

MRI용 CRYOSTAT의 설계 제작**

조전욱, 이연용, 권영길* 류장식¹⁾,
류충식, 권오범²⁾, 이홍주, 이혜성³⁾, T.Fukui, T.Komoshita⁴⁾

1) 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀
2) (주)신성월드, 3) 덕성화학(주), 4) CryoVac Co.

Design and manufacturing of the MRI Cryostat

Jeon-Wook Cho, Eon-Yong Lee, Young-Kil Kwon*, Kang-Sik Ryu¹⁾,
Choong-Sik Ryu, Oh-Bum Kwon²⁾, Hong-Ju Lee, Hai-Sung Lee³⁾, K.Fukui, K.Komoshita⁴⁾

1) Applied superconductivity Lab., Korea Electrotechnology Research Institute
2) Shin Sung World Co., 3) Dyung Sung Chemical Co. 4) CryoVac Co.

Abstract

A superconducting 2 tesla MRI magnet for the animal magnetic resonance imaging has been developed as a basic model for the application of the precise superconducting magnet technology. MRI cryostat with 210mm room temperature bore was designed and manufactured for this magnet. The cryostat was designed basically not only to extract the principal design parameters at the performance test but also for the convenience of the manufacturing. The most extinct feature of the cryostat is that it does not have LN₂ tank and the 77K thermal shield is cooled by circulating LN₂ through copper pipe which is welded around the shield plate. It results in reduction of the total cryostat size(about 30%)

1. 서 론

의료용 핵자기공명장치(Nuclear magnetic resonance imaging Instrument, MRI)에 사용되는 초전도 마그네트 시스템은 고균등 및 고자장을 발생시킬수 있는 초전도 마그네트와 Cryostat로 구성된다. 마그네트를 초전도 상태로 유지하기 위해서는 액체헬륨과 같은 저온의 냉매속에 마그네트를 잠기게하여 마그네트를 저온의 동작온도로 유지하여야 한다. 따라서 초전도 마그네트를 극저온상태로 장기간 유지하기 위해서는 복잡한 단열구조를 가진 Cryostat의 설계 및 제작이 필요하게 된다.

궁극적으로 MRI-CT의 운영비용은 액체헬륨조제로의 열침입에 의한 액체헬륨의 소모량에 의해 좌우됨으로 고효율의 Cryostat의 설계 및 제작이 무엇보다도 중요하기 때문에, 상용의 MRI-CT에 사용되는 cryostat에는 액체헬륨의 소모량을 최소화하기 위하여 20K 및 77K 열차폐판(thermal shield)을 냉각하는 냉동기가 부착되어 있어, 액체헬륨의 소모량을 시강당 0.2리터정도로 줄여, 액체헬륨의 재 주입기간을 6개월이상으로하여 운영비를 최소화하고 있다.

본 연구에서 제작되는 Cryostat는 상용화목적의 고효율 MRI용 Cryostat의 전단계에서, MRI용 Cryostat의 요소설계 기술, 주요핵심 제작기술의 개발차원과, 초전도마그네트의 실험의 편의성을 고려하는 측면에서 설계, 제작되었다.

2. MRI용 Cryostat의 설계

2-1. Cryostat의 구조 설계

그림 1과 2에 Cryostat의 기본구조를 나타내었다. 그림

중의 ①이 초전도 마그네트이고 초전도 마그네트 보-아내에 마그네트를 지지하는 직경 254mm의 SUS304 shimless tube가 내장되고 상온의 실험구간을 확보하는 내경 210mm, 두께 2.8mm인 SUS304 shimless tube사이에 77K 열차폐판과 superinsulation이 내장된다. 마그네트의 보-아내에 설치되는 모든 재료는 가능한 완전한 비자성체에 가까운 재질을 선택하여 상온의 실험구간에서 자장분포에 영향을 미치지 않도록하여한다. 따라서 일반적인 Cryostat의 제작시에 사용되는 rolling후 용접하는 방법으로는 용접부위가 자성체로 변질되기 때문에 사용할 없고, shimless tube를 필요한 치수로 가공하여 사용하여야한다.

②는 액체헬륨조를 나타내는데 중심축으로 부터 아랫쪽으로 66mm편심되게하여 이용 가능한 액체헬륨의 내용적을 크게할 수 있다. 액체헬륨조의 총 액체헬륨내용적은 약 280리터이고 초전도마그네트 상부면으로 부터의 내용적은 약 100리터정도이다. ④번은 40K shield 판을 나타내는데 "L"형의 동frame에 알루미늄호일을 감아 제작하고, 본 Cryostat는 실험을 목적으로 헬륨소모량의 감소보다는 가능한 한 상온 실험구간을 크게하기 위하여 마그네트 보-아내에서는 40K shield판을 마그네트와 77K shield사이에 설치하지 않았다.

