

고온초전도 집합도체들의 I-V 특성에 관한 연구

손명환, 민치현, 이연용, 심기덕, 김석호, 성기철
한국전기연구원 초전도응용연구그룹

I-V Characteristics of HTS Conductors with Joints

Myung Hwan Sohn, Chi Hyun Min, Eon Yong Lee, Ki Deok Sim, Seokho Kim, Ki Chul Seong
Superconducting Devices & Cryogenics Research Group, KERI

Abstract - Various different types of joining between High Tc superconducting(HTS) tapes were prepared and current-voltage (I-V) characteristic curves were investigated at 77 K, liquid nitrogen temperature. Two types of HTS tapes were used, one is no laminated tape(Sumitomo high strength type tape) and the other stainless steel laminated tape(AMSC(American Superconductors Inc.) 3ply tapes) Sample joints were lap-jointed with indium or solder. Joint resistances between Sumitomo tapes with 4-8mm in length were estimated from I-V curves and in the range of 4-8nΩ at 77 K. Joint resistances of AMSC tapes were in the range of 140-170nΩ, much higher than them of Sumitomo samples. The n-values of jointed HTS tapes were 50% of them with no joint. In AMSC tapes, indium is better than solder as the jointing material.

I_c 는 초전도 도체 내부의 초전도 부분에 흐르는 전류이다. 지수 n-값은 여러 가지 내부적인 혹은 외부적인 요인에 의해 영향을 받는다[4]. Flux motion에 의한 전압발생은 도체 내부 혹은 불균일한 초전도 filament들 사이에서의 전류분류에 의한 요인으로부터 또한 영향을 받는다[5]. I-V 특성 곡선으로부터의 임계전류(I_c)측정에서 $1\mu V/cm$ 은 널리 사용되는 표준기준이다. 그러나 온전전류가 I_c 이하라 하여도 복합 초전도 테이프 도체의 불균일성 때문에 안전한 상태는 아니다. 고온초전도 도체의 일반적인 I-V 특성 곡선을 <그림 2>에 나타내었다. <그림 2> (a)는 저항 값이 영(0)인 영역이 있는 고온초전도 도체의 I-V 곡선이다. 전류가 흐르는 고온초전도 도체 사이에 초전도 상태가 아닌 정상상태의 도체 혹은 기계적 손상을 입거나 접합에 의한 저항을 가지는 영역이 있으면 <그림 2> (b)처럼 기울기를 가진다. 이 경우 고온초전도 도체의 I_c 는 이 기울기 부분을 제거하여 구할 수 있다.

1. 서 론

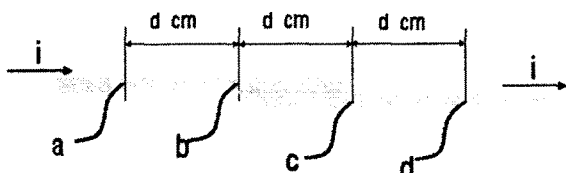
고온초전도체는 부서지기 쉬운 금속산화물 세라믹의 고유한 특성을 가지기 때문에 금속피복재를 가진 테이프 형태로 제조된다. 테이프 형태의 도체는 측면으로 구부러질 경우 내부의 손상에 의해 초전도 특성의 열화가 생겨 전류용량이 저하되므로 기존의 구리 또는 저온 초전도 도체처럼 자유롭게 권선할 수가 없다. 그래서 고안된 방법이 팬케이크권선법인데, 초전도 자석을 제작하는데 많이 응용된다[1]-[3]. 고온초전도 팬케이크 코일을 제작하는데 장선의 도체가 필요하고 이 경우 접합이 필요할 경우가 발생한다. 이 접합은 초전도접합이 가장 이상적이지만, 열처리를 해야 하는 어려움이 있기 때문에 다심 도체에서는 거의 불가능하다. 따라서 실제 접합작업이 가능하고 가장 작은 저항을 나타내는 접합기술이 요구된다.

