

HTS-코일의 임계전류 계산

이주영*, 마용호* 류경우*, 박권배**, 오일성**
 전남대학교*, LS산전**

Calculation of Critical Current for High Temperature Superconducting Coil

Zhu-Yong Li*, Yong-Hu Ma*, Kyung-Woo Ryu*, Kwon-Bae Park**, Il-Sung Oh**
 Chonnam National University*, LS Industrial Systems**

Abstract - 임계온도가 높아 시스템응용에서 매우 안정한 장점을 지닌 고온초전도(HTS)도체를 이용한 HTS-SMES(Superconducting Magnetic Energy Storage)장치에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다[1]-[2]. 이런 HTS-SMES장치의 고가성, 복잡성 등 원인에 기인하여 운전에 앞서 장치의 임계전류, 자속유동손실 및 충·방전시 불가피하게 발생하는 교류손실 등과 같은 기본적인 특성들이 선행하여 연구되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 600 kJ급 HTS-SMES코일에 대한 자장분석을 기반으로 코일의 임계전류밀도 분포를 계산하였고 최소 임계전류밀도에 근거하여 코일의 임계전류를 결정하였다. 그 주요 결과를 요약하면 코일에서 자장과 임계전류밀도 분포는 코일의 형상에 무관하게 같은 분포 경향을 보여 주며 최소 임계전류밀도는 코일의 top과 bottom의 중심에 위치하며, model코일에서 임계전류의 계산값과 측정값이 비교적 잘 일치하였기 때문에 600 kJ급 HTS-SMES코일도 잘 일치할 것으로 사료된다. 또한 SMES코일을 20 K에서 운전한다고 가정하면 코일 임계전류의 ~60%, 4.2 K에서는 ~40%에서 각각 운전하게 될 것으로 예측된다.

1. 서 론

고온초전도도체인 Bi-2223도체와 YBCO도체가 개발되어 상업적으로 판매되고 있으나, 대표적인 저온초전도(LTS)도체인 NbTi-초전도선과 경제성측면에서 비교하여 매우 고가이다. 또한 HTS도체는 임계온도가 약 100 K정도로 높아 임계온도 측면에서 시스템응용에서 매우 안정한 특성을 지니는 반면, 외부자장에 대한 이방성으로 인하여 외부자장이 인가되면 임계전류밀도가 감소하는 단점을 지니고 있다. 그러나 HTS도체 기술의 진보에 힘입어 기술적 측면에서는 NbTi-초전도선으로 제작되는 SMES장치의 전형적인 운전전류밀도인 ~100 A/mm²에 대응한 수준으로 제작이 가능하다.

이런 장치들은 고가이면서도 조립이 복잡하기에 운전에 앞서 임계전류, 자속유동손실 및 충·방전시 불가피하게 발생하는 교류손실 등과 같은 특성평가가 선행 연구되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 600 kJ급 HTS-SMES코일의 임계전류 특성을 평가하기 위하여 임계전류밀도 분포를 수치해석적인 방법으로 계산하였고 이에 근거하여 여러 가지 온도에 대한 코일의 임계전류도 결정하였다[3]. 또한 model코일에 대하여 측정된 임계전류와 계산값을 비교하여 임계전류 계산 알고리즘의 정확성에 대해서도 언급하였다.

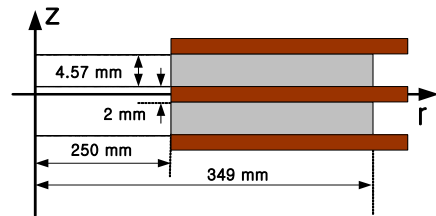
2. 해석 코일 및 방법

그림 1과 2에는 본 연구의 해석대상인 model코일과 SMES코일의 개략도를 각각 나타내고 있다. 이 개략도는 Z축에 대칭인 코일 단면의 한쪽 부분만 도시하였다. model코일과 SMES코일은 표 1에 나타내고 있는 4-ply도체로 제작되었다. Model코일은 팬케이크형상의 코일 1개로 구성된 코일이고 SMES코일은 팬케이크형상의 코일 22개를 적층한 코일이다. 두 코일의 주요사양은 표 1과 그림 1, 2에 나타내었다.

