

고온초전도 계자코일 제작을 위한 접합기술 연구

손명환, 김석환, 백승규, 조영식, 서무교, 이연용, 권영길, 윤문수
한국전기연구원 전략기술연구단

Study on Joint Technology for HTS Field Coils

M.H. Sohn, S.W. Kim, S.K. Baik, Y.S. Jo, M.G. Seo, E.Y. Lee, Y.K. Kwon, M.S. Yun
KERI, Strategic Electrotechnology Research Laboratory

mhsohn@keri.re.kr

Abstract - Six different types of joining between two parallel high T_c superconducting tapes were prepared and I-V characteristic curves were obtained at the atmosphere of liquid nitrogen. Resistances in joint parts were estimated from I-V curves. We selected the best jointing method among these six methods and its availability for fabricating HTS field coils is discussed.

1. 서 론

초전도현상을 발견한 이후로 초전도기술을 전력분야에 응용하고자하는 노력들이 선진국을 비롯한 세계 곳곳에서 오늘날까지 계속되고 있으며, 고온초전도(HTS)의 발견은 액체헬륨을 이용하는 기존의 극저온 냉각방식에서 액체질소나 냉동기를 사용한 냉각방식을 채택하게 함으로써, 냉동기부분의 부피와 유지비용 등을 대폭적으로 절감하는 것을 가능하게 하였다. 초전도전력기에 사용하는 HTS 도체는 HTS 재료가 부서지기 쉬운 금속산화물 세라믹의 고유한 특성을 가지기 때문에 금속피복재를 가진 테이프 형태의 장선으로 제작된다. 이 HTS 도체의 형상 때문에 대부분의 초전도동기발전기나 초전도동기모터에 적용되는 계자코일은 레이스트랙형 팬케이크 코일형태이다[1-3]. 따라서 각 팬케이크 코일 사이에는 반드시 접합이 이루어져야만 하고 이 접합은 초전도접합이 가장 좋겠지만, 열처리를 해야 하는 어려움이 있기 때문에 접합작업이 가능하고 가장 작은 저항을 나타내는 접합이 요구된다.

본 연구에서는 계자코일을 만들기 위해 제작한 팬케이크 코일들 사이에서 이루어지는 접합을 가정하여 일정한 간격으로 떨어진 최외각에 권선된 HTS 테이프도체들 사이의 접합을 6가지 방법으로 접합한 다음 I-V 특성 곡선을 측정하고 얻은 결과들을 서로 비교하였다.

2. 실험방법

본 실험에 사용한 Bi-2223 HTS선재는 Nordic Superconductor Technologies(NST)사가 제조한 것이다. NST사 도체는 은합금피복재 바깥에 절연이 되어 있는데, 이 절연막을 제거하기 위해 인두로 접합할 부분을 가열 한 다음 날카로운 칼로 긁어 고온초전도선재에 피복된 절연피막을 제거하였다[4]. 접합할 부분의 길이는 모두 25mm 이내로 정하였다. 길이 25mm에는 약 7개의 HTS 도체를 접합할 수 있었다. 먼저, 두 HTS 도체를 0.5mm 떨어진 상태로 그림 1에 나타낸 것처럼 나란히 배열을 한 다음 HTS 도체 혹은 구리판 등을 대고 solder paste(SSX-430-830 Fusion Automation Inc.)를 사용하여 6 종류의 접합을 만들었다.

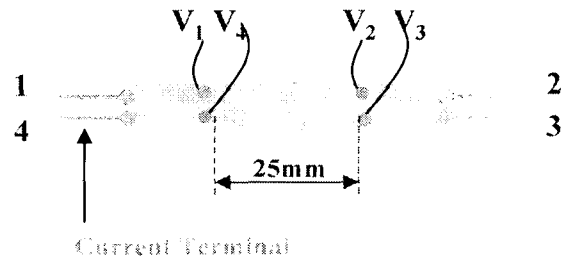


Fig. 1. Configuration of voltage and current taps on joint sample

HTS 도체의 경우 접합시키는 HTS 도체가 나란한 두 도체에 서로 수직하도록 1개[시편 ①], 3개[시편 ②], 7개[시편 ③]를 배치한 3 종류의 접합을 만들었고, HTS 도체와 비교하기 위해 1개의 구리판을 사용하여 접합한 시편[시편 ④]도 만들었다. 그리고 solder paste만으로 두 나란한 HTS 도체 사이를 길이 25mm되게 채운 접합[시편 ⑤]과 이 접합에 7개의 HTS 도체를 동시에 접합한 시편[시편 ⑥]도 만들었다.

