

Cryostat의 제작 및 응용 기술

김성래, 권오범

Cryogenics & Vacuum Engineering

1. 서론

초전도 기술의 산업적 응용을 위한 연구가 1960년대 초반부터 활발히 진행되고 있고 이러한 연구결과로서 핵자기 공명 영상장치(MRI), 초전도 자기에너지 저장장치(SMES), 초전도 양자 간섭장치(SQUID) 등 일부 분야에서는 이미 실용화가 이루어져 보급되고 있으며 자기 부상 열차, 전자 추진 선박 등을 중심으로 한 교통 수송 분야, 초전도 핵융합 장치, 초전도 모터, 초전도 발전기, 초전도 송전 케이블 등을 중심으로 한 전력에너지 분야, 조셉슨 소자 등의 정보통신 분야, MRI, SQUID 등의 의료공학 분야 등 산업 전반에 걸쳐 폭넓은 응용 및 실용화가 이루어 질 것으로 전망되고 있다.

이러한 초전도 기술의 응용을 위해서는 무엇보다도 저온공학 기술이 뒷받침되어야 하며 초전도 마그네트를 극저온 상태에서 안정적으로 운전할 수 있는 극저온 유지기술의 개발이 초전도 기기의 성능 및 경제성을 좌우하는 중요한 분야라고 할 수 있다.

초전도 마그네트를 초전도 상태로 유지하기 위하여 사용되는 극저온의 냉매로는 액체 헬륨이나 액체 질소가 있는데 이들 액체는 비등점이 극도로 낮기 때문에 보통의 용기에 저장하는 것은 불가능하고 특수한 구조를 가진 단열용기가 필요한데 이러한 용기를 cryostat라 부른다. 본고에서는 cryostat의 설계 및 제작에 필요한 각종 요소 기술과 여러 형태의 cryostat에 관하여 살펴보고자 한다.

2. Cryostat의 제작 및 방법

2.1 Cryostat의 설계, 제작시 유의점

이론적으로 cryostat의 구조는 진공 및 초단열재로 외부와 완전하게 분리되어 외부로부터의 열원을 100% 차단하는 것이 가장

이상적인 구조이지만 현실적으로 이러한 구조는 냉매의 출입이 불가능하고, 실험 목적상 냉각(시험) 대상체를 관찰, 교체 및 보안을 하기 위해 외부로 출입을 시키고자 할 때에는 불가능하다. 따라서 cryostat는 어떠한 형태로든 개방부가 필요하며 이것을 neck라 한다.

Cryostat의 가장 큰 기능은 외부로부터의 열유입을 최대한 차단해서 안에 담겨있는 냉매의 증발을 최대한 억제하는데 있다. 그런데 neck가 있으면 neck로 부터 많은 양의 열유입이 있다.

Cryostat는 기술적으로 상반되는 양면성이 있다. Neck가 크고 두꺼울수록 사용이 편리하고 안정적이거나 열유입이 증가하고, 또한 neck를 작고 얇게 하면 열유입은 감소하지만 시료의 출입이 불편하고 cryostat의 강도는 떨어진다. 이외에도 단열이라는 cryostat의 기본 개념에 역행하여 저온용기에 요구되는 사항이 몇 가지 있다. 이것을 열전달과 기계강도, 전자기 특성 등의 관점에서 정리하면 다음과 같다.

* 강도

- 내통(냉매가 담겨있는 통)의 support를 견고히 하면 열유입이 증대한다.

· MRI용 cryostat, SMES용 cryostat

* 사용의 편리성

- 취급이 편리하면 열유입이 증가한다.

· 구경이 큰 neck

- 신호선을 많이 넣으면 열유입이 증가한다.

· 多 Channel의 SQUID

* 액체 질소의 소비량

- 액체 질소 소비량을 줄이면 열유입이 증가한다.

· 액체 질소 냉각 열차폐판

* 크기, 형상

- 저온용기를 횡으로 설치하면 길면서 가늘게 되고, 넓게 하면 support, neck

등이 짧아져서 열유입이 증가한다. 내용적에 대한 표면적의 비율이 증가하여 열복사가 증가한다.

