

두 가닥 초전도 케이블에서 자속변화한계와 전류 재분배 해석

김석호, 정상권
한국과학기술원 기계공학과

Analysis of ramp-rate limitation and current redistribution in two-strand superconducting cable

Seokho Kim, Sangkwon Jeong
Department of mechanical engineering, KAIST

shkim75@kaist.ac.kr

Abstract - Ramp-rate limitation is a serious obstacle for successful operation of fast charging and discharging magnet. Ramp-rate limitation is hard to expect or fully investigate due to its electric and thermo-hydraulics couplings. In this paper, the simplest case of ramp-rate limitation is investigated with two-strand superconducting cable model considering transient heat transfer. The simulation results are compared with the experimental results.

1. 서 론

자속변화한계(Ramp-Rate Limitation)는 자기장 변화에 의해 발생하는 현상으로서 자기장 변화가 여러 가닥으로 이루어진 초전도 케이블 내에서 전류 불균일 분배를 유발하여 초전도 자석의 성능 저하를 유발하는 것으로 알려져 있다 [1]. 특히 토카막 장치와 같이 빠른 자기장 변화를 수반하는 초전도 자석에서는 자속변화한계가 초전도 자석 전체의 성능에 매우 큰 영향을 미치며 [2], 이러한 성능 저하를 고려하여 보수적인 설계가 이루어지고 있다. 이처럼 자속변화한계가 자석의 안정성에 매우 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있지만, 실제로는 초전도 케이블에서 각 선재들의 전자기적 상태뿐만 아니라, 초전도 선재와 액체 헬륨 또는 초임계 헬륨과의 열수력학적 관계가 서로 복잡하게 연관되어 나타나기 때문에 정량적인 해석이 매우 어렵거나 불가능하다.

실제 대형 초전도 자석의 관내연선도체(CICC; Cable-In-Conduit Conductor)보다 선재 수가 훨씬 적은 2 가닥에서 12 가닥 정도의 초전도 케이블에서 자속변화한계에 대한 연구가 진행되었다 [3]. 하지만, 이처럼 간단한 시험 도체에서도 자속변화한계의 본질이라 할 수 있는 자기장 변화에 의한 전류의 불균일 분포, 증가된 전류에 의한 선재의 국부적인 켄치(quench) 이후 전류의 재분배 및 회복에 이르는 일련의 과정

등을 명확히 제시하고 있지는 못한 실정이다.

본 연구에서는 자속변화한계를 보다 명확히 이해하기 위하여 두 가닥의 단순화된 초전도 케이블에 대하여 실험을 수행하였으며, 이를 설명하기 위한 전류 분배 및 열전달 모델을 제시하고 자속변화한계에 의한 선재의 안정성과 열전달 관계를 연구하고자 한다.

2. 본 론

2.1 실험 장치

표 1의 사양을 갖는 NbTi 초전도 선재를 이용하여 총 길이 2.6 m의 두 가닥 시험 도체 케이블을 제작하였으며, 6 T까지 빠른 자기장 변화가 가능한 외부 초전도 자석의 중심부에 위치하도록 하여 자속변화한계 실험을 수행하였다.

시험 도체는 그림 1과 같이 두 가닥 선재 사이에 자속연결면적(flux-linkage area)이 형성되도록 하여 외부자기장 변화에 의한 전류의 불균일 분포가 발생하도록 하였다. 절연된 선재를 사용함으로써 선재 사이의 전류 분배는 시험 도체 끝단의 조인트에서만 발생하도록 하였다.

