

20cm 상온 보어를 갖는 MRI용 초전도 마그네트의 제작 및 평가

진홍범*,오봉환,조전옥,오상수,권영길,하동우,이연용,류경우,류강식 : 한국전기연구소
 나완수*,김성래**,한일용** : *성균관대학교, **대성전선 기술연구소

Fabrication and test of MRI superconducting magnet with 20cm room temperature bore

H.B.Jin*, B.H.Oh, J.W.Cho, S.S.Oh, Y.G. Kwon, D.W.Ha, E.Y.Lee, K.W.Ryu, K.S.Ryu : KERI
 W.S.Nah*, S.R.Kim**, I.Y.Han** : *SungKyunKwan university, **Daesung Cable Co., LTD.

Abstract

We fabricated superconducting magnet for MRI and tested it using automatic field mapping system. This magnet has 20cm diameter of room temperature bore for the sample access. In this paper, the fabrication of MRI magnet system and the test results of field homogeneity are described.

1. 서론

MRI(Magnetic Resonance Imaging)을 위해서는 목적 원자핵을 스핀에너지 순위별로 배열시키기 위한 정자장, 화상을 구성하는 출력신호에 위치정보를 주는 경사자장, 목적 원자핵을 여기시키기 위한 고주파자장이 필요하게 된다. 그 중에서 정자장은 신호의 S/N (Signal/Noise)비를 결정하는 주 요인이 된다. 정자장을 발생하는 MRI용 마그네트에는 자기공명신호의 취득에 필요한 자장강도, 촬영공간 내에서의 고균등한 자장, 시간적으로 안정한 자장이 요구된다. 또한 마그네트가 편치되었을 때 마그네트를 보호하기 위한 보호시스템과 장기간 액체헬륨을 유지할 수 있는 최적 단일 구조의 저온용기(cryostat)가 필요하다.

본 연구에서는 동물 및 인체의 손이나 발등의 부분을 단층 촬영할 수 있는 20cm 상온 보어를 갖는 MRI용 초전도 마그네트를 제작하여 평가하였다. 본 논문에서는 본 마그네트의 제작 및 자장 균등도 평가 결과에 대하여 기술한다.

2. 마그네트 시스템 제작

본 연구에서 제작한 마그네트는 코일 보어 내경이 26cm 이고, 중심 자장이 운전전류 170 암페어에서 2 테슬라(Tesla), 자장균등도가 직경 10cm 구내에서 0.3ppm(part per million)이 되도록 5분할 구조로 설계되었다.¹⁾ 본 장에서는 마그네트 시스템을 정자장을 발생시키는 코일 부분과 코일을 액체헬륨 온도 유지하기 위한 저온용기(cryostat) 부분으로 나누어 각 부분의 제작 과정 및 제작 결과에 대하여 간단히 기술한다.

2-1. 코일 제작

초전도 코일은 강자장을 발생시키는 주 코일(main coil)과 제작오차, 전자력 및 열 수축응력 그리고 주위 자성체 등의 영향에 의한 자장오차를 보정하기 위한 보정코일(shim coil)로 구성된다. 이들 코일의 보빈은 제작시 가공오차를 극소화하여 매우 정밀하게 제작하여야 하며, 마그네트 운전시 발생하는 전자력에 의한 스트레스와 극저온에서 충분히 견딜 수 있는 재료와 구조를 갖추도록 해야한다. 주 코일은 그림1에 나

타낸 바와 같이 하단의 세개 section(이하 내부 코일)과 상단의 두개 section(이하 외부 코일)으로 구성된다. 보빈의 기판은 적당한 강도를 갖고 가공성이 좋은 Al합금(500계)판을 용접하여 원통형으로 제작하였다. 보빈의 플랜지는 저온특성이 우수한 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic)를 원판으로 가공하였다. 코일의 권선오차는 마그네트의 자장균등도에 직접적인 영향을 주므로 고균등 자장 마그네트의 제작에서는 매우 세심한 주의가 요구되는 공정이다. 본 마그네트의 주 코일은 직경 1mm의 선재를 2.3kgf의 장력을 주어 권선하였고, 층간에는 두께 0.15mm의 절연지를 사용하여 층간절연 하였다. 또한 최외층에는 직경1mm의 구리선을 1층 권선하여 여자시 발생하는 전자력에 의한 코일의 움직임을 최소화 하였다. 그림 2는 권선이 완료된 주코일의 내부 코일과 외부 코일의 사진이다.

