 초전도체를 직접 부상시키는 방법으로 세간의 많은 흥미를 자아내었다[4-11]. 일반적인 초전도 자기부상의 경우 부상체의 부상높이는 영구자석의 자성특성에 따라 일정하며 또한 부상체가 부상된 상태에서 기울어지거나 중심에서 떨어지려는 등의 불안정 부상을 하는 등 많은 문제가 있는 반면 "Active-maglev"의 경우에는 다음과 같은 장점 및 유용성이 있다: 1) 전자기마그넷에 흘려주는 전류를 양을 통하여 발생자장의 조절이 가능함에 따라 부상높이를 임의적으로 쉽게 조절할 수 있고, 2) 상당히 큰 전자기마그네트를 제작할 경우 아주 높은 부상높이를 얻을 수 있으며, 3) 다양한 모양과 자장분포를 갖는 전자기마그넷 제작을 통하여 매우 안정된 자기부상을 할 수 있다. 이 같은 시스템에 고화질소 냉각방법을 이용할 경우 시스템이 간편해지며 요구에 따라 필요한 장소로 이동이 가능해진다. 특히 자기부상을 요구하는 공연용야외 특설무대 같은 곳에 이용하면 제 격이라 할 수 있겠다.

이외에도 고온초전도마그넷 시스템에 응용을 하게 될 경우 수주부터 일년 정도의 불변자장이 요구되는 해군함정이나 우주왕복선의 자장발생장치 같은 분야의 사용에 아주 적절하며 특히 냉동기로 인한 소음으로 측정시 많은 노이즈가 발생하는 NMR/MRI같은 의료장비의 고자장마그넷에 사용할 경우 많은 이점이 있을 것이다. 이상으로 본고에서 간략하게 살펴 본 바와 같이 고화질소 냉각방법은 냉각장치를 요구하는 초전도분야를 포함한 모든 극저온 시스템에 차세대 새로운 냉각방법으로 이용될 것으로 예상된다.

참고문헌

1. Y Iwasa, Case Studies in Superconducting Magnets, Plenum Press, New York, 1994
2. S.S. Oh, H.S. Ha, D.W. Ha, Y.K. Kwon, H.G. Lee, Y. Iwasa, J.W. Baek, "Development of HTS magnet cooled by solid nitrogen (1)", Proceeding of KIASC 2000, KBSI, Yusung, Korea, Feb., 18-19,

- pp.19-21, 2000
3. H.S. Ha, H.M. Jang, N.J. Lee, S.S. Oh, D.W. Ha, K.S. Ryu, H.G. Lee, and J.S. Lee, "Fabrication of 6 double pancakes Bi-2223 HTS magnet", Proceeding of the Korean Superconductivity Society Meeting (KSS 99), YoungPyung, Kangwondo, Korea, Aug, 18-20, pp.373-377, 1999
 4. Y. Iwasa and Haigun Lee, "'Electromaglev' magnetic levitation of a superconducting disk with a DC field generated by electromagnets: Part 1, Theoretical and experimental results on operating modes, lift-to-weight ratio, and suspension stiffness", Cryogenics 37, p.807, 1997
 5. Yukikazu Iwasa, HaiGun Lee, Koichiro Sawa and Masato Murakami, "Active Magnetic Levitation with YBCO Samples", Advances in Superconductivity IX, Vol.2, p.1379, 1997
 6. Haigun Lee, Makoto Tsuda, and Yukikazu Iwasa, "'Electromaglev' ("Active-Maglev") magnetic levitation of a superconducting disk with a DC field generated by electromagnets: Part 2, Theoretical and experimental results on lift-to-weight ratio and lateral stiffness", Cryogenics 38, p.419, 1988
 7. Y. Iwasa, H.G. Lee, M. Tsuda, K. Sawa, K. Nishi, M. Murakami, T. Miyamoto, K. Nagashima, and H. Fujimoto, "Electromaglev (Active-Maglev)-Recent Results", Materials and technology Issues for HTS Wires and Bulk Applications, p.125, 1988
 8. Y. Iwasa, H.G.Lee, M. Tsuda, K. Sawa, H. Horiuchi, K. Nishi, M. Murakami, K. Nagashima, and H. Fujimoto, "A Large Electromaglev System", Advances in Superconductivity X, Vol.2, p.1325, 1988
 9. Makoto Tsuda, Haigun Lee, and Yukikazu Iwasa, "'Electromaglev' ("Active-Maglev") magnetic levitation of a superconducting disk with a DC field generated by electromagnets: Part 3, Theoretical results on levitation height and stability", Cryogenics 38, p.743, 1988
 10. Y. Iwasa, H.G.Lee, M. Tsuda, M. Murakami, T. Miyamoto, K. Sawa, K. Nishi, H. Fujimoto, and K. Nagashima, "Electromaglev-Levitation Data for Single and Multiple Bulk YBCO Disks", IEEE Trans. on Applied Superconductivity Vol.9, No.2, June, p.984, 1999
 11. Makoto Tsuda, Haigun Lee, So Noguchi, and Yukikazu Iwasa, "'Electromaglev' ("Active-Maglev") magnetic levitation of a superconducting disk with a DC field generated by electromagnets: Part 4, Theoretical results on supercurrent distribution in field-cooled YBCO disks", Cryogenics 39, p.893, 1999

저자이력

이해근(李海根)

1963년 9월 26일 생
 1987년 고려대 재료공학과 졸업
 1990년 미국 일리노이대 재료공학과 졸업(석사)
 1995년 동대학원 재료공학과 졸업(박사)
 1995-1997 MIT, Francis Bitter Magnet Laboratory, Post. Doc.
 1997 - 현재 MIT, Francis Bitter Magnet Laboratory, Research Staff

