

고균일 자계발생용 초전도 능동차폐 마그네트의 설계에 관한 연구

"이 광호", 김 성도", 조 윤현", 이 재복"
"동아대학교 전기공학과, " 한국전기연구소

A Design Approach for High Homogeneity Superconducting Magnet with Superconducting Active Shield

"K.H.Lee", S.D.Kim", Y.H.Cho", J.B.Lee"

"Dept. of Electrical Eng. Dong-A Univ, "Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - An optimal design approach is presented for high homogeneity superconducting magnet with superconducting active shield especially for use in magnetic resonance imaging system.

This paper is investigated phenomena for the stray magnetic field to get a basic reduction techniques of the unwanted stray magnetic field from the magnet. The present method obtains optimal coil configuration considering constraints for magnetic field homogeneity and leakage field.

1. 서론

MRI (Magnetic Resonance Imaging) 장치는 고자계, 고균일 자계발생 장치로서 초전도 전자석을 널리 사용되고 있지만 공심 마그네트에서는 주변에 대한 누설자장의 영향이 무시할 수 없는 경우가 많기 때문에 누설자장을 저감하는 것이 필요하다. 자기 차폐재료로는 자성체와 초전도체 등이 이용되고 있으며, 누설자장을 차폐하는 방법으로는 전자석에 자성체 차폐를 직접 장치하는 수동차폐(Passive Shield)방법과 초전도의 주코일 외부에 초전도차폐 코일을 배치하여 역자장을 발생케 하여 누설자장을 차폐하는 능동차폐(Active Shield)방법이 있다. 본 연구에서는 고자계, 고균일 초전도 마그네트의 누설자장 억제 장치로 능동차폐를 사용하는 경우에 차폐 마그네트의 최적설계 방법 및 특성 해석에 대하여 논하였다.

최적설계 방법으로는 최소 2승법을 적용하여 능동차폐의 마그네트 배치와 형상 최적치수를 도출하고, 설계 검증으로는 유한요소법을 적용하여 자속분포 특성 등을 고찰하였다.

2. 마그네트 누설자계 해석

가. 자계세기, 상호인력터스 및 힘계산

자계의 세기 및 자속밀도를 계산하기 위해서 그림 1과 같이 선전류 밀도 J 가 흐르는 반경 a 를 가지는 원 모양의 전류 필라멘트에서 발생하는 자기 벡터 포텐셜

A 는 식 (1)로부터 구할수 있으며,

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{J}{r} d\vec{s} \quad (1)$$

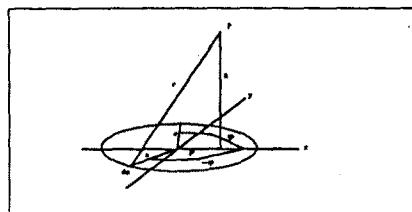


그림 1 반경 a 인 전류 필라멘트에 의한 P점의 자기 포텐셜

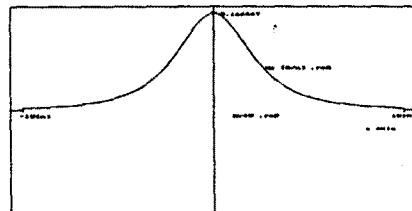


그림 2 자계의 세기 $H_z(r=0)$

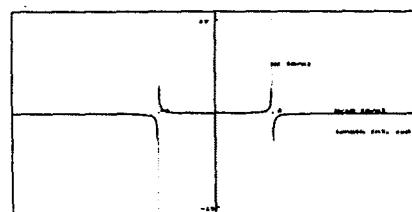


그림 3 자계의 세기 $H_z(z=0)$

두 도체에 작용하는 힘 F 는 식 (2)로부터 얻을수 있다..

$$F = J_b B_\rho (a, \rho = b, z = c) \int_0^{2\pi} b d\phi \\ = 2\pi b J_b B_\rho (a, \rho = b, z = c) \quad (2)$$

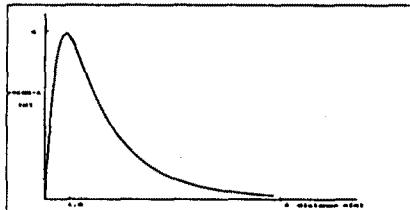


그림 4 두 권선사이에 작용하는 힘

나. 코일의 선정

코일의 구조에서 중심자계는 식 (3) 과 같다.

