

μ SMES용 초전도선의 안정성

김대선, 류경우, 김해중*, 성기철*
전남대학교, *한국전기연구소

Stability of superconducting wires for a μ SMES device

D.S. Kim, K. Ryu, H.J. Kim*, K.C. Seong*
Chonnam national univ., *KERI

Abstract - A dry winding is adopted in μ SMES devices. In these kinds of devices, MPZ and quench propagation velocity are important characteristics in the fabrication of μ SMES devices. In this paper, the influence of disturbance, Cu ratio and external field on MPZ and quench propagation velocity was investigated.

1. 서 론

에너지저장 용량이 수 MJ인 소형 초전도 에너지저장 장치(이하 μ SMES장치)의 경우 고전류밀도 운전이 요구되며, 충·방전 시 발생하는 교류손실을 효과적 냉각시키기 위해서는 냉각채널을 갖는 구조로 제작되어야 한다. 이러한 구조의 μ SMES장치에서는 여자 시 발생하는 강한 자기력에 의해 초전도선이 국부적으로 움직이게 되는 결과, 초전도선의 한 부분에서 매우 국부적으로 상전도부가 발생하게 된다. 이러한 국부적인 상전도부가 점점 성장하여 μ SMES장치 전체를 켜치시키게 된다. 따라서 μ SMES장치의 제작에 앞서 초전도선의 국부적 켜치에 의해 발생한 상전도부가 전체로 성장하지 못하도록 냉각채널의 폭을 결정해야 하며 이를 위해서 초전도선의 MPZ(minimum propagation zone: 최소 전파 영역)를 열평형 방정식으로부터 조사하였다. 또한 만약 어떤 원인에 의해 μ SMES장치 전체가 켜치될 때 장치를 소손으로부터 보호 및 μ SMES장치에 저장된 에너지를 저온 용기 외부로 신속히 방출할 때 대단히 중요한 인자인 켜치 전파속도에 관해서 조사하였다.

2. 해석모델

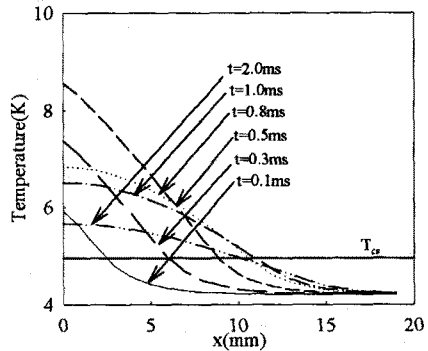
본 연구에 이용된 초전도선의 열평형 방정식은 식(1)로 표시할 수 있다(1).

$$S \frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) - Pq_h + Sg + d = Sc(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

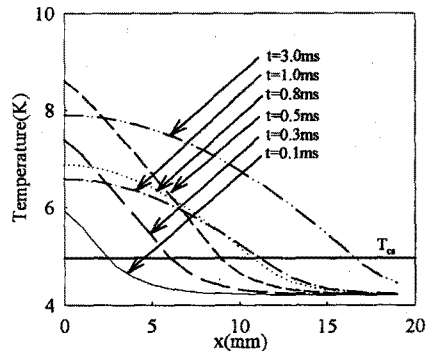
여기서 S, T, P는 각각 초전도선의 단면적, 온도 및 냉각 주변길이, k(T), c(T)는 초전도선의 유효 열전도도 및 유효 비열, q_h는 냉매인 액체헬륨으로의 열전달 그리고 g, d는 각각 초전도선의 주울손실 및 외란 파워를 의미한다.

그림 1은 보통 μ SMES장치를 조기 켜치시키는 국부적 외란이 초전도선에 인가되었을 때 시간에 따른 초전도선의 온도변화 추이를 외란의 대칭성을 고려하여 1/2만 나타내었다. 그림 1에서 a)는 외란 에너지가 338 μJ인 경우의 결과로써 외란 지속시간인 0.5 ms까지는 초전도선의 온도가 상승하다가 외란이 종료된 이후에는 다시 낮아져 초전도 상태로 회복됨을 나타내는 반면, b)의 경우는 외란 에너지가 a)의 경우보다 0.6 %정도 큼

에도 불구하고 초전도선의 온도는 외란이 종료된 후 짧은 시간동안 감소하다 다시 상승하여 초전도 상태로 회복되지 못하고 궁극적으로는 초전도선 전체로 켜치가 확산됨을 알 수 있다. 따라서 특정한 국부적 외란에 대해서 발생한 상전도부는 전파도 회복도 되지 않는 경계 에너지가 존재함을 알 수 있고, 이를 MQE (minimum quench energy)라 하며 일반적으로 초전도선의 안정성 평가 기준으로 사용된다. 또한 이 경계에서 초전도선에 발생한 상전도부의 길이를 MPZ라 하고 μ SMES장치의 제작 시 냉각채널의 폭을 결정하는데 중요한 설계 데이터이며 본 해석에서 MPZ를 결정하는 데는 초전도선의 손실이 최초로 발생하기 시작하는 온도인 분류 개시 온도(T_{cs})를 사용하였으며 해석 대상으로서는 참고문헌(1)의 초전도선으로 하였다.



a) 회복시 외란 에너지=338 μJ



b) 켜치시 외란 에너지=340 μJ

그림 1. MQE경계에서 초전도선의 온도 분포: Cu ratio=6, x_{ds}=1 mm, t_{ds}=0.5 ms, B=4 T.

