

## μ SMES 마그네트용 Model Coil의 제작 및 특성시험

김해중, 성기철, 조전욱, 이연용, 권영길, 류강식, 류경우\*  
한국전기연구원, \*전남대학교

### Fabrication and Test of the Model Coil for a μ SMES Magnet

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

hjkim@keri.re.kr

**Abstract** - For the development of a small-sized superconducting magnetic energy storage (SMES) system we designed, fabricated and tested the model coil consisting five coils with different features, e.g. winding tensions, bore diameters and materials, cooling channels. The results show that even in the highly pre-stressed small coil A, about 70 % of the coils critical current are degraded. The quench current of the coils A, B and E with narrow cooling channels is two times as high as that of the coil C without them though they are similar except spacers. The test results also indicate that the usual training effect depends on the winding tensions of the coils but the quench characteristic does not change according to materials of a bobbin.

### 1. 서 론

민감하고 중요한 부하에 고품질의 전력을 공급할 목적으로 수 십년 동안 초전도자계에너지저장(이하 SMES) 장치에 대해 연구 및 개발이 되어왔다. 이러한 장치는 전력품질을 제어하기 위한 작은 규모의 SMES(이하 μSMES) 와 부하 평준화를 목적으로 하는 대용량 SMES 장치에 이르기까지 다양하다. 현재 민감하고 중요한 부하에 고품질의 전력 공급을 목적으로 하는 저장용량이 수 MJ급의 μSMES장치를 개발하고 있다. 본 논문에서는 이와 같은 μSMES 장치 개발의 전 단계 연구로서 각종 효과를 분석하기 위한 model coil에 대한 제작 및 켄치 특성에 대해 검토하였다.

### 2. 실험

#### 2.1 도체 및 Model Coil

μSMES용 마그네트의 개발을 위해 교류손실

보다는 안정성에 비중을 두고 고 동비의 kA급 초전도도체를 선정했다. 각 소선 사이는 절연되지 않은 9개의 소선으로 구성되었으며, 도체의 단면은 거의 사각형이다. 또한 두께 25μm 과 폭 10mm의 Kapton 테이프로 도체 주위를 나선형으로 둘러싸서 턴간의 절연을 했으며, 본 시험에 사용된 도체의 주요 사양은 표 1에 나타내었다. 그리고 시험에 사용된 model coil은 5개의 각기 다른 특성으로 설계 및 제작되었으며, 각 코일의 주요사양은 표 2와 같다.

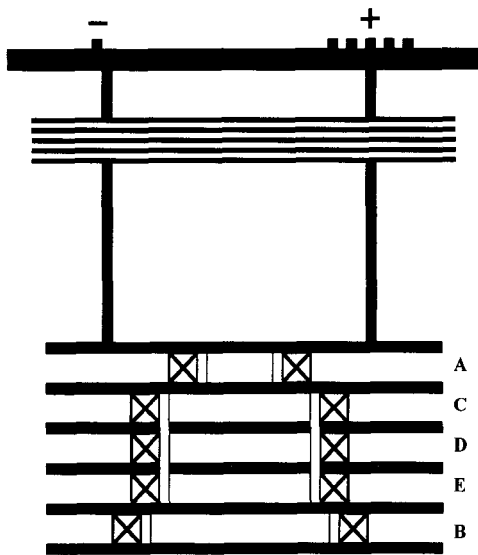
Table I. Parameters of the wire and conductor

Wire	NbTi/CuNi/Cu ratio	1/1/5
	Diameter	1 mm
	Filament diameter	5 μm
	Filament twist pitch	19.5 mm
	Number of filaments	5712
	RRR	120
	Insulation	Bare
Conductor	Dimension	4.8 mm×1.8 mm
	Number of wires	9
	Transposition pitch	45 mm
	Transposition direction	Left
	Critical current	3375 at 4T

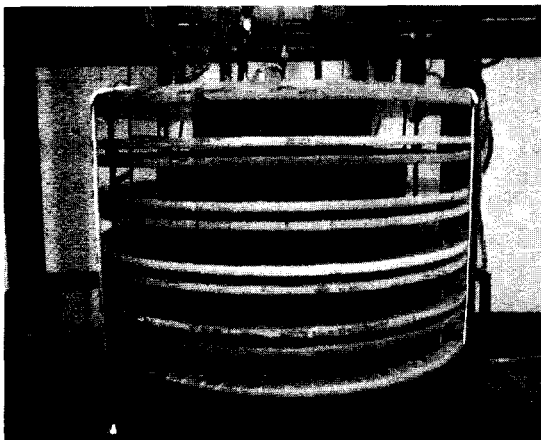
Table II. Specification of the Model coil consisting of five coils