$$H_o = \frac{2\pi}{10} (j\lambda) \int_{a_1}^a \int_{-b}^b \frac{a^2}{(a^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} dz dr \quad (3)$$

$$= j\lambda a_1 \frac{4\pi\beta}{10} (\sinh^{-1} \frac{a}{\beta} - \sinh^{-1} \frac{1}{\beta})$$

여기서, $a = \frac{a_2}{a_1}$, $\beta = \frac{b}{a_1}$ 으로 나타낸다. (단 $a \geq 1$)

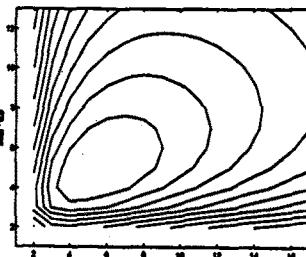
자계에 대한 모든 Factor를 기하학적 구조합수인 Fabry Factor(G Factor)로 표시하면 식 (4) 와 같다.

$$H_o = G(a, \beta) \sqrt{\frac{W\lambda}{\rho a_1}} \quad (4)$$

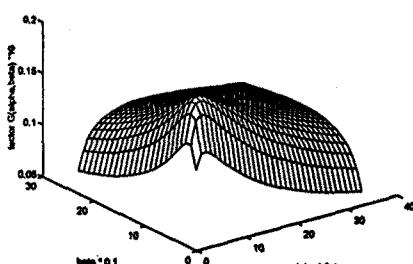
$$G(a, \beta) = \frac{F(a, \beta)}{\sqrt{2\pi\beta(a^2-1)}} \quad (5)$$

$$= \frac{1}{5} \sqrt{\frac{2\pi\beta}{a^2-1}} (\sinh^{-1} \frac{a}{\beta} - \sinh^{-1} \frac{1}{\beta})$$

$a=3$, $\beta=2$ 근처에서 최대 값이 되며 그때 $G = 1.179$ 는 된다. 이것은 $a=3, \beta=2$ 에서 최소전력으로 최대의 자속을 발생한다는 것을 의미한다.



(a) G-factor의 2차원 등고선



(b) G-factor의 3차원 등고선

그림 6 최적 형상 계수 G factor

3. 형상 최적화 설계 기법

가. 설계 목표

그림 7 의 원점 O로 부터 반경 200 [mm] 와 구내의 자속 밀도가 1.5 [T] 이고 그것의 자계 균일도를 최소화하기 위한 자계 균일도는 다음 식과 같이 계산한다.

$$\eta = \frac{|B_{max}| - |B_{min}|}{|B_0|} \times 10^6 \quad [\text{ppm}] \quad (6)$$

$|B_0|$: 원점 O의 자속 밀도

$|B_{max}|$: 관측점의 최대 자속 밀도

$|B_{min}|$: 관측점의 최소 자속 밀도

나. 초기치의 결정

코일에 흐르는 전류를 코일 두께가 거의 0(zero)에 가까운 선전류라고 가정한다.

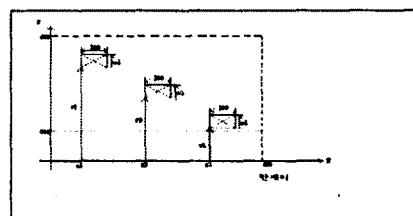


그림 7 회전 대칭의 6개 초전도 코일 배치

1) 코일 내경의 제약 조건

$$500 \text{ mm} \leq r_1, r_2, r_3 \leq 650 \text{ mm} \quad (7)$$

2) 코일 배치 영역의 제약 조건

$$0 \leq z_1 \leq 150, 350 \leq z_2 \leq 500, 700 \leq z_3 \leq 850 \quad (8)$$

$$200 \leq z_2 - z_1 \leq 500, 200 \leq z_3 - z_2 \leq 500 \quad (9)$$

초기치를 결정할 때는 식 (10)을 10등분 한다.

$$500 \text{ mm} \leq r_1, r_2, r_3 \leq 650 \text{ mm} \quad (10)$$

코일의 내경 및 배치를 주어진 범위에 벗어나지 않게 변화시켜 평가점에 있는 목표치와의 벗나감이 최소가 되는 경우의 코일의 내경 및 배치를 구한다. 평가점의 z 좌표는 식 (11)로 주어지며, 여기서, $i=1, 2, \dots, 12$ 이다.

$$z_0 = \frac{40(i-0.5)}{12} \quad [\text{cm}] \quad (11)$$

본 연구의 설계 과정에 있어서 제일 중점적으로 고려되어야 할 사항은 평가점에 있는 목표치 자속 밀도와의 오차가 최소가 되는 경우의 코일의 내경 및 내치를 구하는 것이다.

