

고전류밀도 초전도선의 안정성

김대선, 류경우, 최병주
전남대학교, *서라벌대학

Stability of a high current density superconducting wire

D.S. Kim, K. Ryu, B.J. Choi
Chonnam National Univ., *Sorabol College

kwryu@chonnam.chonnam.ac.kr

Abstract

Dry winding is generally adopted in superconducting coils of an UPS system. In these kinds of coils a quench is often initiated by a disturbance such as wire motion that generates a highly localized normal zone in a superconducting wire. To fabricate the stable coils, stability of the superconducting wire should be touched. In this paper, a model for a transient stability analysis of the wire is suggested. The influence of a local disturbance, cooling, an external field and a stabilizer to superconductor ratio on the wire stability is investigated and discussed.

도코일의 제작 시 가능한 한 초전도선이 움직이지 않도록 제작하는 연구가 되어야한다.

따라서 본 논문에서는 초전도선의 안정성 해석에 그 중점을 두어 초전도선에 국부적 외란이 인가 될 때 열적·전기적 과도 현상을 해석하기 위하여 먼저 해석모델을 정립하였으며, 유한차분법을 이용하여 국부적 외란에 대한 초전도선의 열적·전기적 과도 현상을 해석하였다. 또한 초전도선의 안정성평가 기준으로서 이 분야의 실험 및 이론 연구에서 보편적으로 사용되는 최소 켄치에너지(minimum quench energy; 이하 MQE라 함)를 사용하였으며, 국부적 외란, 초전도선의 냉각 및 안정화제 그리고 초전도코일의 운전자장 등이 초전도선의 안정성에 미치는 영향을 조사하였다.

1. 서 론

미국의 AS사에서 상용화된 에너지저장 용량이 수 MJ이고, 출력이 수 MW인 UPS용 초전도코일의 경우, 급속 충·방전 운전 및 고전류밀도 운전이 요구된다. 이와 같은 분야에 응용되는 초전도코일은 급속 충·방전 시 발생하는 교류손실을 효과적으로 냉각시키기 위해서는 냉각채널을 필요로 하게되고, 냉각채널을 갖는 구조의 초전도코일에서는 여자시 발생하는 자기력에 의해 초전도도체를 구성하는 기본 요소인 초전도선의 운동 즉 초전도선 사이의 마찰운동에 의한 국부적 발열 즉 국부적 외란(local disturbance)을 피할 수가 없다. 뿐만 아니라 고전류밀도로 운전되는 초전도코일에 있어서는 초전도선이 수 μm 의 매우 작은 운동에도 불구하고 이에 의한 국부적 외란으로 인하여 초전도코일 전체가 켄치해버리는 불안정성의 문제가 발생된다[1]. 따라서 이와 같은 초전도코일에서 발생하는 불안정성의 문제를 해결하기 위해서는 무엇보다도 먼저 초전도코일의 제작에서 기본이 되는 초전도선의 안정성에 대한 연구가 선행되어야 하며, 다음으로 초전

2. 해석모델

현재 사용되고 있는 초전도선의 직경은 직류 및 펄스용인 경우는 약 1 mm, 교류용인 경우는 약 0.1 mm로 초전도선에 국부적 외란이 인가되어 온도가 변할 경우 초전도선 단면에서의 온도 불균일성은 무시될 수 있고, 따라서 국부적 외란에 대한 초전도선의 열평형 방정식은 1차원으로 식(1)과 같이 표시될 수 있다.

$$S \frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) - P q_h + S g + d = S c(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

여기서 T , S , P 는 각각 초전도선의 온도, 단면적 및 냉각 주변길이, $k(T)$, $c(T)$ 는 각각 초전도선의 유효 열전도도 및 유효 비열, q_h 는 액체 헬륨으로의 열전달 그리고 g , d 는 각각 주물손실 및 외란과파를 의미한다.

냉매로는 초전도 응용시스템에서 일반적으로 사용되는 액체헬륨을, 그리고 해석에 사용된 액체헬륨의 과도열전달 특성은 시험결과에 근거한 것을 사용하였으며 다음과 같다[2]. 핵비등 및 막비등 영역에서 액체헬륨으로의 열전달

q_h (W/m²)는 각각 식(2) 및 (3)과 같이 표시될 수 있다.

$$q_h = 300(T^4 - T_0^4), 0 < t < t_d$$

$$\int_0^{t_d} q_h dt = (1.27 \times 10^3)t_d^{0.6} \quad (2)$$

$$q_h = 250(T - T_0), t \leq t_d \quad (3)$$

여기서 T_0 는 액체헬륨의 온도, t_d 는 초전도선의 발열 개시 후 막비등 영역에 돌입하기까지의 시간을 의미한다.

