

고온초전도 솔레노이드의 임계전류 향상을 위한 형상 최적화

감준선, 이준호, 나완수, 박일한, 권영길*, 손명환*, 김석환*
성균관대학교 전기전자및컴퓨터공학부, 한국전기연구원 초전도응용연구그룹*

Shape Optimization to Improve the Critical Current of HTS Solenoid

Joonsun Kang, Jonn-Ho Lee, Wansoo Nah, Il-Han Park,
Young Kil Kwon*, Myung Hwan Sohn*, Seog Whan Kim*
School of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan Univ.
Applied Superconductivity Lab., Korea Electrotechnology Research Institute*

bigbear@ece.skku.ac.kr

Abstract - To enhance the critical current of superconducting coil, the magnetic field experienced by superconductors in a coil should be minimized. This is true for both low T_c and high T_c superconductors, and the difference between the two lays in their isotropic/an-isotropic characteristics. In this paper, we propose a shape optimization algorithm to reduce radial magnetic field components in HTS solenoid to enhance the critical current of a solenoid. In the algorithm, finite element method and continuum shape design sensitivity formula were employed. The objective function is to minimize the maximum radial magnetic fields in a solenoid with a constraint of constant solenoid volume condition. In this paper, the details on algorithm are introduced and the calculated optimized shapes are presented.

1. 서 론

고온초전도 테이프가 자장의 방향에 따라 비등방성 임계전류 특성을 갖는다는 것은 잘 알려져 있다. 즉, 외부 자장이 테이프의 넓은 면에 수평인 경우보다 수직인 경우 임계전류가 더 낮다. 또한 코일의 임계전류는 일반적으로 단축 시료에 비해 매우 낮다. 그 이유는 테이프의 넓은 면에 대한 수직 자장의 영향 때문이다. 이러한 자장의 분포 특성이 코일의 경우 코일의 위아래 양 끝 부분에서 나타난다. 그러므로 고온초전도 솔레노이드의 임계전류를 향상시키기 위해서는 코일 양 끝 부분의 반지름 방향 자장(솔레노이드의 권선 방향을 고려할 때, 초전도 테이프의 넓은 면에 수직인 방향과 같다.)을 감소시킬 필요가 있다. 본 논문에서는 고온초전도 코일의 임계전류를 최대화하기 위해, 반지름 방향의 자장이 최소가 되도록 하는 형상 최적 설계 방법을 제시하였다. 유한요소법과 연속체 형상설계 민감도식이 설계

변수의 민감도를 계산하는데 이용되었다. 또한 이러한 방법을 이용하여 솔레노이드의 최적화된 형상을 제시하였으며 그 유용성을 논의하였다.

2. 연속체 민감도 해석

본 접근 방법에서는 형상의 경계를 설계변수로 이용하기 때문에 어떠한 코일 형상도 가능하다. 그러므로 최종 형상을 얻기 위해 코일의 치수 매개변수가 아닌 형상 자체를 이용한다.

우리의 목적은 코일의 권선 부분에서 반지름 방향의 최대 자장 크기를 최소화 하는 것이기 때문에 목적함수는 다음과 같다.

$$\text{Minimize } F = \int_{\Omega_p} (B_r - B_{r0})^2 d\Omega \quad (1)$$

$$\text{Subject to Constant coil volume} \quad (2)$$

, 여기서 B_r 은 각 요소의 반지름 방향(원통좌표계에서 r 방향) 자장 그리고 B_{r0} 는 매 계산 단계에서 반지름 방향 자장 크기의 목표치이다. 해석 영역, Ω_p 는 최대 반지름 방향 자장을 포함하며, B_{r0} 와 Ω_p 는 매 계산 단계에서 다시 계산된다.

$$B_{r0} = \alpha B_{rmax} \quad (3)$$

$$\{\Omega_p : \Omega_p \supset B_r \geq \beta B_{rmax}\} \quad (4)$$

B_{rmax} 는 코일 권선 내부의 최대 반지름 방향 자장 그리고 α, β 는 $0 \leq \alpha, \beta < 1$ 의 범위를 갖는 상수이다. Fig. 1은 솔레노이드의 초기 형상과 계산에 사용되는 변수를 나타내고 있다.

