

고온초전도 코일 제작을 위한 접합특성 연구

손명환, 김석환, 백승규, 조영식, 서무교, 이인용, 권영길

A Study on Joint Characteristics for High Tc Superconducting Coils

M.H.Sohn, S.W.Kim, S.K.Baik, Y.S.Jo, M.G.Seo, E.Y.Lee, Y.K.Kwon  
KERI, Applied Superconductivity Research Group

**Abstract** - Some different types of joining between two parallel high Tc 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 methods and its resistance were obtained at 28K. The availability of this joint method for fabricating HTS field coils is discussed.

1. 서 론

고효율, 저손실, 고안정도가 기대되는 초전도전력기기 특히 고온초전도(HTS)동기발전기나 HTS동기모터의 계자코일은 레이스트랙형 팬케이크 코일형태로 제작되어 응용이 된다.[1-3]. 이것은 HTS가 부서지기 쉬운 금속 산화물 세라믹의 고유한 특성으로 인하여 테이프 형태를 가지기 때문이다. 각 팬케이크 코일들 사이에는 반드시 접합이 이루어져야만 하고 이 접합은 실제 접합작업이 가능하고 가장 작은 저항을 나타내는 접합이 요구된다.

본 연구에서는 계자코일을 만들기 위해 제작한 팬케이크 코일들 사이에서 이루어지는 접합을 가정하여 일정한 간격으로 떨어진 두 HTS테이프들 사이의 접합을 땀납, 구리판, HTS테이프 등을 이용한 여러 가지 방법으로 접합한 다음 I-V 특성 곡선을 측정하고 기울기로부터 구한 저항값들을 서로 비교하였다. 또한, 최소 저항을 나타내는 접합에서의 주울열도 계산하였다.

2. 실험 방법

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 HTS선재에 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 나타난 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.

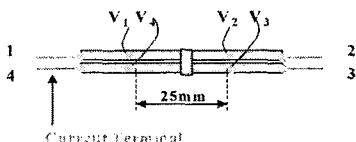


Fig.1. Configuration of voltage and current taps on joint sample

HTS 도체의 경우 접합시키는 HTS 도체가 나란한 두 도체에 서로 수직하도록 1개(시편 ①), 3개(시편 ②), 7개(시편 ③)를 배치한 3종류의 접합을 만들었고, HTS 도체와 비교하기 위해 1개의 구리판을 사용하여 접합한 시편(시편 ④)도 만들었다. 그리고, solder paste만으로 두 나란한 HTS 도체 사이를 길이 25mm 되게 채운 접합(시편 ⑤)과 이 접합에 7개의 HTS 도체를 동시에 접합한 시편(시편 ⑥)도 만들었다. 접합용 HTS 도체로 NST 것보다 Ic가 높은 ASC 도체 및 Innost 도체를 사용하여 시편⑥과 같은 방법으로 시편 ⑦, ⑧을 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 V1-V3을 측정하였고, 2-4번 단자로 흘린 경우 전압은 V2-V4를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

절연피복된 HTS도체와 절연피복을 제거한 HTS도체의 I-V 특성 곡선을 측정하여 임계전류(Ic)를 측정하였다. 1uV/cm<sup>2</sup>의 기준에서 두 시편 모두 임계전류(Ic)는 40A정도로 같아서 절연피복재의 제거에 의한 Ic의 열화는 무시할 수 있는 것으로 생각하였다.

HTS 도체만으로 접합한 3가지 경우의 I-V 특성을 그림 2에 나타내었다. 시편 ①은 HTS 도체 하나로 접합을 한 것으로 기울기로부터 구한 저항은 2.5(μΩ)이다. 이 때 전류가 흐르는 경로를 고려할 때 저항은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$R_1 = R_c + R_c = 2R_c \quad (1)$$

R1은 전체 저항이고, Rc는 solder paste 접합한 각 접합에서 생긴 접합 저항이다. 여기서, 은 피복재의 저항은 접합저항보다 훨씬 작기 때문에 고려하지 않는다. 시편 ①에서 일어난 접합 저항 Rc[①]은 1.33(μΩ)이다. 시편 ②와 시편 ③처럼 N개의 HTS 도체로 나란한 두 HTS 도체를 접합하였을 경우 전체저항은 저항은 다음 식으로 표현된다.