- 가속기, 자기부상열차용 cryostat
- 단열층을 얇게 하면 열유입이 증가한다.
- SQUID
- * 온도가변성
 - 저온부터 고온까지 온도를 연속 가변하면 증발량이 증가한다.
 - 열물성 측정용 cryostat
- * 전기, 자기특성
 - 전기저항을 작게 하면 열유입이 증가한다.
 - 각종 lead선
 - 신호전파경로를 짧게 하면 열유입이 증가한다.
 - 조셉슨 반도체용 cryostat
 - Cryostat의 전기, 자기적 잡음을 줄이면 열유입이 증가한다.
 - SQUID

이와 같이 정리해보면 단열성 대 neck tube, 전선, support 등을 삽입하는 각종 유틸리티 등의 적대 관계를 알 수 있으며 또한, 그에 따른 각각의 사용 목적에 맞는 최적의 cryostat를 개발하는 것이 중요하다.

2.2 Cryostat의 단열

열이 고온에서 저온으로 전달되는 경로는 대류, 전도 및 복사에 의한 열전달이 있는데 cryostat 외부로부터 헬륨조로의 열전달은 이들이 복합적으로 이루어진다.

2.2.1 기체의 열전달

통상의 cryostat의 단열 진공부에서는 압력이 10^{-2} Pa 이하로 되어 있다면 잔류가스는 자유분자기체로 볼 수 있기 때문에 이것에 의한 열전달은 압력에 비례한다. 다른 열전달 기구에 비하여 잔류가스에 의한 열전달량을 무시할 수 있는 정도로 되는 것은 10^{-3} Pa 이하의 압력 영역이기 때문에 이 이하로 진공도를 유지하는 것이 반드시 필요하다. 단열 진공부를 설치하여 사용하는 cryostat에서는 표면에 흡착되는 가스를 탈착하기 위하여 충분한 시간 동안 진공 배기시키고 단열 진공부의 저온면에 활성탄을 시

공하여 저온액화가스를 충전할 때 냉각되어진 활성탄의 흡착 작용에 의하여 단열 진공부의 진공도를 향상시키는 방법을 사용하고 있다. 또한 표면에 흡착되기 쉬운 것은 물, 공기, 탄화수소계의 가스 등이 있으나 수분의 양이 가장 많아 이러한 수분을 제거하기 위하여 진공조의 외벽에 heating cable을 연결하여 고온으로 유지하여 진공 배기 시키고 있다.

2.2.2 복사에 의한 열전달

Cryostat에 많이 사용되어 지고 있는 긴 동심원통 또는 동심구형의 두 면사이의 복사 열전달기구에 의한 저온면의 단위 면적당 열전달량은 다음 식으로 표현된다.

$$Q_R = C_R \cdot C_T \cdot (T_h - T_c) \quad [W \cdot cm^{-2}]$$

$$C_R = \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_c} + \frac{A_c}{A_h} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_h} - 1\right)} \quad [W \cdot cm^{-2} \cdot K^{-4}]$$

$$C_T = \frac{(T_h^4 - T_c^4)}{(T_h - T_c)} \quad [K^3] \quad (1)$$

여기서 ϵ 는 복사율, A 는 각각의 면의 표면적, σ 는 Stefan-Boltzmann 상수($5.67 \times 10^{-12} W \cdot cm^{-2} K^{-4}$), 첨자 c 와 h 는 각각 저온면, 고온면을 나타낸다.

액체헬륨용 cryostat에서는 실온으로부터의 복사열전달을 차단하기 위하여 냉동기로 냉각되어 지는 복사 열차폐판을 설치하거나 헬륨조 외측에 질소조를 설치하는 것이 일반적이다.

다층단열(multilayer insulation) 시공은 복사열전달의 저감에 매우 효과적이거나 이 방법은 정상상태에 도달하는데 수일의 시간이 걸리기 때문에 장시간에 걸쳐 사용하는 cryostat나 저온액화가스의 저장용기에 대해서 더욱 효과적으로 적용되고 있다. 이러한 다층단열재를 액체헬륨조나, 열차폐판의 외측에 수십 회를 감아 외부로부터 침입하는 복사열전달을 수분의 1로 줄일 수 있다. 진공은 아니나 cryostat의 내부에 수매의 동판(baffle)을 설치하여 증발가스에 의한 열차폐판 냉각으로 neck 부분으로의 복사열을 줄일 수 있다.

