

전신촬영용 MRI cryostat 개발

김성래, 류충식, 이흥주, 오원균, 주진득, 권오범, 권영길*, 조전욱*, 배준한*
 CVE 기술연구소, *한국전기연구소

Development of cryostat for whole body MRI

S. R. KIM, C. S. Ryu, H. J. Lee, W. K. Oh, J. D. Ju, O. B. Kwon, Y. K*. Kwon, J. W*.
 Cho, J. H. Bae*

Cryogenics & Vacuum Engineering, Korea Electrotechnology Research Institute

cvet@unitel.co.kr

Abstract - The cryostat with refrigerator for whole body MRI had been designed and fabricated. This cryostat consist of LHe vessel, 20 K and 80 K shield, and vacuum vessel. The design and fabrication data were discuss in this paper. These results will be applied to commercial MRI cryostat in the future.

1. 서 론

의료용 핵자기 공명 영상 장치(MRI)에 사용되는 초전도 마그네트 시스템은 고균등 및 고자장을 발생시킬 수 있는 초전도 마그네트와 cryostat로 구성된다. 마그네트를 초전도 상태로 유지하기 위해서는 마그네트를 액체헬륨과 같은 극저온의 냉매 속에 잠기게 하여 극저온의 온도로 유지되게 하여야 한다. 따라서 마그네트를 극저온 상태로 장기간 유지하기 위해서는 복잡한 단일 구조를 가진 cryostat의 설계 및 제작이 필요하게 된다.

궁극적으로 MRI-CT의 운영비용은 액체헬륨조 예로의 열침입에 의한 액체헬륨의 소모량에 의해 좌우됨으로 고효율의 cryostat 설계 및 제작이 무엇보다도 중요하기 때문에 상용의 MRI-CT에 사용되는 cryostat에는 액체헬륨의 소모량을 최소화하기 위하여 20 K 및 80 K 열차폐판(thermal shield)을 냉각하는 냉동기가 부착되어 있어 액체헬륨의 소모량을 시간당 0.1 l 이하로 줄여 액체헬륨의 재충진 기간을 6개월 이상으로 하여 운영비를 최소화하고 있다.

본 연구에서 제작한 cryostat는 상용화 목적의 고효율 MRI용 cryostat를 개발하기 위하여 MRI용 cryostat의 요소설계기술, 주요 핵심 제작기술의 개발 차원과, 초전도 마그네트의 성능 평가 실험의 편의성을 고려하는 측면에서 극저온 냉동기가 부착되어 액체질소조를 설치하지 않고도 비교적 장시간 운전할 수 있는 초창기의 냉동기 부착형 MRI-CT용 cryostat를 설계·제작하였다.

2. 본 론

2.1 Cryostat 구조 설계

그림 1에 냉동기 부착형 cryostat의 정면도와 측면도를 나타내었다. 전체 cryostat의 크기는 2000 mm(직경) × 2000 mm(길이)이고 초전도 마그네트의 무게를 포함한 총 cryostat의 중량은 약 3380 kg으로 상용화된 전신촬영용 MRI-CT와 비슷한 크기 및 중량을 갖는다.

그림 중의 ①은 20 K 열차폐판과 80 K 열차폐판을 냉각시키기 위한 2단 냉동기를 보여 주고 있으며 동작 중에 있을 진동을 감쇄하기 위하여 진공층에 bellows를 부착하였으며 여기에 사용된 미국 CTI사의 GM 냉동기 사양을 표 1에 표기하였다.

①은 초전도 마그네트이며 이 마그네트가 내장되어 있는 액체헬륨조의 내통과 실온의 촬영 공간을 확보하는 내경 800 mm인 진공조 사이에 20 K 열차폐판④, 80 K 열차폐판③과 superinsulation이 설치된다.

마그네트 보아 내에 설치되는 열차폐판, 헬륨조 내통, 상온 보아 튜브 등은 경사 코일이 필스적으로 운전될 때 유도기전력에 의한 eddycurrent를 최대로 억제할 수 있는 형상과 재질을선택하여야 하기 때문에 자성을 띄지 않는 Al과 SUS316L로 제작하였다.