목적함수의 민감도는 연속체 방식의 일반적인 민감도식을 이용하여 계산한다[1]. 일반적인 민감도식은 다음과 같다.

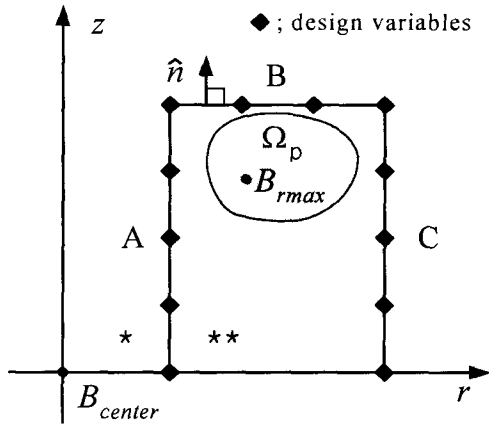


Fig. 1. Initial solenoid shape and definition of design variables. A, B and C denote design variables at inner, upper, and outer side of coil.

$$\frac{dF}{dP} = \int_{\gamma} G(A, \lambda) \hat{n} \cdot \frac{\partial X}{\partial P} d\Gamma \quad (5)$$

$$G(A, \lambda) = B(\lambda^{**}) \cdot [B(A^*)(\nu^* - \nu^{**}) + \lambda^{**}(J^{**} - J^*)]$$

그리고 P 는 설계변수, X 는 유한 요소의 절점, γ 는 설계 영역, \hat{n} 은 1번 영역에서 나가는 방향의 수직 벡터, ν 는 자기 저항률, J 는 전류밀도 그리고 *와 **는 각각 영역 1과 2를 나타낸다. 이러한 민감도식은 매질 편미분과 변화율 지배방정식의 보조변수법을 이용하여 해석적으로 유도된다[].

식 (5)의 민감도를 계산하기 위해서는 상태변수 A 와 보조변수 λ 가 필요하다. 보조변수 λ 는 보조 시스템 방정식으로부터 구할 수 있다. 이 시스템 방정식은 기본 시스템 방정식의 매질 특성 행렬과 같다. 보조 구동항은 식 (1)의 전미분에 의해 구할 수 있고, 보조 시스템 방정식은 $a(\cdot, \cdot)$ 형태인 에너지 쌍선형으로 식 (6)과 같이 표현된다[].

$$a(\lambda, \bar{\lambda}) = \int_{\Omega_p} 2(B_r - B_{r0}) \cdot B(\bar{\lambda}) d\Omega \quad (6)$$

여기서 구해진 상태변수와 보조변수는 식 (5)의 민감도를 계산하는데 이용된다.

3. 계산 과정

솔레노이드의 구조는 축대칭이므로 Fig. 1과 같은 모델로 계산이 가능하다. 여기서 해석 영역을 약 8000개의 1차 삼각형 요소로 분할하였고, 절점 수는 약 4000개이다. 그리고 설계변수는 A, B 그리고 C 각각 25개이며, 각 설계변수는 솔레노이드의 부피가 일정하게 유지되도록 움직인다.