본 연구에서는 여러 가지 solder(땀납, 인듐 등)에 따른 그리고 접합 길이에 따라 몇 개의 접합 시편을 만든 다음 I-V 특성 곡선을 액체질소 온도인 77K에서 측정하고 기울기로부터 구한 저항값들을 서로 비교하고 최적의 접합조건을 제시한다.

2. 본 론

2.1 시편준비

사용한 고온초전도 도체는 미국 AMSC사의 3ply type과 일본 Sumitomo 사 high strength type의 2종이다. 접합은 <그림 1>에 나타난 것처럼 lap join법을 사용하였으며, 전압단자들 사이의 간격을 달리하여 준비하였다. 접합에 사용한 solder는 인듐과 일반적인 땀납이었으며, 사용한 solder에 따라 인두의 온도를 달리하였다.



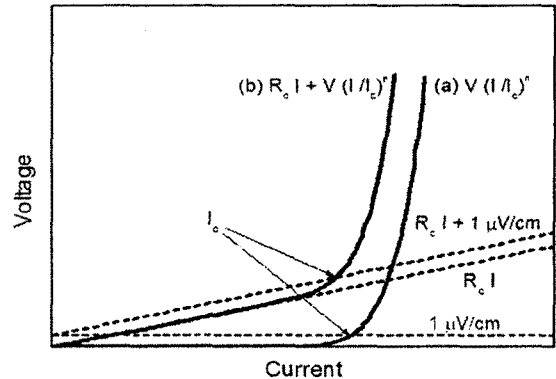
<그림 1> 접합을 가진 샘플에서 전압단자들의 배치

2.2 측정 및 해석

준비한 시편들의 I-V 특성 곡선을 액체질소 속인 77K에서 4단자법으로 측정하였다. 다심 고온초전도 도체는 여러 응용분야에 널리 사용되는데, 이 도체의 I-V 특성 곡선을 조사하는 것은 기본적인 물리 측면뿐만 아니라 실제 응용의 관점에서 매우 중요하다. 근사적인 power law 특성식

