

600 kJ SMES 모델 코일의 설계와 Stress 해석

박명진*, 광삼엽**, 이승욱*, 김우석*, 한승용*, 최경달⁵, 한진호⁵, 이지광⁵⁵, 정현교**, 성기철**, 한승엽*
 *기초전력연구원, **서울대학교, *MIT, **한국전기연구원, ⁵한국산업기술대학교, ⁵⁵우석대학교

Design and Stress Analysis of 600 kJ SMES Model Coil

Myung-Jin Park*, Sang-Yeop Kwak**, Seoung-Wook Lee*, Woo-Seok Kim*, Seoung-Young Hahn*, Kyeong-Dal Choi⁵,
 Jin-Ho Han⁵, Ji-Kwang Lee⁵⁵, Hyun-Kyo Jung**, Ki-Chul Seong**, Song-yop Hahn*

*Korea Electrical Engineering & Science Research Institute, **Seoul National Univ., *MIT, **Korean Electric Research Institute,
⁵Korea Polytechnic Univ., ⁵⁵Woosuk Univ..

Abstract - 본 논문은 600 kJ SMES 모델 코일의 설계와 전자기력에 의한 모델코일의 스트레스의 해석에 관한 연구 결과를 나타낸다. 모델 코일의 설계에 적용된 초전도 선재는 77 K, 자기장 하에서 115 A인 강화 선재이며, 모델 코일은 두 개의 팬케이크 코일로 구성된 모듈 코일 3개를 적용한 형태로 총 6개 더블 팬케이크 코일로 구성되어 있다. 모델 코일의 임계전류는 전류를 인가하였을 때 코일에서의 최대 수직방향 자장을 이용해 Load Line을 나타내고, 이를 운전온도인 20 K에서의 $B-I_c$ 곡선에 적용하여 결정하였으며 236 A이다. 운전전류는 임계전류의 80 %인 165 A로 결정하였으며, 이는 n-value 손실을 고려한 값이다. 또한 해석적 방법을 이용해 코일에 전류를 인가하였을 때 전자기력에 의한 모델 코일의 radial stress와 hoop stress를 계산하여 나타내었다.

1. 서 론

현재 고온초전도(HTS) 선재를 이용한 Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) 시스템 개발에 관한 연구가 활발히 추진되고 있다. SMES 시스템은 대전류와 고자장하에서 운용되기 때문에 코일의 기계적 안정성을 판단하고 이를 코일의 설계와 제작에 반영하기 위해서는 코일의 스트레스 해석이 반드시 필요하다 할 수 있다. 본 논문에서는 모델 코일의 설계를 위해 고온초전도 선재의 양면에 스테인레스 스틸을 보강한 선재를 이용하였으며, 설계된 모델 코일의 운전전류와 이때 코일 내부에 발생한 코일의 자속밀도 분포를 이용하여 모델 코일에서의 radial stress와 hoop stress를 계산하고 나타내었다.

2. 모델 코일의 설계와 스트레스 해석

2.1 모델 코일의 설계

모델 코일의 설계를 위해 사용된 초전도 선재의 제원을 표 1에 나타내었다. 초전도 선재는 77 K, 자기장 하에서 115 A의 임계전류를 가지며 선재의 양 끝에 스테인레스 스틸을 덧댄 강화선재이다. 초전도 선재의 최대 인장응력은 300 MPa이다. 모델 코일의 운전온도를 20 K로 하여 모델 코일을 설계하였다. 20K하에서 초전도 선재 시편의 임계전류는 77 K에서의 임계전류의 약 5.4배인 624 A이다. 모델 코일은 2개의 팬케이크 코일을 한 개의 모듈로 한 3개의 모듈코일을 축 방향으로 쌓아올렸다. 더블 팬케이크 코일은 전체 턴 수는 282 턴이다. 더블 팬케이크 코일 사이에 1.3 mm 두께의 스페이서를 두어 더블 팬케이크 코일 사이의 절연을 유지하도록 하였다. 모델 코일은 전도냉각 방식을 택하였으므로 냉각관을 더블 팬케이크 위쪽과 아래쪽으로 두었다. 코일을 지지하기 위한 보반의 두께를 고려한 모듈코일의 높이는 37 mm이며, 모델 코일의 전체 높이는 111 mm 이다. 모델 코일에 사용된 초전도 선재의 총 길이는 약 1.3 km이다. 모듈 코일에 대한 자세한 제원은 표 1에 나타내었다. 그림 1은 모듈 코일의 단면도와 3개의 모듈코일로 구성된 모델코일의 형상을 나타낸다.

