

kA급 초전도도체의 퀘칭 특성

김해중, 성기철, 조전욱, 권영길, 류강식, 최병주*, 류경우**
 한국전기연구소, 서라벌대학*, 전남대학교**

Quench Characteristics of a kA class Superconductor

H. J. Kim, K. C. Seong, J. W. Cho, Y. K. Kwon, K. S. Ryu, B. J. Choi*, K. Ryu**
 KERI, Sorabol college*, Chonnam National Univ.**

hjkim@keri.re.kr

Abstract - As the earlier step of the fabrication of the SMES magnet, a kA class superconductor with a high copper ratio was selected as a candidate conductor. The superconductor was tested in two points of view, which are basic and important in development of the SMES magnet. First stabilities of the superconductor against localized disturbances such as wire motions were measured by using a wire heater. Second the quench current characteristics for different charge rates were also tested.

1. 서 론

민감한 부하에 고품질의 전력을 공급하기 위한 목적으로 저장용량이 수 MJ인 SMES용 마그네트를 개발하고 있다. 따라서 안정성 및 신뢰성이 우수한 마그네트 제작을 위한 전 단계로써 선정된 kA급 초전도도체에 대하여 마그네트의 설계 및 제작에 있어서 중요한 두가지 관점에서 시험을 했다. 첫째, 초전도선의 운동을 고려하여 국부적인 발열에 대한 도체의 안정성을 선 히터를 이용해 측정하였으며 둘째, SMES 장치의 빠른 펄스 운전모드를 고려하여 여러 가지 전류상승율(current ramp rate)에 대한 도체의 퀘칭 특성을 시험했다. 본 논문에서는 SMES용 마그네트의 후보 도체로 선정된 kA급 초전도도체에 대한 안정성 및 퀘칭 시험결과에 대해 검토를 하였다.

2. 실 험

SMES용 마그네트의 개발을 위해 교류손실보다는 오히려 안정성에 비중을 두어 동비가 비교적 큰 kA급 초전도도체를 후보도체로써 선정했다. 시험에 이용된 도체의 중요한 사양을 표1에 나타내었다.

안정성과 퀘칭 시험을 위한 시험샘플은 길이가 약 1.6 m인 도체를 직경 50 mm, 높이 130 mm인 보빈에 피치를 10 mm로 하여 권선 하였다. 또한 도체를 액체헬륨과의 접촉이 잘 되도록 하기 위하여 보빈 원주상에는 깊이 1 mm, 폭이 10 mm

Table 1 Parameters 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
	Yield strength	$40 \times 10^6 \text{ kgf/m}^2$
	Insulation	Bare
	Conductor	Dimension
Number of wire		9
Transposition pitch		45 mm
Transposition direction		Left
Critical current		3375 A at 4T 2385 A at 6T

인 냉각 채널을 동일한 간격으로 배치시켰다. 시험 샘플의 권선 장력은 이전의 실험의 결과를 고려하여 비교적 강한 장력인 약 70 N/mm로 하였다[1].

시험샘플은 안정성 및 퀘칭 실험동안 솔레노이드형 초전도마그네트의 중앙에 배치시켜 외부자장을 인가하였으며 3 ~ 6 T의 외부자장에 대하여 도체 특성을 조사하였다. 시험샘플용 전원은 10 V, 3000 A 전원으로, 외부자장 인가용 마그네트와 히터용 전원은 각각 10 V, 500 A 전원 및 150 V, 30 A 펄스전원으로 하였다. 시험샘플, 외부자장 인가용 마그네트와 히터의 전류는 시험샘플 및 히터의 전압탭 신호와 함께 디지털 스코프로 측정하였다.