Table 1 Specification of refrigerator

| 구 분 | 크 기 |
|-----------------|----------------|
| Model | 1050CP |
| size | 346H×152W×502L |
| capacity (80 K) | 65 Watt |
| capacity (20 K) | 7 Watt |
| weight | 13.5 kg |

⑤는 액체헬륨조를 나타내는데 총 액체헬륨 내용적은 약 610 l 이고(초전도 마그네트 내장) 내통 및 외통의 직경은 각각 970 mm, 1800 mm이고 길이는 1640 mm이며 마그네트에 설치되는 보호저항은 access port에 가까운 쪽 측면 플랜지에 설치하였다. 또한 외부로부터의 복사열을 줄이기 위해 액체헬륨조 외측에 superinsulation을 시공하였다.

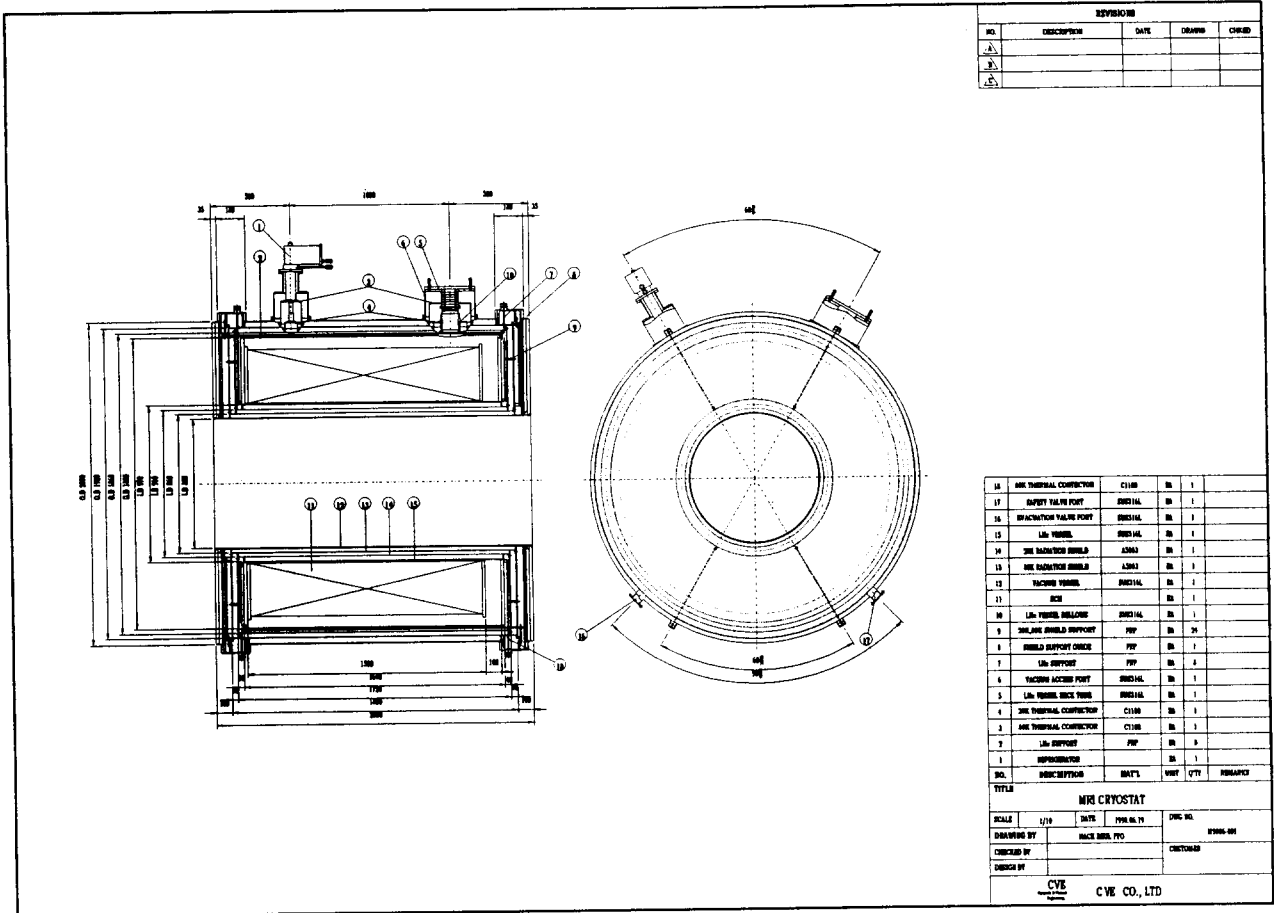


Fig. 1 Schematics of MRI cryostat

⑬과 ⑭는 80 K 열차폐판과 20 K 열차폐판으로서 액체헬륨조⑮와 진공조⑫ 사이에 위치하며 각각 냉동기의 1단과 2단에 연결된다. 재질은 비자성체이며 경량으로 열전달이 우수한 Al로 제작·조립하였으며 각각의 shield 외측에는 superinsulation을 시공하여 외부복사열에 의한 열침입을 감소시켰다. 이와 같이 MRI cryostat에 냉동기를 부착하면 액체질소조를 생략할 수 있어 MRI cryostat의 전체 크기를 줄일 수 있는 장점이 있다.

⑫는 cryostat의 최외측 진공용기를 나타내는데 SUS316L 판을 롤링하여 원통을 만들고 좌우 플랜지는 SUS316L로 제작하여 진공에 충분히 견디도록 하였다. 또한 내면은 10^{-5} Torr 이상의 진공을 발생시킬 수 있도록 내면을 충분히 연마 가공하였다.

⑦은 마그네트 및 액체헬륨조의 하중을 지탱하는 지지대로서 이 지지대는 cryostat의 단일성능을 좌우하는 중요한 부분 중의 하나이다. 이 지지대는 초전도 마그네트와 충전되는 액체헬륨의 무게 및 액체헬륨조 등 약 2100 kg 정도의 상당한 무게에 해당하는 하중을 지지할 수 있도록 설계해야 할 뿐만 아니라 상온인 외부 진공조와 액체헬륨조와 직접 연결되는 부분이기 때문에 무엇보다도 효과적으로 단일시킬 수 있는 구조와 재질

