

한국전기연구소 초전도 MRI 마그네트 시스템 제작 기술

고락길, 배준한, 심기덕, 진홍범, 이연용, 권영길, 류강식
한국전기연구소

Fabrication techniques of superconducting magnet system for MRI in KERI

Rockkil Ko, Joonhan Bae, Kideok Sim, Hongbeam Jin, Eonyong Lee, Youngkil Kwon, Kangsik Ryu
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract

Fabrication of superconducting magnet system needs high-degree technical know-how, which require not only a lot of investment of man-power and finance but also that of long time. Until now, we have met many technical problems and it have been solved by trial and error. In fact, we have got chance to come into contact with researches into the magnet design for MRI easily but did not contact with the process of fabrication and the techniques. We introduced process of fabrication and techniques for MRI magnet system until before the superconducting magnet combine with cryostat in Korea Electrotechnology Research Institute.

1. 서 론

x-ray의 소개이후 의료 진단 장비로 가장 많은 관심을 갖고 개발된 것 중에 하나가 핵자기공명영상(MRI) 장치이다. 이렇게 현재 MRI가 기본적인 의료 진단 장비로 자리 잡을 수 있었던 것은 1970년대 말에서 1980년대 초에 대구경 초전도마그네트 시스템의 설계 및 제품 생산이 가능했기 때문이다. 초전도 마그네트 시스템의 제작은 많은 복합적인 기술적 노하우를 필요로 하며, 이는 많은 시간과 인적, 물적 투자를 통해 얻어지는 기술이다. 특히, 초전도 마그네트 시스템은 초전도 응용 기술이 가장 먼저 상용화된 분야로써 아직까지도 선진 및 개국에서만 생산하여 전세계의 시장을 독점하고 있다.

국내에서의 MRI용 초전도 마그네트 시스템 개발은 1994년 한국전기연구소의 상온 보어 직경 200mm의 1.0T 동물실험용 MRI 초전도 마그네트의 설계 및 제작을 시작으로, 현재는 상용화급인 보어 직경 800mm의 1.5T 전신 촬영용 MRI 초전도 마그네트를 순수 국내 기술로 초전도 선재부터 시스템의 설계 및 제작까지 수행하고 있다.

국내 MRI 시장은 인구 백만명 당 국가별 MRI 보유 현황에서 12위고 매년 MRI의 수요는 증가하고 있어 MRI 국산화의 중요성은 점점 더 커지고 있다. 일반적으로 MRI용 마그네트의 설계 기술에 대해서는 쉽게 접할 수 있었지만, 제작 과정 및 기술에 대해서는 서로 간의 자체 기술적 노하우 등의 노출을 기피하기 때문에 접할 수 있는 기회는 많지 않았던 것이 사실이다. 초전도 마그네트 시스템의 제작과정은 초전도 마그네트 제작 부분과 극저온 제작부분으로 크게 나눌 수 있는데, 본 논문에서는 초전도 마그네트의 제작 부분까지를 한국전기연구소의 MRI용 초전도 마그네트 시스템의 일반적인 제작과정 및 기술을 중심으로 소개하고자 한다.

2. 본 론

기본적으로 마그네트 제작은 그림1의 순서에 의해 수행된다.

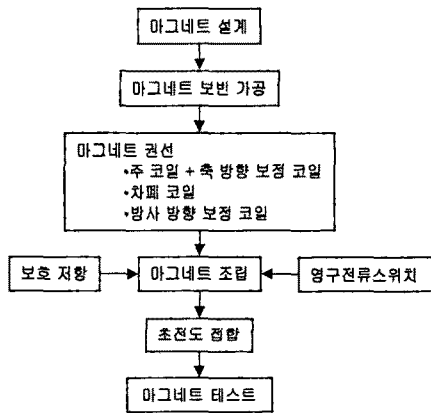


그림 1 초전도 마그네트 시스템 제작 순서

일반적으로 MRI용 초전도 마그네트는 6분할의 코일로 이루어져 8차까지의 항을 상쇄시켜 10차의 마그네트로 여러 제한 조건을 가지고 최적화 기법을 적용하여 설계된다. 한국전기연구소의 상온 보어 800mm 초전도 마그네트 시스템의 주요 설계 사양은 표1과 같다.