우선, 초기 형상으로부터 자장 분포를 계산한다. 그리고 민감도 해석에 의해 다음 형상을 얻을 수 있다. 각 절점에 대한 목적함수의 민감도는

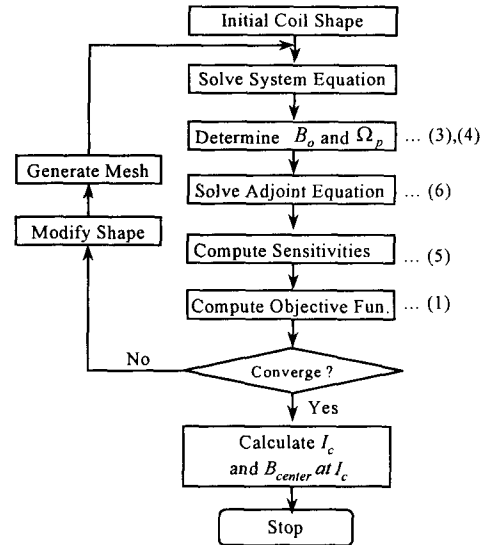


Fig. 2. Flow chart of calculation procedure

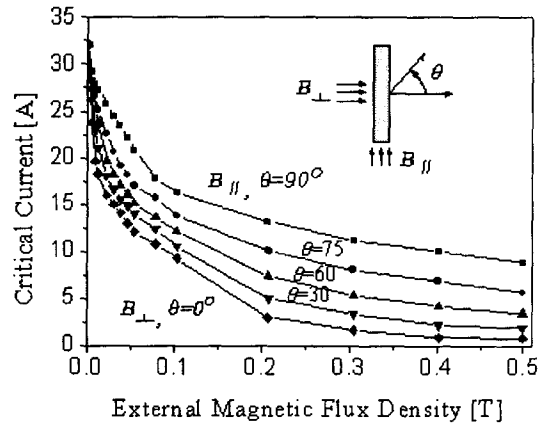


Fig. 3. I_c - B curves of the HTS tape

연속체 형상설계 민감도 해석을 이용하여 계산할 수 있다.

그 다음으로 새롭게 얻은 형상을 이용하여 요소를 재분할하고 다시 자장 분포를 계산한다. 그리고 최대 반지름 방향 자장이 감소되었는지를 검사한다. 그리고 다시 새로운 형상을 계산한다. 이러한 과정은 목적함수가 목표치로 수렴한 때까지 반복하여 이루어진다. 여기서 얻어진 최종 형상의 자장분포와 고온초전도 테이프의 I_c - B 곡선을 이용하여 솔레노이드의 임계전류를 계산한다. 다음 Fig. 2는 이러한 계산 과정을 잘 나타내고 있다.

3. 결과 및 토의

다음은 앞에서 제시한 알고리즘을 이용하여 고온초전도 솔레노이드의 임계전류가 향상되는지를 검증해 보았다. 계산에 이용된 솔레노이드 모델은 내경 18mm, 외경 36mm 그리고 높이 36mm로 임의로 정한 것이며, 솔레노이드의 임

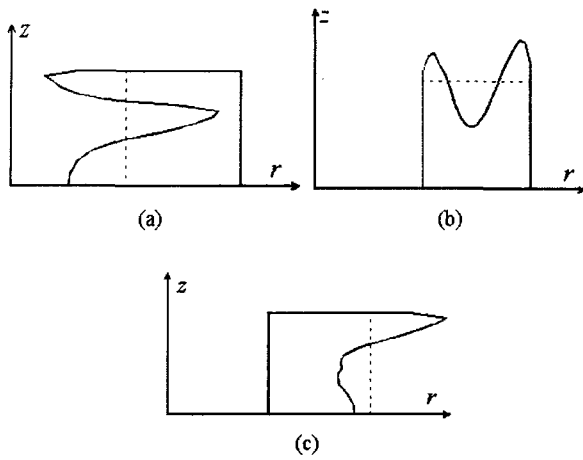


Fig. 4. Finally obtained coil shapes. Design variables are at (a) inner, (b) upper and (c) outer side of the coil, respectively. Designed shape: solid lines. Initial solenoid: dotted lines.

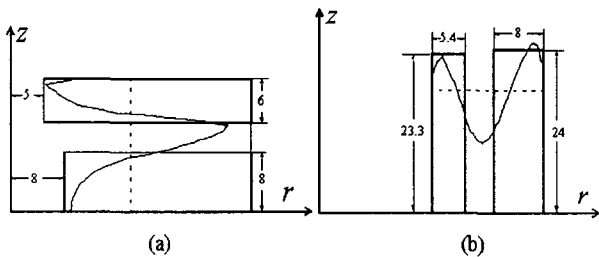


Fig. 5. Simplified coil shape: thick solid line. Designed coil shape: thin solid line. Initial solenoid: dotted line. Lengths are in (mm).