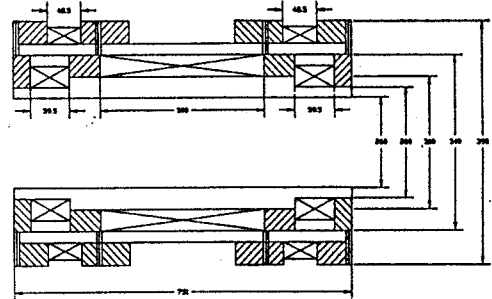


그림 1 주 코일의 보빈 개략도(단위 : mm)

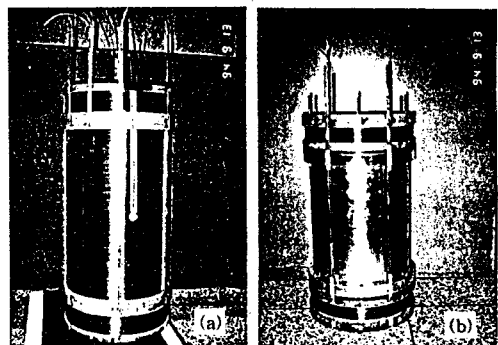


그림 2 권선이 완료된 주코일
 (a) 내부 코일 (b) 외부 코일

보정코일의 설계는 보정하고자하는 1가지의 gradient만 발생하도록 하는 것으로 보빈의 제작 오차나 권선 오차는 다른 gradient의 발생을 초래하므로 보정코일에 의한 자장오차 보정시에 오히려 보정코일에 의한 불균일 자장이 발생한다. 본 연구에서는 Z^1 및 Z^2 term의 axial shim과 X 및 Y term의 radial shim을 제작하였다. axial shim용 보빈은 GFRP 원통을 가공하여 제작했다. axial shim 코일은 직경 0.33mm 선재를 사용하여 0.4kgf의 장력으로 권선하였으며, 주 코일과 마찬가지로 층간절연하였다. radial shim은 권선 완료된 axial shim 코일의 보빈 위에 saddle type으로 제작하였다. 그림3은 최종 제작이 완료된 보정코일 사진이다.

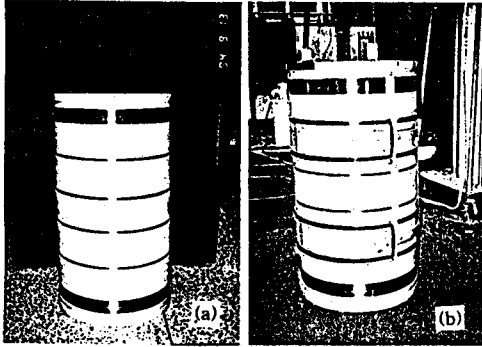


그림 3 권선이 완료된 보정코일
(a) axial shim (b) radial shim

초전도 코일간의 접속은 극저저항을 갖도록 접속해야하며 영구전류 모드로 운전하기 위해서는 영구전류 스위치가 필요하다. 초전도 선재의 접속은 Cu와 NbTi로 이루어진 복합체 봉을 가공한 슬리브 내에 접속할 선재를 애칭하여 노출된 필라멘트 부분을 꼬아서 삽입하고 프레스하여 접속하였다. 영구전류 스위치는 히터의 열에 의해 on-off되는 열트리거 방식으로 제작하였고, 주 코일에 유기되는 자장의 교란을 최소화하기 위하여 무유도(non-inductive)로 권선하였다. 최종적으로 주 코일은 그림4에 나타낸 바와 같이 접속·조립되었다.

