

## 형상에 따른 HTS SMES 코일의 최적설계

서형주\*, 김아롱\*, 김재호\*, 박민원\*, 유인근\*

국립창원대학교 \*

### Optimal design of HTS SMES coils by shape

Hyeong-Ju Seo\*, A-Rong Kim\*, Jae-Ho Kim\*, Minwon Park\*, In-Keun Yu\*  
Changwon National University, Korea \*

**Abstract** - 고온 초전도체를 이용한 에너지 저장장치는 종래의 저온 초전도체를 이용한 장치에 비해 효율이 높고, 설치 면적이 작으며, 환경 친화적 특성을 갖고 있다. 또한 냉각비용이 저렴하고 저장되는 에너지 밀도가 높다. 고온초전도 선의 성능향상이 가속화됨에 따라 고온초전도 선을 이용한 초전도 전력기기의 개발이 활발히 이루어지고 있다.

하지만 초전도 선이 구리선에 비하여 고가라는 단점이 여전히 문제가 되고 있다. 가격적인 측면에서 선의 사용량을 줄이기 위한 대책이 필요하다. 또한 코일의 손실해석은 전력기기의 경제성 여부와 성능향상을 위해 수행되어야 할 중요한 연구 분야 중 하나이다.

본 논문에서는 초전도 선으로 권선한 코일의 자장분포 및 인덕턴스를 유한요소법(FEM)해석을 통해 확인하였으며, 솔레노이드 코일, 팬케이크 코일, 트로이달 코일의 저장용량을 결정하기 위해 비교를 통하여 최적의 형상을 도출하였다.

#### 1. 서 론

임계전류가 높고 기계적 특성이 향상된 고온초전도(HTS : High Temperature Superconducting) 선의 개발과 더불어 초전도에너지저장장치(SMES : Superconducting Magnetic Energy Storage)의 상용화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1].

SMES 시스템은 극저온에서 전기저항이 존재하지 않는 초전도 성질을 이용한 것으로, 초전도 마그네트에 전류를 흘려 손실 없이 자기 에너지 형태로 저장할 수 있는 장치이다. 이러한 SMES 시스템은 저장요소가 초전도 마그네트이므로 기존의 에너지 저장방식인 배터리에 비해 저장효율이 높고, 에너지의 저장과 방출이 빠른 우수한 성능을 가지고 있으며 에너지 저장 밀도가 높고, 수명이 반영구적이다. 그래서 순간 정전이나 전압 변동에 신속한 대응이 가능한 HTS SMES의 연구가 활발해지고 있다. 하지만 가격 면에서 구리선에 비해서 고가라는 단점이 있다. 이러한 단점을 줄이기 위해 요구되는 용량의 SMES 설계에 있어 최적의 설계가 필요하다[2,3]. 논문에서는 선의 사용량을 최소화하기 위해 형상에 따라 특징이 다른 코일들을 비교 분석하였다

#### 2. 본 론

##### 2.1 코일 형상에 따른 특징

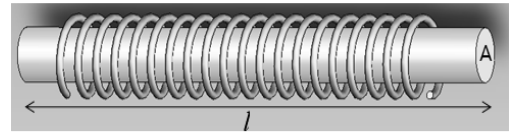
초전도 코일의 형태로서 크게 솔레노이드 코일, 팬케이크 코일, 트로이달 코일이 있다. 각 코일의 형상에 따라 그 특징이 다르며[4-6] 표 1에서 각 코일의 장·단점을 나타내었다.

〈표 1〉 코일 형상에 따른 장단점

구분	장점	단점
솔레노이드 코일	내부에 균일한 자기장 형성	표류자장(stray field)이 가장 크다
팬케이크 코일	인접한 반대 방향의 전류가 서로 발생하는 자기장을 상쇄시켜 외부 자기장을 줄임	적층된 구조방식으로 인해 냉각이 어려움
트로이달 코일	외부로 누설되는 표류자장(stray field)의 크기를 줄임 선의 사용량 최소화	구조가 복잡 고온초전도체로 만들기 어려움

##### 2.2 코일 형상에 따른 인덕턴스 계산

그림 1은 일반적인 솔레노이드 코일을 형상화 한 것이다.