자기장이 변화하면 루프전류(I_l)가 형성되며 각 선재에 흐르는 전류 I_1 과 I_2 는 식 1과 같이 표현된다. 여기서, I_t 는 전달 전류(transport current)로서 초전도 케이블에 흐르는 전류의 합이다. 루프 전류는 자기장이 변화할 때 발생하는 유도 기전력으로 시험 도체의 선재 1에서 2

$$I_1 = \frac{I_t}{2} + I_l, \quad I_2 = \frac{I_t}{2} - I_l \quad (1)$$

Table 1. Specification of the superconducting strand

strand	
선재 직경(절연 포함)	0.94 mm(1.0 mm)
동비	7.11
RRR	150
임계전류(4.2 K)	407 A @ 2 T
	266 A @ 4 T
	170 A @ 6 T

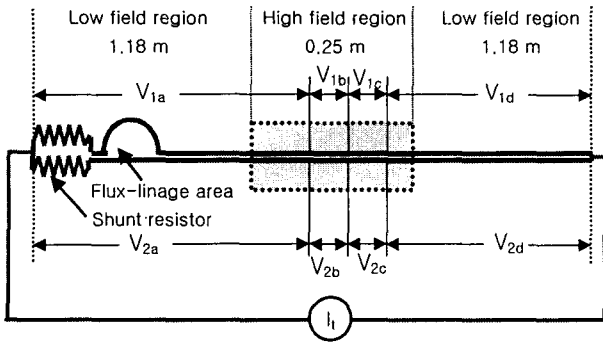


Fig. 1. Schematic diagram of sample conductor

로 흐르는 전류로서 전류 불균일 분포를 유발하는 원인이 된다.

두 가닥 선재에 흐르는 전류는 조인트에 설치된 션트 저항(shunt resistor)을 통하여 측정하였으며, 각 선재에 설치된 전압 탭($V_a \sim V_d$)을 이용하여 켄치를 측정하였다. 실험은 시험 도체에 흐르는 전달전류는 일정하게 유지한 상태에서 외부자기장을 선형적으로 증가시키면서 실험을 수행하였다. 실험 장치 및 방법에 대한 자세한 내용은 참고문헌[4]에 설명되어 있다.

2.2 실험 결과

그림 2는 자속변화한계 실험 결과로서 외부자기장 변화에 의해 전류의 불균일 분포가 형성된 후 선재 1의 전류(I_1)가 임계전류(I_c)에 이르면 국부적인 켄치가 발생하고 전류가 재분배되는 과정을 보여준다.

그림 2 (a)는 전달 전류 400 A, 자기장 변화율 0.93 T/s의 조건에서 전류 재분배를 통하여 다시 초전도 상태로 회복하는 것을 보여주며, 이러한 켄치 회복 과정을 두 번 반복한 후 세 번째 국부 켄치에서는 케이블 켄치가 발생하는 것을 보여준다. 그림 2 (b)는 전달 전류를 500 A로 증가시켰을 경우로서, 처음 발생한 국부 켄치에서 초전도로 회복하지 못하고 바로 케이블 켄치가 발생하는 실험 결과이다. 여기서, 국부 켄치는 선재의 일부분만이 상전도로 바뀐 상태를 의미하며, 케이블 켄치는 두 선재 모두가 상전도로 전이하여 초전도 상태로 다시 회복될 수 없음을 의미한다. 그림 2의 실험 결과는 자속변화한계 현상을 보여주는 가장 명료한 실험적 결과라 할 수 있다.

2.3 수치해석

실험을 통하여 초전도 케이블의 켄치 회복 및 케이블 켄치 발생 여부는 전달 전류 및 자기장 변화율의 함수로는 간략히 표현할 수 없음을 알 수 있었다. 따라서 자속변화한계와 관련된 열적 전자기적 과정들을 자세히 연구하기 위하여 전류 분배 모델 및 열전달 모델을 세우고 수치해석을 수행하였다. 수치해석에서 초전도 선재의 물성 값들은 온도와 자기장의 세기에 따라 변화하는 값들을 이용하였다.