모델 코일의 운전 전류를 결정하기 위해서는 먼저 모델 코일의 임계전류를 결정해야만 한다. 모델 코일의 임계전류는 20 K에서의 초전도 선재 시편의 $B-I_c$ 특성곡선과 코일의 인가 전류와 이때 발생한 최대 반경방향 축 선재에 수직으로 가해지는 수직방향의 최대값을 이용하여 나타낸 Load Line을 이용하여 결정하였다. 그림 2는 $B-I_c$ 특성 곡선과 Load Line을 나타낸다. 그림 2에서 나타내었듯이 모델 코일의 임계전류는 약 236 A이다. 모델 코일의 운전전류를 결정하기 위해서 초전도선재의 전압-전류의 관계를 나타내는 n-value 모델에 관한 식(1)을 이용하였다.

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c(B)} \right)^{n(B)} \quad (1)$$

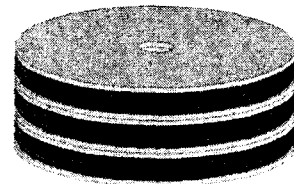
여기서 E_c 는 일반적으로 쓰이는 $1 \mu V/cm$ 기준을 이용하였으며, $J_c(B)$ 는 모델 코일의 임계전류이다. $n(B) = 22$ 의 값을 이용하였다[1]. 그림 2는 식

<표 1> HTS 선재와 모듈 코일의 제원

HTS Tape				
Critical current@ sf, 77 K	115 A			
Reinforcement	soldered Stainless Steel			
Thickness	0.29-0.32 (mm)			
Width	4.0-4.4 (mm)			
Tensile stress	300 (MPa), max			
Module HTS Coil				
No.	Inner Radius (mm)	Outer Radius (mm)	Thickness (mm)	No. of turn
① (Bobbin)	20	155	6	
② (Spacer)	95	155	1.3	
③ (Cooling plate)	95	151.4	1.2	
④ (HTS Coil)	95	151.4	4.4	141



(a) 모듈 코일 (2개의 더블 팬케이크 코일로 구성)



(b) 모델 코일 (3개의 모듈 코일로 구성)

<그림 1> 600 kJ SMES 모델 코일

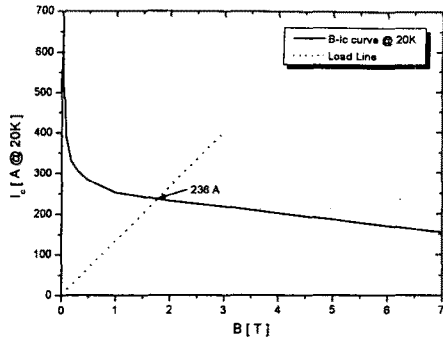
(1)을 이용해 도시한 모델 코일의 $V-I$ 곡선을 나타낸다. 그림 2의 구간 a 사이에서 운전전류를 결정 할 경우 모델코일에 열이 발생해 전도 냉각을 위한 냉동기와 모델 코일에 무리가 갈 수 있으므로 구간 a 이하에서 운전 전류를 결정하였으며 그 값은 임계전류의 80 %인 165 A로 결정하였다. 그림 3은 운전전류가 인가되었을 때 모델 코일의 자속밀도 분포를 나타낸다.