2.2.3 전도에 의한 열전달

단면 A 가 일정한 고체를 통한 전도열전달은 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$Q_s = \frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT \quad (2)$$

여기서 T_1, T_2 는 고체 양단의 온도, $\lambda(T)$ 는 온도가 T 인 고체의 전도열전달율이다. λ 는 일반적으로 온도에 따라서 큰 폭으로 변하기 때문에 윗식의 적분은 $\lambda-T$ 곡선의 면적으로부터 구해진다.

고체에 의한 열의 전도를 줄이기 위하여 소재를 얇은 것으로 사용하거나 지지 구조를 간단히 하여 최대한의 열침입을 줄이고 있다. 그러나 이들은 서로 상반된 관계가 있어 cryostat의 안정성을 높이기 위하여 지지 구조를 견고히 하면 전도에 의한 열침입이 증가하기 때문에 최소의 구조물로 최적의 지지 구조를 위한 연구가 필요하다.

2.3 Cryostat의 구성 및 구성재료

그림 1에서와 같이 일반적으로 cryostat는 외측에는 진공조와 내측에는 액체헬륨조로 구성되어 있으며 헬륨조로 침입하는 열을 줄이기 위하여 진공조와 헬륨조 사이에 질소조를 장착하여 진공조로 부터 들어오는 복사열을 중간층의 질소조가 차단하여 헬륨조로의 침입열을 줄이게 된다. 또한 진공조와 헬륨조 사이의 기체를 배기시켜 대류에 의한 열침입을 줄이기 위한 진공배기변, 만약의 사고로 인하여 진공조의 압력이 증가할 경우

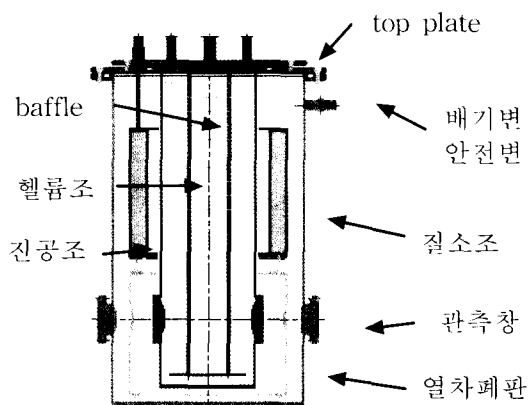


그림 1. Cryostat의 구성 요소

기체를 배출시키기 위한 안전변, 초전도 마그네트 및 신호선 등 각종 port 들이 부착되는 top plate, 그리고 특수 목적에 따라 insert dewar 나 관측창 등이 부착되기도 한다.

Cryostat를 제작하는데 사용되는 재료는 고자장의 초전도 마그네트에 의한 자장의 영향을 받지 않으며 상온과 극저온의 열수축에 대응할 수 있으며 기계적 강도 등을 고려하여 재질을 선택하여야 한다.

서로 다른 종류의 재료를 사용하는 경우는 열수축의 차이를 충분히 고려하여야 한다. 여러 가지 구성재료의 접합에는 기계적 강도, 기밀성, 내열특성 등을 고려하여 행하는데 일반적으로 용접, 은납, 납땜, 에폭시 등으로 접합을 한다. 표1은 cryostat에 사용되는 재료들을 나타내었다.

표 1. Cryostat에 사용되는 각종 재료

용도	사용 재료
저온용기	스텐레스 : SUS304, SUS304L, SUS316, SUS316L 등 알루미늄 합금 : A5052, A1050 등
도입관	스텐레스, 티타늄 합금, FRP, NiCu
열차폐판	동, 알루미늄
전열체	금속 : 동, 알루미늄, 은, 베릴륨강 절연물 : 사파이어, 석영, 산화베릴륨
히타	니크롬, 망간, 카본저항
저온seal 재료	유연한 재료 : 인듐, 알루미늄, 동, 은 체결력이 필요한 재료 : 금, 케프톤
단열재	알루미늄 증착 마이라, 알루미늄 박, 유리, 유리섬유강화직물, 나일론망, 발포재

2.4 Cryostat의 여러 형태

2.4.1 광학용 cryostat

광학용 cryostat는 헬륨조 내부의 측정 물질의 변화를 광학적으로 볼 수 있도록 한

저온공학 분야 특집

것이다. 이러한 창은 여러 가지로 실험에 유용한 점이 많으나 헬륨조로의 열침입을 크게 하는 요인이 되기 때문에 창의 크기 또한 중요 설계 변수이다. 관측창의 재료로는 사파이어, 석영, fused silica, 유리 등이 사용되고 있으며 파장의 크기와 온도 및 크기 등에 따라 선택된다. 그림 2는 관측창 부착형 cryostat의 외관이다.