표 1 마그네트 설계 사양

동작전류	225[A]
중심자속밀도	1.5(T)
자장균일도	2.5ppm/30cmDSV
누설자장(5G line)	Axial→4.5m / Radial→3m
인덕턴스	117[H]

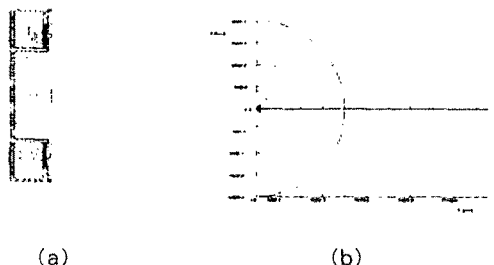


그림 2 (a)마그네트 자속선 (b) 5Gauss line

2.1 마그네트 보빈

마그네트 보빈은 마그네트 설계를 바탕으로 초전도 선재가 권선 될 위치와 전체적인 배선, 극저온 환경과 강한 전자기력에 의한 변형이 면밀히 고려되어 설계되고 매우 정밀한 가공이 요구된다. 일반적으로 비자성체의 재질인 FRP 또는 알루미늄 합금을 쓰게 되며, 재질의 선택은 제작사마다 다르다. 한국전기연구소의 경우 전도 냉각이 우수하고 국내에서의 가공이 유리한 알루미늄 보빈을 사용한다. 주 코일과 축 방향의 보정 코일을 동시에 권선할 수 있게 제작된 보빈과 차폐 코일 권선을 위한 보빈으로 구성된다.

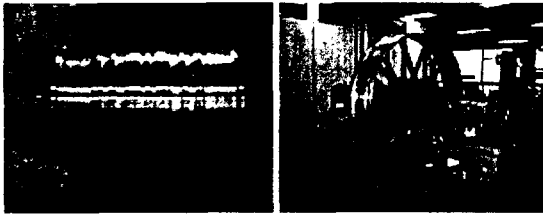


그림 3 (a)주 코일 보빈 (b)차폐 코일 보빈

2.2 마그네트 권선

초전도 코일의 권선은 매우 중요한 기술 중의 하나로 선재에 인가되는 tension의 균일한 제어를 통해 정렬 권선을 하여 초전도 소선의 움직임과 최대한 막아 권치 전류를 높임으로써, 초전도 코일의 신뢰성 및 성능을 향상시킬 수 있게 한다. 이를 위해서는 초전도 코일 권선 시 초전도 마그네트 전용 권선기에 의해 최적의 권선 장력으로 권선 되어야 한다. 초전도 코일 권선기는 권선 중 Tension 조절 및 측정이 가능하며 선재의 직경에 따라 Guide roller가 정밀하게 이동하여 정확하게 선재의 위치가 조절된다. 초전도선 권선 후 일반 구리선으로 2층이상 밴딩 작업을 하여 권선을 마무리한다.

2.2.1 선재

MRI에는 일반적으로 안정성을 높이기 위해 동비가 높은 매우 안정된 NbTi 초전도 선재를 사용한다. 한국전기연구소에서는 본 연구소에서 기술 이전한 (주)대성전선의 동비가 7이고, 4T에서 200A의 Ic를 갖는 에나멜 코팅된 직경 1mm의 NbTi 선재를 사용하였다.

2.2.2 층간 절연 및 함침

도체인 알루미늄 보빈과 초전도 선재 사이의 절연은 권선 시 가장 주의해야 하는 부분이다. 초전도선재는 일정 두께의 에나멜로 절연 피복 처리되어 있으나, 제작하면서 외부의 물리적인 힘에 의해 선재의 절연에 문제가 생겼을 경우, 이를 찾아낸다는 것은 거의 불가능하다. 이로 인해 발생할 수 있는 문제는 위·아래로 위치한 선재 층간의 short와 알루미늄 보빈과 그 위 선재 사이의 short가 있을 수 있다. 전자의 경우 확률이 매우 적지만 후자의 경우 선재 한쪽만의 절연 피복의 문제로 발생되어 질 수 있고, 이는 매우 치명적인 제작 실패의 원인이 된다. 이를 위해 보빈의 바닥은 설계에 영향을 미치지 않을 정도의 얇지만 절연성이 우수한 캡톤 테이프, 측면은 테프론 테이프를 절연시키고 권선을 한다.