2.2 모델 코일의 스트레스 해석

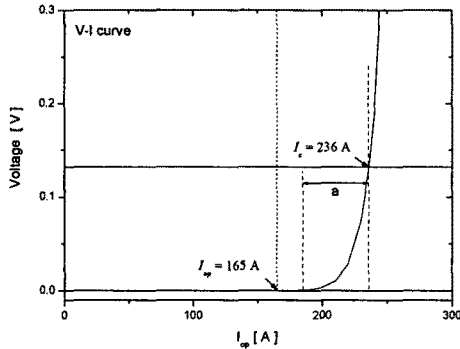
코일에 발생하는 스트레스의 원인은 코일을 권선할 시 선재에 가하는 장력에 의해 발생하는 권선 스트레스와 냉각 시 코일을 구성하는 각 재료의 열팽창률 차이에 의해 발생하는 열 스트레스와 코일에 전류를 인가하였을 때 전자기력에 의해 발생하는 스트레스로 나누어 볼 수 있다. 본 논문에서는 전자기력에 의해 발생하는 스트레스만을 고려하였다.

축대칭 모델에서 $r-\theta$ 평면을 부채꼴 모양의 $r-\theta$ 미세 블록 분할하고 이를 Lorentz Force를 고려한 힘의 평형 방정식을 세우면 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

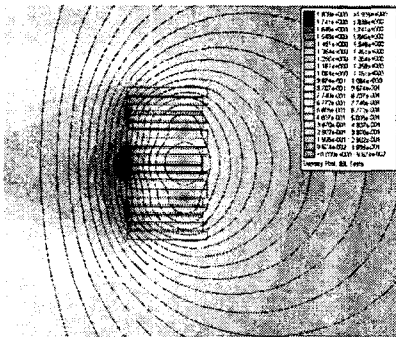
$$r \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \sigma_r - \sigma_\theta + r A(r) B(r) = 0 \quad (2)$$



〈그림 2〉 B-Ic curve 와 Load Line



〈그림 3〉 V-I curve



〈그림 4〉 모델 코일의 자속밀도 분포

여기서 σ_r , σ_h 는 각각 radial 방향의 스트레스와, hoop 방향의 스트레스를 나타내며, $J(r)$ 과 $B(r)$ 은 모델 코일의 전류밀도와 축방향(z) 성분의 자속 밀도 값이다.

hoop 방향과 radial 방향의 변형율은 radial displacement u 를 이용해 나타낼 수 있으며, 이를 generalized Hook's law를 이용하면 식 (3)과 (4)와 같이 σ_r , σ_h 로 표현 할 수 있다[2,3].

$$\sigma_r = \frac{\epsilon_r + \beta_1 \epsilon_h + X_2}{\frac{1}{E_r E_h} - \alpha_1 \beta_1} \quad (3)$$

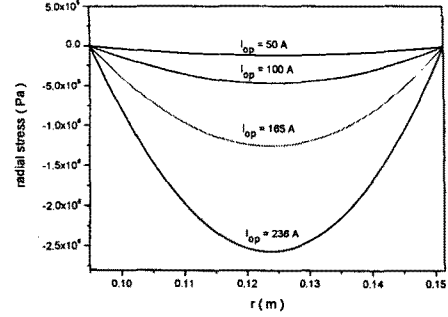
$$\sigma_h = \frac{\epsilon_h + \alpha_1 \epsilon_r + X_2}{\frac{1}{E_r E_h} - \alpha_1 \beta_1} \quad (4)$$

여기서, E , ν 는 각각 탄성계수(Young's modulus), 포아송 비를 나타내며, α_1 , α_2 , β_1 , β_2 , X_1 , X_2 는 아래와 같다.