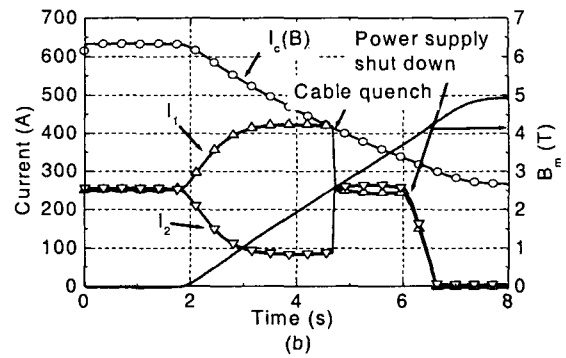
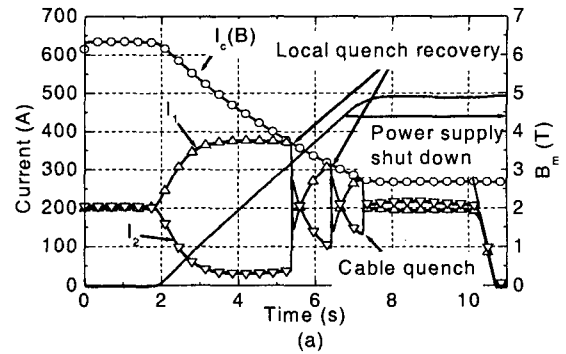


Fig. 2. Experimental results of strand current when sample transport currents are (a) 400 A and (b) 500 A with 0.93 T/s

2.3.1 열전달 모델

초전도 선재에서 켄치에 의한 저항열 발생 및 열전달은 수십 ms 이내에서 매우 빠르게 발생한다. 이처럼 빠른 열전달 현상에서는 정상 상태에서 서와는 다른 비정상 열전달 관계식을 필요로 한다. 비정상 열전달은 강제 대류 또는 비등 열전달이 발생하기 이전 짧은 시간 동안 전도에 의한 열확산(thermal diffusion)을 통하여 열전달량을 크게 증가시키기 때문에, 외부 교란에 대한 초전도 선재의 안정성을 향상시킨다고 알려져 있다[6].

본 연구는 초임계 헬륨에 의한 냉각이 아니라 1 기압 액체 헬륨에 의해 냉각되므로 비정상 비등 열전달을 고려해야 한다. 액체 헬륨에 대한 비정상 비등 열전달은 비등 열전달 자체의 복잡성 때문에 유용한 실험 결과들이 충분하지 않다. 다양한 연구에 의해 비정상 열전달 모델들이 제시되었지만, 실험 조건 및 열전달 표면의 상태에 따라 그 계수들의 편차가 매우 크게 나타나는 실정이다. 그럼에도 불구하고 핵비등 영역에서는 초임계 헬륨과 비슷한 거동을 보이는 것으로 알려져 있으며, 막비등 영역에서는 헬륨 기체의 막 생성 및 성장에 따른 비정상 열전달 모델이 제시되었다[7]. 대부분의 실험 결과들은 선재의 온도가 증가하는 과정 중에는 열전달 계수가 증가하는 반면, 온도가 감소하는 과정 중에는 열전달 계수가 감소한다는 사실에 일치한다. 비정상 비등 열전달 외에 선재 상호간 그리고 선재와 보빈 사이의 접촉 열전달 또한 정확히 알 수 없으므로 실험 결과를 정밀하게 예측하는 데는 무리가 따른다.

본 연구에서는 열전달 모델의 불확실성에도 불구하고 과거의 비정상 비등 열전달 연구 결과와 실험 결과를 이용하여 일부 불확실한 상수를 결정함으로써, 자속변화한계 현상에서 선재의 온도 변화 및 전류 재분배 현상을 모사하도록 하였다.

특히, 국부 퀘치가 발생할 경우 저항열이 매우 커서 선재의 온도가 임계 온도 이상으로 증가하게 되므로, 초기 열확산에 의한 냉각은 수치 해석 결과에 큰 영향을 미치지 않는다. 따라서 본 연구에서 가장 중요한 열전달은 막비등이며 이때 막비등에 대한 비정상 열전달 계수는 참고 문헌[7]에서 제시된 식을 이용하였다.