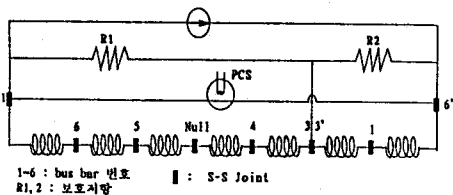


그림 4 조립 완료된 주 코일의 회로도

2-2. 저온용기(cryostat) 제작

초전도 마그네트를 액체헬륨 온도로 장시간 유지하기 위해서는 복잡한 단열구조를 가진 고효율의 저온용기가 필요하다. 본 연구에서 제작한 저온용기는 상용화 목적의 고효율 저온용기의 전단계로서 MRI용 저온용기 제작기술의 개발차원과 초전도 마그네트 시험의 편의성을 고려하는 측면에서 설계·제작하였다. 그림5에 저온용기의 기본 구조를 나타내었다. 그림 중의 ①이 초전도 마그네트이며, 초전도 마그네트 보아 내에 마그네트를 지지하는 직경 245mm의 SUS304 shimless tube가 내장된다. 또한 상온의 실험구간을 확보하는 내경 210mm, 두께 2.8mm인 SUS304 shimless tube 사이에 77K 열차폐판과 초열절연(superinsulation)이 내장된다. ②는 액체헬륨조이다. 액체헬륨조는 중심축으로 부터 아래쪽으로 65mm 편심되게

제작하여 이용 가능한 액체헬륨의 용적을 크게 하였다. ③은 "L"형의 동 프레임에 알루미늄 호일을 감아 제작한 40K 열차폐판이다. 본 저온용기는 실험용으로서 헬륨소모량의 감소보다는 가능한 상온 실험 구간을 크게 하기 위한 목적으로 마그네트 보아 내에는 40K 열차폐판을 설치하지 않았다. ④는 77K 열차폐판이다. 기존의 상용 MRI용 저온용기에서는 액체헬륨 탱크를 내장하거나 또는 용량이 비교적 큰 냉동기를 설치하여 액체헬륨소를 생략하는 경우도 있고 양자를 혼용하여 77K 열차폐를 하는 경우도 있다. 그러나 본 연구에서는 제작 기간 및 제작비용 상의 제약 때문에 열교환기 방식을 응용한 새로운 형태의 77K 열차폐판을 고안하였다. 구리판으로 40K 열차폐판의 외측과 마그네트 보아의 내측에 열차폐판을 설치하고 이 열차폐판 주위에 동파이프를 용접하여 동파이프와 차폐판 사이의 열접촉을 양호하게 한 후, 동파이프 속으로 일정한 액체헬륨을 흐르게 하여 열차폐판을 77K로 유지하는 구조로 제작하였다.

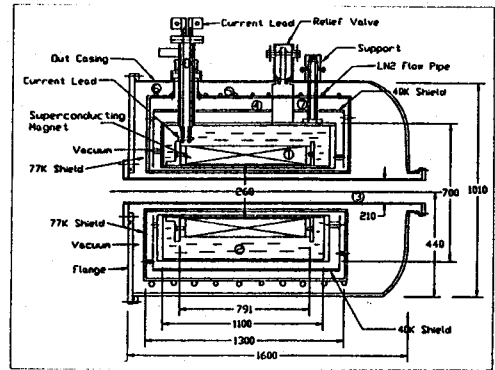


그림5 밀폐형 저온용기의 개략 단면도

3. 시험

3-1. 자장분포 측정 시스템

솔레노이드형 코일의 내반경 r의 구내에서 자속밀도의 측방향성분은 구좌표계를 이용하여 아래 식과 같이 spherical harmonics로 나타낼 수 있다.²⁾

$$B_z(r, \theta, \phi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n r^n [(n-m+1) \cos \theta P_n^{m+1}(\cos \theta) + \sin \theta P_n^{m+1}(\cos \theta)] \times [A_n^m \cos m\phi + B_n^m \sin m\phi] \quad (1)$$

여기서 m, n은 정수(단 $m \leq n$), A, B는 경계조건에 의해 결정되는 계수이고 $P_n^m(\cos \theta)$ 는 $u = \cos \theta$ 의 1차 associated Legendre function이다. 식(1)은 직교좌표계를 이용하여 다음과 같이 처음 몇차항까지만 전개해 보면 그 의미를 확연하게 알 수 있다.