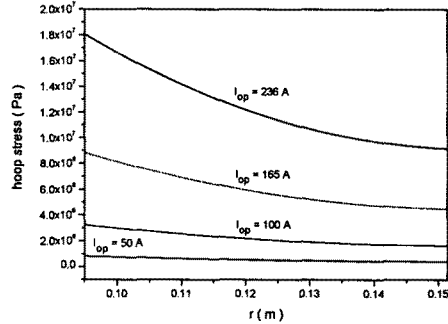
$$\alpha_1 = \frac{\nu_{hr}}{E_r}, \quad \alpha_2 = \frac{\nu_{hz}}{E_z}, \quad \beta_1 = \frac{\nu_{rh}}{E_h}, \quad \beta_2 = \frac{\nu_{rz}}{E_z}$$

$$X_1 = \frac{\alpha_2 \sigma_z - \alpha_h \delta T}{E_r} + \alpha_1 (\beta_2 \sigma_z - \alpha_r \delta T)$$

$$X_2 = \frac{\beta_2 \sigma_z - \alpha_r \delta T}{E_h} + \beta_1 (\alpha_2 \sigma_z - \alpha_h \delta T)$$



〈그림 5〉 운전전류에 따른 모델코일의 radial stress



〈그림 6〉 운전전류에 따른 모델코일의 hoop stress

본 논문에서는 축 방향 스트레스와 열에 대해서는 고려하지 않았으므로 X_1 , X_2 에서 σ_z , α_1 , α_2 , δT 에 대한 항은 모두 0으로 하였다. 식(3)과 (4)를 radial displacement u 에 대해 정리하면 식(5)와 같다.

$$r \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + (\beta_1 E_h + 1 - \alpha_1 E_h) \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{E_h}{E_r} \frac{u}{r} = -E_h r \left(\frac{1}{E_r E_h} - \alpha_1 \beta_1 \right) JB + (X_1 - X_2) E_h \quad (5)$$

식(5)의 해는 $u = u_h + u_p$ 로 하여 r 에 대한 함수로 나타낼 수 있다. 코일의 양 끝단에서의 $\sigma_r = 0$ 의 경계조건을 사용하여 u 를 구하고, 식(3)과 (4)에 대입하면 코일의 각 r 방향 위치에서의 radial stress와 hoop stress를 계산 할 수 있다.

모델 코일에 인가전류를 50 A, 100 A, 165 A, 236 A로 하였을 때 모델 코일의 radial stress와 hoop stress를 그림 5와 6에 나타내었다. 모델 코일의 운전전류인 165 A 일 때 최대 radial stress는 1.25 MPa이며, 최대 hoop stress는 모델 코일의 내경 위치에서 8.8 MPa이다.

3. 결 론

본 논문에서는 77 K, 자기장 하에서 임계전류가 115 A인 강화선재를 이용하여 더블 팬케이크 코일 2개로 이루어진 모델 코일 3개를 적용한 600 kJ SMES 모델 코일을 설계하였다. 모델 코일의 운전전류를 최악의 조건을 고려하여 20 K의 운전온도에서 165 A로 결정하였다. 또한 인가전류에 따른 모델 코일의 전자기력에 의한 radial stress와 hoop stress를 계산하였다. 본 논문의 연구결과는 600 kJ SMES 설계를 위한 기초자료로 활용될 것이다.

감사의 글
본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2004-1-144) 주관으로 수행된 과제임.

[참 고 문 헌]

- [1] M. A. Young et al., "Measurements of the Performance of BSCCO HTS Tape Under Magnetic Fields With a Cryocooled Test Rig", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 13, NO. 2, pp.2964-2967, JUNE 2003
- [2] Martin N. Wilson, Superconducting Magnet, Oxford University Press, 1983.
- [3] 박명진, 광상엽의 "소형 고온초전도 싱글 팬케이크 코일의 전자기력에 의한 Stress 해석", 대한전기학회 하계학술대회, 용평, 2006.