Coil	A	B	C	D,E
I · D (mm)	300	600	450	450
O · D (mm)	392	692	510	542
Height (mm)	49	49	49	49
No. of layers	16	16	16	16
No. of turns	160	160	160	160
Length of conductor (mm)	175	325	241	250
Stored energy (kJ)	13	32	23	22
Inductance (mH)	12	29	20.8	20
Operating current (kA)	1.5	1.5	1.5	1.5
Maximum field (T)	2.3	2.1	2.5	2.1

퀵치에 대한 마그네트의 권선 장력 효과를 조사하기 위하여 코일 A, B, C, E는 소선의 움직임을 막기 위해 약  $80 \text{ N/mm}^2$ 의 강한 권선 장력으로 권선 하였으며, 코일 D는  $8 \text{ N/mm}^2$ 의 약한 권선 장력으로 권선 하였다. 코일 C는 냉각채널 효과를 조사하기 위하여 스페이스 없이 제작하였으며, 다른 모든 코일들은 소선의 움직임에 의한 열을 제거하기 위해 두께  $1\text{mm}$  폭  $5\text{mm}$ 의 FRP 냉각 스페이스를 코일의 각 층 사이에 규칙적으로 사용하였다. 표 2에 나타난 것과 같이 model coil은 3가지 크기의 내직경인  $300\text{mm}$ ,  $450\text{mm}$ ,  $600\text{mm}$ 로 제작되었으며 이는 일반적으로 직경  $500\text{mm}$  이상에서는 코일의 특성이 나빠진다는 size effect를 검증하기 위하여 제작되었다. [1,2] 모든 코일의 보빈은 FRP로 제작되었으나 코일 E는 304 스테인레스 스틸로 제작했으며 그림 1에 model coil의 개략도와 사진을 나타내었다. 실험에 사용된 cryostat는 펄스 운전시 eddy current 손실을 줄이기 위해 비자성 스테인레스 스틸로 제작되었다.



a) Schematic



b) Photo

Fig. 1. Assembled model coil

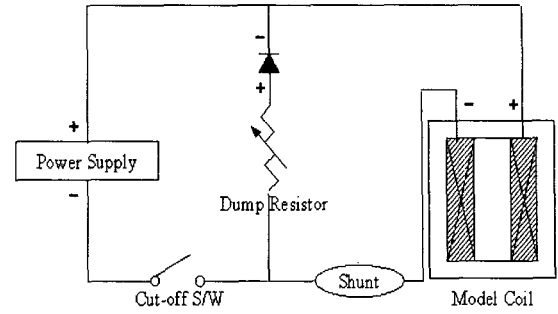


Fig. 2. Schematic of the test apparatus

그림 2에는 실험장치의 개략도를 나타내었다. 그림에서와 같이 model coil의 시험 중 퀵치시 코일의 보호를 목적으로 하는 dump 저항은 코일 양단에 병렬로 연결하였다. 그리고 퀵치시 빠른 검출을 위해 Bridge 회로를 이용한 퀵치 검출법을 사용하였으며, 정확하고 빠른 퀵치 검출을 위해 각 model coil의 중심 전압탭의 신호점은 인덕턴스가 거의 같은 지점에서 인출하도록 설계 및 제작하였다.

## 2.2 실험결과 및 검토

그림 3에는 코일 A, B, E의 외부자장에 대한 퀵치 전류를 나타내었다. 이 코일들은 비슷한 자장상수를 가지는데 A 코일은  $1.5 \text{ mT/A}$  그리고 B 와 E 코일은  $1.4 \text{ mT/A}$ 이다. 그림에서는 코일의 퀵치 전류 데이터와 함께 부하선과 샘플도체의 임계전류를 나타내었다. 이 코일들은  $8\text{A/s}$  전류 상승률로  $900\text{A}$ 까지 성공적으로 충전시켰으며 그 후에 퀵치가 발생했다. 이때 퀵치전류는 코일의 임계전류의 약 30% 수준이며, 직경이 큰 코일에서는 training effect 없이 큰 전류의 열화가 나타났다. 이러한 시험 결과는  $138 \text{ N/mm}^2$ 의 강한 장력으로 권선 한 소형 model 코일의 퀵치 전류 시험결과[1]와 비슷하다.

