

MRI 마그네트용 보정코일 설계

Design of the Shimming Coils for MRI Magnet

裴俊漢* · 高樂吉** · 陳弘範* · 沈基德** · 權永吉*** · 柳康植§

(Joonhan Bae · Rockkil Ko · Hongbum Jin · Kideok Sim · Yungkil Kwon · Kangsik Ryu)

Abstract - This paper describes the general and efficient design method of an axial and a radial shim coils to correct field impurities of various harmonic orders in the imaging volume of Magnetic Resonance Imaging magnet. Shim coils are optimized by BCLSF subroutine of IMSL, which is the well-known commercial package for optimization, aiming at maximizing the magnitude of the desired field component as well as minimizing other field components. In order to evaluate their effect, the developed method was applied to the MRI magnet constructed in KERI.

Key Words : shim coil, field impurity, imaging volume, Magnetic Resonance Imaging magnet

1. 서 론

MRI 마그네트는 40cm의 영상공간 내에서 수 ppm이하의 자장균일도를 얻기 위해서 설계시 다수의 솔레노이드형 코일을 Z=0 평면에 대칭적으로 배치하여 짝수차 항의 축방향 고조파성분만 발생하도록 하고, 6차 또는 8차까지의 짝수차 항의 축방향 고조파성분은 영이 되도록 각 솔레노이드 코일의 기하학적 형상과 공간상의 위치를 결정한다[1].

그러나, 실제로 코일을 제작하면 권선의 불균일 및 선재직경의 불균일 등으로 인하여 Z축에 대하여 축대칭이 되지 못함으로써 방사방향 고조파성분이 발생한다. 또한, 코일의 권선오차, 전자력 및 열수축 응력에 의한 변형 등의 원인으로 인하여 Z=0 평면에 대한 대칭성이 깨어짐으로서 홀수차 항의 축방향 고조파성분이 발생하며, 제작오차로 인해 6차 또는 8차까지의 짝수차 항의 축방향 고조파성분이 완전히 상쇄되지 못한다. 이외에 코일의 여자시 외부 자성체의 자화에 의해 외부자장이 유입되어 자장균일도가 저하된다.

따라서, 요구되는 자장균일도를 얻기 위해서는 이러한 영향에 의한 자장의 불균일 성분을 상쇄시켜 주는 보정(shimming) 과정이 필요하게 된다[2].

보정방법으로는 보정코일을 이용하는 능동보정 방법과 철편을 이용하는 수동보정 방법이 있으나, 본 논문에서는 원형 필라멘트를 이용하여 축방향 보정코일을 설계하고, 불완전 원형 필라멘트 코일을 이용하여 방사방향 보정코일을 설계하는 능동보정 방법을 개발하였고, 이를 실제 모델에 적용하여 그 도입효과를 검증해 보았다.

2. 불균일 자장 이론

구좌표계에서 솔레노이드 코일의 내반경 R_1 을 반경으로 하는 구내 한점에서의 스칼라 자기포텐셜 V는 다음과 같다[3].

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

여기서, P_n^m 은 1차 associated Legendre 함수이고, A_n^m, B_n^m 은 각각 경계조건에 의해 결정되는 계수이다.

따라서, Z축 성분의 자속밀도는 다음의 식으로 주어진다.

$$B_z(r, \theta, \phi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n r^n [A_{n+1}^m \cos m\phi + B_{n+1}^m \sin m\phi] \times [(n-m+1) \cos \theta P_{n+1}^m(\cos \theta) + \sin \theta P_{n+1}^{m+1}(\cos \theta)] \quad (2)$$

여기서, $n=0,1,2,3,\dots$ 이고, 반경 r에 따른 자장변화의 차수를 나타낸다. 그리고, 식(2)을 직교좌표계를 이용하여 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} B_z(x, y, z) = & A_1^0 + 2A_2^0 z + 3A_3^0 z^2 + 3B_3^0 z \\ & + 3A_3^0 [z^2 - (x^2 + y^2)]/2 + 12A_4^0 zx + 12B_4^0 zy \\ & + 15A_4^0 (x^2 - y^2) + 15B_4^0 (2xy) \\ & + 4A_4^0 [z^3 - 3z(x^2 + y^2)]/2 + 30A_4^0 [4z^2 - (x^2 + y^2)]x \\ & + 30B_4^0 [4z^2 - (x^2 + y^2)]y + 90A_4^0 z(x^2 - y^2)/2 \\ & + 90B_4^0 zxy + 105A_4^0 (x^3 - 3xy^2) + 105B_4^0 (3x^2y - y^3) \\ & + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

* 正 會 員 : 韓國電氣研究員 超傳導應用研究그룹 先任研究員
 ** 正 會 員 : 韓國電氣研究員 超傳導應用研究그룹 研究員
 *** 正 會 員 : 韓國電氣研究員 超傳導應用研究그룹 그룹장
 **** 正 會 員 : 次世代 超傳導應用研究技術開發 事業團長
 接受日字 : 2001年 8月 22日
 最終完了 : 2001年 11月 15日