계전류 계산에 필요한 초전도 테이프의 I_c - B 곡선은 Fig. 3과 같은 실험 데이터를 이용하였다.

최종 형상 결과는 Fig. 1에서 설명한 바와 같이 설계대상 A, B 그리고 C 각각에 대해 Fig. 4에 나타나 있다. 하지만 계산 과정에서 설계변수의 이동 범위를 정하여 놓기 때문에 Fig. 4의 형상 결과는 최적 결과라고 보기 어렵다. 다만 Fig. 4의 결과는 일반적인 최적형상 결과를 나타낸다. 실제 계산에서 무한정 계산을 하게 되면 솔레노이드의 형상은 2등분 또는 3등분으로 나누어진다.

이와 같은 결과를 이용하여 실제 초전도 솔레노이드를 제작하는 것은 불가능하다. 그래서 최적 형상 계산 과정에서도 나타나듯이 솔레노이드의 형상이 나누어질 때 반지름 방향 자장이 가장 많이 감소된다는 것을 바탕으로 실제 제작이 가능한 간단한 모델(Fig. 5)을 이용하여 자장 분포를 계산하였다. 이 모델 역시 코일의 부피는 일정하게 유지한 것이다.

Table. 1은 최적형상 결과와 간단한 솔레노이드 모델에 대한 계산 결과를 요약한 것이다. 각 열은 권선 내부의 최대 반지름 방향 자장 크기, 솔레노이드의 임계전류 그리고 솔레노이드의 중심자장을 나타낸다. A'와 B'는 A와 B 모델을

Table 1. Specifications of the Designed Coils

	B_{rmax} (T)	I_c (A)	B_{center} (T)
Init.	0.209	11.4	0.141
A	0.187	12.0	0.177
B	0.146	12.5	0.149
C	0.187	11.8	0.137
A'	0.179	12.0	0.218
B'	0.165	12.4	0.134

간단히 한 것을 나타낸다. Table. 1에서 알 수 있듯이 모든 형상은 초기 형상에 비해 모두 임계전류가 향상되었음을 알 수 있다. 또한 최대 반지름 방향 자장은 감소되었다. 하지만 C와 B'의 경우 중심자장(B_{center})의 크기가 향상되지 못하였다. 이는 초전도체가 솔레노이드의 중심에 가까운 부분에 분포하지 못하였기 때문으로 사료된다.

3. 결 론

본 논문에서는 연속체 민감도법을 이용하여 솔레노이드의 최대 반지름 방향 자장이 감소하도록 형상을 최적화 하는 방법을 제시하였다. 설계변수를 코일의 3변(A, B, C)으로 하여, 각각에 대해 최적형상과 임계전류를 계산하였다. 또한 실제 제작을 고려하여 최적형상을 바탕으로 간단한 모델을 제시하고, 이 모델에 대해서도 임계전류 및 자장분포를 계산하였다. 민감도법을 이용한 형상 최적화 방법이 직접적으로 제작 가능한 형상을 제시하지는 못하였지만 앞으로 솔레노이드의 임계전류 향상 또는 균일한 중심 자장의 분포를 위한 새로운 개념과 형상을 제시할 수 있을 것이다.

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] E.J. Haun, K.K. Choi and V. Komkov, "Design Sensitivity Analysis of Structural System", Academic Press New York, 1986.
- [2] D.G. Luenberger, "Linear and Nonlinear programming", 2nd ed., Addison Wesley, 1984.
- [3] Il-han Park, Beom-taek Lee and Song-yop Hahn, "Sensitivity Analysis Based on Analytic Approach for Shape Optimization of Electromagnetic Device: Interface Problem of Iron and Air", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 27, no. 5, pp. 4142-4145, 1991