초전도체의 고유특성인 임계전류밀도(J_c)의 자장 의존성은 초전도코일의 운전자장이 일반적으로 3에서 6 T임을 고려하여 고자장 영역에서 시험결과와 잘 일치하는 식(4)를 사용하였으며 [3].

$$J_c = (-500B + 5250) \times 10^6 \text{ (A/m}^2\text{)} \quad (4)$$

여기서 B (T)는 외부인가 자장을 의미한다. 또한 초전도체의 고유특성인 임계온도 T_c (K)의 자장 의존성 및 분류 개시온도 T_{cs} 는 식(5)와 같이 표현될 수 있으며,

$$T_c = 9.3(1 - B/15)^{1/2}$$

$$T_{cs} = (T_c - T_0)(1 - I_{op}/I_c) + T_0 \quad (5)$$

여기서 I_{op} , I_c 는 각각 초전도선의 전류 및 임계전류를 의미한다. 따라서 식(5)의 초전도선의 고유특성 온도로부터 초전도선의 각각의 온도에 따라 발생하는 손실 g (W/m³)는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$g = \rho_{Cu}(I_{op}^2/S_{Cu})/S, T \geq T_c$$

$$= \rho_{Cu}(I_{op}^2/S_{Cu})/S(T - T_{cs})/(T_c - T_{cs}), T_{cs} < T < T_c$$

$$= 0, T \leq T_{cs} \quad (6)$$

여기서 ρ_{Cu} 는 안정화재 동의 저항률, S , S_{Cu} 는 각각 초전도선의 단면적 및 동의 단면적이다.

마지막으로 초전도코일에서 발생하는 외란은 서론에서 언급한 바와 같이 초전도선의 마이크로한 운동에 의한 것이 대부분임을 고려하여 공간적 및 시간적으로 매우 국부적인 구형파 펄스파워 d (W/m)를 사용하였으며 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$d = \frac{p_0}{2} \left[1 - \tanh \left\{ \alpha \left(\frac{2x}{x_{ds}} - 1 \right) \right\} \right], 0 \leq t \leq t_{ds}$$

$$= 0, t > t_{ds} \quad (7)$$

여기서 p_0 는 초전도선에 인가되는 국부적 외란의 크기이고, α 는 구형파 외란의 양쪽 가장자리 부분에서의 완만도를 나타내는 인자이며, x 는 초전

도선의 길이방향 좌표, x_{ds} 는 외란이 인가된 공간길이, t_{ds} 는 외란 지속시간을 의미한다.

초전도선의 안정성평가의 기준으로써는 이 분야 연구에서 보편적으로 이용되는 MQE를 사용하였으며, 이는 초전도선을 켜치시키는 외란파워 중 가장 작은 외란파워를 시간에 대해 적분한 에너지로써 식(8)로 나타낼 수 있다.

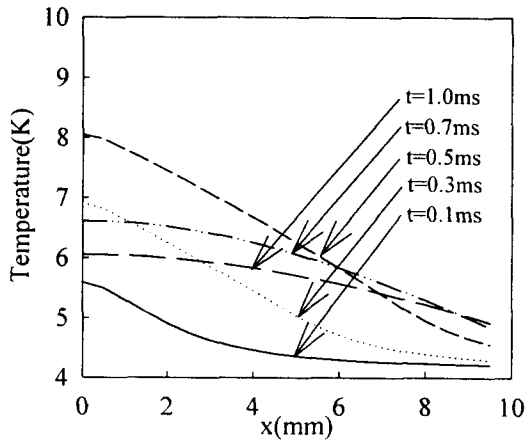
$$MQE = \int_0^{t_{ds}} \int_{-x_{ds}/2}^{+x_{ds}/2} d \, dx \, dt \text{ (J)} \quad (8)$$