을 선택해야 한다. 여기서는 GFRP (G10) 파이프 양측에 SUS 금구를 stycast로 접착하여 하중에 충분히 견디면서도 전도열전달을 억제할 수 있는 구조로 하였다.

⑥은 액체 및 기체헬륨의 입·출입, 마그네트 여자용 전원, 각종 신호 입·출력선을 외부로 인출하는 access port이다. 이 access port도 외부 및 액체헬륨조와 직접 연결되어 있고 전류도입선, 신호선들이 복잡하게 지나가기 때문에 헬륨의 소모량을 증가시키는 요인을 제공한다. 상용의 MRI 마그네트는 여자 후 헬륨 소모량이 많은 전류도입선을 외부로 인출할 수 있는 착탈식을 사용하여 헬륨의 소모량을 줄이는 방식을 채택하고 있다. 본 cryostat도 주코일 여자용 전류도입선과 보정코일용 전류도입선 및 영구전류스위치의 히터 전원용 전류도입선을 각각 착탈식으로 제작하였으며 착탈식 current lead adapter를 access port 하부에 설치하였다. Access port 외벽 및 각종 신호선의 냉각 그리고 액체헬륨조로의 복사열을 차단하기 위하여 access port 내부에 baffle을 설치하였다. 또한 액체헬륨조와 access port와의 연결 부위에는 bellows를 설치하여 열수축의 차이에서 오는 열응력을 제거할 수 있는 구조로 설계·제작하였으며 표 2에 설계·제작된 cryostat의 주요 사양을 나타내었다.

Table 2 Designed parameters of cryostat

| 항 목 | 단위 | 크기 | 비고 |
|-----------|-------|------|------|
| 실온 보아의 직경 | mm | 800 | |
| Cryostat | 외경 | mm | 2000 |
| | 길이 | mm | 2000 |
| 액체헬륨조 | 길이 | mm | 1640 |
| | 외경 | mm | 1800 |
| 20 K 열차폐판 | 내경 | mm | 970 |
| | 길이 | mm | 1740 |
| 80 K 열차폐판 | 외경 | mm | 1860 |
| | 내경 | mm | 910 |
| 액체헬륨 내용적 | 길이 | mm | 1840 |
| | 외경 | mm | 1920 |
| 액체헬륨 소모량 | 내경 | mm | 860 |
| | | ltr | 610 |
| | ltr/h | 0.12 | |

