

μ SMES 마그네트용 모델 코일의 퀘치 특성

Quench Characteristic of the Model Coil for a μ SMES Magnet

김해중*, 성기철*, 조전욱*, 김석환*, 이언용*, 권영길*, 류강식**, 류경우#

H. J. Kim*, K. C. Seong*, J. W. Cho*, S. W. Kim*, E. Y. Lee*, Y. K. Kwon*, K. S. Ryu**, and K. Ryu#

Abstract : For the development of a small-sized superconducting magnetic energy storage (μ SMES) system we designed, fabricated and tested a model coil consisting of 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 the quench currents of the coils are degraded to about 70 % of their coils critical current. The quench currents of the coils with narrow cooling channels are two times as high as that of the coil without 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 the bobbin.

Key Words : Model coil, narrow cooling channel, quench current degradation, small-sized superconducting magnetic energy storage, winding tension.

1. 서 론

민감하고 중요한 부하에 고 품질의 전력을 공급할 목적으로 이미 수 년 전부터 초전도에너지저장(이하 SMES) 장치에 대해 연구·개발이 되어왔다. 이러한 장치는 현재 상용화되어진 전력품질 제어용인 소형 규모인 SMES(이하 μ SMES)부터 부하 평균화를 목적으로 하는 저장용량이 수천 MWh급의 대형 규모에 이르기까지 다양하다. 현재 민감하고 중요한 부하에 고품질의 전력 공급을 목적으로 하는 저장용량이 수 MJ급의 μ SMES장치를 개발하고 있다. 이와 같은 SMES장치의 가장 중요한 요소인 초전도마그네트는 급속한 충·방전운전 시 초전도도체에서 발생하는 교류손실을 액체헬륨으로 신속하게 제거할 수 있는 장점 때문에 비합침 구조의 마그네트로 제작되고 있다. 이러한 마그네트에서 퀘치는 소선의 움직임과[1] 같은 매우 국부적인 외란으로 발생한다. 따라서 마그네트의 권선 장력에 따른 기계적인 불안정성에 대해 조사했다[2].

마그네트 안정성의 다른 큰 영향으로는 도체로 부터

냉매의 열 전달 특성이다. 도체와 액체헬륨사이의 열 전달은 마그네트의 폭이 좁은 냉각채널에서 일반적으로 일어난다. 이러한 과정의 효율성은 도체의 절연 및 냉각구조 등 몇 가지 특성에 의해 결정되어진다[3]. 따라서 μ SMES 마그네트의 효율적인 설계는 마그네트의 권선 장력 및 냉각구조와 연관되어진 각종 특성이 요구되어진다.

모델 코일은 주어진 저장에너지를 만족하면서 μ SMES 마그네트를 위한 요소 와 크기를 결정할 수 있으며, 이미 개발된 코드를 사용하여 설계 및 제작되었다[4]. 본 논문에서는 μ SMES 장치 개발을위한 전 단계 연구로서, 직경, 권선 장력, 냉각 채널 및 보빈 재질에 따른 퀘치 특성을 조사하였으며, 이를 위한 시험용 코일의 제작 및 시험결과를 나타내었다.

2. 시 험

2.1. 도체

실험에 사용된 초전도도체는 AC loss를 줄이기 위한 안정성에 비중을 두었으며, 여러 도체중 고 동비의 kA급 초전도케이블을 선택하였다. 도체는 9개의 소선으로 구성되었으며, 소선 사이는 절연되지 않았고 단면은 거의 사각형 구조이다. 턴간의 절연은 두께 25 μ m, 폭 10mm의 Kapton tape으로 도선 주위를 나선형으로 감았다. 그림 1에 도체의 단면모양을 나타내었으며, 주요 사양은 표 1에 나타내었다.

2.2. 모델 코일

모델 코일은 5개의 시험용 코일로 구성되었으며, 각기 다른 특성으로 설계, 제작되었으며, 각 코일에 대한 주요사양은 표 2에 나타내었다.