이렇게 만들어진 접합의 특성을 보기 위해 각 접합시편을 액체질소 속(77K)에서 4단자법으로 I-V 특성 실험을 행하였다. 그림 1의 경우 전류를 1-3번 단자로 흘린 경우 전압은 V_1-V_3 을 측정하였고, 2-4번 단자로 흘린 경우 전압은 V_2-V_4 를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

절연피복된 HTS도체와 절연피복을 제거한 HTS도체의 I-V 특성 곡선을 그림 2에 나타내었다. $1\mu\text{V}/\text{cm}^2$ 의 기준에서 두 시편 모두 임계전류(I_c)는 40A 정도로 같아서 절연피복재의 제거에 의한 I_c 의 열화는 없는 것으로 생각하였다.

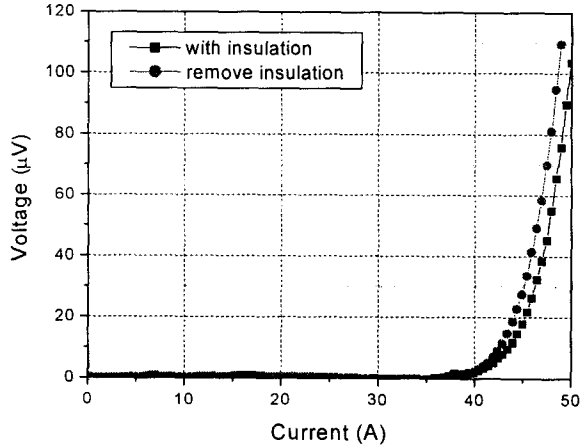


Fig. 2. I-V curves of HTS tapes with insulation and removed one, respectively

HTS 도체만으로 접합한 3가지 경우의 I-V 특성을 그림 3에 나타내었다. 시편 ①은 HTS 도체 하나로 접합을 한 것으로 기울기로부터 구한 저항은 $2.5[\mu\Omega]$ 이다. 이 때 전류가 흐르는 경로를 고려할 때 저항은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$R_1 = R_c + R_c = 2R_c \quad (186)$$

R_1 은 전체 저항이고, R_c 는 solder paste로 접합한 각 접합에서 생긴 접합 저항이다. 여기서, 은 피복재의 저항은 접합저항보다 훨씬 작기 때문에 고려하지 않는다. 시편 ①에서 일어난 접합 저항 R_c [①]은 $1.25[\mu\Omega]$ 이다. 시편 ②와 시편 ③처럼 N개의 HTS 도체로 나란한 두 HTS 도체를 접합하였을 경우 전체저항은 저항은 다음 식으로 표현된다.

$$R_{\text{total}} = \frac{1}{N}(R_c + R_c) = \frac{2R_c}{N} \quad (2)$$

$$R_c = \frac{N}{2} \times R_{\text{total}} \quad (3)$$

따라서, 시편 ②는 3개의 HTS 도체로 이루어졌으므로, 그림 3으로부터 접합저항 R_c [②]는

$$R_c$$
[②] = $\frac{3}{2} \times 0.5[\mu\Omega] = 0.75[\mu\Omega]$ (4)

이다. 7개의 HTS 도체로 이루어진 시편 ③의 접합저항 R_c [③]은 $1.75[\mu\Omega]$ 이다. 이 결과로부터 시편 ②의 접합이 가장 잘 이루어졌다.