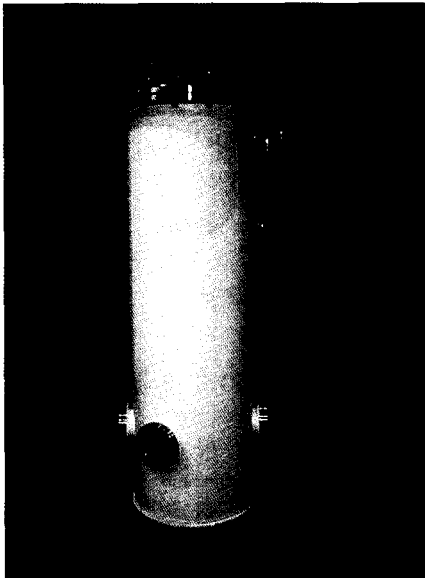


그림 2. 관측창 부착형 cryostat

2.4.2 NMR용 cryostat

일반적인 cryostat와 기본적인 구조는 같으나 헬륨의 재충진 시간이 매우 장시간(수개월에서 1년)에 걸쳐 이루어지므로 헬륨조로의 열침입을 줄이는데 가장 큰 어려움이 있다. 이를 위해 질소조와 헬륨조 사이에는 gas 냉각 방식의 열차폐판을 장착하여 최대한의 열침입을 줄이고 있으며 지지 구조를 최대한으로 간단히 하여 열침입을 줄이고 있다. 현재 상용화된 NMR용 cryostat는 헬륨의 증발량이 10 ml/h 이하로 한번 헬륨을 충전하면 약 1년 정도의 실험이 가능하다. 그리고 고자장(최고 20여 tesla)으로 여자할 때 유기되는 eddy current를 줄여야 되는 구조 및 재질을 사용하여야 하고 실험할 재료의 물성을 측정할 상온 보어가 cryostat 내부에 장착되어야 한다. 또한 cryostat 내측의 협소한 공간에 여러 겹의 내통들(헬륨조 내통, 20 K, 80 K 열차폐판 그리고 진공조 내통)이 열적으로 절연되어

있어 정밀한 기계적 가공과 조립이 필수적으로 요구된다. 그림 3은 여러 형태의 NMR의 외관을 보여주고 있다.

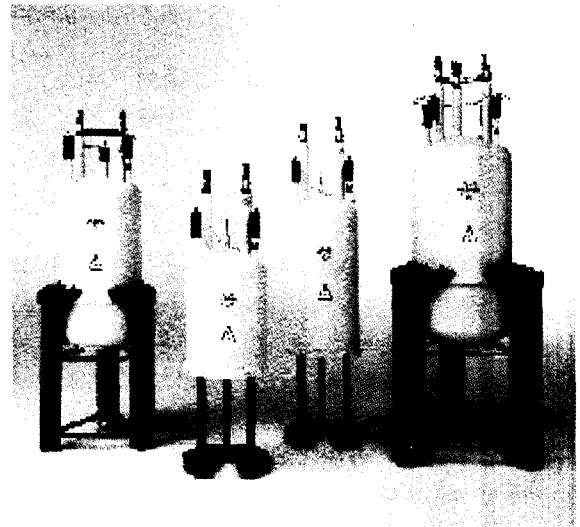


그림 3. Bruker사의 NMR용 cryostat

2.4.3 MRI용 cryostat

앞의 NMR용 cryostat와 기본적으로는 같은 형태이나 가장 큰 차이점은 cryostat가 횡으로 설치되어 있다는 점이다. 수 톤이나 되는 cryostat의 구조물을 안전하게 지지하고 또한 열침입을 줄이기 위해서는 특별한 지지 방법 및 연구가 요구된다. 또한 영상을 얻기 위해 환자가 들어갈 상온 보어의 크기도 700 ~ 800 mm로 대구경이기 때문에 cryostat가 매우 커지게 된다. 그러나 설치 공간을 줄이며 원자재 및 작업의 효율성 등을 감안하여 cryostat를 compact하게 제작하지 않으면 안 된다. 이 때 가장 중요한 것이 헬륨조로의 열침입을 줄이며 구조적으로 안전한 헬륨조 지지 방법이 요구된다.