3. 실험 결과 및 검토

그림 1에는 각각의 상이한 외부자장에 대하여 도체의 운전전류에 따른 시험샘플의 최소퀘치에너지를 나타내었다. 그림 1에서 보는 바와 같이 동일한 운전전류에 대해서 외부자장이 4 T일 때 최소 퀘치에너지가 6 T일 경우와 비교하여 약 10배정도 크다. 즉 동일한 운전전류에 대해서는 외부자장이 낮을수록 초전도도체는 더욱 안정함을 알 수 있다.

그림 2에는 히터의 펄스 폭에 따른 시험샘플의 최소퀠치에너지를 나타내었고, 그림 2로부터 최소 퀠치에너지는 10 ms 이하 범위에서는 실질적으로 히터의 펄스 폭에 의존하지 않지만 이보다 커지면 펄스 폭이 증가함에 따라 최소퀠치에너지는 매우 급격히 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 이전의 실험결과들과도 잘 일치하고 있다[2-3].

그림 3에는 외부자장에 따른 시험샘플의 회복전류에 대한 실험 결과를 나타내었으며 회복전류와의 비교를 위하여 측정된 임계전류를 함께 나타내었다. 또한 식(1)로부터 계산된 회복전류도 그림 3에 나타내었다[4].

$$I_r = \frac{-1 + \sqrt{1 + 8a}}{2a} I_c \quad (1)$$

$$a = \frac{\rho I_c^2}{APh(T_c - T_b)} \quad (2)$$

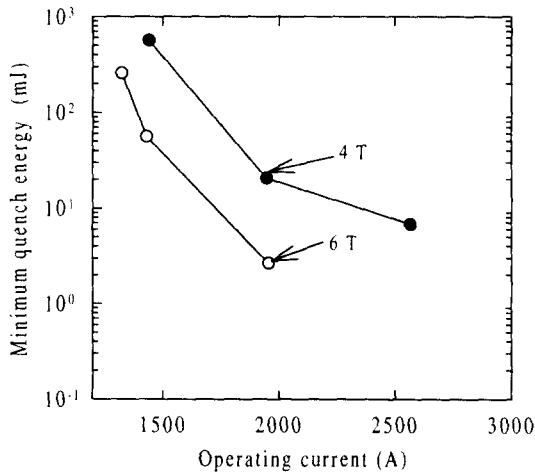


Fig. 1. Minimum quench energy vs. operating current for different background fields with a heat pulse of 1 ms.

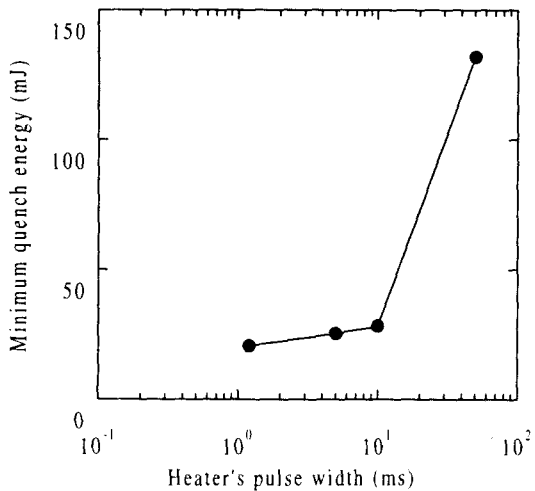


Fig. 2. Minimum quench energy vs. heaters pulse width at the operating current of 1890A, 4T

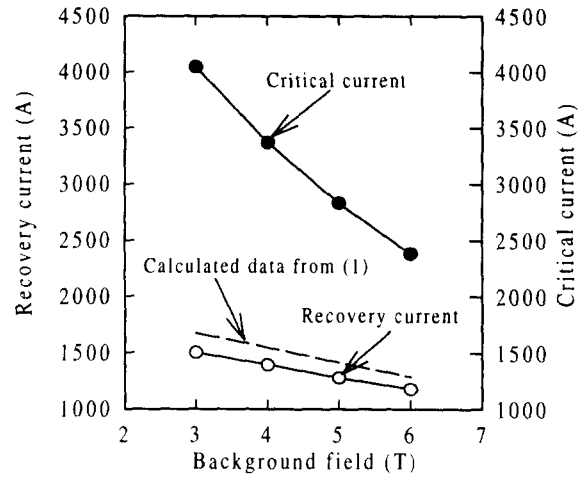


Fig. 3. Recovery current vs. background field.