그림 4에는 HTS 도체대신에 구리판을 사용한 경우[시편 ④]와 두 HTS 도체의 측면에 solder paste로서만 접합한 경우[시편 ⑤]의

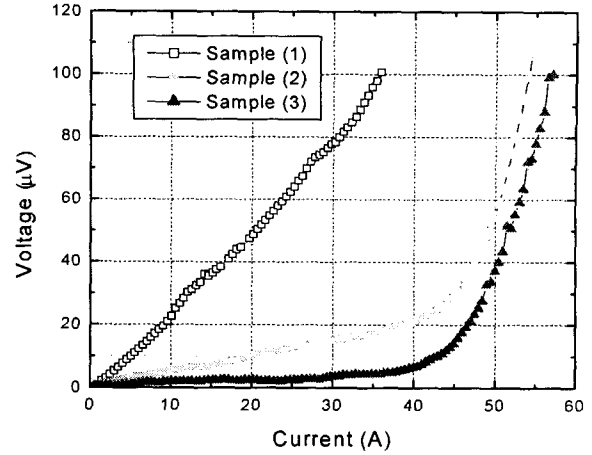


Fig. 3. Three cases of I-V characteristic curves with variation of numbers of joints. Sample (1) : one piece of tape jointed crossly on parallel HTS tapes, Sample (2) : three pieces, Sample (3): seven pieces

I-V 특성곡선을 나타낸다. 시편 ④는 길이 25mm, 두께 0.6mm인 구리판을 사용하였는데, 이때의 저항은

$$R_4 = R_c + R_{Cu} + R_c = 2R_c + R_{Cu} \quad (5)$$

이다. 여기서 구리의 저항 R_{Cu} 는 두 HTS 도체 사이의 간격이 0.5mm이기 때문에 77K에서 약 $5 \times 10^{-2}[\mu\Omega]$ 이다. 그림 4의 기울기로부터 R_4 는 약 $5[\mu\Omega]$ 로 측정되었기 때문에

$$R_{Cu} \ll R_4 \approx 2R_c \quad (6)$$

이다. 따라서 접합저항 R_c [④]는

$$R_c$$
[④] $\approx \frac{R_4}{2} = \frac{5}{2} = 2.5[\mu\Omega]$ (7)

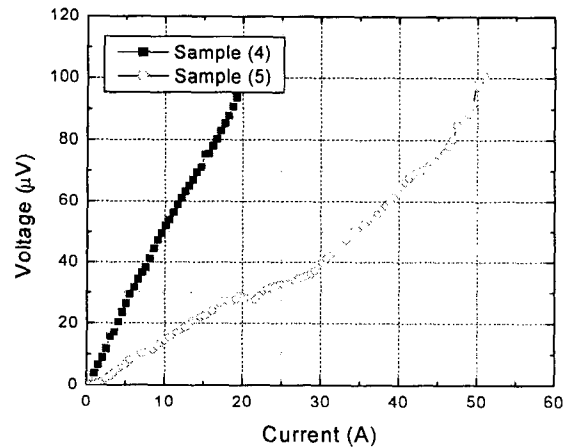


Fig. 4. Two cases of I-V characteristic curves of samples with variation of joining materials.

Sample (4) : Cu tape used

Sample (5) : soldering paste used only.

로 계산된다. HTS 도체의 경우보다 훨씬 나쁜

접합이 이루어졌다고 볼 수 있는데 이러한 결과는 0.6mm 두께의 도체가 HTS 도체보다 더 딱딱하여 경계면에서 접합이 잘 이루어지지 못한 것으로 생각된다. 이것에 비하여, HTS 측면에 길이 25mm만큼 solder paste만으로 접합한 경우 저항 R_s [⑤] 구하면, 그림 4로부터

$$R_s[⑤] \approx \frac{70}{40} = 1.75[\mu\Omega] \quad (8)$$

이다.

본 연구의 목적은 두 HTS 도체사이의 접합에서 가장 작은 접합저항을 가지는 접합방법을 찾아내는 것이다.

저항 두개를 직렬로 연결하면 저항값은 더한 값이 되고, 병렬로 연결하면 저항값은 작은 저항값보다도 더 작게 된다. 따라서 HTS 도체를 접합저항 R_c [②]와 같이 작게 7개(25mm 사이의 최대접합수)를 접합하고 측면에도 R_s [⑤]의 저항을 가지는 측면 접합을 동시에 한다면, 계산상으로는 총 저항 R_{total} 은,

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{total}} &= \frac{7}{2R_c} + \frac{1}{R_s} \\ &= \frac{7}{2R_c} \left\{ \frac{R_s + 2R_c/7}{R_s} \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