또한 MRI의 운영 비용은 헬륨조로의 열침입에 의한 액체헬륨의 소모량에 의해 좌우됨으로 고효율의 cryostat 설계 및 제작이 무엇보다도 중요하기 때문에 상용의 MRI에 사용되는 cryostat에는 액체헬륨의 소모량을 최소화하기 위하여 20 K 및 80 K 열차폐판과 이를 냉각하는 냉동기가 부착되어 있어 액체헬륨의 소모량을 시간당 0.1 l 정도로 줄여 액체헬륨의 재충진 기간을 1년 이상으로 하여 운영비를 최소화하고 있다.

이러한 냉동기를 부착하여 질소조를 생략하고 20 K 및 80 K 열차폐판을 냉각하면 지지구조, 열차폐판의 구조 및 크기를 축소시킬 수 있지만 극저온 냉동기를 부착시키기 위해서는 냉동기 부착시 나타나는 진동, 냉동기의 cold head와 열차폐판과의 접속 방법, 접합부에서의 열전달 해석 등이 필요하다.

마그네트 보아내에 설치되는 열차폐판, 헬륨조 내통, 상온 보아 등은 영상을 얻기 위해 필수적인 경사코일이 펄스적으로 운전될 때 유도기전력에 의한 eddy current를 최대한으로 억제할 수 있는 형상과 재질을 선택하여야 하는데 이와 같이 열차폐판, 헬륨조 내통, 상온 보아에서 발생하는 펄스파형을 변형시켜 영상의 질에 직접적인 영향을 미치기 때문이다. 그림 4는 전신촬영용 1.5 tesla 급의 MRI cryostat 외관이다.

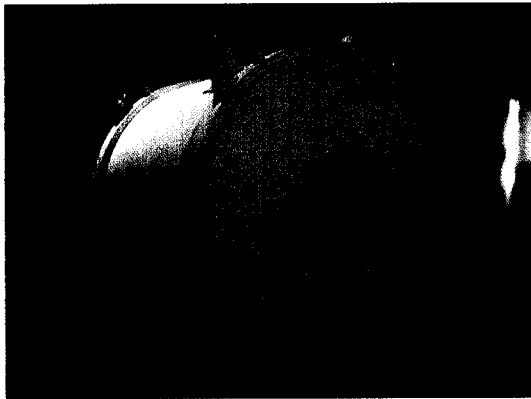


그림 4. 전신촬영용 MRI cryostat

2.4.4 고온초전도 케이블용 cryostat

고온초전도 케이블은 기존 케이블의 구리선 대신 고온초전도 도체를 사용하여 전기저항이 없어지는 현상을 이용하여 저손실·대용량 전력 수송이 가능한 미래형의 케이블로서 케이블 코아와 케이블 코어를 저온으로 유지시키는 극저온 관료로 구성되어 있다. 극저온 관료는 상온으로 부터의 열유입을 차단하기 위한 진공층을 갖는 진공관료와 냉매의 순환을 위한 냉각시스템으로 구성되어 있으며 냉각시 생기는 외통과 내통의 기계적 수축 차이 등을 고려하여 bellows가 사용되며 관료의 말단 부위에는 초전도 단말부가

부착되어 있다. 그림 5는 고온초전도 케이블용 cryostat의 외관 및 구조이다.

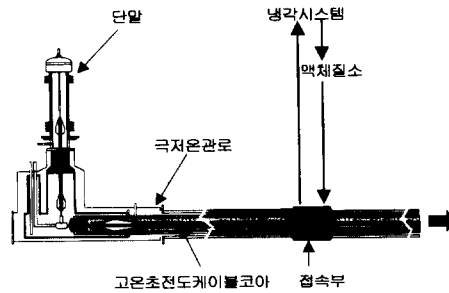
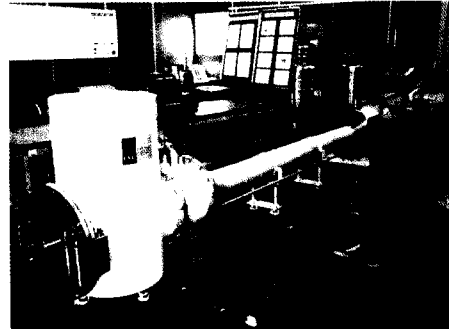


