

내노치형 초전도 솔레노이드 마그네트의 설계·제작 및 평가

나 원수^o 진 홍범 오 봉환 권 영길 오 상수 조 전욱 하 동우 이 언용 류 강식

한국 전기 연구소, 경남 창원시 성주동 28-1

Design, fabrication and test of inside notched superconducting coil

Wansoo Nah, Hongbeom Jin, Bonghwan Oh, Youngkil Kwon, Sangsoo Oh, Jeonwook Cho, Dongwoo Ha, Eonyong Lee, Kangsig Ryu,

Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon, Kyounghnam 641-120, Korea

Abstract - In this paper, the design, fabrication and test of inside notched superconducting coil are described. The inside notched coil is one of the basic configurations, producing homogeneous magnetic field. This magnet is a primitive version of MRI or NMR magnet in Korea Electromagnetic Research Institute. To test the magnetic field distribution inside the magnet, a X-Z scanner was made and the homogeneity was about 1.8×10^{-3} in 5 cm dsv (Diameter of Spherical Volume).

1. 서론

고균등 자장 마그네트는 일반적으로 NMR (Nuclear Magnetic Resonance) spectroscopy, 또는 MRI (Magnetic Resonance Imaging) 시스템에 필수적이며, 이러한 기기에 필요한 자장의 세기 및 균일도, 균일도가 요구되는 공간의 크기, 시간적인 안정도 (Stability) 등은 요구되는 공간 주파수, 해상도 (Resolution), 기울기 코일 (Pulsed Gradient coil) 의 출력 및 Data Acquisition 시간 등에 따라서 달라진다. 일반적으로 MRI 영상 시스템에 필요한 자장의 세기는 양성자 (Proton)를 기준으로 하여 0.2 - 2 T 정도이고 이 때 자장 균일도는 30 - 50 cm DSV 의 공간에서 1 - 10 ppm (Part Per Million) 오더 (Order)의 균일도가 보통 요구된다. 이러한 자장은 기본적으로 솔레노이드 형태의 마그네트 수 대를 공간적으로 적절하게 조합한 후 shim 코일로 미세한 자장의 세기를 조절하여 얻을 수 있다. 본 논문에서는 고균등 초전도 마그네트를 설계하는데 바탕이되는 수식에 대하여 기술하고, 그것을 바탕으로 하여 고균등 초전도 마그네트 설계의 첫번째 시도로서 단순 솔레노이드 마그네트의 안쪽에 노치 (Notch)를 부착한 코일 (Inside Notched Coil)을 설계하고 또 이것을 제작·시험한 결과에 대하여 기술한다.

II. 설계

우리가 설계하고자 하는 고균등 자장 마그네트는 기본적으로 여러개의 솔레노이드 형 마그네트가 공간적으로 배치되어 있는 형태이므로 축대칭의 기하학적 모양을 가지고 있다. 특히 이 경우, 균등 자장은 z 축의 자장 B_z 에 전적으로 의존하며, 실제적으로 MRI 마그네트의 자장 균등도는 이 B_z 를 여하히 균일하게 만드느냐에 모든 노력이 경주된다. 구 좌표계에서 이 B_z 는 다음과 같이 표현된다.

$$B_z = \sum_n R(r) \cdot S(\theta, \phi) \quad (1)$$

$$\text{단, } R = A_1 \cdot r^n + A_2 \cdot r^{-n}$$

$$S = P_n^m(u) [D_1 \cdot \sin(m\phi) + D_2 \cdot \cos(m\phi)]$$

여기서 $u = \cos \theta$ 이다. 위의 수식이 의미하는 것은 공간적 위치에 대한 B_z 의 변화가 반경 r 의 함수와 구 표면의 위치 (θ, ϕ)의 함수의 곱으로 표현된다는 것이다. 코일의 중심에서 자장은 제한된 값 (Finite value)을 가지므로 A_2 는 0이며 또 변수 분리 때에 도입된 n 는 $\theta = 0$ 및 π 에서의 특이점 (Singular point)를 없애기 위하여 정수의 값을 갖고, m 는 0, 1, 2, ..., n 의 값을 갖는다. 그리고 P_n^m 은 associated Legendre function이다. 위 식들에서 볼 수 있듯이 $m = 0$ 일 때에는 B_z 가 ϕ 에 관계없음을 알 수 있고, 이것은 기하학적 형상이 완벽한 축대칭임을 의미한다. 이러한 축대칭을 갖는 형상은 솔레노이드의 형태로 쉽게 구현될 수 있으며, 이 때 B_z 는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$B_z = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot r^{n-1} \cdot P_n(\cos\theta) \quad (2)$$

즉 ϕ 를 포함하는 항이 사라졌으며, 이 때의 계수 A_n 은 $\theta = 0$ 인 z 축 상에서의 B_z 를 마그네트의 중심 ($B_z(0) = B_0$)에서 Taylor 급수로 전개한 다음 식과 계수를 비교함으로써 얻을 수 있다.

