

### 0.7MJ SMES Coil 설계 및 제작

김해중, 성기철, 조전욱, 이연웅, 류강식, 류경우\*  
한국전기연구소, 전남대학교\*

#### Design and Manufacture for the 0.7MJ SMES Coil

H.J. Kim, K.C. Seong, J.W. Cho, E.Y. Lee, K.S. Ryu, K. Ryu\*  
KERI, Chunnam National Univ.\*

**Abstract** - The major part of SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) system consist of the superconducting coil, cryostat and current lead, power converter. The 0.7MJ SMES coil was a design and manufacture by using SMES device that we developed a design code. A SMES coil was wound with high winding tension in order to prevent wire motion from Lorentz force. This paper described optimum design for the SMES coil.

#### 1. 서 론

초전도에너지저장(Superconducting Magnetic Energy Storage: 이하 SMES라 함)장치의 주요 부분은 초전도 코일과 초전도코일을 수용하는 극저온용기(Cryostat) 그리고 초전도코일의 두 단자를 Cryostat외부로 인출하는 전류도입선(Current lead) 및 전력계통으로부터 전력을 변환시켜 공급하는 전력변환기로 나눌 수 있다. 여기에 전류 및 자장 등을 측정하기 위해 계측장치가 부착된다.

SMES용 초전도코일은 수백 A/mm<sup>2</sup>인 고 전류밀도의 급격한 펄스모드로 운전되기 때문에 다른 코일에 비해 매우 가혹한 조건에서 운전된다고 할 수 있다. 따라서 초전도 코일 내부의 도체간의 국부적인 마찰에 의한 국부적인 발열에 의해 초전도코일 전체가 켄치 될 수가 있다. 이러한 불안정성을 줄이고 초전도코일을 고 전류 밀도로 운전하며 초전도도체의 움직임을 줄이기 위해 초전도도체의 기계적 강도 한계내의 장력을 가해 전자력에 의한 도체의 움직임을 없도록 해야하며 냉각 채널을 설치함으로써 초전도코일에 발생하는 발열을 액체 헬륨으로서 효과적으로 냉각시켜줌 으로서 초전도코일의 불안정성을 해결해야한다.

본 논문에서는 이러한 모든 조건을 만족하는 0.7MJ SMES용 초전도 코일의 최적 설계 [1] [2] 및 제작에 대해서 기술 하고자 한다.

### 2. SMES Coil의 설계 및 제작

#### 2.1 SMES Coil의 도체

SMES Coil에 사용한 도체는 GEC Alsthom사의 직경 1mm의 초전도9본소선을 케이블화 시킨 폭4.8mm, 두께 1.8mm의 초전도케이블을 사용했으며 사양을 표1에 나타내었다.

표1. Alsthom9본 케이블 사양

Cable	Width	4.8
	Thickness	1.8
	Number of strands	9
	Transposition pitch	46.0
	Transposition directon	Left
Strand	Diameter	1
	Cu/CuNi/NbTi Ratio	5/1/1
	Twist pitch	19.3
	Twist direction	Right

#### 2.2 SMES Coil의 설계

0.7MJ급의 에너지 저장용량을 갖는 초전도코일의 최적설계를 위한 flow chart를 그림1에 나타내었다.

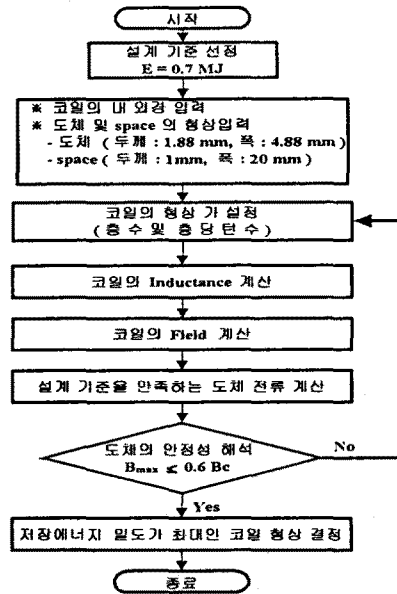


그림1. 0.7MJ SMES Coil 설계 flow chart

그림에서와 같이 코일의 설계기준으로서 저장에너지를 설정한다. 그리고 코일의 내·외경과 도체의 형상 및 냉각채널을 위한 spacer의 형상을 입력한다. 코일의 내경 및 외경은 각각 450mm 및 530mm로하였고 spacer는