$$B_z(x, y, z) = CA_0^0 + CA_1^0 Z + CA_1^1 X + CB_1^1 Y + CA_2^0 [Z^2 - (X^2 + Y^2)] + CA_2^1 ZX + CB_2^1 ZY + CA_2^2 (X^2 - Y^2)/2 + CB_2^2 XY + \dots \quad (2)$$

즉 솔레노이드 중심 부근에서의 자장을 spherical harmonics로 전개하면 자장을 구성하는 서로 독립적인 각 gradient들의 합으로서 전체자장을 나타낼 수 있다. 이식에서 계수 CA_n^m ,

CB_n^m 는 각 gradient의 크기를 나타낸다. 따라서 구표면상의 여러 측정점에서 자장을 측정하고, 식(2)를 이용하여 이 값들을 data fitting하면 각 gradient들의 크기를 알 수 있다. 그 결과 제작된 마그네트가 발생하는 불균등 자장의 성분과 그 크기를 알 수 있으므로 이들 Gradient만 발생시키는 보정코일

로 불균등 성분을 상쇄시켜 줌으로서 일정 공간 내에서 최대의 자장균등도를 달성할 수 있다.

본 연구에서는 제작한 MRI용 마그네트의 자장측정을 위하여 Resonance Research사의 Mapper를 이용하여 그림6의 측정시스템을 구성하였다. MRI용 마그네트와 같은 고균등자장 마그네트에서 자장분포를 알기 위해서는 고분해능의 probe를 사용해야 하며, 본 연구에서는 10^7 T의 분해능과 0.7 - 2.1 T의 측정범위를 갖는 METROLAB사의 PT2025 NMR Tesla meter를 사용하였다. 구표면상의 서로 독립적인 측정점에서의 자장측정은 step 모터로 구동되는 mapper가 NMR probe를 구표면상에서 나선 궤도를 따라 이동시키면서 최대 252개의 자장값을 읽어들인다.

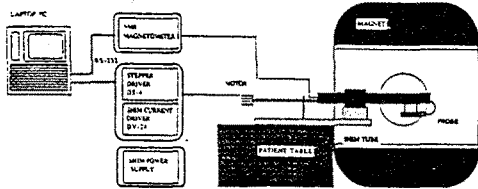


그림6 자장측정 시스템의 구성도

3-2. 자장 분포 측정 및 자장 오차 보정

제작한 마그네트를 1 Tesla 까지 여자하고 그림6의 측정시스템을 이용하여 마그네트의 자장 분포를 측정하였다. 그림7은 자장오차를 보정하지 않은 마그네트의 직경 10cm 구표면상에서 자장분포를 측정한 후 중심자장으로 부터의 편차 즉 자장오차를 마그네트의 수평축상 즉 z축상에 투영시켜서 z축상의 위치의 함수로 나타낸 것이다. 이때 자장균등도는 직경 10cm 구내에서 348 ppm 이다. 측정 data를 식(2)를 이용하여 least square method로 data fitting을 하여 자장불균등 성분의 gradient값을 계산하면 표1과 같다. 표1에서 보는바 같이 2차의 axial gradient가 가장 크며, 이것은 그림7의 2차함수 형태의 그래프에서도 확인할 수 있다. 그림8은 Z, Z², X, Y 항의 초선도 보정코일을 이용하여 각각의 자장오차를 상쇄시킨 후 직경 10cm의 구표면에서의 자장분포이다. 이때 자장균등도는 직경 10cm 구내에서 34 ppm으로 향상되었다. 그림9는 직경 6cm의 구표면에서의 자장분포이며, 직경 6cm 구내에서의 자장균등도는 10ppm 이다.