3. 결과 및 고찰

그림 2 - 그림 4에는 MPZ에 대한 해석 결과를 나타내었다. 그림 2는 μ SMES장치에서 빈번히 발생하는 국부적 외란이 MPZ에 미치는 영향을 조사하기 위해 MPZ와 운전전류사이의 관계를 나타낸 것으로 외란 지속시간 및 공간길이는 MPZ에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 또한 운전전류가 커질수록 MPZ는 짧아짐을 알 수 있고 이는 안정한 μ SMES장치를 제작하기 위해서는 장치가 고전류밀도가 될 수록 냉각재질의 폭을 좁게하여야만 함을 의미한다. 그림 3에는 동비가 초전도선의 MPZ에 미치는 영향을 조사하였으며, 동비가 클수록 MPZ는 길어짐을 알 수 있다. 그림 4에는 초전도선에 인가되는 외부 자장에 대한 영향을 나타내었으며, 외부자장이 클수록 MPZ도 길어지는 것을 알 수 있다.

그림 5 - 그림 8에는 μ SMES장치가 국부적으로 켄치 되었을 때 초전도선의 켄치 전파속도에 대해서 조사한 결과를 나타내었다. 그림 5에는 외란의 지속시간과 공간길이에 대한 결과를 나타내었으며, 켄치 전파속도와 외란 지속시간 및 공간길이가 거의 무관하고 운전전류가 높을수록 커진다는 것을 알 수 있었다. 그림 6에는 동비에 의한 영향을 나타내었으며, 동비가 클수록 켄치 전파속도는 느려지는 것을 알 수 있다. 그림 7에는 초전도선에 인가된 외부 자장과 켄치 전파속도와 관계를 나타내고 있으며 외부자장이 클수록 켄치 전파속도는 느려지는 것을 알 수 있으며, 마지막으로 그림 8에는 외란 에너지가 켄치 전파속도에 미치는 영향을 나타내었고, 휘축은 초전도선에 인가한 외란 에너지를 MQE 경계에서의 외란 에너지로 정규화한 량을 의미한다. 결과로부터 초전도선의 켄치 전파속도는 외란 에너지에는 거의 무관함을 알 수 있다.

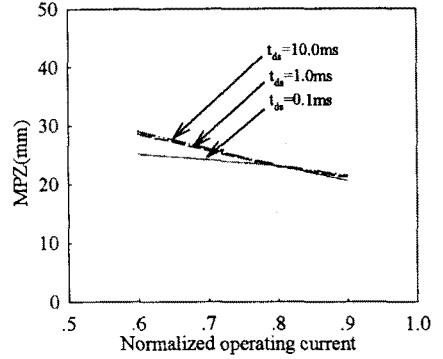
4. 결 론

이상의 초전도선에 대한 열평형 방정식으로부터 구해진 MPZ 및 켄치 전파속도에 관한 결과를 요약하면 다음과 같다.

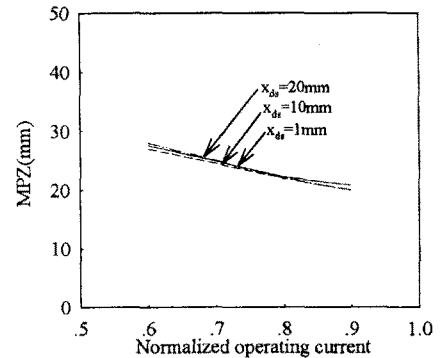
- 운전전류가 커질수록 MPZ는 짧아지며, 켄치 전파속도는 빨라진다.
- 외란 지속시간 및 공간길이는 MPZ 및 켄치 전파속도에 거의 영향을 미치지 않는다.
- 동비가 커질수록 MPZ는 길어지며, 켄치 전파속도는 느려진다.
- 외부 자장이 커질수록 동비의 경우와 동일하게 MPZ는 길어지고, 켄치 전파속도는 느려진다.
- 마지막으로 켄치 전파속도는 외란 에너지의 크기에 거의 무관함을 알 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김대선, 류경우, 최병주, "고전류밀도 초전도선의 안정성", 초전도·저온공학회 학술대회 논문집, pp.61-64, 1999.
2



a) $x_{ds} = 1$ mm



b) $t_{ds} = 0.5$ ms

그림 2. MPZ의 외란에 대한 영향:
Cu ratio=6, B=4 T.