그림 5. 고온초전도 케이블용 cryostat 외관 및 구조

2.4.5 초전도 발전기용 cryostat

초전도 발전기는 기본적으로 기존의 발전기와 그 구조가 같으나 계자코일을 구리선 대신에 초전도선을 사용하기 때문에 그 구조가 매우 다르다. 계자코일이 초전도 상태를 유지하기 위하여 극저온의 냉매가 충전되어 회전하는 cryostat가 필요하게 되고 이 cryostat 내부로 상온의 정지된 외부로부터 액체헬륨이 주입되는 주입관이 연결되는 관계로 300 K과 4.2 K 사이의 극저온 사이의 기계적인 열수축 및 열팽창 문제를 해결하는 특수한 헬륨급배장치가 설치되어 액체헬륨을 공급하고 기화된 헬륨을 회수하는 복잡한 구조를 가지게 된다.

또한 고속의 회전시 나타날 수 있는 기계적인 요동을 없애기 위하여 balancing을 해결하는 것 또한 필수 요건이다. 아래의 그림 6은 30kVA급 초전도 발전기의 외관과 구조이다.

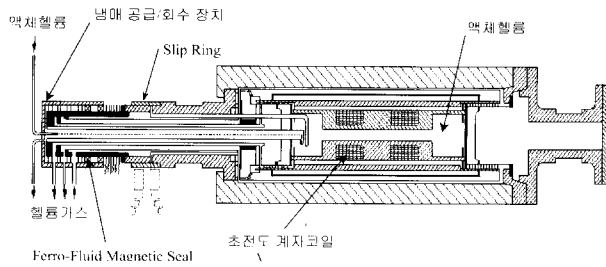
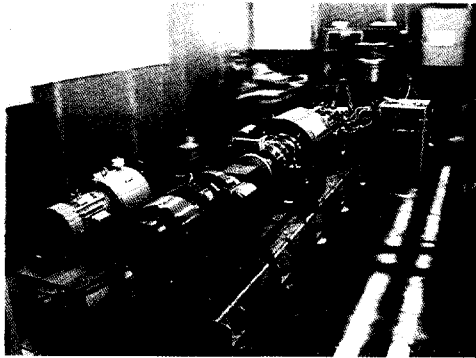


그림 6. 초전도 발전기용 cryostat 외관 및 구조

2.4.6 SMES용 cryostat

전력계통으로부터 공급되는 전력의 품질은 정전방지 및 규정주파수/규정전압의 유지지만 최근에는 전력의 품질에 매우 민감한 기기들이 사용됨에 따라 수 ms ~ 수 s 정도의 매우 짧은 시간의 전력 왜곡에도 심각한 문제가 야기되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 SMES가 개발되고 있는데 이 SMES용 cryostat는 내진동 설계가 만족되어야 하며 교류자장의 변화에 따른 와전류

를 감쇄시키기 위한 기술이 요구된다. 그리고 항상 전류도입선이 액체헬륨조 내부의 초전도 마그네트와 연결이 되어 있기 때문에 액체헬륨조 내부로의 열침입을 줄이기 위하여 냉동기로 냉각이 되는 고온초전도 전류도입선과 재응축용 냉동기, 그리고 shield 냉각용 냉동기 등이 필요하다. 그림 7은 SMES용 cryostat의 구조를 보여주고 있다.

2.4.7 SQUID용 FRP cryostat

자기잡음의 원인으로는 금속 등의 전도체 부분의 외부에서의 교류 자장에 따른 와전류, 자성체의 유무, 전도체 부분에 발생하는 Johnson 잡음 등이 있다. 뇌자기는 매우 미약하기 때문에 자기잡음을 수 μT 로 낮출 필요가 있다. 그래서 검출센서에 가까운 tail 부분에는 대자율이 낮은 알루미늄을 이용한 AFRP를 이용하고 있다. 또 tail 부분의 내·외통의 두께를 얇게 하고 내·외통간의 간격을 좁게 해서 검출코일의 위치를 가능하면 측정체에 가깝게 할 필요가 있다. Tail 부분에서의 열차폐판은 가늘고 긴 동선을 종방향으로 에폭시로 접착하여 제작하며 다층단열재는 slit 되어진 superinsulation을 사용한다. 또한 FRP cryostat는 액체질소조가 없는 대신에 2~3개의 gas 냉각 열차폐판이 설치되어 있다. 각각의 FRP 통들은 filament winding 방식으로 제작이 되었으며 tail 부분은 FRP 판을 가공하거나 성형을 하여 제작이 된다.