그림중의 ⑤번은 77K shield판을 나타내는데 기존의 상용 MRI용 cryostat의 경우는 액체질소 팽크를 내장하거나, 용량이 비교적 큰 냉동기를 설치하여 액체질소조를 생략하는 경우도 있고 양자를 혼용하는 경우도 있다. 그러나 이 경우는 제작기간이 길고, 제작비용도 많이 소요될 뿐만 아니라, Cryostat의 전체 부피도 상당히 크게되어 이와 같은 문제점을 해결하면서 상용화가 아닌 실험목적에 잘 부합되는 새로운 형태의 77K shield를 구상하게되었다. 우선 구리판으로 40K shield중 바깥쪽과 마그네트 보-아 내측에 shield판을 설치하고 shield판주위를 동파이프를 감아 동파이프와 shield판을 용접하여 동파이프와 shield판 사이의 열접촉을 양호하게한다. 물론 동파이프측으로 일정량의 액체질소를 흐르게 하여 shield판을 77K로 유지시킨다. 이와 같은 형태의 77K shield방식은 산업적으로 널리 이용되고 있는 열교환기 방식을 응용한것으로서 액체질소를 외부에서 항상 흘러주어야하는 번거로움이 있기 때문에 상업화용의 MRI용 Cryostat에는 적용할 수 없으나, Cryostat의 개발단계에서는 여러 가지 형태의 실험을 할 수 있기 때문에 매우 바람직한 방식이라고할 수 있다.

그림중의 ⑦번은 마그네트, 액체헬륨조, 40K shield, 77K

** 본 연구는 생산기술개발사업으로 수행된 것임.

shield의 하중을 지탱하는 지지대로서 cryostat의 성능을 좌우하는 중요한 부분중의 하나이다. 우선 이 지지대는 약 160Kg에 해당하는 초전도 마그네트와 충전되는 액체헬륨의 무게 및 액체헬륨조, 40K shield, 77K shield등 상당한 무게에 해당하는 하중을 지지할 수 있도록 설계해야 할 뿐만 아니라, 상온인 외부진공조와 액체헬륨조와 직접 연결되는 부분이기 때문에 무엇보다도 효과적으로 단열시킬 수 있는 구조와 재질을 선택해야 한다. 여기서는 GFRP(G10, 극저온용) 파이프에 SUS봉을 내장하는 구조로 하여 하중에 충분히 견디면서 진도열전달을 억제할 수 있는 구조로 설계하였다.

⑧번은 액체질소 및 액체헬륨의 입,출입, 마그네트 여자용전선, 각종 데이터 입,출선을 외부로 인출하는 Access port이다. 물론 Access port도 외부와 액체헬륨조와 직접 연결되어 있고, 전류도입선, Signal readout선이 복잡하게 지나가기 때문에 헬륨의 소모량을 증가시키는 요인을 제공한다. 상용의 MRI에서는 마그네트의 여자후 헬륨소모량이 많은 전류도입선을 외부로 인출할 수 있는 착탈식을 사용하여 헬륨의 소모량을 줄이는 방식을 채용하고 있으나, 본 실험용 Cryostat에서는 헬륨의 소모를 다소 감수하더라도 가격이 저렴한 편조선을 사용하였다. 전류도입선 및 각종 Signal readout선의 냉각 및 액체헬륨조로의 복사열을 차단하기 위하여 Access port에 4개의 Baffle을 설치하였다.

아울러 Cryostat의 중요한 제작 장면 중의 일부를 그림3에 나타내었다.

2-2. Cryostat의 열전달

가. 기체에 의한 열전달

다른 열전달 기구에 비하여 잔류가스에 의한 열전달량을 무시할 수 있는 정도로 되는 것은 10^{-3} Pa이하의 압력영역이기 때문에 이 이하로 진공도를 유지하는 것이 반드시 필요하다. 단열진공부를 설치하여 사용하는 Cryostat에서는 표면에 흡착된 가스를 탈착하기 위하여 충분한 시간동안 진공배기시키거나 단열진공부를 가열하여 진공시키는 것이 필요하다. 특히 진공다충단열을 행하는 경우는 다충단열층사이의 좁은 부위에서의 진공배기가 더욱 어려움으로 보다 세심한 주의가 필요하다.

본 Cryostat의 제작시에는 10^{-3} Pa이하로 충분히 진공시키는 것을 전제로 다른 열전달기구에 의한 것에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 잔류가스에 의한 진도 및 대류열전달은 열설계시 고려하지 않았다.