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

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

따라서, 시편 ②는 3개의 HTS 도체로 이루어졌으므로, 그림 2로부터 접합저항 Rc[②]는

$$R_c[②] = \frac{3}{2} \times 0.525 [\mu\Omega] = 0.788 [\mu\Omega] \quad (4)$$

이다. 7개의 HTS 도체로 이루어진 시편 ③의 접합저항 Rc[③]은 1.575(μΩ)이다. 이 결과로부터 시편 ②의 접합저항이 가장 작아 각각의 접합은 잘 되었지만 전체 접합저항은 거의 같았다.

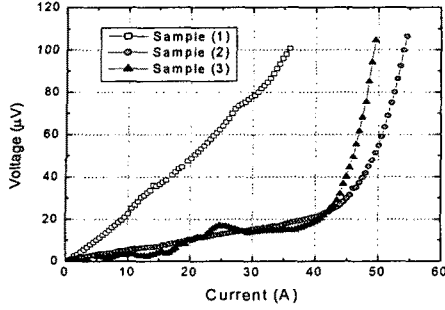


Fig. 2. Three cases of I-V characteristic curves with variation of numbers of joints. Sample (1) : one piece of tape jointed crossly on parallel HTS tapes, Sample (2) : three pieces, Sample (3) : seven pieces

그림 3에는 HTS 도체대신에 구리판을 사용한 경우(시편 ④)와 두 HTS 도체의 측면에 solder로서만 접합한 경우(시편 ⑤)의 I-V 특성 곡선을 나타낸다. 시편 ④는 길이 25mm, 두께 0.6mm인 구리판을 사용하였는데, 이 때의 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 3의 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

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

으로 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 solder만으로 접합한 경우 저항  $R_s[⑤]$ 를 구하면, 그림 3으로부터

$$R_s[⑤] \approx \frac{64}{40} = 1.6 [\mu\Omega] \quad (8)$$

이다.

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

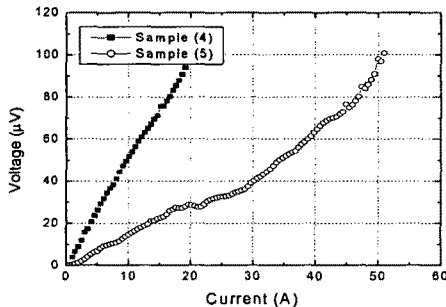


Fig. 3. Two cases of I-V characteristic curves of samples with variation of joining materials. Sample (4) : Cu tape used Sample (5) : soldering paste used only.

저항 두개를 직렬로 연결하면 저항값은 더한 값이 되고, 병렬로 연결하면 저항값은 작은 저항값보다도 더 작게 된다. 따라서, 저항  $R_c[②]$ 와 같이와 같이 접합저항이 작게 7개(25mm 사이의 최대접합수)의 HTS 도체를 접합하고 측면에도  $R_s[⑤]$ 의 저항을 가지는 측면 접합을 동시에 한다면, 계산상으로 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,

$$\begin{aligned} R_{total} &= \frac{2R_c[②]}{7} \left\{ \frac{R_s}{R_s + 2R_c[②]/7} \right\} \\ &= 2 \times \frac{0.788}{7} \left\{ \frac{1.6}{1.6 + (2 \times 0.788)/7} \right\} \\ &= 0.197 [\mu\Omega] \end{aligned} \quad (10)$$

이다. 그림 4에 두 HTS 도체 사이를 HTS 도체 7개로 접합하고 solder로도 사이를 채워서 접합한 시편 ⑥의 I-V 특성 곡선을 나타낸다. 그림 4의 기울기로부터 구한 저항은 약  $0.15 [\mu\Omega]$ 이다. 이 값은 앞의 식 (10)에서 계산한 값보다도 더 작은 값이다.

시편 ⑥의 접합저항  $R_c[⑥]$ 은 위 식 (9)로부터 구하면,

$$\begin{aligned} R_c[⑥] &= \frac{7}{2} \left\{ \frac{R_s \times R_{total}}{R_s - R_{total}} \right\} \\ &= \frac{7}{2} \left\{ \frac{1.6 \times 0.15}{1.6 - 0.15} \right\} \\ &= 0.579 [\mu\Omega] \end{aligned} \quad (11)$$

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

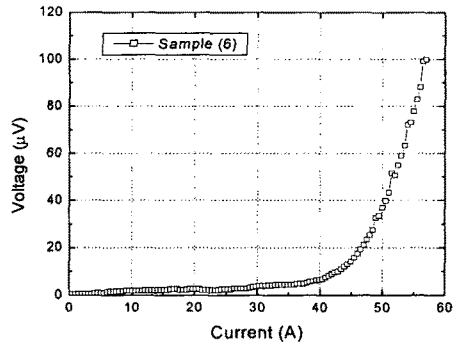


Fig. 4. I-V characteristic curves of sample ⑥ joined by using both joining methods adapted in samples (3) and (5).