또한 코일의 층간에는 섬유와 같이 짜여진 유리섬유강화수지(GFRP)에 극저온용 에폭시가 함침 되어진 절연지를 삽입하면서 권선 한다. 이 절연지는 상온에서는 약간의 점성을 가진 종이와 같이 유연성이 좋아서 다루기 용이하여 권선 시 발생한 각 코일 층간의 공간을 매우

되고, 극저온의 환경에서는 단단히 굳어져 선재의 기계적 동요를 최소화하게 된다. 에폭시-유리섬유강화수지 절연지를 이용한 방법은 절연뿐만 아니라 밀도 높은 에폭시 함침의 효과를 동시에 얻을 수 있는 방법으로 그 우수성은 여러 실험을 통해 확인하였다.

2.2.3 주 코일과 축 방향 보정 코일

주 코일은 원하는 자장의 세기와 균등성을 갖게 하는 가장 중요한 코일로 좌우 권선 밀도의 대칭성이 유지되게 권선하여 설계와의 제작오차를 최소로 줄이는 것이 매우 중요하다. 필연적으로 발생할 수밖에 없는 오차에 대해서는 초전도 보정 코일과 절편을 이용한 Ferromagnetic 보정으로 원하는 자장의 특성을 갖도록 보정하게 된다. 특히 초전도 코일의 경우, 축 방향 보정 코일은 보정의 효과를 가장 많이 볼 수 있는 코일로 Z1과 Z2로 2차항까지를 보정하게 되며, 주 코일과 같은 보빈에 권선되도록 설계된다.

2.2.4 차폐 코일

차폐 코일은 주 코일로부터 발생하는 강자장에 의한 외부의 누설자장을 반대 방향의 자장으로 서로 상쇄시켜 줌으로써 일정 수준으로 낮추는 역할을 한다. 주 코일과 반대의 전류 방향을 갖게 방향에 주의하여 권선을 한다.



그림 4 (a)주 코일 권선 (b)차폐 코일 권선

2.2.5 방사 방향 보정 코일

방사방향의 보정 코일인 X, Y, XZ, YZ 코일 모두 안장형의 기하학적인 모양을 갖게 되므로 그림5(a)와 같이 설계한 모양을 만들어 주는 일정 두께의 FRP 판을 투명한 합성수지로 산 아크릴 판 사이에 놓고 고정시켜 방사방향의 보정 코일을 권선할 수 있는 틀을 만든다. 같은 모양의 4개가 한 set가 되므로 각각 설치할 위치를 고려하여 각 코일간에 선재의 여유를 두어 4개를 한번에 권선 한다. 이때 초전도 권선에 저온 에폭시를 묻히면서 권선 하는 wet winding을 한다. 권선 후 일정 시간 후 틀을 분리하여 권선 된 코일인 그림5(b)는 3M의 저온 테이프를 절연시킨다.



그림 5 (a)방사 방향 보정코일 권선 (b)완성된 모습

2.3 초전도 영구전류 스위치(PCS)

대부분의 초전도 마그네트 시스템의 경우, 전류의 손실이 없다는 초전도의 특징을 이용해 단 한번의 충전 후

외부로부터 전원을 분리시켜 일정 기간동안 외부로부터 어떠한 전원의 공급 없이도 운전할 수 있는 초전도 영구 전류 상태로 운전하게 된다. 이때 충전된 전원을 초전도 폐회로 상에 가두게 하는 역할을 하는 것이 초전도 영구 전류 스위치이다. 이는 히터에 의한 열적 트리거 방식으로 초전도 상태와 상전도 상태를 임의로 전환시켜 구현된다. 제작 시 비저항이 높은 CuNi 선재를 무유도 권선 하고, 열적 트리거 제어를 위한 단열 조건이 매우 중요하다.

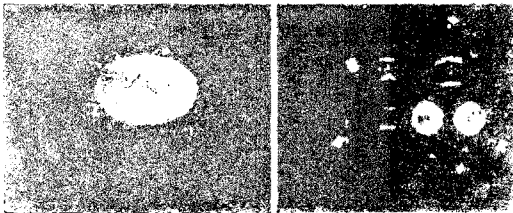


그림 6 (a)주 코일용 PCS (b)보정 코일용 PCS

2.4 보호저항 및 보호회로

영구전류 상태로 운전되는 초전도 마그네트 시스템의 경우 예상치 못한 이유로 의한 퀀치를 대비하여 일정한 값을 갖는 보호저항과 장치로 보호회로를 구성함으로써 퀀치 발생 시 자기에너지를 적절히 분산 시키므로써 초전도 코일의 손상을 막는다. 일반적으로 보호저항은 비자성체인 스테인레스 스틸을 사용하여 설계한 저항 값을 갖도록 제작하고 MRI나 NMR의 경우 코일의 각 색선에 분산하여 배치시킨다.