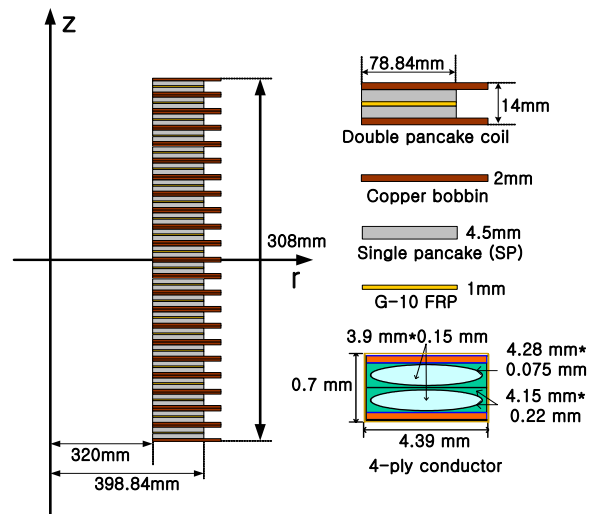
코일의 임계전류를 계산하기 위하여 상용의 전자기장 응용해석프로그램인 COMSOL을 사용하여 수치해석적인 방법을 사용하였고 초전도체의 DC 전압-전류특성에서 N-value가 비교적 크고 또한 코일에서 발생하는 열적인 원인으로 하여 임계전류 부근에서 초전도체가 신속히 퀘칭되는 데 기인하여 코일의 최소 임계전류밀도가 위치한 도체의 임계전류를 코일의 임계전류로 결정하였다.

코일의 임계전류밀도 분포를 계산하기 위해서는 선행연구결과인 짧은 도체샘플의 수평 및 수직자장에 대한 I_c-B특성만으로 코일의 임계전류밀도 분포를 구하는 방법을 사용하였으며[3], 77 K에서 수직 및 수평 자장에 대한 I_c-B특성은 [3]을, 20 K에 대해서는 [4]를, 4.2 K에 대해서는 [5]를 참고하였다.

또한 코일 임계전류의 계산 알고리즘의 정확성을 알아보기 위하여 model코일에 대하여 DC 전압-전류특성을 액체질소 온도(77 K)에서 실험적으로 조사하였다.



〈그림 1〉 Model코일의 개략도.



〈그림 2〉 SMES코일의 개략도.

〈표 1〉 도체 및 코일의 주요사항

4-ply conductor	Width	4.37 mm
	Thickness	0.70 mm
	Bi-2223/Ag/Solder/Brass	28/42/5/25 (%)
	Critical current @ 77 K	280 A
Model coil	Inner diameter	500 mm
	Outer diameter	698 mm
	Height	15.4 mm
	Number of DPC	1
	Total number of turns	262 turns
	Total length of conductor	500 m
	Inductance	69 mH
	Stored energy	522 J
SMES coil (600 kJ급)	Inner diameter	640.0 mm
	Outer diameter	797.7 mm
	Height	308 mm
	Number of DPC	22
	Total number of turns	4752 turns
	Total length of conductor	10 km
	Inductance	15.9 H
	Stored energy	620 kJ

3. 결과 및 고찰

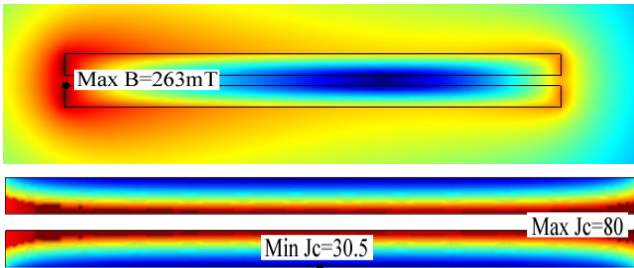
그림 3과 4는 model코일과 SMES코일에 대하여 계산된 자장 및 임계전류밀도 분포를 각각 나타낸다. 그림 4에는 SMES코일의 운전온도를 77 K, 20 K, 4.2 K로 하여 계산된 결과를 대표적으로 나타내었다.