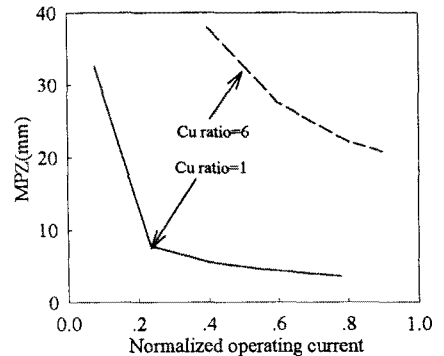


그림 3. MPZ의 동비에 대한 영향:
 $x_{ds} = 1$ mm, $t_{ds} = 0.5$ ms, B=4 T
 $I_{op}/I_c = 0.6$.

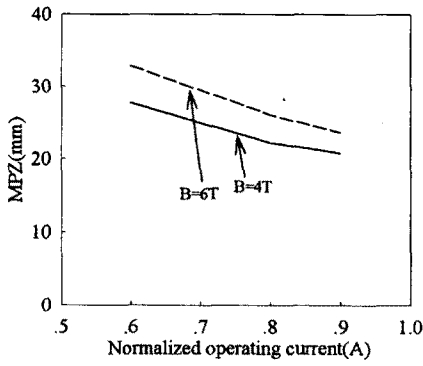


그림 4. MPZ의 외부자장에 대한 영향:
Cu ratio=6, $x_{ds}=1$ mm, $t_{ds}=0.5$ ms.

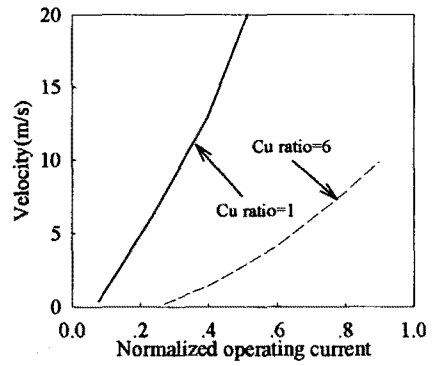
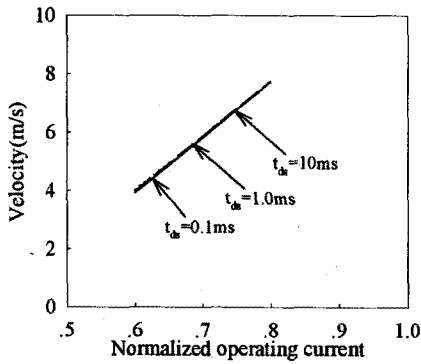


그림 6. 퀘치 전파속도의 동비에 의한 영향:
 $x_{ds}=1$ mm, $t_{ds}=0.5$ ms, $B=4$ T.



a) $x_{ds}=1$ mm

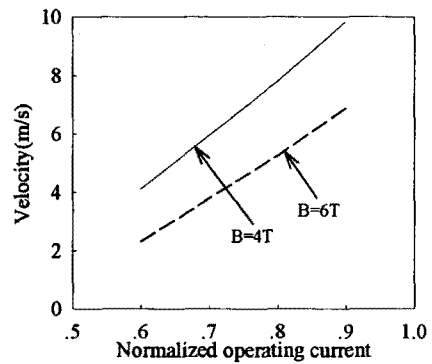
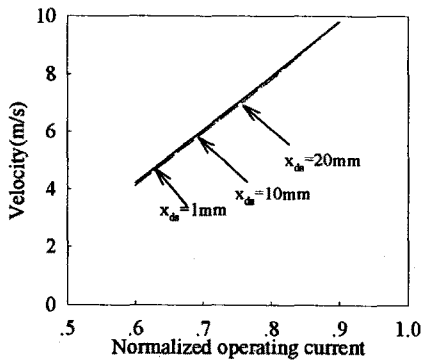


그림 7. 퀘치 전파속도의 외부자장에 의한 영향:
Cu ratio=6, $x_{ds}=1$ mm, $t_{ds}=0.5$ ms.



b) $t_{ds}=0.5$ ms

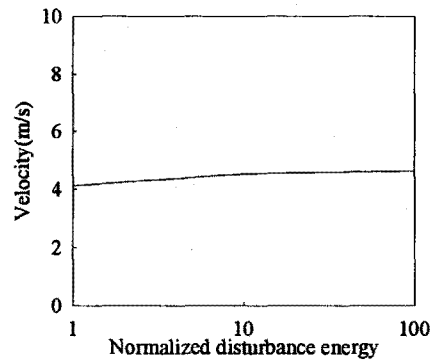


그림 8. 퀘치 전파속도의 외란 에너지에 의한 영향:
Cu ratio=6, $x_{ds}=1$ mm, $t_{ds}=0.5$ ms, $B=4$ T.

그림 5. 퀘치 전파속도의 외란에 의한 영향:
Cu ratio=6, $B=4$ T.