$$B_z(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{r^n}{n!} \cdot \frac{\partial^n B_z(0)}{\partial z^n} \cdot P_n \cos(\theta) \quad (3)$$

윗 식은 원점에서 B_z 의 미분치를 알고 있으면, 최대치를 가지고 있는 어떠한 형태의 자장의 분포도 모두 계산 할 수 있다는 것을 의미한다. 일반적으로 식(3)에서의 $\frac{1}{n!} \cdot \frac{\partial^n B_z(0)}{\partial z^n}$ 를 q_n 으로 정의하고 이것을 주

어진 코일의 n 차 source 항 (Source term)이라고 부른다. 고균등 마그네트를 설계한다고 함은 각각의 차수 (Order: $n = 1, 2, 3, 4, \dots$)에서 이 source 항이 0 이 되도록 여러개의 솔레노이드의 크기 및 형태를 결정하고 또 공간적으로 적절하게 배치하는 것을 말한다. 좌표의 원점을 솔레노이드형 마그네트의 중심에서 취하면 식(3)에서, n 가 기수인 항은 0 이되어 우수의 항만 남고, 축대칭 형태를 갖는 여러 개 (예를 들어서 k 개)의 마그네트가 조합 된 형태의 마그네트 전체 자장의 세기는 다음 식과 같이 각 요소 마그네트의 합으로 표현될 수 있다.

$$B_z(r, \theta) = \sum_{m=1}^k B_0^m + \sum_{m=1}^k q_{2m} r^{2m} P_{2m}(\cos \theta) + \dots \quad (4)$$

마그네트 설계의 목적인 균등 자장을 실현하기 위해서는, 윗 식에서의 q_n 의 합을 0 으로 만들면 됨을 알 수 있다. 즉,

$$\sum_{m=1}^k q_{2m}^m = 0, \quad \sum_{m=1}^k q_{2m}^m = 0, \quad \sum_{m=1}^k q_{2m}^m = 0, \dots \quad (5)$$

가 되고, 만약 각 요소의 마그네트가 모두 단순 솔레노이드 형태라면, 결과적으로 단순 솔레노이드에서의 q_n 을 알고난 후에 그것을 식(5)에 대입하여 연립 방정식을 풀면 우리가 원하는 고균등 마그네트의 형상을 설계할 수 있게 된다. 그림 1 과 같이 정의된 단순 솔레노이드의 형태에서 q_n 은 a, β, a_1 및 전류 밀도 J 의 함수이다. 이러한 단순 솔레노이드 형태에서 q_n 을 계산하는 것은 단조로운 계산의 반복을 요구하고, 이것에 대해서는 이미 Garret [1,2]을 비롯한 많은 저자 [3]들이 계산한 바 있으며 또한 잘 정의되어 있다. 여기에서는 이미 계산된 q_n 을 인용하기로 한다.

내노치 솔레노이드는 식(4)에서 $k = 2$ 인 경우이고 그림 2와 같은 형태이다. 설계에서 결정해야할 것은 그림 2에서 정의된 파라메타 a_1, a_2, a_3, l_c 및 전류밀도 J 를 적절히 변화시켜서 식 (4)에서의 2 차 및 4 차 에러 계수를 0 으로 만드는 것이다. 따라서 이 결과로 설계된 마그네트는 에러 계수가 4 차항 까지 소거 되므로, 6 차 내노치 마그네트 (6th order inside notch magnet)가 된다. 이 경우 중심 자장은,

$$B_0 = a_1 J \cdot [F(a, \beta) - F(a_1, \beta_1)] \quad (6)$$

이고, 2 차 에러 계수는 다음 식을,

$$[FE_2(a, \beta) - FE_2(a_1, \beta_1)] = 0 \quad (7)$$

그리고 4 차 에러 계수는 다음 식을 만족해야 한다.

$$[FE_4(a, \beta) - FE_4(a_1, \beta_1)] = 0 \quad (8)$$

윗 식에서의 $FE_n(a, \beta)$ 의 정의는 참고문헌 3 에 기술되어있다. 식(7)에서의 원하는 중심자장 B_0 와 마그네트 내경 a_1 및 전류밀도 J 를 고정시키면, 미지수의 갯수가 a_1, β_1, a_2 , 및 β_2 의 4 개 이고 주어진 수식이 세 개가 된다. 이 4 개의 미지수 중에서 적당한 1 개를 고정시키면 미지수 3 개, 수 식 3 개이므로 비선형 3 원 연립 방정식의 해를 구할 수가 있게된다.

지금까지 기술한 설계 방식을 토대로 실제로 내노치 마그네트를 설계한 결과가 표 1 에 나타나있다. 이 마그네트 설계와 제작 시에 사용한 초전도 선재는 Furukawa 에서 제작된 초전도 선재이며 직경이 32 μm 인 NbTi 필라민트가 24 개, 선재 직경이 0.5 mm 이고, 높은 동비 (7) 을 가지고 있는 MRI 용 초전도 선재이다. 다음 절에서는 이 선재로 마그네트를 제작한 과정에 대하여 기술한다.