〈그림 1〉 솔레노이드 코일

그림 1에 나타난 솔레노이드 코일에서 암페어 법칙에 의해 자계는 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r} [T] \quad (1)$$

솔레노이드에 전류가 흐르고 균일하게 코일이 감겨있는 경우, 자속은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi = BA = \frac{\mu_0 NI}{l} A [Wb] \quad (2)$$

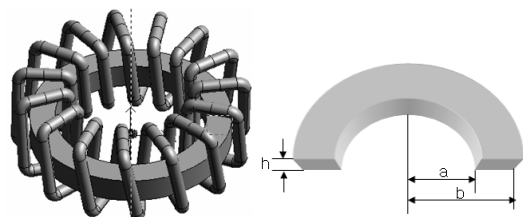
여기서, N: 턴수, I: 전류, r: 반경,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ , A: 코일의 단면적을 나타낸 것이다. 식 (3)은 솔레노이드 코일의 인덕턴스를 계산하기 위한 식이다.

$$L = \frac{N\Phi}{I} = \frac{\mu_0 NA}{l} [H] \quad (3)$$

그림 2에 트로이달 코일을 나타내었다. 이 경우 인덕턴스를 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L \approx \frac{\mu_0 N^2 h}{2\pi} \cdot \frac{b-a}{a} = \frac{\mu_0 N^2 A}{2\pi a} = \frac{\mu_0 N^2 A}{l} [H] \quad (4)$$

이 때, a: 내반경, b: 외반경, h: 두께,  $A = h(b-a)$ ,  $l = 2\pi a$  이다.

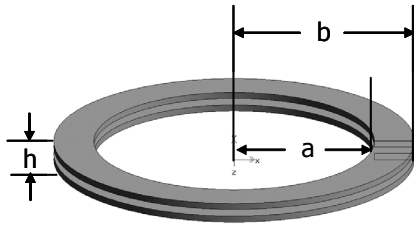


〈그림 2〉 트로이달 코일

그림 3의 더블팬케이크 코일의 인덕턴스는 식 (5)와 같이 나타낸다.

$$L = \frac{\mu_0 h}{2\pi} \left( \ln \frac{b}{a} \right) \times 2 \quad (5)$$

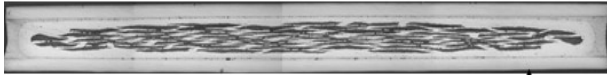
이 때, a: 내반경, b: 외반경, h: 두께이다.



〈그림 3〉 더블팬케이크 코일

**2.3 유한요소법(FEM)을 이용한 수치해석**

코일의 형상에 따라 동일한 조건에서 인덕턴스 값을 비교하기 위해 수치해석 프로그램인 MagNet을 이용하여 해석하였다[7]. 그림 4와 표 2에 코일 설계에 사용된 고온초전도선의 사양을 나타내었다.



〈그림 4〉 AMSC High Strength Plus wire

〈표 2〉 초전도 선의 사양

Average thickness	0.255 - 0.285 mm
Minimum width	4.4 mm
Min. double bend diameter (RT)	38 mm
Max. Rated tensile stress (RT)	200 MPa
Max. Rated wire tension (RT)	21 kg
Max. Rated tensile stress (77K)	250 MPa
Max. Rated tensile strain (77K)	0.4%

동일한 조건에서 세 가지 형태 SMES 코일의 특성을 비교하기 위해 인덕턴스와 선의 길이를 각각 0.2mH와 20m로 하였을 경우의 해석결과를 표 3과 표 4에 나타내었다. 표 3의 결과에서 인덕턴스를 0.2mH로 동일한 조건으로 설계하였을 때 솔레노이드 코일과 트로이달 코일에 비해 더블팬케이크 코일이 선의 길이를 최소화 할 수 있었다. 또한, 표 4의 결과에서 선의 길이를 20m로 동일하게 하였을 경우 식 (6)에 의해 더블팬케이크에 더 큰 에너지가 저장되는 것을 해석을 통해 확인하였다.

$$W = \frac{1}{2} L I^2 [J] \quad (6)$$

〈표 3〉 인덕턴스가 동일한 경우 코일의 해석 결과

구분	솔레노이드	더블팬케이크	트로이달
인덕턴스	0.2 mH	0.2 mH	0.2 mH
내 경	100 mm	100 mm	1000 mm
외 경	100.57 mm	110.26 mm	2000 mm
중심자장 @ 1A	1.07 gauss	2.5 gauss	1.04 gauss
최대수평자장@ 1A	1.92 gauss	15.6 gauss	0.97 gauss
최대수직자장@ 1A.	2.79 gauss	17.4 gauss	1.08 gauss
선의길이	31.4 m	6.7 m	312m
턴 수	100	18	300