각 선재에 대한 1 차원 열전달 모델은 선재의 길이 방향으로 발생하는 전도, 선재와 선재 사이의 접촉 열전달, 선재에서 액체 헬륨으로의 비등 열전달 및 보빈으로의 접촉 열전달 항을 포함하고 있으며 식 2와 같이 표현된다.

$$A \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) - hP(T_1 - T_0) + S(T_1, I_1, B) - \sigma_1(T_1 - T_2) - \sigma_2(T_1 - T_0) = AC \frac{\partial T_1}{\partial t} \quad (2)$$

여기서 A , k , h , P , C 는 각각 초전도 선재의 단면적, 열전도도, 비등 열전달 계수, 접수 길이 및 부피 열용량이며, T_1 , T_0 , T_2 는 각각 선재 1, 2 및 액체 헬륨의 온도이다. S 는 선재의 온도, 전류 및 자기장(B)에 대한 함수로서 퀘치에 의한 저항열을 나타낸다. σ_1 , σ_2 는 각각 선재 1에서 2로의 접촉 열전달 계수 및 보빈으로의 열전달 계수이다.

2.3.2 전류 분배 모델

식 3은 전류 분배 모델로서 외부 자기장 변화에 의해 발생한 유도기전력으로 전류 불균일 분포가 발생하는 것을 나타내며, 각 선재에서 퀘치에 의한 저항이 발생할 경우 전류의 재분배를 모사할 수 있도록 하였다.

$$(R_1 + R_2)I_1 + L \frac{dI_1}{dt} = V_1 + R_2 I_2 \quad (3)$$

여기서, R_1 과 R_2 는 각각 선재 1과 2의 저항으로서 조인트에서의 선트 저항과 퀘치에 따른 저항을 포함한 값이다. 또한, L 은 루프 전류의 인덕턴스이며 실험으로부터 구한 값이다. V_1 은 자속 연결면적에서 발생하는 유도 기전력이며, 선재 1의 전류 I_1 을 증가시키는 역할을 한다. I_2 는 전달 전류로 선재 1과 2에 흐르는 전류의 합이다

2.4 수치 해석 결과 및 고찰

유한차분법을 이용하여 수치해석을 수행하였으며, 선재의 매우 빠른 온도 변화를 모사하기 위하여 2.6 m의 시험 도체를 1 mm 간격으로 나누고 50 μ s의 시간 간격마다 계산을 수행하였다.

그림 3은 수치 해석을 이용하여 그림 2의 실험

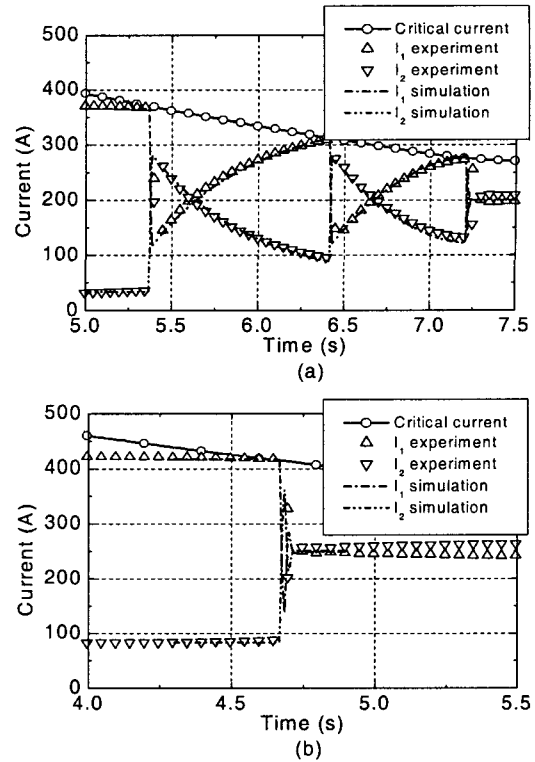


Fig. 3. Simulation results of strand current when sample transport currents are (a) 400 A and (b) 500 A with 0.93 T/s

결과를 모사한 것으로서 국부적인 퀘치가 발생한 이후 전류의 재분배 형태를 보여준다. 각 실험 조건에 대하여 수치 해석을 수행한 결과 퀘치 회복 및 케이블 퀘치의 발생 여부를 비교적 정확하게 모사할 수 있음을 알 수 있었다.