그림3과 4에서 보듯이 자장 및 임계전류밀도 분포는 코일의 형상에 무관하게 분포 경향은 같다. 코일에서의 자장의 최대치는 코일 내측면의 mid plane에 위치하여 있는 반면, 임계전류밀도의 최대치는 코일 외측면의 mid plane에, 최소치는 top과 bottom의 중심에 위치하여 있다.

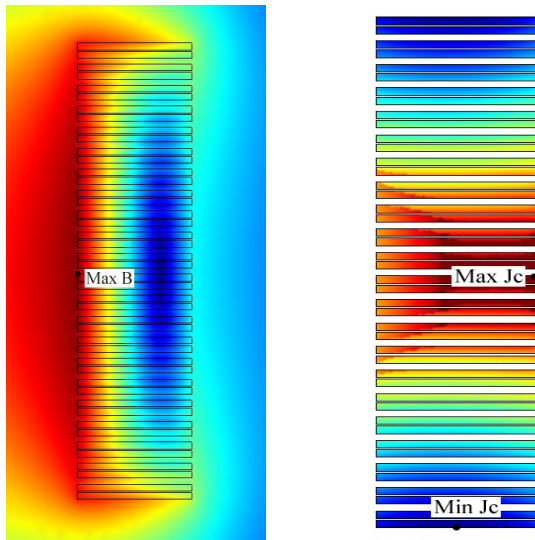
표 2는 model코일과 SMES코일의 주요특성 해석결과를 나타낸다. 그중에서 코일 임계전류의 계산값과 측정값을 비교하기 위하여 model코일에 대한 DC 전압-전류특성을 그림 5에 나타내었다.

그림 5에서 보듯이 77 K에서 측정된 코일의 임계전류는 123 A이다. 표 2에서 model코일의 계산된 임계전류는 107 A로서 측정된 임계전류의 ~87%이므로 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 본 연구에서 사용된 코일의 임계전류를 계산하는 알고리즘은 비교적 정확함을 증명하여 준다. 따라서 model코일보다 사이즈가 크고 더 큰 자장이 발생하는 SMES코일인 경우는 임계전류의 계산값이 측정값과 더 잘 일치할 것으로 사료된다.

표 2에서는 코일 전류가 커짐 따라 코일의 주요특성 파라미터(자장, 에너지 용량, 임계전류 등)가 동시에 커지는 것을 볼 수 있다. 그중에서도 SMES코일에 대하여 계산된 임계전류에서 20 K와 4.2 K에서의 계산값은 77 K에서의 계산값의 ~13배, ~20배인데, 이는 코일의 임계전류는 온도에 아주 의존함을 알 수 있다.



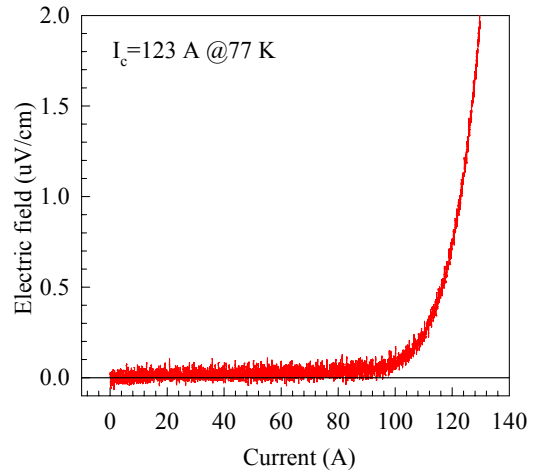
〈그림 3〉 77K에서 model코일의 자장 및 임계전류밀도 분포.