〈표 4〉 길이가 동일한 경우의 코일의 해석 결과

구분	솔레노이드	더블팬케이크	트로이달
선의길이	20 m	20 m	20 m
인덕턴스	0.12 mH	1.46 mH	0.001 mH
내 경	100 mm	100 mm	1000 mm
외 경	100.57 mm	113.97 mm	2000 mm
중심자장 @ 1A	1.8 gauss	6.56 gauss	0.066 gauss
최대수평자장@ 1A	2.16 gauss	22.03 gauss	0.061 gauss
최대수직자장 @ 1A	2.7 gauss	33.3 gauss	0.069 gauss
턴 수	63	49	19

**3. 결 론**

초전도 코일의 설계를 위해서는 코일에 대한 전자기해석은 필수적이다. 고온초전도 선의 가격이 고가라는 단점을 완화하기 위해서는 최적 전자기장 설계를 통해 고밀도로 자장에너지를 축적할 수 있는 코일형태가 필요하다.

본 논문에서는 자장에 따른 임계전류 값이 동일하다고 가정하고 고온 초전도 선을 이용하여 솔레노이드, 팬케이크, 트로이달 코일의 특성을 해석하였다. SMES 설계에 있어 동일한 초전도선의 길이를 조건으로 주었을 때 세 가지의 형상 중 최대 저장에너지를 가지는 코일의 형상을 도출 하였다. 코일의 형상에 따라 자장의 분포가 다르며, 자장의 세기에 따라 저장할 수 있는 에너지의 크기와 운전전류가 달라지게 된다. 수직 방향 자장에 의해 많은 영향을 받는 고온초전도 선의 특성상 이를 완화할 수 있는 형태로 코일을 설계하는 것 또한 필수적이다. 최적의 설계를 하기위해서는 자장에 따른 임계전류를 예측하고 코일의 용량을 선정하여야 한다.

**감사의 글**

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 및 21세기 프론티어 연구개발 사업인 차세대 초전도 응용 기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

**[참 고 문 헌]**

[1] H. Kasahara, S. Akita, K. RAsaki, A. Tomioka, T.Hase, K. Ohata, N. Ohtani, and H. Sakaguchi, "Basic characteristic evaluation of cryocooler-cooled HTS coils", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 12, No. 1, pp. 766-769, 2002.

[2] Y. Mitani, Y. Murakami and K. Tsuji, "Experimental study on stabilization of model power transmission system by using four quadrant active and reactive power control by SMES", *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol. MAG-23, No. 2, pp. 541-544, March 1987.

[3] M. Tada, Y. Mitami, and K.Tsuji, "Power Control by Superconducting Magnetic Energy Storage for Load Change Compensation and Power System Stabilization in Interconnected Power System", *IEEE Trans. Appl. supercond.*, Vol. 5, No. 2, June 1995.

[4] Tsutsui H., Nomura S., Shimada R. "Optimization of SMES coil by using virial theorem", *IEEE Trans. Appl. supercond.*, Vol. 12, No. 1, pp. 800-803, 2002.

[5] Dong Keun Park, Min Cheol Ahn, Seong Eun Yang, Il Gu Yoon, Young Jae Kim, Tae Kuk Ko, "Short-circuit Analysis of Solenoid and Pancake Type Bifilar Winding Magnets using BSCCO tape", *Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics*, Vol. 7, No. 4, pp. 28-31, 2007.

[6] Carlo A. Borghi, et. al., "Design Optimization of a Microsuperconducting Magnetic Energy Storage System," *IEEE Trans. on Magnetics*. Vol. 35, No. 5, pp. 4275-4284, September 1999.

[7] Kazuhiro Kajikawa, Toshihiro Hayashi, Ryoji Yoshida, Masataka Iwakuma, and Kazuo Funaki, "Numerical Evaluation of AC losses in HTS wires with 2D FEM Formulated by self magnetic field," *IEEE Transaction on applied superconductivity*, vol. 13, No. 2, pp. 3630-3633, 2003.