$$V = V_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n \quad (1)$$

으로 임계전류 근처에서의 flux motion behavior를 묘사할 수 있다. 여기서



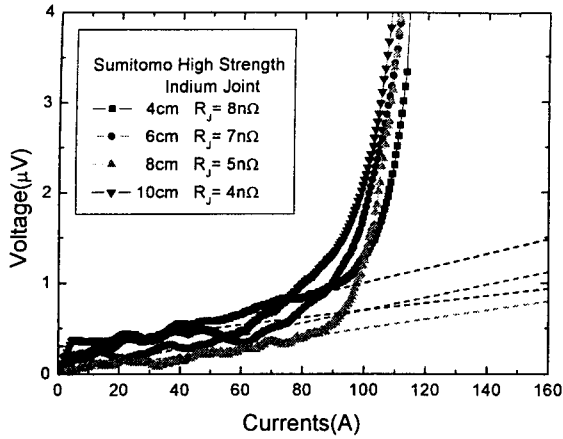
<그림 2> 초전도 도체의 전형적인 I-V 특성 곡선

2.3 결과 및 논의

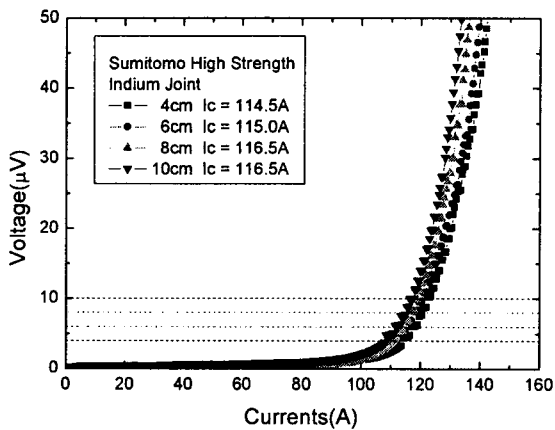
2.3.1 접합저항

그림 3에 서로 다른 접합길이를 가지는 Sumitomo high strength type 도체의 I-V 특성 곡선을 나타내었다. Indium을 사용하여 접합을 하였는데, 접합길이가 길수록 접합저항이 작아졌다. 그러나 그림 3에 보였듯이 직선 기울기로부터 벗어나기 시작하는 위치는 일관성이 없어 보였는데, 시편을 만드는 과정에서 생긴 손상에 의한 것으로 생각된다. 또한 접합길이가 길수록 접합면적이 증가하여 한 쪽의 초전도 도체에서 다른 쪽의 도체로 흐르는 전류에 의한 접합 발생이 작아 즉 접합저항의 감소에 의한 발생하는 줄임이 작아 I_c 가 약간 증가하는 것을 보였다(<그림 4>). 이 실험의 결과만 보면 접합 길이는 대략 8cm가 적당한 것으로 나타났다. 일반 땀납을 사용한 경우 접합부 길이가 8cm이었을 때 접합저항은 약 6nΩ이었다. 도체에 손상을 입지 않는다면 어떤 재료를 사용하든지 상관없다.

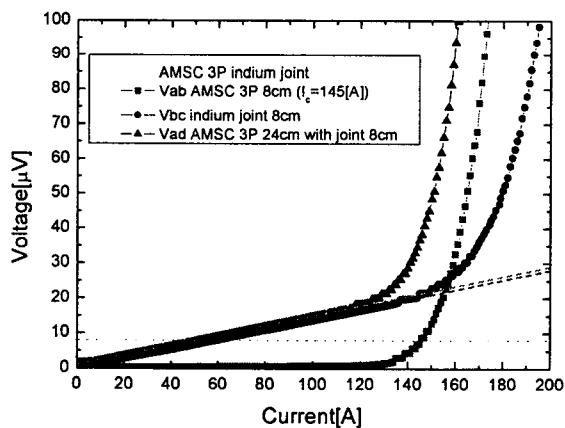
<그림 5>에 접합길이가 8cm인 AMSC 3ply 초전도 도체의 I-V 특성 곡선을 나타내었다. <그림 1>에서 접합부분은 b-c 구간이다. 접합이 없는 초전도 도체 부분의 I_c 는 145A이다. 그림 5로부터 구한 접합저항은 약 140nΩ이고 이 값은 Sumitomo 도체에서의 접합저항보다 훨씬 큰데, 이유는 두 도체 사이의 접합 사이에 혼합금 모재 외에 강도를 위해 불인 stainless steel tape 2개 층이 존재하기 때문이다. 50A부근에서 $1\mu V/cm$ 기준을 넘어서는 것을 확인하였다. 접합부 양단의 도체를 포함한 I-V 특성 곡선으로부터 구한 기울기 즉 접합저항값도 약 140nΩ임으로 접합시에 도체에 손상이 매우 적은 듯 것을 알 수 있다. 일반 땀납으로 접합을 한 경우에서도 같은 결과를 얻었으며, 이 경우 접합저항은 170nΩ이었다. 만약 접합시 접합부 양단에서 손상을 입었다면 접합저항보다 접합부 양단의 도체를 포함한 영역의 저항값이 더 크게 된다. 인듐을 사용한 경우에 접합저항이 더 작고, 도체의 손상이 덜한 것을 확인하였다.