표1. 마그네트의 자장 성분

n	m	associated gradient	principal gradient	coefficient	value of coefficient
0	0	B ₀ =constant		CA ₀ ⁰	9833.94 G
1	0	Z	Z	CA ₁ ⁰	-8x10 ⁻² G/cm
	1	X	X	CA ₁ ¹	-5x10 ⁻² G/cm
	1	Y	Y	CB ₁ ¹	-1.3x10 ⁻¹ G/cm
2	0	Z ² -(X ² +Y ²)/2	Z ²	CA ₂ ⁰	-6x10 ⁻² G/cm ²
	1	ZX	ZX	CA ₂ ¹	1x10 ⁻² G/cm ²
	1	ZY	ZY	CB ₂ ¹	7.6x10 ⁻³ G/cm ²
	2	(X ² -Y ²)/2	X ² -Y ²	CA ₂ ²	-2.9x10 ⁻³ G/cm ²
	2	XY	XY	CB ₂ ²	1.4x10 ⁻² G/cm ²
	3	0	Z ³ -3Z(X ² +Y ²)/2	Z ³	CA ₃ ⁰
3	1	[4Z ² -(X ² +Y ²)]X	Z ² X	CA ₃ ¹	-1.55x10 ⁻³ G/cm ³
	1	[4Z ² -(X ² +Y ²)]Y	Z ² Y	CB ₃ ¹	3.5x10 ⁻⁵ G/cm ³
	2	Z(X ² -Y ²)/2	Z(X ² -Y ²)	CA ₃ ²	-2.1x10 ⁻³ G/cm ³
	2	ZXY	ZXY	CB ₃ ²	-1.2x10 ⁻⁴ G/cm ³
	3	X ³ -3XY ²	X ³	CA ₃ ³	1.2x10 ⁻³ G/cm ³
3	3X ² Y-Y ³	Y ³	CB ₃ ³	7.5x10 ⁻⁴ G/cm ³	

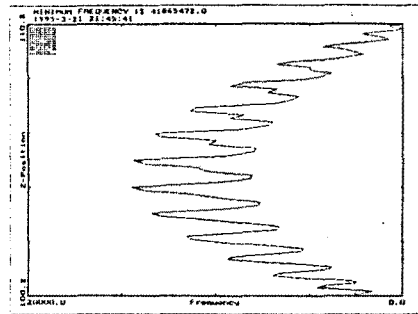


그림7 자장오차를 보정하지 않은 마그네트의 자장분포 (직경 10cm 구표면)

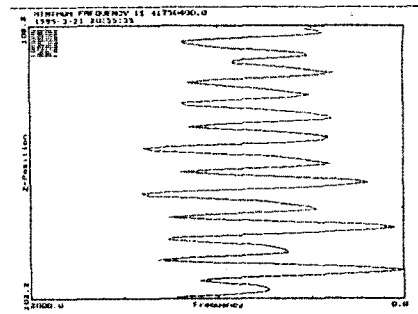


그림8 자장오차를 보정한 마그네트의 자장분포 (직경 10cm 구표면)

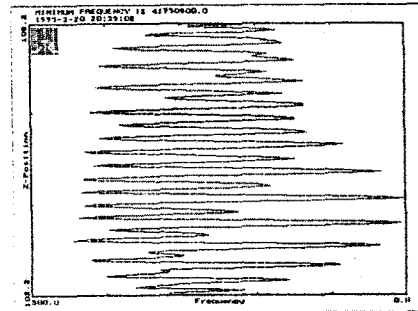


그림9 자장오차를 보정한 마그네트의 자장분포 (직경 6cm 구표면)

4. 결론

본 마그네트는 자장균등도가 10cm 구내에서 0.3ppm이 되도록 설계하였으나 제작오차 및 주위의 자성체의 영향 때문에 제작된 마그네트의 자장균등도는 직경 10cm 구내에서 348 ppm이었다. 초선도 보정코일을 이용하여 자장오차를 보정한 결과 자장균등도가 직경 10cm 구내에서 34 ppm으로 향상되었다. 본 마그네트에서 고해결의 영상처리가 가능한 10ppm 이하의 자장균등도 영역은 직경 6cm 구내이며, 제작 중인 상선도 보정코일을 이용하면 직경 10cm 구내에서 10ppm 이하의 자장균등도를 달성할 것으로 예상된다.

5. 참고문헌

1. "고균등자장 발생용 초선도 마그네트의 설계", 1994년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 A, p192-194.
2. Static and Dynamic Electricity, W.R.Smyth, McGRAW-HILL BOOK COMPANY, 1950