그림 4는 그림 3의 결과에서 첫 번째 국부 퀘치가 발생하였을 때 각 선재의 중심부 온도를 나타낸다. 선재 1에서 국부 퀘치에 의해 저항열이 발생하면 선재 1의 온도가 매우 빠르게 상승하는 것을 보여준다. 또한, 접촉 열전달에 의해 선재 2의 온도도 약간 상승하는 것을 알 수 있다. 하지만, 선재 1의 온도가 크게 증가한 후에, 저항 증가로 인한 선재 2로의 전류 재분배가 이루어지면서, 저항열이 감소하고 선재 1의 온도가 다시 낮아지는 것을 알 수 있다.

그림 4 (a)는 국부 퀘치 이후 전류 재분배로 선재 1의 온도가 낮아져 결국 전류 공유 온도 (T_{cs}) 이하가 되면서 초전도 상태로 돌아가는 과정을 보여준다. 그림 4 (b)는 선재 1의 온도가 전류 공유 온도 이하로 감소하기 이전에 선재 2의 온도가 선재 2의 전류 공유 온도 이상이 되면서 더 이상 전류가 재분배되지 못하고 케이블 퀘치가 발생하는 결과를 보여준다.

그림 4 (b)의 결과와 같이 시험 도체의 전달 전류를 400 A에서 500 A로 증가시키면 국부 퀘치 이후에 시험 도체가 회복되지 못하고 케이블 퀘치가 발생하게 된다. 이는 시험 도체의 안정성이 선재 1과 2의 온도 변화뿐만 아니라 전류의 재분배에 따른 전류 공유 온도의 변화에 의

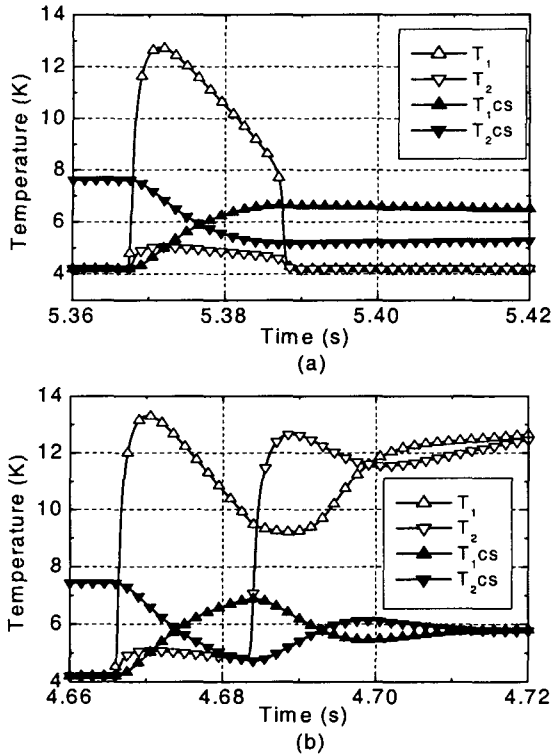


Fig. 4. Simulation results of strand temperature when sample transport currents are (a) 400 A and (b) 500 A with 0.93 T/s