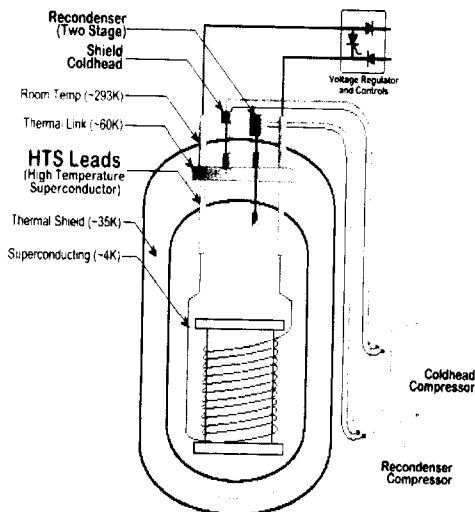


그림 7. SMES용 cryostat의 냉각시스템

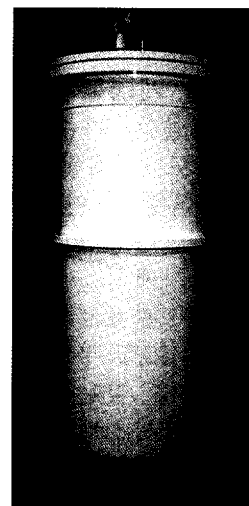


그림 8. SQUID용 FRP cryostat

그리고 각각의 부품들은 stycastr로 접착하여 제작되었다. SQUID용 FRP cryostat의 외관을 그림 8에 나타내었다.

3. 결 론

초전도 기술의 산업적인 응용을 위한 관점에서 cryostat의 설계 방법 및 제작, 그리고 여러 형태의 cryostat 구조에 대해 간단히 살펴보았다. 선진국에서는 초전도 기술의 산업적 응용을 위한 연구가 본격적으로 시작된지도 30여년 이상 경과되었고 산업사회의 발달에 따라 새로운 요구에 부응할 수 있는 초전도 기술이 향후 본격적으로 이루어질 것으로 전망되고 있으며 이러한 요구에 부응하는 각종 cryostat의 개발도 많은 진척을 이루었으며 상당한 수준에 까지 올라와 있다.

그러나 국내의 사정은 1980년대 초반부터 저온공학 및 초전도 관련 연구가 활성화되어 오면서 극저온기술 및 각종 산업 및 연구용 cryostat의 개발 필요성이 대두되어져, 1990년대 중반부터 현재까지 연구용의 MRI, NMR용 cryostat 그리고 특수목적용의 cryostat 등이 부분적으로 개발되고 있는 실정이다.

초전도, 저온물리, 화학, 의료, 유전공학등의 기초과학분야의 연구 근간이 되는 극저온의 생성 및 유지기술을 본격적으로 연구·개발하기 위하여 산업계 및 학계, 연구기관 등의 보다 많은 관심이 요구된다.

참 고 문 헌

- [1] 일본저온공학협회, "초전도·저온공학 핸드북" 1993.
- [2] 한국전기연구소, "고자장 자기공명 영상 장치 및 초전도 자석개발", 보고서, 1999.
- [3] 한국전기연구소, "산업화 가능 핵심 초전도 기술 분석", 보고서, 1999.
- [4] K. Fujioka et al., "Developmental study of FRP dewar for multi-channel SQUID-MEG", biomagnetism, 87, p. 466 ~ 469, 1987.

저자이력



김성래(金聖來)

1965년 10월 9일생, 1988년 부산대학교 물리학과 졸업, 1992년 부산대학교 물리학과 (이학석사) 현재 (주)CVE 과장



권오범(權五範)

1941년 7월 20일생, 1966년 건국대학교 경제학과 졸업, 1977년 대연통상(주) 상무이사, 1987년 11월 (주)신성월 드 대표이사, 1997년 (주)CVE 대표이사