4. 농동 차폐 성능 해석

일반적으로 구조가 복잡한 시스템에 대해 해석적인 방법으로 시스템을 분석하기에는 많은 어려움이 있으므로 본 연구에서는 수치 해석적인 방법으로 유한요소법을 적용하여 자계발생시스템의 자계해석을 통해 농동차폐의 특성을 고찰하였다.

여기서 농동차폐제는 마찬 가지로 초전도체로 역자계를 발생하게 큼 권선의 방향을 반대로 감아 여자시킨다.

본 연구의 능동차폐를 최적 설계하기 위한 수치계산 알고리즘이다.

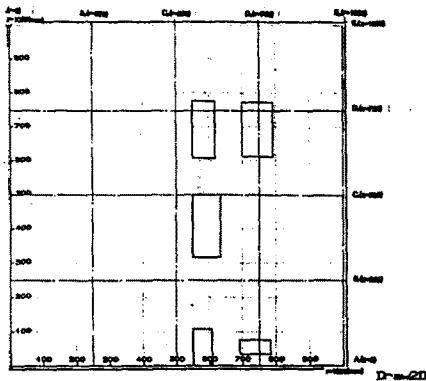


그림 10 해석모델의 segment line

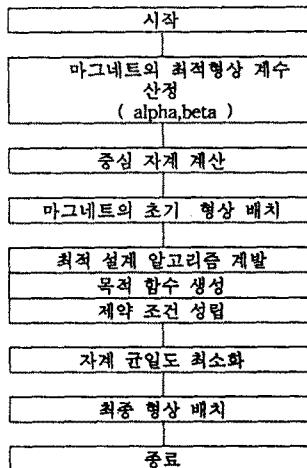
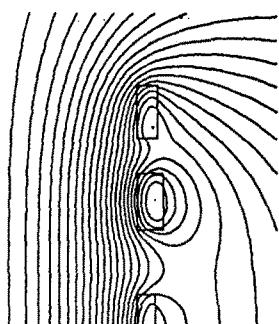


그림 12 자기 차폐 설계의 flowchart



(a) 비차폐시

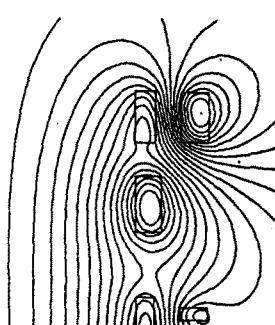


그림 11 능동 차폐 장치의 상세 자속분포도

5. 결론

본 연구에서 강자계 발생시스템으로부터 필연적으로 발생되는 누설자계 억제기술의 토대를 마련하기 위하여 마그네트의 형상과 배치방법을 연구하였다. 최적 설계를 하기 위해서는 여러 가지 방법의 장단점을 비교 분석하고 수치 해석적인 방법을 사용하여 초기 형상 배치를 위해 설계방법을 개발하는 것이었다.

여기에 관련되는 부가적인 조건들을 간단한 방법을 통해 고찰하였으며, 앞으로 남은 과제는 마그네트 배치에 관한 모든 형상 변수들을 고려하여 목적함수로 부터 조금 더 정밀한 치수를 구하는 것이다.

참고문헌

- [1] M. W. Garret : "The Method of Zonal Harmonics", in High Magnetic Field, Willy, p14-26 (1961)
- [2] W. Conley, Computer Optimization Techniques, rev. ed. Princeton, NJ : Petrocelli, 1984.
- [3] A. Ishiyama and H. Hirooka, "Magnetic Shielding for MRI Super conducting Magnets", IEEE Trans. Magn., Vol.27, No.2, pp. 1692-1695, 1991.
- [4] D.B. Monthonmery, "Solenoid Magnet Design", Robert E. Krieger Pub. Co., 1980.