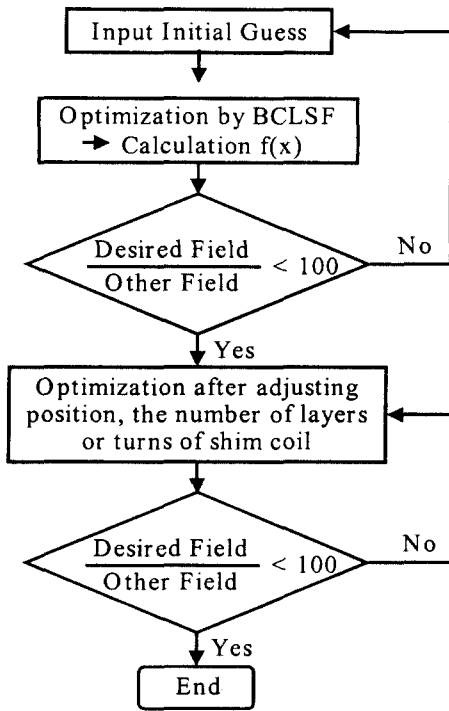


그림 8. 보정코일 최적화 흐름도
Fig. 8 Flow chart for shim coil optimization

표 2. 보정코일의 설계사양
Table 2. Design specifications of shim coils

구분	내 반경 (R1) [cm]	외 반경 (R2) [cm]	권선길이 (L) [cm]		위치(S) [cm]		층 수 [개]	turn/층 [개]		경사자장 (Gauss/cm ⁿ · A)
			L1	L2	S1	S2		DL1	DL2	
z ¹	51.0	51.9	0.5		42.0		9	5.0		0.24
z ²	51.0	51.9	1.1	1.1	15.5	38.0	9	11	11	0.21
x	52.7	52.8	3.0	3.0	26.1	46.5	1	30	30	5.1 × 10 ⁻³
y	52.8	52.9	3.0	3.0	26.1	46.5	1	30	30	5.1 × 10 ⁻³
xz	52.7	52.8	4.0	4.0	5.5	18.5	1	40	40	2.2 × 10 ⁻⁴
yz	52.8	52.9	4.0	4.0	5.5	18.5	1	40	40	2.2 × 10 ⁻⁴

표 3. 보정전 보정코일의 경사자장
Table 3. Gradients of shim coil before correction

보정코일	경사자장
z ¹ 보정코일	0.31 Gauss/cm · A
z ² 보정코일	3.9 × 10 ⁻² Gauss/cm ² · A
x 보정코일	3.0 × 10 ⁻² Gauss/cm · A
y 보정코일	0.2 Gauss/cm · A
xz 보정코일	3.1 × 10 ⁻³ Gauss/cm ² · A
yz 보정코일	8.9 × 10 ⁻³ Gauss/cm ² · A

표 4. 보정후 보정코일의 경사자장
Table 4. Gradients of shim coil after correction

보정코일	경사자장
z ¹ 보정코일	7.7 × 10 ⁻³ Gauss/cm · A
z ² 보정코일	2.8 × 10 ⁻⁴ Gauss/cm ² · A
x 보정코일	1.1 × 10 ⁻² Gauss/cm · A
y 보정코일	1.2 × 10 ⁻³ Gauss/cm · A
xz 보정코일	7.0 × 10 ⁻⁶ Gauss/cm ² · A
yz 보정코일	3.1 × 10 ⁻⁴ Gauss/cm ² · A

표를 통해 알 수 있듯이 각 자장성분의 계수값이 현저히 감소되었음을 확인할 수 있다. 이러한 보정과정을 통해 MRI 마그네트의 자장균일도가 40cm 구표면에 대해서 보정 전의 406ppm에서 보정 후에 41ppm으로 크게 향상되었다.

5. 결 론

초전도 MRI 마그네트의 성능향상을 위해서 제작오차 및 주변 자성체로 인해 발생하는 불균일 자장성분을 최소화할 수 있는 보정방법을 개발하고, 이를 실제 시스템에 적용하여 그 도입효과를 검증한 결과 자장균일도가 10배 이상 향상되었음을 확인할 수 있었다. 그러나, 본 연구에서는 2차 보정으로 ferromagnetic shim을 이용하였기 때문에 저차항의 불균일 자장성분만 최소화되어 자장균일도는 크게 향상되지는 못하였다. 따라서, 고차항의 불균일 자장성분을 상쇄할 수 있는 보정코일을 추가로 적용하면 40cm 구표면에서 수 ppm 이내의 높은 자장균일도를 얻을 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 보건복지부의 선도기술·의료공학기술개발사업(HMP-98-G-1-015)에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] F. Romeo, et al., "Magnetic Field Profiling: Analysis and Correcting Coil Design", Magnetic Resonance in Medicine 1, pp. 44-65, 1984.
- [2] W. A. Anderson, "Electrical Current Shims for Correcting Magnetic Field", The Review of Scientific Instruments, vol. 32, no. 3, pp. 241-250, 1961.
- [3] 한국전기연구원, "고자장 자기공명영상 장치 및 초전도자석 개발(2차년도 연차실적·계획서)", 선도기술·의료공학기술개발사업, 보건복지부, 2000. 12.

저 자 소 개



배 준 한 (裵 俊 漢)

1966년 4월 30일 생. 1992년 건국대 전기공학과 졸업. 1994년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원



심 기 덕 (沈 基 德)

1973년 2월 1일 생. 1997년 연세대 전기공학과 졸업. 1999년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 연구원



고 락 길 (高 樂 吉)

1972년 5월 1일 생. 1995년 배재대 물리학과 졸업. 1997년 동 대학원 졸업(석사). 1997년~현재 한국전기연구원 연구원



권 영 길 (權 永 吉)

1959년 7월 28일 생. 1982년 부산대 기계공학과 졸업. 1984년 동대학원 기계공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학). 1990~1991년 한국기계연구원 선임연구원. 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 그룹장



진 흥 범 (陳 弘 範)

1962년 11월 20일 생. 1987년 성균관대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 졸업(공학). 1991년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹



류 강 식 (柳 康 植)

1958년 8월 5일 생. 1980년 한양대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1988년~1993년 한국전기연구소 초전도연구실 실장. 1993년~1999년 한국전기연구원 초전도응용연구사업팀장. 1999년~2001년 한국전기연구원 전략기술연구단 단장. 현재 차세대 초전도응용기술개발 사업단장