2.2 Cryostat의 열설계

2.2.1 대류에 의한 열전달

통상의 cryostat의 단열진공부에서는 압력이 10^{-2} Pa 이하로 되어 있다면 잔류가스는 자유분자 기체로 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. 단열진공부를 설치하여 사용하는 cryostat에서는 표면에 흡착되는 가스를 탈착하기 위하여 충분한 시간 동안 진공 배기시키고 진공단열부의 저온면에 활성탄을 시공하여 저온액화가스를 충전할 때 냉각되어진 활성탄의 흡착 작용에 의하여 단열진공부의 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 cable를 연결하여 고온으로 유지하여 진공 배기 시키고 있다.

2.2.2 복사에 의한 열전달

Cryostat에 많이 사용되어 지고 있는 긴 동심 원통 또는 동심구형의 두 면사이의 복사열전달기구에 의한 저온면의 단위 면적당 열전달량은 다음 식으로 표현된다.

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

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

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

여기서 ϵ 는 복사율, A는 각각의 면의 표면적, σ 는 Stefan-Boltzmann 상수(5.67×10^{-12} W ·

$cm^{-2}K^{-4}$). 첨자 c과 h는 각각 저온면, 고온면을 나타낸다.

액체헬륨용 cryostat에서는 실온으로부터의 복사열전달을 차단하기 위하여 냉동기로 냉각되어지는 복사 열차폐판을 설치하는 것이 일반적이다.

Superinsulation 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 superinsulation을 액체헬륨조나, 20 K 또는 80 K 열차폐판의 외측에 수십 회를 감아 외부로부터 침입하는 복사열전달을 수분의 1로 줄일 수 있다. 진공중은 아니나 cryostat의 내부에 수매의 동판을(baffle) 설치하여 증발가스에 의한 열차폐판 냉각으로 neck 부분으로의 복사열을 줄일 수 있다.

2.2.3 전도에 의한 열전달

단면 A가 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 T인 고체의 전도열전달율이다. λ 는 일반적으로 온도에 따라서 큰 폭으로 변하기 때문에 위의 식의 적분은 $\lambda-T$ 곡선의 면적으로부터 구해진다.

2.2.4 Cryostat의 열설계 계산

위에서 언급한 각종 열전달기구에 관한 고찰을 토대로 하여 설계된 cryostat의 열침입량을 계산하였다. 물론 cryostat의 구조가 복잡하고 위에서 언급한 열전달기구 외에도 access port에서의 기화된 헬륨가스에 의한 대류열전달도 함께 고려되어야 하기 때문에 정확한 계산을 위해서는 보다 장기간에 걸친 연구가 필요하며 이와 같은 관점에서 고효율의 상용화를 목적으로 한 cryostat의 최적 설계 및 제작을 위해서는 좀 더 많은 연구가 필요하며, 여기서는 최적설계를 위한 관점보다는 제작되는 cryostat의 헬륨소모량을 예측한다는 관점에서 계산하였다.

· 액체헬륨조에서의 열침입

식 (2)에 의하여 액체헬륨조에서의 전도에 의한 열침입량을 계산하기 위하여 열침입 경로를 살펴 보면 헬륨조의 지지봉, 주코일 및 보정코일의 전류도입선, 계측용 신호선, access port 등을 생각할 수 있다. 이 중 주코일 및 보정코일용 전류도입선으로 침입되는 열전도열이 매우 큰 비중을 차지하므로 코일의 여자 후 전류도입선을 제거할 수 있는 착탈식 전류도입선을 사용하는 것이 바람직하다. 착탈식 전류도입선의 설계·제작시에는 착탈의 용이성, 대전류 통전시의 절연성, 극저온에서

절연물질의 내균열성 등을 충분히 고려하여야 하며 특히 MRI용 cryostat인 경우는 보정코일에서 많은 전류단자를 필요로 함으로 설계·제작상의 난점이 있다.

그림 2는 access port에 설치된 착탈식 전류도입선의 콘넥터를 나타내며 본 cryostat에서는 주코일용 전류도입선과 보정코일용 전류도입선 및 영구전류 스위치 히터용 전류도입선을 착탈식으로 제작하여 설치하였다.