본 논문에서 초전도선의 안정성 해석에 이용된 초전도선은 실제 직류 및 펄스용 초전도선의 직경이 약 1 mm임을 고려하여 직경을 1 mm로 하였으며, 외란이 인가되어 초전도선의 아주 작은 부분이 상전도로 전이하여 손실이 발생하게 되면 액체헬륨의 열전달 특성은 일정하다고 할지라도 초전도선의 냉각면적에 따라서도 열전달이 상이해짐으로 이와 관련된 파라미터인 냉각주변 길이를 초전도선의 원주의 0 %에서 50 %까지의 범위에서 초전도선의 안정성을 조사하였다. 또한 국부적 외란 특성이 안정성에 미치는 영향을 조사하기 위해서 외란 공간길이를 1 mm에서 20 mm, 지속시간을 0.1 ms에서 10 ms까지의 범위에서 각각 조사하였고, 초전도코일의 운전자장이 일반적으로 3에서 6 T임을 고려하여 초전도선에 인가되는 외부자장은 4 T에서 6 T의 범위에서, 그리고 마지막으로 일반적으로 초전도선이 국부적으로 상전도로 전이했을 경우 초전도선에는 주울손실이 발생하게 되는데 이 손실의 크기를 좌우하는 안정화재의 비는 실용 초전도선의 동비를 고려하여 1에서 6까지의 범위에서 조사하였다.

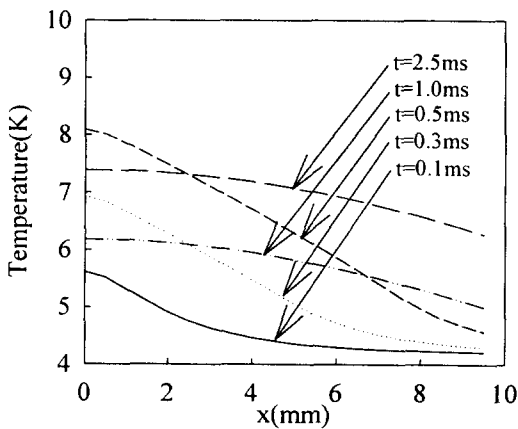
3. 해석결과 및 고찰

초전도선에 국부적 외란을 인가했을 때 전형적인 과도적 온도변화 추이를 대칭성을 고려하여 1/2만 그림 1에 나타내었으며, 식(4)로부터 산출된 임계전류는 364 A이고, 운전전류가 0.86 I_c 인 경우의 해석결과이다. 그림 1에서 a)의 경우는 외란 에너지가 293 μ J로써 외란 지속시간 즉 0.5 ms까지는 초전도선의 일정시각에서 최대 온도(이하에서 Hot-spot온도라 함)가 상승하다가 외란이 종료됨과 동시에 초전도선의 온도는 점차 낮아져 초전도상태로 회복됨을 알 수 있다. 반면 b)의 경우는 외란 에너지는 295 μ J로 a)보다 0.5 %정도 큼에도 불구하고 외란의 종료 후 Hot-spot온도는 짧은 시간동안 감소하다가 다시 증가하여 초전도상태로 회복되지 못하고 궁극적으로는 초전도선 전체로 켜치가 확산됨을 알 수 있다. 따라서 특정한 국부적 외란에 대해서 발생한 상전도부가 전파도 회복도 되지 않는 경계가 존재함을 알 수 있고 이 경계에서

초전도선에 발생된 상전도부의 길이를 최소전파 길이(minimum propagation zone: MPZ)라 하고 초전도코일의 제작 시 사용되는 냉각채널의 폭을 결정하는데 중요한 설계 데이터로 된다.