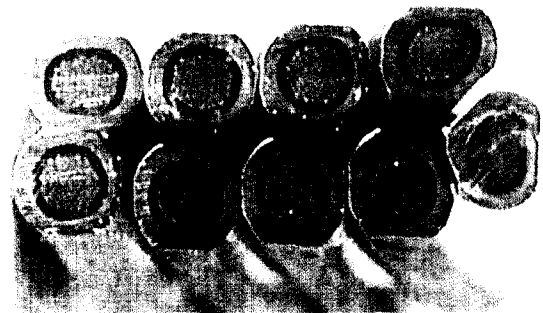


그림 1. 도체의 단면

Fig. 1. Cross-section of the conductor

퀘치에 대한 마그네트의 권선 장력 효과를 조사하기 위하여 코일 A, B, C, E는 소선의 움직임을 막기

* 정 회 원 : 한국전기연구원 초전도응용연구그룹

** 정 회 원 : 차세대초전도응용기술개발사업단

정 회 원 : 전남대학교 전기공학과

원고접수 : 2001년 09월 05일

심사완료 : 2001년 10월 30일

위해 약 80 N/mm의 강한 권선 장력으로 권선 하였으며, 코일 D는 8 N/mm의 약한 권선 장력으로 권선 하였다. 코일 C는 냉각채널 효과를 조사하기 위하여 스페이스 없이 제작하였으며, 다른 모든 코일들은 소선의 움직임에 의한 열을 제거하기 위해 두께 1mm, 폭 5mm의 FRP 냉각 스페이스를 코일의 각 층 사이에 규칙적으로 사용하였다.

표 1. 도체의 사양

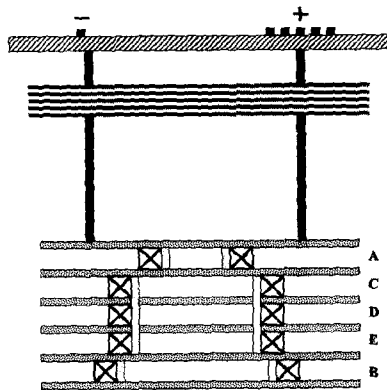
Table 1. Specifications of the conductor

Wire	NbTi/CuNi/Cu	1/1/5
	RRR	120
	Diameter	1 mm
	Filament diameter	5 μm
	Number of filaments	5712
	Filament twist pitch	19.5 mm
	Filament twist direction	Right
Conductor	Yield strength	40×10 ⁶ kgf/m ²
	Insulation	Bare
	Dimension	4.8mm×1.8mm
	Number of wire	9
	Transposition pitch	45 mm
	Transposition direction	Left
Critical current		3375 A at, 4T
		2385 A at 6T

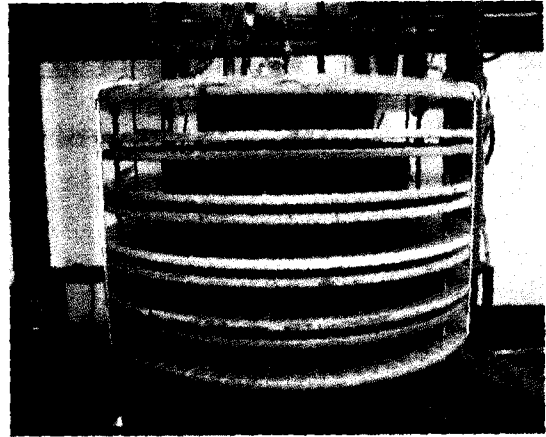
표 2. 모델 코일의 주요사양

Table 2. Specification of the Model coil

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



a) Schematic



b) Photo

그림 2. 조립된 모델 코일 개략도 및 사진
Fig. 2. Schematic and photo of assembled model coil

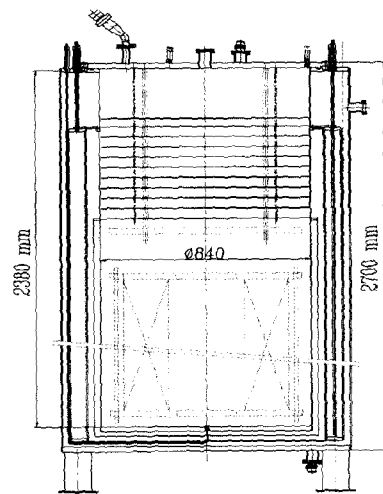


그림 3. 극저온용기 개략도
Fig. 3. Schematic of the cryostat

표 2에 나타난 것과 같이 모델 코일은 3가지 크기의 내직경인 300mm, 450mm, 600mm로 제작되었으며 이는 일반적으로 직경 500mm 이상에서는 코일의 특성이 나빠진다는 size effect를 검증하기 위하여 제작되었다[5]. 모든 코일의 보빈은 FRP로 제작되었으나 코일 B는 304 스테인레스 스틸로 제작했으며 그림 2에 모델 코일의 개략도 와 사진을 나타내었다.