두께1mm, 폭20mm의 FRP를 사용하였다. 이를 기준으로 코일의 형상 즉, 층수 및 층당 턴 수를 가설정한후 이 가설정한 형상을 이용하여 코일의 인덕턴스를 계산한다. 또한 도체의 안정성을 고려하여 코일의 임계자장마진(stability margin)을 주었을때 코일의 내벽에서 발생하는 최대자장보다 커야되는 조건을 설정한 후 제약조건을 만족하면 종료하고 그렇지 않으면 다시 새로운 코일 형상을 가 설정하여 지금까지의 과정을 반복한다. 따라서 이번 0.7MJ SMES Coil 설계에서는 코일의 안정성에 비중을 두고 설계를 했다.

또한 코일의 설계기준과 설정한 제약조건을 만족하는 코일의 형상은 많으나 0.7MJ의 에너지 저장용량을 갖는 코일의 제작에 소요되는 초전도도체의 길이가 최소인 코일의 형상을 선택하였다.

표2 및 그림2는 설계한 0.7MJ SMES 초전도코일의 사양 및 코일의 형상을 나타내었다.

표2. 0.7MJ SMES 코일의 사양

	Coil	Inner diameter	450 mm		
		Outer diameter	530.64 mm		
Dimensions	(Bare)	Height	480 mm		
		Conductor fraction	66.93 %		
		Cable	Thickness	1.88 mm	
			Width	4.88 mm	
			Number of layer	14 layers	
	Spacer	Number of turns per layer	97 turns		
		Total number of turns	1358 turns		
	Characteristics	Cable	Total conductor length	2087.6 m	
			Spacer	Thickness	1 mm
				Width	20 mm
Number of layer				14 layers	
Characteristics			Number of spacers per layer	36	
		Total number of spacers	504		
		Stored energy	0.7 MJ		
		Inductance	0.58 H		
		Operating current	1,555 A		
Characteristics		Maximum field	4.48 T		
	Center field	3.89 T			
	Critical condition	2200 A			

단위 [ mm ]

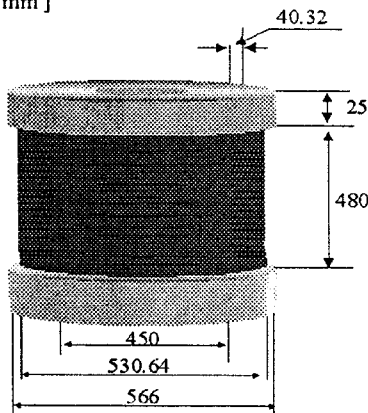


그림2. 0.7MJ SMES 코일의 형상

표 2.에서와같이 코일의 높이는 480이며 코일의 내·외경은 450mm, 530mm이다. 또한 코일의 층수는 전류리드의 인출을 용이하게하기위해 짝수층인 14층으로 했으며 코일의 인덕턴스는 0.58H이며 운전전류는 1555A로 설계했다.

### 2.3 SMES Coil의 제작

초전도코일의 제작시 가장 중요시되는 것은 적정 권선장력에 의해 권선합이 무엇보다 중요하다. 초전도코일 여자시 발생하는 강한 전자력에 의해 코일에는 hoop stress가 작용하며 이는 초전도선재에는 인장력으로 작용하기 때문에 초전도 코일의 특성을 저하시킨다.