〈그림 3〉 인듐 접합을 가진 Sumitomo 고강도 도체의 전류-전압 특성 곡선들(1)



〈그림 4〉 인듐 접합을 가진 Sumitomo 고강도 도체의 전류-전압 특성 곡선들(2)



〈그림 5〉 인듐 접합을 가진 AMSC 3ply 도체의 전류-전압 특성 곡선들

2.3.1 n-값

앞의 시편들에 대한 접합하기 전과 후의 n-값을 I-V 특성 곡선으로부터 구하여 <표 1>에 나타내었다. 접합하기 전 n-값은 Sumitomo 고강도형 도체가 21(±0.7)이고 AMSC 3ply 도체는 14(±0.3)이다. 접합을 하게 되면 정도의 차이는 있으나 대략 n-값이 50(±4)%정도로 감소하였다. I-V 특성 곡선에서 n-값은 I_c 이하 영역에서 전류가 작아질 때 얼마나 빨리 전압감소가 일어나는가를 나타낸다. 즉 n-값이 클수록 급격히 작아진다. n-값이 클수록 I_c 에 가까운 운전전류(I_o)를 정할 수 있음을 의미한다. 왜냐하면 I_c 이하에서도 도체의 길이가 길면 무시할 수 없는 정도의 전압발생이 되고 이 경우 줄(Joule) 열이 발생하기 때문이다.

〈표 1〉 여러 가지 초전도 접합 시편들의 n-값

	Material	Joint length	n-value		
			before	after	
Sumitomo HS	Indium	4cm	21.30	11.11	52%
		6cm	22.50	10.43	46%
		8cm	22.20	11.99	54%
		10cm	21.70	11.58	53%
Sumitomo HS	Solder	8cm	20.58	11.78	57%
AMSC 3ply	Indium	8cm	13.78	6.89	50%
AMSC 3ply	Solder	8cm	14.02	6.70	48%

3. 결 론

일본 Sumitomo사 high strength type과 미국 AMSC사의 3ply type 2종의 고온초전도 도체를 사용하여 접합 시편을 만들고 액체질소 온도(77K)에서 I-V 특성 곡선을 측정하여 분석한 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. Sumitomo 도체의 경우 인듐을 사용한 접합의 저항은 접합길이가 4-10cm이었을 때 4-8nΩ이었고, 접합길이가 길수록 저항은 작았다.
2. 납합을 사용한 경우도 비슷한 값을 나타내었다. 이 실험에서는 접합길이는 약 8cm정도가 적당한 것으로 나타났다.
3. 접합이 없는 도체의 n-값은 21정도였으나, 접합 도체의 값은 11정도로 약 50%정도 작아졌다.
4. AMSC 도체의 경우 stainless steel이 라미네이션되어 있어서 접합저항은 140-170nΩ정도였으며, 접합이 없는 도체의 n-값은 13-14정도이었으나, 접합 도체의 값은 6-7정도가 되었다.
5. 접합작업시 손상이나 접합저항 모두를 고려해 볼 때 AMSC 3ply 초전도 도체끼리의 접합은 인듐을 사용하는 것이 좋겠다.

본 연구는 과학기술부 지원의 한국전기연구원 기본연구사업비로 수행되었습니다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] R. Wayne McGhee, Earle E. Burkhardt, Adam Berryhill, and D. Michael Coffey, "Design and Test Results of a BSCCO-2223 Magnet for Gyrotron Application", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol 15, no. 2, pp. 1189-1191, Jun. 2005.
- [2] Y. Wolfus, A. Friedman, F. Kopansky, Y. Yeshurun, Z. Bar-Haim, Z. Ron, and N. Pundak, "Compact HTS Cryogen-Free Magnet for Magneto-Optics Research Setup", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol 15, no. 2, pp. 2320-2323, Jun. 2005.
- [3] M. H. Sohn, S. K. Baik, Y. S. Jo, E. Y. Lee, W. S. Kwon, Y. K. Kwon, T. S. Moon, Y. C. Kim, C. H. Cho, and I. Muta, "Performance of High Temperature Superconducting Field Coils for a 100 HP Motor", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol 14, no. 2, pp. 912-915, Jun. 2004.
- [4] W.H. Wames, L.D. Cooley, D.C. Larbalestier, Adv. Cryog. Eng. Mater. 34 (1988) 1009.
- [5] P. Kovač, L. Cesnak, T. Melis'ec, I. Hus'ek, K. Fro'hlich, Supercond. Sci. Technol. 10 (1997) 605.