〈그림 4〉 SMES코일의 자장 및 임계전류밀도 분포.

〈표 2〉 Model코일와 SMES코일의 주요특성 해석결과

	온도 (K) @코일 전류(A)	Max B (T)	W _H (kJ)	Min Jc (A/mm ²)	계산된 코일 I _c (A)
Model 코일	77 @111	0.263	0.395	30.5	107
SMES 코일	77 @36.3	0.446	10.5	11.1	36.3
	20 @473	5.81	1770	144	473
	4.2 @728	8.94	4200	221	728



〈그림 5〉 Model코일의 DC 전압-전류 특성.

SMES코일에 600 kJ의 에너지를 저장하려면 ~280 A의 운전전류가 흘러야 한다. 따라서 운전온도 20 K에서 운전한다고 가정하면 SMES코일은 임계전류 473 A의 ~60%에서, 4.2 K에서는 임계전류 728 A의 ~40%에서 운전하게 될 것으로 예측된다.

4. 결 론

상용의 전자장 응용해석프로그램인 COMSOL을 사용하여 600 kJ급 HTS-SMES코일에 대하여 자장분석을 하였고 그 결과를 기반으로 온도에 따른 짧은 도체샘플의 수평 및 수직 자장에 대한 I_c-B특성만을 이용하여 코일의 임계전류밀도 분포를 계산하였고 최소 임계전류밀도에 근거하여 온도에 따른 SMES코일의 임계전류를 결정하였다[3]. 또한 코일 임계전류의 계산 알고리즘의 정확도를 알아보기 위하여 model코일을 제작하여 액체질소(77 K)에서 DC 전압-전류특성을 실험적으로 조사하였고 이를 계산값과 비교 하였다. 그 주요결과를 요약하면 다음과 같다

- 1) 코일에서 자장과 임계전류밀도 분포는 코일의 형상에 무관하고 같은 분포 경향을 보여주고 임계전류밀도의 최대치와 최소치는 코일 외측면의 mid plane과 top, bottom의 중심에 각각 위치하여 있다.
- 2) Model코일에서 임계전류의 계산값과 측정값은 비교적 잘 일치 한다. 따라서 SMES코일에 대한 임계전류의 계산값도 실험값과 잘 일치할 것으로 사료된다.
- 3) SMES코일을 20 K에서 운전한다고 가정하면 코일 임계전류의 ~60%, 4.2 K에서는 ~40%에서 운전하게 될 것으로 예측된다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술 개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

【참 고 문 헌】

[1] P. Tixador, B. Bellin, M. Deleglise, J. C. Vallier, C. E. B격다, A. Allais, and J. M. Saugrain, "Design and First Tests of a 800 kJ HTS SMES", IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 2, p. 1967, 2007.

[2] Woo-Seok Kim, Sang-Yeop Kwak, Ji-Kwang Lee, Kyeong-Dai Choi, Hyun-Kyo Jung, Ki-Chul Seong, and Song-yop Hahn, "Design of HTS Magnets for a 600 kJ SMES", IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 16, No. 2, p 620, 2006.

[3] 이주영, 마용호, 류경우, 최세용, 김해중, "경사 외부자장에 대한 600 kJ급 SMES용 HTS도체의 DC V-I 특성," 전기전자재료학회논문지, 21 권, 1호, p. 79, 2007.

[4] American Superconductor, Inc. [Online]. Available: <http://www.amsc.com/products/htswire/1gHSP.html>

[5] M. Beckenbach, F. Hornung, M. Klaser, P. Leys, B. Lott, and Th. Schneider, "Manufacture and Test of a 5T Bi-2223 Insert Coil", IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 15, No. 2, p. 1484, 2005.