따라서 초전도코일의 운전 중에 발생하는 전자력에 의한 초전도선재의 움직임을 방지하기 위하여 코일 권선시 장력을 인가하여 권선 하여야한다. 이러한 이유에서 초전도선재에 걸리는 허용응력을 조사하여 권선시 초전도선재의 허용응력이하로 되도록 장력을 설정하여 권선 하여야 한다 [3] [4]. 그림3은 초전도코일의 반경방향으로 작용하는 자기력에 의한 응력을 나타내고 있다.

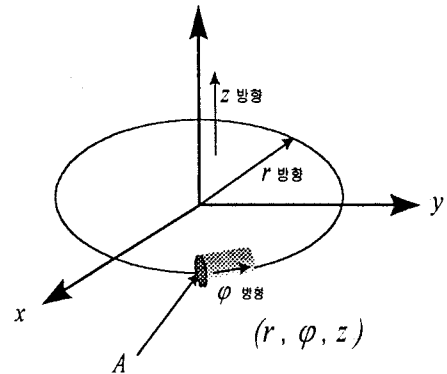


그림3. 초전도코일의 반경방향 응력

초전도코일에 전류를 흘리면 Lorentz force에 의해 코일은 밖으로 튀어 나갈려는 hoop stress를 받는다. 이때 발생하는 hoop stress는 초전도코일의 길이방향의 인장응력(tensile stress)으로 작용한다. 따라서 도체의 전류밀도를  $J$  [A/cm<sup>2</sup>], 자장을  $B$  [Gauss], 코일의 반경을  $R$  [cm] 이라 하면 초전도 코일의 선재에 작용하는 인장응력  $\sigma_m$ 은 다음 식과 같다 [5].

$$\sigma_m = J_{\phi} B_z R \text{ [N/m}^2\text{]}$$

그리고  $\phi$  방향 권선응력은 권선장력에의한 응력으로서 다음 식과 같다.

$$\sigma_w = \frac{T}{A} \text{ [kgf/mm}^2\text{]}$$

GEC Alsthom사 제공 초전도선재의 항복강도는 약 400MPa 즉, 40kgf/mm<sup>2</sup>였다.

이와 같이 모든 조건을 고려해서 0.7MJ SMES 코일에서의 권선응력은 약 100kgf로 하였다.

또한 SMES용 초전도코일은 에너지 총·방전 시간이 짧은 펄스 코일이므로 코일 운전시 많은 교류손실이 발

생한다. 이와 같이 교류손실에 의해 발생하는 열을 흡수하기 위해 코일의 보빈은 냉각채널을 가진 구조로 설계했으며 이러한 냉각채널을 만들기 위해 spacer를 각 층 사이에 삽입하여 액체헬륨에 의한 냉각효과를 높였다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 0.7MJ급 SMES Coil의 최적설계에 의한 코일제작의 검증을 위해 소형 초전도 코일을 선 제작해 설계에 대한 검증을 거쳤으며 특히 SMES용 코일의 실험방법 습득과 코일의 부하선 실험에서 코일임계전류의 약97%까지 가는 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 SMES Coil의 최적설계 프로그램의 개발로 인해 차후 중·대형 SMES 시스템 개발의 기술확보에 기여 하리라 생각된다.

본 연구는 통상산업부의 에너지자원기술개발지원센터의 지원에 의한 것이며 이에 감사드립니다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] 류강식의 26인, "UPS용MES의 소형 초전도코일 및 전력변환기 요소기술개발에 관한 중간보고서 (1차년도)", 통상산업부, pp.87-100, 1996.
- [2] 류강식의 27인, "UPS용MES의 소형 초전도코일 및 전력변환기 요소기술개발에 관한 중간보고서 (2차년도)", 통상산업부, pp.208-227, 1997.
- [3] M.N.Wilson, "Superconducting Magnets", Oxford University Press, p.55, 1983.
- [4] Richard P. Reed, et al., "Materials At Low Temperatures", American Society for Metals, p.499, 1983.
- [5] D.Bruce Montgomery, "Solenoid Magnet Design", Robert E. Krieger Company, p.109, 1980.