2.5 초전도 접합

초전도 선재간을 연결하는 극저 저항 초전도 접합 기술은 초전도 마그네트 시스템 제작 기술 중에서도 매우 중요한 기술로 접합 부분에서의 저항이 $10^{-9}\Omega$ 이하가 되어야 성공적인 영구전류 상태의 운전이 가능하다. 선재의 세척 및 슬러브의 가공 등의 일련의 과정들이 자신들의 노하우로 기술의 자세한 공개를 기피하는 부분이 다.

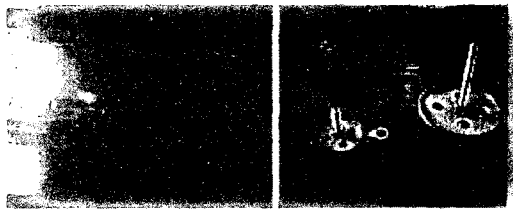


그림 7 (a)초전도 접합 (b)보호 저항

2.6 조립

먼저 주코일과 축 방향 코일이 권선된 보빈 위에 방사 방향의 보정 코일을 자장 방향을 고려하여 붙이고, 차폐 코일을 양쪽에 지지구조물을 이용해 조립한다. 주 코일의 경우 천 테이프를 이용해 방사방향 보정 코일의 이탈을 막기 위해 wet winding으로 밴딩을 한다.

초전도 영구전류 스위치와 보호저항들은 효율적인 회로 구성을 위해 하나의 판 위에 모아서 차폐코일과 주 코일 사이의 공간 내에 위치시켜 조립한다. 그 다음 코일에 권선된 초전도 선재와 초전도 영구전류 스위치 선재간의

초전도 접합을 하고, 전체적인 배선과 각종 신호선들을 access port의 위치에 따라 정리를 한다. 마지막으로 모든 회로의 구성과 각종 sensor들의 동작 여부 등을 점검하여 확인한다.

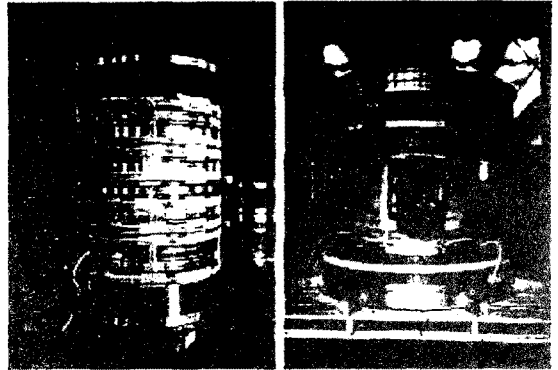


그림 8 (a)주 코일, 축 방향·방사 방향 보정 코일의 조립 완료한 모습 (b)조립 완료한 모습

3. 결 론

초전도 마그네트 시스템의 제작은 실제적인 경험과 치밀한 준비과정을 통해서 성공적인 결과를 이룰 수 있다. 더욱이 사소한 실수로 인한 제작 실패는 많은 비용의 손실을 초래하게 된다. 선진 외국의 초전도 마그네트 시스템의 제작 기술은 이미 20년이 넘었고, 그 동안 막대한 인원과 재원을 투자했으며, 지금도 지속적인 연구 개발이 이루어지고 있다. 이에 비해 국내의 경우 상대적으로 매우 열악한 환경에도 불구하고, 지금까지의 연구 개발 성과는 매우 고무적이라 할 수 있으며, 지속적인 관심과 지원을 통한 국내 초전도 마그네트 시스템의 기술 발전을 기대한다.

(참 고 문 헌)

- [1] 한국전기연구소, 한국전력공사, "저온초전도선재개발(최종보고서)", 1996
- [2] 한국전기연구소, 보건복지부, "G7의료공학 연구개발사업 자기공명 영상진단용 초전도 마그네트 개발(최종보고서)", 1998
- [3] 한국전기연구소, 보건복지부, "G7의료공학 연구개발사업 고자장 자기공명영상 장치 및 초전도 자석 개발(2차년도 연차실적·계획서)", 1999

감사의 글

본 연구는 보건복지부에서 시행한 선도기술·의료공학 기술개발 사업에 의하여 지원되었으며, 이에 감사 드립니다.