a) $MQE^- = 293 (\mu J)$ for a recovery

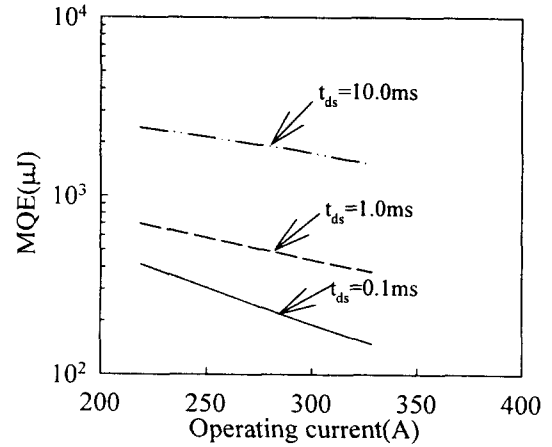


b) $MQE^+ = 295 (\mu J)$ for a quench

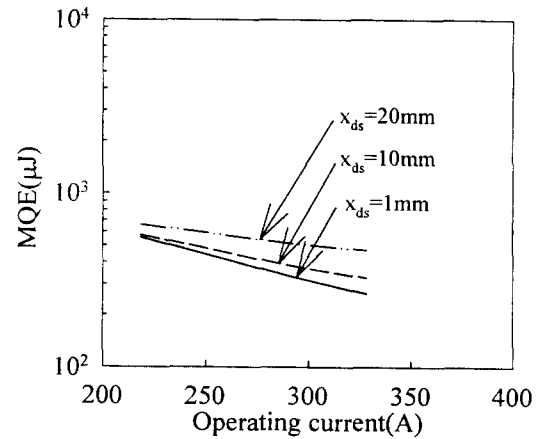
Fig.1. Temperature profile at MQE boundary: Cu ratio=6, $x_{ds} = 1mm$, $t_{ds} = 0.5ms$ and $B = 4T$.

초전도코일에서 실제로 발생하는 외란의 특성은 대단히 복잡하여 일률적으로 취급하기는 매우 어렵지만, 외란의 특성 중의 하나인 외란 지속시간 및 외란의 공간길이가 초전도선의 안정성에 미치는 영향을 조사함으로써 실제로 어떠한 종류의 국부적 외란이 초전도코일을 불안정하게 만드는가를 이해하는데 있어서 대단히 중요한 정보를 제공할 것으로 생각되어 이들이 초전도선의 안정성에 미치는 영향을 조사하여 그림 2에 나타내었다. 그림 2는 MQE와 운전전류사이의 관계를 외란 지속시간 및 공간길이에 대해서 나타낸 것으로 외란 지속시간 및 공간길이가 짧아질수록 MQE가 작아짐을 알 수 있으며, 이는 초전도선에 인가되는 외란 특성 중 초전도코일의 충·방전 시 발생하는 교류손실처럼 시간적·공간적으

로 긴 외란보다 일반적으로 초전도선의 운동으로 발생하는 국부적 외란이 초전도코일을 더욱 불안정하게 만든다는 것을 의미한다.



a) $x_{ds} = 1mm$



b) $t_{ds} = 0.5ms$

Fig.2. MQE vs. operating current: Cu ratio=6 and $B = 4T$.

초전도선의 냉각면적이 안정성에 미치는 영향을 조사하기 위해 초전도선의 원주를 기준망으로 하여 냉매인 액체헬륨에 노출된 원주 길이를 백분율로 표시한 %냉각주변 길이가 초전도선의 안정성에 미치는 영향을 조사하였으며, 이를 그림 3에 나타내었다. 그림 3의 결과로부터 초전도선의 %냉각주변 길이가 작아질수록 MQE가 작아짐을 알 수 있으며, 이는 초전도코일 제작 시 충분한 냉각이 이루어 질 수 있는 구조로 제작되어야 함을 의미한다. 또한 초전도선의 동비가 안정성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 실용 초전도선의 동비를 고려하여 1에서 6까지의 범위에서 조사하였으며, 이를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 동비가 6일 경우 식(4)로부터 산출된 임계전류는 1276 A이다. 그림 4의 결과로부터 운전전류가 작은 영역에서 MQE는 동비가 클수록 MQE가 큰 반면 운전전류가 큰 영역에서는

그 경향이 반대로 되는 것을 알 수 있다. 이는 낮은 전류밀도로 운전되는 초전도응용에서는 동량이 많은 초전도선을 사용함으로써 안정성이 뛰어난 초전도코일을 제작할 수 있는 반면 높은 전류밀도로 운전되는 응용에서는 많은 양의 동이 반드시 초전도코일의 우수한 안정성을 보장하지는 못한다는 것을 의미한다.