표 3에 위의 방법으로 계산된 액체헬륨조 및 20 K, 80 K 열차폐판으로의 열침입량 계산 결과를 정리하여 나타내었다.

2.3 Cryostat의 제작

Cryostat의 제작을 위하여 가장 필요한 제작 기술은 정밀가공기술, 정밀용접기술, 고진공 발생 기술, 극저온단열기술 등의 여러 가지 첨단 핵심 기술들이 요구된다.

MRI-CT용 cryostat는 마그네트를 내부에 설치하고 제작하여야 하는 특수성으로 인하여 외국에서 제작하는 것이 불가능하고 특히 cryostat의 제작상의 결함으로 인하여 cryostat 뿐만 아니라 마그네트 자체의 운전을 불가능하게 하는 위험을 내재하고 있다. 특히 마그네트와 조립·제작된 cryostat는 분해 및 조립이 불가능하기 때문에 설계·제작상의 결함은 많은 손실을 초래하게 된다.

그림 3은 최종 조립된 MRI cryostat의 외관을 보여주고 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 상용화 목적의 고효율 MRI cryostat 개발을 위한 전단계로서 MRI cryostat

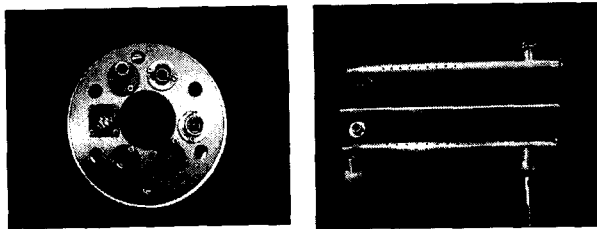


Fig. 2 Photographs of connector and current lead

의 요소설계기술 및 주요 핵심 제작기술의 개발차원으로 열설계와 구조설계 및 제작을 하였다. 본 연구를 통하여 MRI cryostat의 설계 기술과 제작 기술을 확립할 수 있었으며 이의 특성 평가를 통하여 상용화급의 고효율 전신촬영용 MRI cryostat를 제작하기 위한 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

Table 3 Estimated values of heat leak for LHe vessel, 20 K shield, and 80 K shield.

| 액체헬륨조 | | | | |
|-----------|--------------------|-----|--------|----|
| 구분 | 계산 | | 열침입량 | |
| | 명칭 | 재질 | 산출량(W) | 비고 |
| 전도열 | Neck tube | SUS | 0.008 | |
| | 수직하중 support | G10 | 0.069 | |
| | 진동방지 support | G10 | 0.015 | |
| 복사열 | 20 K shield(외통)→ | Al | 0.001 | |
| | 20 K shield(내통)→ | Al | | |
| | 20 K shield(side)→ | Al | | |
| | Neck tube | SUS | 0.033 | |
| 합계 | | | 0.126 | |
| 20 K 열차폐판 | | | | |
| 합계 | | | 5.4 | |
| 80 K 열차폐판 | | | | |
| 합계 | | | 66 | |

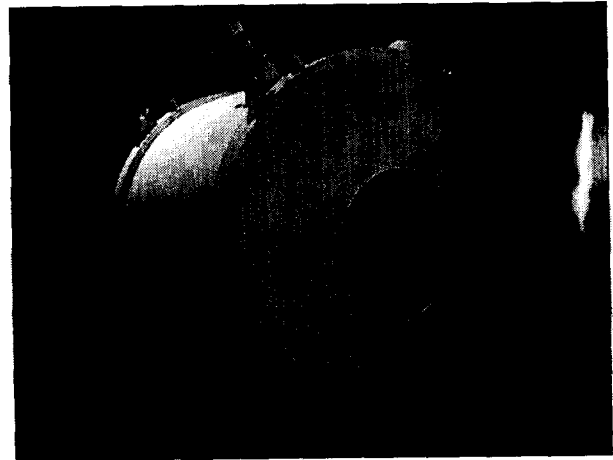


Fig. 3 Out view of the MRI cryostat

[참고 문헌]

- [1] 일본저온공학협회, "초전도·저온공학 핸드북", 1993.
- [2] 저온공학협회 관서지부, "저온공학 데이터집", 1997.
- [3] 한국전기연구소, "고자장 자기공명 영상장치 및 초전도 자석개발", 보고서, 1999.