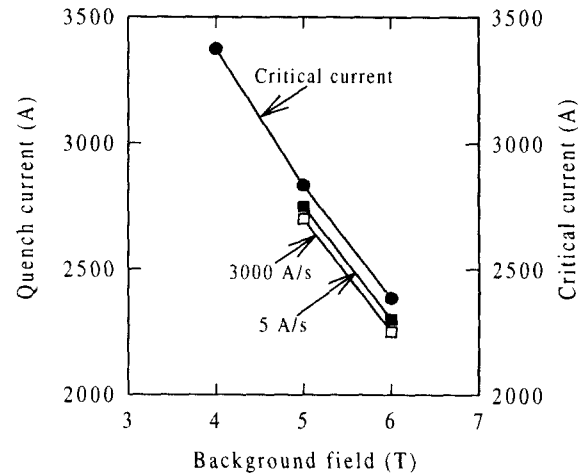


Fig. 4. Quench current vs. background field for different current ramp rates.

그림 4에는 상이한 전류상승율에 대하여 외부자장에 따른 퀠치전류를 나타내었다. 퀠치전류와의 비교를 위하여 시험샘플에 대하여 측정된 임계전류를 그림 4에 함께 나타내었다. 전류상승율에 따른 퀠치전류 열화 시험에서는 시험샘플의 전류상승율을 5 A/s ~ 3000 A/s로 대단히 광범위한 영역에 대하여 조사하였으며 그림 4의 결과에서 보는 바와 같이 시험샘플의 퀠치전류는 전류상승율에는 무관한 결과 임계전류와 거의 동일함을 알 수 있다.

4. 결론

수 MJ의 에너지저장 용량을 갖는 SMES용 마그네트 개발의 전 단계 연구로서 높은 동비 특성을 지닌 kA급 초전도도체에 대하여 안정성 및 전류상승율 특성을 조사하였다. 안정성 시험 결과로부터는 초전도선의 운동과 같은 원인에 의하여 발생하는 짧은 열 펄스가 초전도도체를 더욱더 불안정하게 만든다는 사실을 알 수 있었다. 그리고 낮은 동비의 초전도 선에 대한 실험 결과와 비교하여 볼 때 시험에 사용된 외부자장의 범위에서 kA급 초전도도체의 회복전류는 임계전류의 40% ~ 50%

사이로 비교적 높은 회복전류 특성을 보였다. 마지막으로 전류상승율에 따른 퀘치전류 열화 실험결과로부터 시험에 사용된 직류 외부자장의 범위에서 kA급 초전도도체의 퀘치전류는 전류상승율에 무관하게 도체의 임계전류 데이터와 거의 비슷하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] 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 magnet with high winding tension, ICEC17, p. 559-562, 1998.
- [2] Kazutaka Seo, Masao Morita, Shiro Nakamura, Tadatoshi Yamada, Yoshihiro Jizo, Minimum quench energy measurement for superconducting wire, IEEE Trans. Magn., vol. 32, no. 4, pp. 3089-3093, 1996.
- [3] S.W. Kim, T. Shintomi, N.Kimura, Y. Makida and H. Hirabayashi, Experimental studies on stabilities of Rutherford cables for superconducting accelerator magnets, IEEE Trans. Magn., vol. 32, no. 4, pp. 2784-2787, 1996.
- [4] Yoich Hayashi, Noriaki Sato, An experimental study of quench protection for superconducting magnetic energy storage, the transactions of the institute of electrical engineers of Japan, vol. 105-B, no. 12, pp. 81-88, 1986.