나. 복사에 의한 열전달

액체헬륨용 Cryostat에서는 실온으로 부티의 복사열전달을 차단하기 위하여 액체질소로 냉각되어지는 복사shield를 설치하는 것이 일반적이다. 또한 액체헬륨의 증발가스의 잠열(실온과 비등점온도의 가스의 엔탈피차)은 증발잠열의 74배이기 때문에 이것을 이용하여 복사shield를 냉각하는 가스 shield의 방식이 사용되어지고 있고 초전도마그네트의 전류리-드의 냉각에도 사용되어지고 있다.

진공다충단열도·복사열전달의 저감에 매우 효과적이거나, 이 방법은 정상상태에 도달하는데 수일의 시간이 걸리기 때문에 장기간에 걸쳐사용하는 Cryostat나 지온액화가스의 저장용기에 대해서 더욱 효과적으로 적용되고 있다. 진공중은 아니나 Cryostat의 목부분이 두꺼운 경우에는 수매의 동판을 설치하고 증발 가스가 이 Shield판을 냉각하기 때문에 복사열 차단에 매우 효과적이라고 할 수 있다.

다. 진도에 의한 열전달

단면 A가 일정한 고체를 통한 진도열달은 다음식으로

표현될 수 있다.

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

여기서 T_1 , T_2 는 길이 L인 고체 양단의 온도, $\lambda(T)$ 는 온도가 T인 고체의 진도열전달율이다. λ 는 일반적으로 온도에 따라서 큰 폭으로 변하기 때문에 위의 식의 적분은 λ -T 곡선의 면적으로부터 구하여 진다.

라. Cryostat의 열침량의 계산

위에서 언급한 각종 열전달기구에 관한 고찰을 토대로하여 설계된 Cryostat의 열침입량을 계산하였다. 물론 Cryostat의 구조가 매우 복잡하고, 위에서 열전달기구의 예도 Access port에서의 기화된 헬륨가스에 의한 대류열전달도 함께 고려되어야 하기 때문에 정확한 계산을 위해서는 보다 장기간에 걸친 연구가 필요하다. 여기서는 최적 설계를 위한 관점보다는 제작되는 Cryostat의 헬륨소모량을 예측한다는 관점에서 계산하였다.

Cryostat의 주요 구성 부위에서의 열침입량을 계산하여 표 1에 정리하였다.

3. 성능평가

Cryostat의 성능평가를 위하여 주요 구성 부위에 CGR 및 Cernox Resistor온도계를 설치하였다. 먼저 LN2의 순환시 77K Shield판의 냉각상태를 관찰하기 위하여 LN2 순환관 입,출구에 온도계를 설치하여 온도변화를 관찰하였는데, Shield판이 77K로 잘 유지되고 있는 것을 확인하였다.

마찰가지로 40K shield판의 온도를 관찰하기 위하여 동프레임에 온도계를 설치하였는데, 이 점에서의 온도는 예상과는 다르게 40K로 내려가지 않고 100K정도의 높은 온도를 유지하였는데, superinsulation과 동프레임사이의 열접촉이 불량하여 superinsulation의 온도가 센서가 설치된 동프레임에 충분히 전달되지 않은 경우로 생각된다.

Cryostat의 액체헬륨 증발량을 측정하기 위하여 액체헬륨조내에 Helium Levelmeter를 시간이 지남에 따른 액체헬륨의 높이 변화를 측정하였다. 액체헬륨의 증발량은 물론 마그네트의 운전 상태 즉 main coil의 여자 또는 영구전류 스위치의 가열등에 따라 매우 큰 값으로 변화하게 되는데, 시간당 약 3리터 정도의 액체헬륨이 증발하여 설계치의 약 두배의 약 두배에 해당하는 값을 나타내었다.

액체헬륨의 높이가 전류도입선이 설치된 지점이하에서는 액체헬륨의 소모량이 설계치와 거의 같은 점으로 미루어 이와 같이 설계치보다 많은 헬륨증발량을 나타내는 것은 main coil과 shim coil의 전류 도입선을 계산시 초전도 마그네트용 전류도입선의 열침입량보다는 무척 큰 일반적인 편조선을 사용한데서 기인된 것으로 생각된다.

4. 결 언

국내에서는 최초로 실험공간이 상온이며 수평형의 MRI용cryostat를 설계·제작하였다. MRI용 cryostat는 다른 형태의 cryostat에 비하여 구조도 매우 복잡할 뿐만 아니라, 마그네트의 지지구조등이 매우 복잡하여 설계·제작이 매우 어려운 cryostat이다. 향후 고성능의 cryostat의 개발을 위하여 보다 많은 연구가 필요하며, 본 연구에서 골격을 이루는 설계 및 제작기술을 개발했는 점에서 매우 중요한 의의를 가질 수 있다.