실험에 사용된 극저온용기(cryostat)는 비자성 스테인레스 스틸로 제작되었으며 그림 3에 개략도를 나타내었다. 모델 코일은 원통모양의 액체 헬륨조의 안쪽에 위치했으며, 액체 헬륨 조는 스테인레스 스틸의 액체 질소 조로 둘러 싸여져있다. 그리고 측정을 위해서 극저온용기에는 액체 헬륨 level sensor 와 온도 sensor를 부착시켰으며, 고 효율의 헬륨가스로 냉각되는(gas-cooled) 전류 리드를 제작하여 부착 시켰다.

2.3. 시험장치

μSMES용 초전도마그네트의 최적 설계/제작 및 각종 실험 데이터의 사전 도출을 목적으로 제작된 모델

코일 특성 시험용 시험장치의 개략도는 그림 4에 나타내었다. 모델 코일의 시험에서 퀘치시 모델 코일의 보호를 위해 코일 단자에 병렬로 보호 저항을 연결했으며, 이때 보호 저항을 통해 1600A 이상 내 전류가 녹는점 없이 수초 동안 흘릴 수 있게했으며, 사용된 저항은 최대 500 m Ω 까지 가변 할 수 있게 했다. 또한, μ SMES 장치 개발에서 가장 중요한 문제 중 하나가 확실하고 민감한 퀘치 검출이다.

본 시험에서는 퀘치시 빠른 검출을 위해 브리지 회로를 이용한 퀘치 검출법을 사용하였으며[6], 정확하고 빠른 퀘치 검출을 위해 각 모델 코일의 중심 전압 탭의 신호점은 인덕턴스가 거의 같은 지점에서 인출하도록 설계 및 제작하였다. 그리고 사용된 브리지 회로의 저항은 각각 9.1 k Ω 과 10 k Ω 으로 구성되었다.

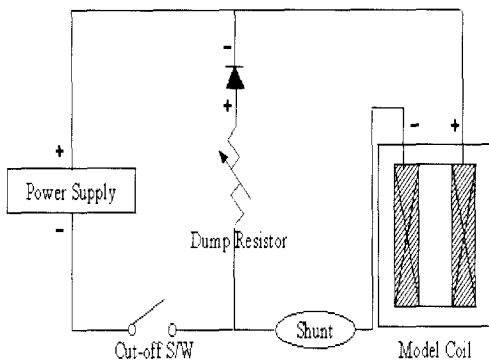


그림 4. 시험장치 개략도
Fig. 4. Schematic of the apparatus

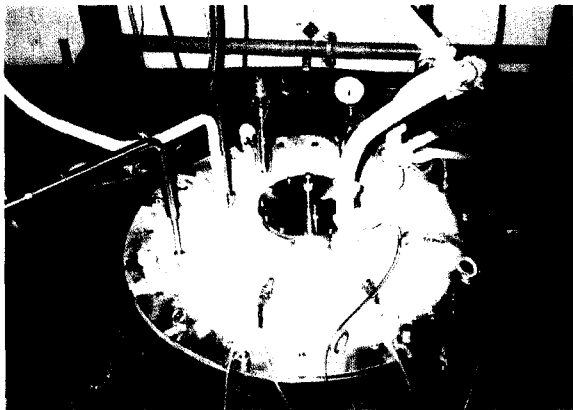


그림 5. Cryostat 및 model 코일 냉각
Fig. 5. Cooling of the cryostat and the model coil

3. 실험결과

극저온용기와 모델 코일은 그림 5에서와 같이 액체 헬륨의 loss를 줄이기 위해 상온부터 77 K 까지 액체 질소로 냉각한 후, 극저온용기의 액체 질소를 모두 제거하고 액체 헬륨으로 채웠다. 상온인 290 K에서 액체 헬륨 온도인 4.2 K까지 냉각에 걸린 시간은 약 2일이 소요되었다. 그림 6에는 코일 A, B, E의 외부자장에 대한 퀘치 전류를 나타내었다.