시편 ⑥과 같은 방법으로 접합을 하면서 두 초전도도체를 연결하는 도체로 AMSC와 Innost사의 테이프를 사용하여 시편 ⑦과 시편 ⑧을 만들어 77K에서 I-V 특성 곡선을 측정하였다. 그 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림에서도 알 수 있듯이  $I_c$ 는 각각 조금씩 차이가 있지만 40A정도에서 발생하는 전압의 크기는  $6 [\mu V]$ 로 비슷하였다. 발생전압으로부터 구한 접합저항은 대략  $0.15 [\mu\Omega]$ 이다.

그림 6에 28K에서 측정된 시편 ⑥의 I-V 특성 곡선을 나타내었다.  $I_c$ 는 110A 이상으로 생각되고 100A에서의 발생전압으로부터 구한 접합저항은  $0.045 [\mu\Omega]$ 이다. 접합저항이 선형적으로 변한다고 가정하여 운전온도

30K에서의 접합저항을 계산하면,

$$\begin{aligned}
 R_c[30K] &= R_c[28K] \\
 &+ \frac{R_c[77K] - R_c[28K]}{77 - 28} \times [30 - 28] \quad (12) \\
 &= 0.045 + \frac{0.15 - 0.045}{77 - 28} \times 2 \\
 &= 0.0493 [\mu\Omega]
 \end{aligned}$$

이다. 이 값은 77K에서의 접합저항 값의 약 1/3이다.

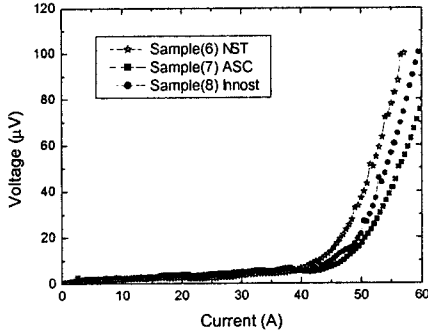


Fig. 5. I-V characteristic curves of samples joined by using superconducting tapes of other company's at 77K.

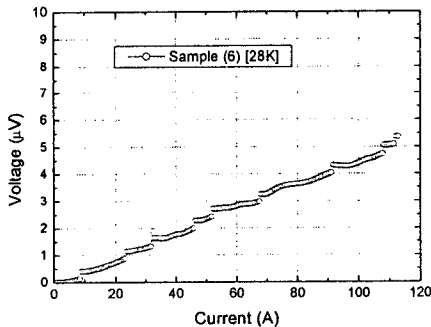


Fig. 6. I-V characteristic curves of sample (6) jointed by using NST tapes at 28K.

이 실험으로부터 자기장을 무시한 경우 운전온도 30K에서 운전전류에 따른 접합 하나에서 발생하는 주울열을 그림 7에 나타내었다. 운전전류가 50A일 경우 주울열은 0.123mW 발생한다. 운전전류가 70A이면 약 0.24mW이다.

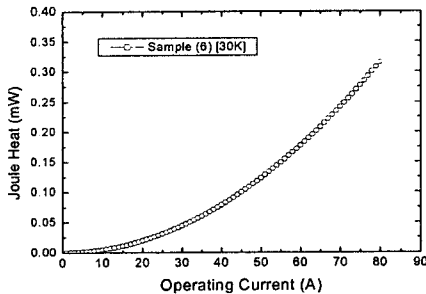


Fig. 7. Joule heat vs. operating current of sample (6) at 30K, operating temperature.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 일정한 간격으로 떨어진 두 HTS 도체들 사이의 접합을 8가지 방법으로 접합하여 I-V 특성 곡선을 측정하고 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 나란한 두 HTS 도체 사이에 solder로 채우고 HTS 도체들을 사용하여 접합하는 것이 가장 접합이 잘 되었는데, 이 때 전체 저항값은  $0.15[\mu\Omega]$ 이었고, 28K에서는  $0.045[\mu\Omega]$ 이었다.

2. 30K에서 운전전류 50A와 70A일 경우 발생하는 주울열은 각각 0.123mW 0.24mW로 계산되었고, 운전전류가 커지면 전류의 제곱에 비례하여 주울열도 커진다.

3. 이 접합기술은 초전도회전기용 제자코일을 제작하는데, 충분히 사용이 가능한 접합기술로 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. Fraunhofer, 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"