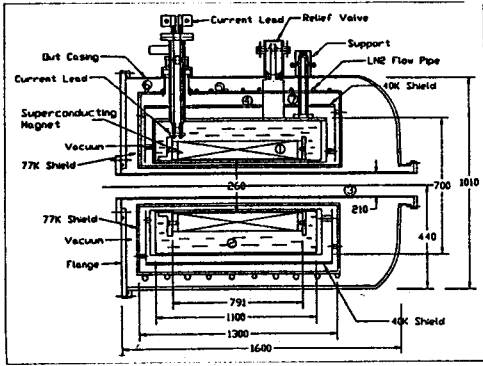


그림 1 MRI Cryostat 개략도(정면도)

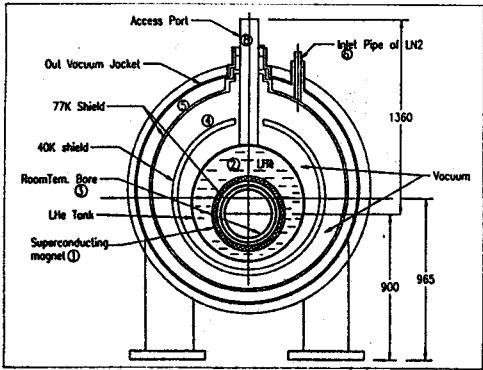


그림 2 MRI Cryostat 개략도(측면도)

표 1. Cryostat의 주요 구성부에서의 열침입량 계산치

항 목	계 산 위 치	계산침입열량	감소율	산정침입열량
고체에 의한	LHe조 지지봉	0.05Wx4=0.2W	0	0.2W
	LHe조 방진구	0.07Wx2=0.14W	0	0.14W
전도	Shield판 지지봉	0.015Wx15=0.18W	0	0.18W
열전달	200A전류도입선	5.0Wx1=5.0W	1/10 ¹⁾	0.5W
	10A전류도입선	0.1Wx20=2.0W	1/10	0.2W
	계측용-signal선	0.004Wx50=0.2W	1/10	0.02W
	Access Port	2.95W	1/10	0.295W
복사	40K shield 복사	0.012W	1/5 ²⁾	0.0024W
	77K shield 복사	0.18W	1/5	0.036W
	Access Port-복사	1.76W	1/5 ³⁾	0.352W
합 계				1.9254W

- 1) 액체헬륨조로부터 증발되는 4.2K온도의 액체헬륨가스가 Access Port를 통하여 각종 전류리드를 냉각하면서 상온인 대기중으로 배출되기 때문에 전류리드를 통하여 침입되는 열을 통상 1/10정도 감소시킬 수 있음.
- 2) Shield 판 주위에 Superinsulation을 여러겹 감아 복사에 의한 열침입을 1/5정도로 감소시킬 수 있음.
- 3) Access Port에 Baffle을 4-5매설치하여 복사에 의한 열침입을 1/5정도로 감소시킬 수 있음.

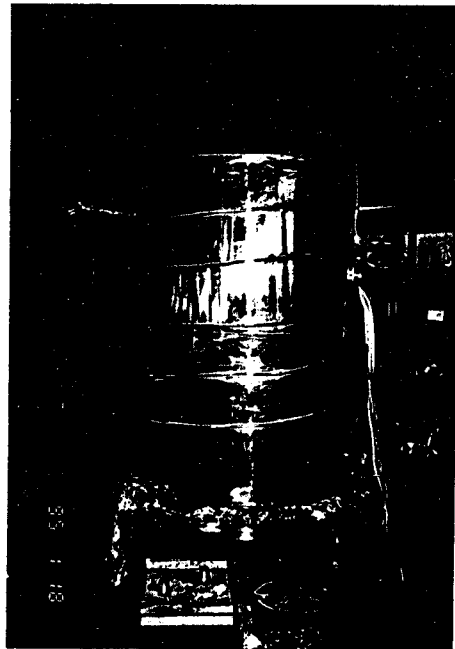
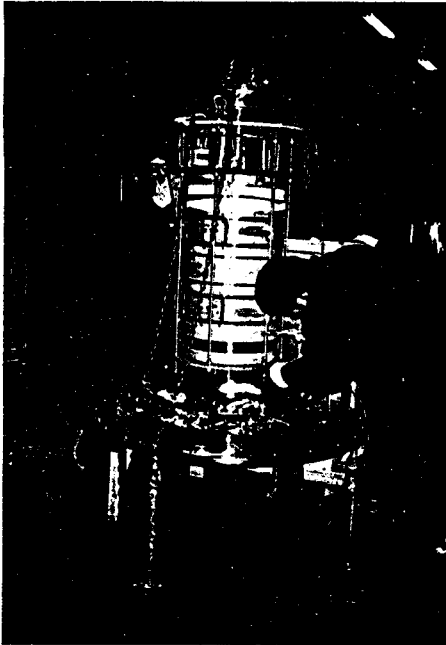


그림 3 Cryostat 제작장면(좌: 마그네트 조립장면, 우: 77K Shield 판 조립장면)