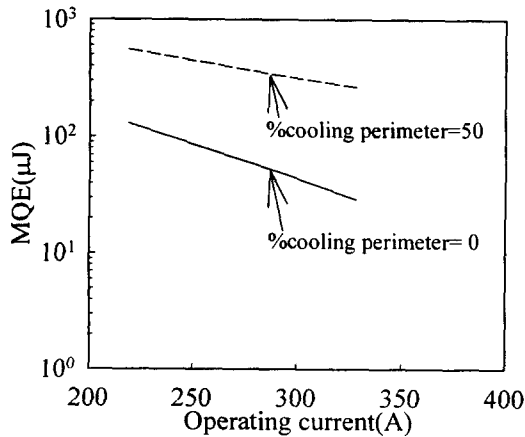


Fig.3. MQE vs. operating current for different cooling perimeters: Cu ratio=6, $x_{ds}=1\text{mm}$, $t_{ds}=0.5\text{ms}$ and $B=4\text{T}$

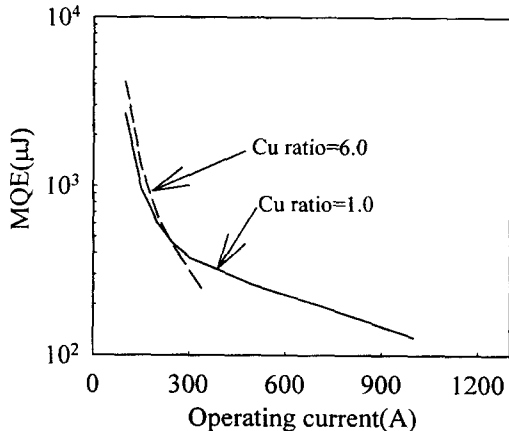


Fig.4. MQE vs. operating current for different Cu ratios: $x_{ds}=1\text{mm}$, $t_{ds}=0.5\text{ms}$ and $B=4\text{T}$

마지막으로 동일한 초전도선이라 할지라도 초전도응용에서 초전도선에 인가되는 외부자장이 안정성에 미치는 영향을 조사하였으며, 이를 그림 5에 나타내었다. 이는 초전도응용에서 동일한 초전도선을 사용한다 할지라도 응용에서 초전도선에 인가되는 외부자장이 작을수록 더욱 안정한 초전도코일을 제작할 수 있음을 의미한다.

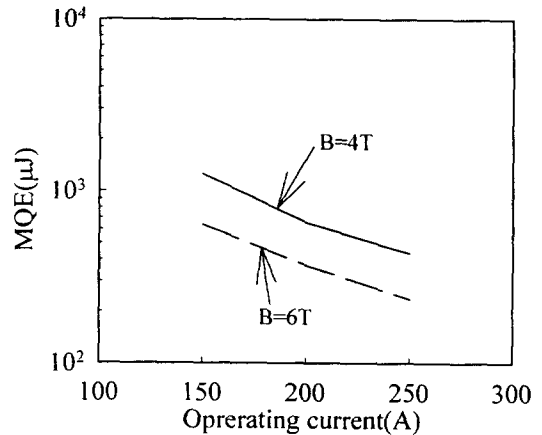


Fig.5. MQE vs. operating current for different fields: Cu ratio=6, $x_{ds}=1\text{mm}$ and $t_{ds}=0.5\text{ms}$

4. 결 론

본 논문에서는 초전도선의 안정성 해석을 위한 해석모델을 제시하였으며, 유한차분법을 이용하여 초전도선의 안정성 해석을 하였으며, 그 결과를 요약하면

- 1) 외란 지속시간 및 공간길이가 짧은 외란에 대해 초전도선은 더욱 불안정해진다. 이는 초전도선에 인가되는 외란 중 초전도코일의 충·방전 시 발생하는 교류손실처럼 시간적·공간적으로 긴 외란보다 초전도선의 운동으로 발생하는 국부적 외란이 초전도코일을 더욱 불안정하게 만든다.
- 2) %냉각주변 길이가 작아 질수록 초전도선은 더욱 불안정해진다. 이는 초전도코일 제작 시 충분한 냉각이 이루어 질 수 있는 구조로 제작되어야 한다.
- 3) 운전전류에 따라서 동비가 초전도선의 안정성에 미치는 영향은 상이하며, 이는 낮은 전류밀도로 운전되는 초전도응용에서는 동량의 증가에 따른 안정성 효과를 얻을 수 있지만 높은 전류밀도로 운전되는 응용에서는 그렇지 못하다.
- 4) 인가되는 외부자장이 클수록 초전도선은 불안정하게 된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Case Studies in Superconducting Magnets Design and Operational Issues, Plenum Press, New York and London, pp268-269, 1994
- [2] 超電導工學, 日本電氣學會, pp109-111, 1990
- [3] 류경우, 김해중, "0.7 MJ UPS용 초전도케이블의 켄치 특성", 전기전자재료학회 논문지, vol.11, no.7, pp.565-570, 1998