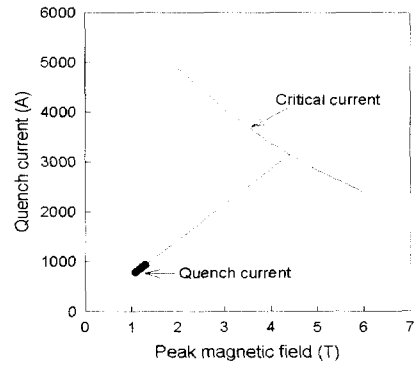


그림 6. 코일 A, B, E의 퀘치전류와 부하선
Fig. 6. Quench current and load line for the coils A, B, and E.

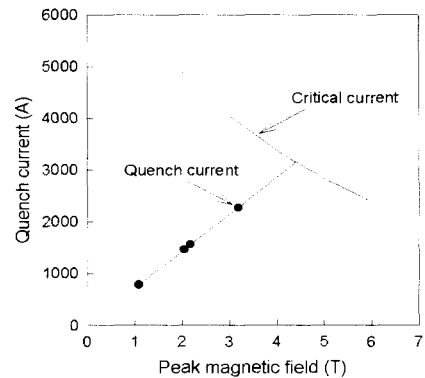


그림 7. 코일 D의 퀘치 전류 및 부하선
Fig. 7. Quench current and load line for the coil D

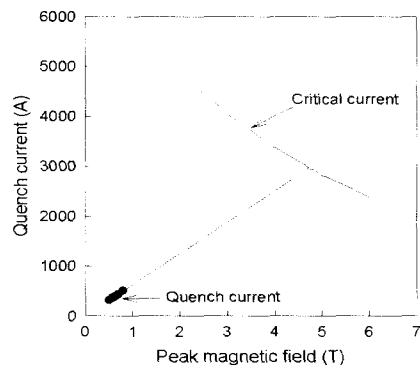


그림 8. 코일 C의 퀘치 전류 및 부하선
Fig. 8. Quench current and load line for the coil C

시험용 각 코일들은 같은 조건에서 2-3회씩 반복 시험했으며, 코일 D를 제외하고는 퀘치전류 변화가 나타나지 않았으나, 코일 D의 경우는 매 시험시 큰 폭의 퀘치전류 상승이 관찰되었다.

시험용 코일들은 비슷한 자장상수를 가지는데 A 코

일은 1.5 mT/A 그리고 B 와 E 코일은 1.4 mT/A 이다. 그림에서는 코일의 퀘치 전류 데이터와 함께 부하선과 샘플 도체의 임계전류를 나타내었다. 이 코일들은 8A/s 전류 상승률로 900A까지 성공적으로 충전 시켰으며 그 후에 퀘치가 발생했다. 이때 퀘치전류는 코일 임계전류의 약 30% 수준이며, 직경이 큰 코일에서는 training effect 없이 큰 전류의 열화가 나타났다. 이러한 시험 결과는 138 N/mm의 강한 장력으로 권선 한 소형 코일의 퀘치 전류 시험결과와 비슷하다[4].

그림 7은 약한 권선 장력으로 제작된 코일 D의 외부자장에 대한 퀘치 전류 특성을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 약 850A에서 첫 번째 퀘치가 일어났으며, training effect에 의해 퀘치 전류도 증가하여 최종적으로는 약 2300A까지 퀘치 전류가 상승했다. 이러한 퀘치 전류는 D 코일 임계전류의 약 73%에 해당한다.

그림 8은 냉각 스페이스가 없는 코일 C의 퀘치 전류 특성으로써 5 A/s의 전류상승률로 약 450A정도에서 퀘치가 발생했으며 이는 코일 임계전류의 약 15% 정도이다. 이러한 결과는 냉각 스페이스를 가진 A, B, E 코일 퀘치 전류의 절반 에 불과 하다.