해서 결정되기 때문이다. 즉, 전류가 재분배하여 선재 2의 전류가 증가하게 되면 선재 2의 전류 공유 온도는 감소하게 된다. 이 과정 중에 선재 2의 온도는 접촉 열전달에 의해 증가하게 되는데, 선재 온도가 전류 공유 온도 이상이 되면 케이블 퀘치가 발생하는 것이다. 그림 4 (b)와 같이 전달 전류를 증가시키면 국부 퀘치에 의한 저항열 발생이 증가하여 선재 1 및 2의 온도가 더 증가하게 된다. 또한, 식 4에서 보듯이 전달 전류의 증가로 인한 선재 2의 전류 증가는 전류 공유 온도를 감소시키기 때문에, 전류 재분배 과정 중에 선재 2의 온도와 전류 공유 온도 사이의 온도 여유가 작아져 케이블의 안정성이 저하되는 것이다.

$$T_{cs} = (T_c - 4.2)\left(1 - \frac{I}{I_c}\right) + 4.2 \quad (4)$$

자기장 변화율을 증가시키면 루프 전류의 크기가 증가하여 전류의 불균일 분포는 더욱 심하게 나타나므로, 자석의 충전 초기에 국부 퀘치가 발생하게 된다. 하지만, 이 경우 국부 퀘치 시의 자기장 세기와 선재 2의 전류가 작기 때문에 초전도 선재 2의 전류 공유 온도는 높아진다. 이처럼 자기장 변화율의 증가는 증가된 전류 불균일 분포로 인하여 선재 1, 2의 온도 증가 폭이 커지지만, 전류 공유 온도가 더 크게 증가하여 초전도 선재는 오히려 초전도 상태로 회복하기 쉬워진다. 이처럼 자기장의 변화율이 증가하면, 초전도 케이블의 국부 퀘치가 조기에 발생하게 되지만, 이 때의 국부 퀘치는 다시 초전도로 회복할

가능성이 높게 된다. 따라서, 케이블 퀘치로 판별되는 자속변화한계는 자기장 변화율의 간단한 함수로서 표현될 수 없음을 알 수 있다.

3. 결 론

수치 해석을 통하여 두 가닥 초전도 케이블에서의 자속변화한계 현상을 모사하고 실험 결과와 비교하였다. 각 실험 조건에서 발생한 퀘치 회복 및 케이블 퀘치를 수치 해석으로 모사하였으며, 전류 재분배 과정 동안 선재의 온도 변화를 예측할 수 있었다. 이로부터 퀘치 회복 및 케이블 퀘치가 선재 2의 온도 및 전류 공유 온도 변화에 의해서 결정됨을 알 수 있었다. 또한, 전류 재분배 및 열전달에 의한 퀘치 회복을 통하여 자속변화한계 현상이 크게 완화될 수 있음을 알았다

본 연구는 한국과학재단의 지원을 받는 연소기술 연구센터(CERC)의 도움으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] N. Koizumi and et al, "Ramp-rate limitation due to current imbalance in a large cable-in-conduit conductor consisting of chrome-plated strands", *Cryogenics*, vol. 37, no. 8, pp. 441-452, 1997
- [2] M. M. Steeves, et al, "Test results from the Nb3Sn US-Demonstration poloidal Coil", *Adv. Cryo. Eng.*, vol. 37A, pp.345-354, 1991
- [3] S. Jeong and et al, "Ramp-rate limitation test of cable-in-conduit conductors with supercritical helium", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 5, pp. 210-213, 1995
- [4] Seokho Kim and Sangkwon Jeong, "Current redistribution and thermal history due to ramp-rate limitation of a superconducting cable", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 13, no. 12, 2003
- [5] W. G. Steward, "Transient helium heat transfer Phase I-static coolant", *Int. J. Heat Mass & transfer*, vol. 21, pp. 862-878, 1978
- [6] N. Koizumi and et al, "Numerical model using an implicit finite difference algorithm for stability simulation of a cable-in-conduit superconductor", *Cryogenics*, vol. 36, no. 36, pp. 649-659, 1996
- [7] Y. Iwasa and B. A. Apgar, "Transient heat transfer to liquid helium from bare copper surfaces in a vertical orientation, Film boiling regime", *Cryogenics*, vol. 18, no. 5, pp. 267-275, 1978