III 초전도 마그네트 제작

본 절에서는 앞 장에서 설계된 고균등 초전도 마그네트를 제작하는 과정에 대하여 서술한다. 마그네트 보빈 (Bobbin)은 원통형 스테인레스 스틸을 선반으로 내부를 깎아내었다. 또 보빈의 돌출 부분에 홈을 파서 권선시 (Winding) 에 선재가 한 쪽 노치에서 다른 한쪽 노치로 이동할 수 있게 하였다. 보빈의 플랜지는 판재 모양의 GFRP를 원 모양으로 가공하여 이것을 보빈 상하부에 저온 에폭시로 부착하였다. 권선은 일반적인 층간 권선 방식으로 하였고, 각 층마다 절연지를 삽입하여 층간

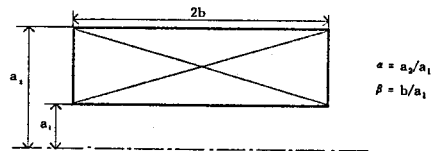


그림 1 단순 솔레노이드 형상
Fig.1 Simple solenoid configurations

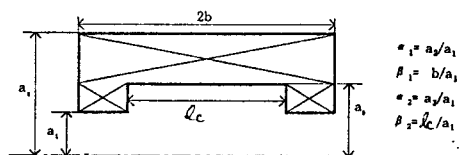


그림 2 내노치 솔레노이드 형상
Fig.2 Inside notched solenoid configuration

결연 방법을 행하였다. 각 층간의 냉각 채널을 고려하지 않았다. 고균등 자장을 발생시키는 마그네트에서의 냉각 채널은 자장의 균일도에 영향을 주므로 일반적으로 고려하지 않은것이 보통이고, 마그네트를 tight winding 하거나 에폭시에 함침시킴으로서 퀀치를 예방한다. 본 마그네트에서는 약 1 kgf의 장력으로 권선하였으며 에폭시는 함침하지 않았다.

IV 시험

그림 3은 제작된 마그네트의 자장 균일도를 확인하기 위해서 축방향 자장의 분포를 측정한 결과이다. Probe는 수직형 극저온용 홀 Probe이며, 가우스 미터는 Lakeshore사의 450 Gauss Meter를 이용하였다. 자장의 균일도는, 4 cm dsv ($z = \pm 2$ cm) 길이에서 1.8×10^{-3} 의 균등도를 가지고 있다. 또 그림 4는 z 축에서 수직인 평면상에서 -2 cm에서 +2 cm까지 0.5 cm 간격으로 이동시킨 후에 z 축방향의 자장 변화를 측정 한것이다. 이와같은 자장의 공간상의 분포는 X-Z scanner를 제작, 사용하여 행하여졌다. 그림 3, 4에서 볼수 있듯이 자장의 분포가 원점을 중심으로 정확한 대칭의 형태를 가지고 있지 않으며, 그 이유로는 마그네트 제작시에 엄밀한 대칭 모양을 구현 못한 것과 또 실험장소 주위에 산재한 자성체의 영향 때문으로 생각된다.

참고문헌

- (1) Milan Wayne Garret, "Axially Symmetrical Systems for Generating and Measuring Magnetic Fields. Part I", Journal of Applied Physics, Vol. 22, No. 9, September, 1951
- (2) Milan Wayne Garret, "Thick Cylindrical Coil Systems for Strong Magnetic Fields with Field or Gradient homogeneities of the 6th to 20th Order", Journal of Applied Physics, Vol. 38, No. 6, May, 1967
- (3) D. Bruce Montgomery, Robert J. Wegler, "Solenoid Magnet Design", Robert E. Krieger Publishing Co. Huntington, New York, 1980

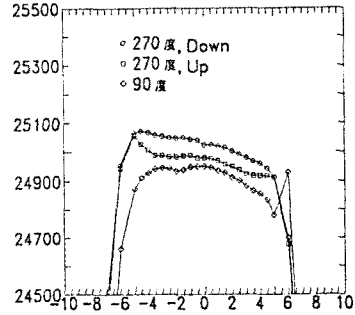


그림 3 Z 축상의 자장분포

Fig.3 Magnetic field distribution on z-axis

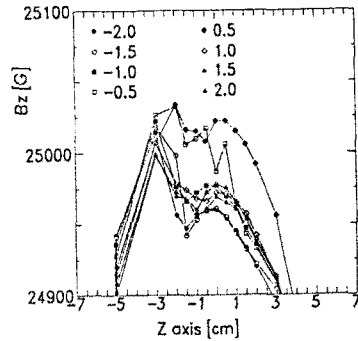


그림 4 X-Y 평면상에서의 Z 축 방향 자장분포

Fig.4 Off-z axis magnetic field distribution