4. 결 론

민감한 전력부하의 보호를 위한 소규모 SMES 장치의 개발과 관련된 각종 요소기술을 확보하기 위하여 5개의 코일로 구성된 시험용 코일을 설계, 제작 및 특성 평가하였으며, 이들 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 고 장력으로 권선된 내직경 300 mm이상의 코일에서는 training effect가 발생하지 않고 전류열화가 일어났으며, 저장력으로 권선한 코일에서는 training effect에 의해 퀘치전류가 임계전류까지 근접함을 알 수 있었다.
- 2) 냉각 채널이 없는 코일의 퀘치 전류는 냉각 채널을 가진 코일보다 더욱 심하게 전류 열화가 일어났다.
- 3) FRP 보빈과 재질이 다른 스테인레스 보빈에서도 보빈 재질에따른 퀘치 특성에는 변화가 없다.

감사의 글

본 논문은 산업자원부의 지원에 의해 수행한 연구결과입니다

참 고 문 헌

[1] K. Ryu, P. Michael, O. Tsukamoto, and N. Amemiya, Stability of cable-in-conduit internally cooled superconductors subject to local disturbance-stability analysis based on measured transient heat transfer of SHE in narrow channel, Cryogenics, Vol. 34, pp. 603-606, 1994.

[2] K. Ryu, H. J. Kim, K. C. Seong, S. S. Oh, J. W. Cho, E. Y. Lee, H. B. Jin and K. S. Ryu, Characteristics of the kA class superconducting

coil with high winding tension, Proceedings of the seventeenth International Cryogenic Engineering Conference, UK, pp. 559-562, 1998.

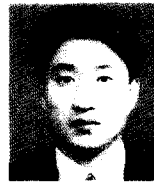
[3] S. S. Ivanov, N. N. Balashov and I. O. Shchegolev, Influence of superconducting structure on conductor cryostability, Cryogenics, Vol. 34, No. 12, pp. 1011-1014, 1994.

[4] 김해중, 성기철, 조전욱, 진홍범, 류강식, 류경우, "μSMES코일용 초전도도체의 전류용량에 관한 연구", 제1권, 1호, 1999.

[5] M. N. Wilson, Superconducting Magnets, Oxford University, New York, 1983, pp.89-90.

[6] Y. Iwasa and M. W. Sinclair, Protection of large superconducting magnets: maximum permissible undetected quench voltage, Cryogenics, Vol. 20, p. 711, 1980.

저 자 소 개



김해중(金海鍾)

1965년 11월 25일생, 1993년 경상대학교 전기공학과 졸업, 1995년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 1995년~1996년 (주)현대정공 근무, 1996년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원



성기철(成耆哲)

1956년 2월 20일생, 1980년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1983년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 1986년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 책임연구원



조전욱(趙全旭)

1960년 3월 2일생, 1983년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1985년 동대학원 전기공학과 졸업, 2001년 연세대학교 전기공학과 졸업(공학박), 1990년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원



김석환(金錫煥)

1964년 1월 12일생, 1986년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1993년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박), 1994년~1996년 일본 고에너지 물리학연구소 연구원, 1996년~1999년 CERN 연구원, 1999년~2001년 미국 Fermi 연구소 연구원, 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원



이언용(李彦容)

1960년 5월 13일생, 1984년 창원기
능대학 전기공학과 졸업, 1986년~현
재 한국전기연구원 초전도응용연구구
룹 책임기사



권영길(權永吉)

1959년 7월 28일생, 1982년 부산대
학교 기계공학과 졸업, 1990년 동 대
학원 기계공학과 졸업(공박), 1992
년~1999년 한국전기연구원 선임연구
원, 1999년~현재 한국전기연구원 초
전도응용연구그룹 그룹장



류강식(柳康植)

1958년 8월 5일생, 1980년 한양대학
교 전기공학과 졸업, 1987년 동 대학
원 전기공학과 졸업(공박), 1988년~
1993년 한국전기연구소 초전도연구실
실장, 1993년~1999년 한국전기연구
원 초전도응용연구사업팀장, 1999년
~2001년 한국전기연구원 전략기술
연구단 단장, 현재 차세대 초전도응용
기술개발 사업단장



류경우(柳暎佑)

1962년 2월 10일생, 1983년 인하대
학교 전기공학과 졸업, 1985년 서울
대학교 대학원 전기공학과 졸업(석
사), 1995년 일본 Yokohama
National Univ. 전자정보공학과 졸
업(공박), 1986년~1995년 한국전기
연구소 선임연구원, 1996년~현재 전
남대학교 전기공학과 부교수