이므로 R_c 에 R_c [②]를 대입하면,

$$\begin{aligned} R_{total} &= \frac{2R_c[②]}{7} \left\{ \frac{R_s}{R_s + 2R_c[②]/7} \right\} \\ &= 2 \times \frac{0.75}{7} \left\{ \frac{1.75}{1.75 + (2 \times 0.75)/7} \right\} \quad (10) \\ &= 0.19[\mu\Omega] \end{aligned}$$

이다. 그림 5에 두 HTS 도체 사이를 solder paste로 채운 후 HTS 도체 7개로 접합한 시편 ⑥의 I-V 특성 곡선을 나타낸다. 그림 5의 기울기로부터 구한 저항은 약 0.15 $\mu\Omega$ 이다. 이 값은 앞의 식 (10)에서 계산한 값보다도 더 작다.

시편 ⑥의 접합저항 R_c [⑥]은 위 식 (9)로부터 구하면,

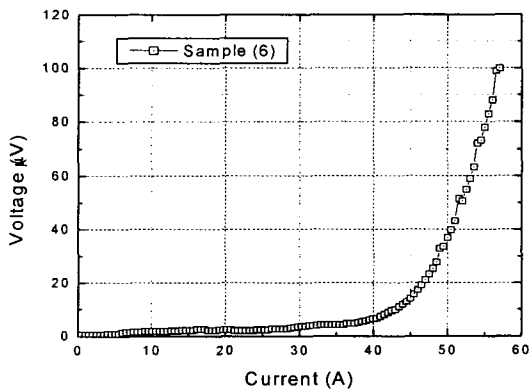


Fig. 5. I-V characteristic curves of sample jointed by using both joining methods adapted in samples (3) and (5).

$$\begin{aligned} R_c[⑥] &= \frac{7}{2} \left\{ \frac{R_s \times R_{total}}{R_s - R_{total}} \right\} \\ &= \frac{7}{2} \left\{ \frac{1.75 \times 0.15}{1.75 - 0.15} \right\} \quad (11) \\ &= 0.574[\mu\Omega] \end{aligned}$$

이다. 이 값은 지금까지의 6가지 접합 중에서 가장 작은 값이다. 따라서, 두 나란한 HTS 도체 사이에 solder paste를 채우고 HTS 도체로 접합했을 때 접합이 더 잘 이루어졌다고 할 수 있다.

이 실험은 모두 액체질소 속에서 이루어 졌는데, 운전전류를 50A로 가정할 경우 접합에서 발생하는 주열은 약 0.375mW이다. 운전온도가 30K 정도로 더 낮아지면 저항값도 더 낮아질 것으로 기대되어 발생하는 주열도 더 작아질 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 일정한 간격으로 떨어진 두 HTS 도체들 사이의 접합을 6가지 방법으로 접합하여 I-V 특성 곡선을 측정 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 나란한 두 HTS 도체 사이에 solder로 채우고 7개의 HTS 도체를 사용하여 접합하는 것이 가장 접합이 잘 되었는데, 이 때 전체 저항값은 0.15 $\mu\Omega$ 이었다.

2. 77K에서 운전전류 50A일 경우 발생하는 주열은 0.375mW로 계산되었고, 운전온도가 낮아지면 접합저항이 낮아져 발생하는 열이 더 줄어들 것으로 생각되는데, 확인 실험이 필요하다.

3. 이 접합기술은 초전도회전기용 계자코일을 제작하는데, 충분히 사용 가능한 기술로 판단된다.

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] J.P. Voccio, B.B. Gamble, C.B. Prum, H.J. Picard, "125 HP HTS Motor Field Winding Development", IEEE Trans. on Appl. Supercon., Vol. 7, No. 2, 519-522, 1997
- [2] G. Papst, B.B. Gamble, A.J. Rodenbush and R. Schottler, "Development of synchronous motors and generators with HTS field windings", Supercon. Sci. Technol. Vol. 10, 924-926, 1997
- [3] W. Nick, G. Nerowski, H.-W. Neumuller, M. Frank, P. van Hasselt, J. Frauenhofer, F. Steinmeyer, "380kW Synchronous Machine with HTS Rotor Windings-Development at Siemens and First Test Results", paper presented at EUCAS 2001, Copenhagen, August 26-30, 2001
- [4] <http://www.nst.com/pdf/notes/4.pdf>, Application Note 004v01, "Soldering and splices"