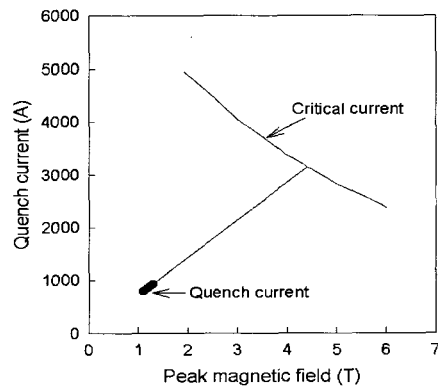


Fig. 3. Quench current of the coils A,B,E

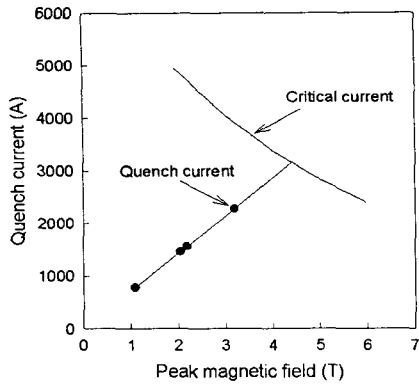


Fig. 4. Quench current of the coil D

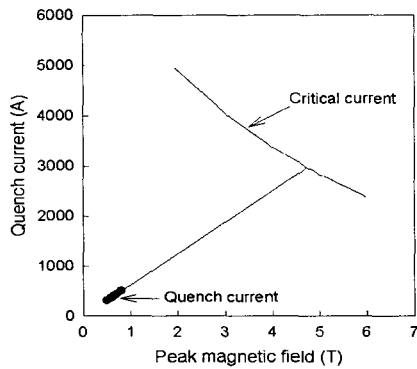


Fig. 5. Quench current of the coil C

그림 4는 약한 권선 장력으로 제작된 코일 D의 외부자장에 대한 퀠치 전류 특성을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 약 850A에서 첫 번째 퀠치가 일어났으며, training effect에 의해 퀠치 전류도 증가하여 최종적으로는 약 2300A까지 퀠치 전류가 상승했다. 이러한 퀠치 전류는 D 코일 임계전류의 약 73%에 해당한다.

그림 5는 냉각 스페이스가 없는 코일 C의 퀠치 전류 특성으로써 약 450A정도에서 퀠치가 발생했으며 이는 코일 임계전류의 약 15% 정도이다. 이러한 결과는 냉각 스페이스를 가진 A, B, E 코일 퀠치 전류의 절반에 불과하다.

### 3. 결론

민감한 전력부하를 보호하는  $\mu$ SMES 장치의 개발을 목적으로 5개의 코일로 구성된 model coil을 설계, 제작 및 시험하였다. 본 연구에서 제작된 model coil에 대한 시험 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 고 장력으로 권선된 내직경 300 mm이상의 코일에서는 size effect에 의해 퀠치 전류

열화가 일어났다.

- 2) 일반적으로 training effect는 약한 권선 장력으로 권선된 코일에서 나타났다.
- 3) 냉각 채널이 없는 코일의 퀠치 전류는 냉각 채널을 가진 코일보다 더욱 심하게 전류 열화가 일어났다

본 연구는 산업자원부의 지원에 의해 수행한 연구결과입니다.

### [참고 문헌]

- [1] K. Ryu, H.J. Kim, K.C. Seong, J.W. Cho, E.Y. Lee, H.B. Jin, and K.S. Ryu, "Test results of the small model coil for a small-sized superconducting magnetic energy storage device," IEEE Trans. Magn., vol.35, pp.4103 - 4105, 1999.
- [2] M.N. Wilson, "Superconducting Magnets," Oxford University, New York, pp.89-90, 1983.
- [3] Y. Iwasa and M. W. Sinclair, "Protection of large superconducting magnets: Maximum permissible undetected quench voltage," cryogenics, vol. 20, p.711, 1980.