

Nb₃Sn 초전도 CICC 의 sub-cable to sub-cable 접합 및 접합저항 측정

이호진, 홍계원, 김기백, 권선철, 김기만*
한국원자력연구소 기능성재료분야, * 삼성종합기술원 에너지 Lab

Measurement of electrical resistance at the Nb₃Sn CICC joint fabricated by sub-cable to sub-cable joining

H.J. Lee, G.W. Hong, K.B. Kim, S.C. Kwon, K.M. Kim*
Functional Material Div. KAERI, * Energy Lab. SAIT

hilee1@nanum.kaeri.re.kr

Abstract - A small scale joint sample of Nb₃Sn CICC was fabricated by sub-cable to sub-cable joining. This joint was produced by parallel insertion of one end of each sub-cable into the sub-cable space of the other side of cable, which can decrease the equivalent electrical resistance at the joint. The sub-cable to sub-cable joint is expected to have average properties, dc resistance and ac losses, in view of the shapes of ITER type joint and strand to strand joint. The 3.8 nOhm of dc resistance was measured in the range of 10-200A transport current. The normalized resistivity of the joint was about 6.7 μ Ohm-mm². Considering the normalized resistivity, the full scale joint prepared by sub-cable to sub-cable joining may have similar joint dc resistance with other conventional full scale joints with a shorter joining length.

1. 서 론

핵융합로 또는 Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) system 과 같이 대규모 장치에 사용되는 초전도자석을 만들기 위해서는 단위 코일과 코일사이의 전기적, 자기적 연결을 위한 Cable-in-Conduit Conductor (CICC) 의 접합이 필요하다. CICC 접합부는 초전도 권선 도체와 마찬가지로 열 적인 안정성을 가져야 한다. 접합부의 전기저항을 작게 하여 Joule 열을 감소시키고, 급격히 변하는 외부 자기장의 변화에 의한 ac loss 발열을 최소화시켜 quench 의 원인이 되지 않도록 설계 제작되어

야 한다. 또한 높은 외부 자기장에 의한 Lorentz 힘에 견딜 수 있는 기계적인 강성을 가져야 하며, 접합 작업성이 좋아야 한다[1].

높은 자기장을 얻거나 혹은 높은 자기장에서 사용하기 위해서는 Nb₃Sn 초전도선재를 사용하는 CICC 가 주로 사용되고 있다. 이 초전도체는 열처리 후 기계적으로 매우 취약해져 다루기 어려운 단점을 가지고 있으므로, 열처리 전에 미리 접합할 수 있는 단말부를 만들어야 하고, 열처리 후 strand 들의 변형을 최소화해야 한다. 따라서 열처리 후 권선할 수 있는 NbTi 초전도선재에 비해 접합과정이 복잡하고 상대적으로 불리한 접합 특성을 갖는다.

US-DPC (Demonstration Poloidal Coil) 나 ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) 형의 접합은 CICC 의 jacket 을 벗기고 cable 전체를 한 개의 구리 sleeve 로 감싼 후, 원형 혹은 편평한 모양으로 compaction 하고, 열처리 후 두 개의 단말부를 서로 soldering 하여 lap 접합하는 방법이다. 이 형태에서 ac loss 를 감소시키기 위해 sleeve 내의 strand 간 soldering 하지 않거나, 혹은 연결부분에 barrier 를 사용하는 방법을 사용하기도 한다[1][2].

위의 방법과는 달리 strand to strand 접합 방법은 NbTi CICC 와 같이 열처리 후 변형이 자유로운 연결 매체를 사용하여 열처리 후 접합 작업을 수행할 수 있는 방법이다. 이 접합부는 접합길이가 짧고, strand 간의 접합을 통해 ac loss 는 물론 전기저항을 감소시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 통전전류의 unbalance 문제와 열처리 후 strand 단위의 작업으로 인한 손상 가능성을 예상할 수 있다[3].

본 연구에서는 US-DPC 형의 접합방법과, strand to strand 접합방법의 중간 형태로 sub-cable to sub-cable 접합방법을 제시하였다. 이 접합 방법은 cable 을 몇 개의

sub-cable 로 나누고, 각각에 대하여 단말부를 만들어 접합시키는 방법으로서, 위에서 설명한 두 가지 방법의 중간특성을 가질 수 있을 것으로 생각하였다. 작업성을 검토하기 위해 소규모 시편을 제작하였으며, dc 접합 저항을 측정하여 기본적인 접합 특성을 조사하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 Sub-cable to sub-cable 접합 시편제작

본 연구에서 제안된 개념을 사용하여 그림 1과 같은 소규모 접합 시편을 제작하였다. 접합시편을 제작하기 위해 우선 두 개의 소규모 Nb₃Sn CICC 를 제작하였다. 사용된 Nb₃Sn strand 는 기존 상품화된 LMI CICC 의 jacket 을 벗기고 cable 을 풀어 사용하였다[4]. 이 strand 들을 이용하여 36 (3x3x4)개의 strand 갖는 cable 로 사용하였다. 이 cable 을 구리 튜브에 넣어 인발 작업으로 compaction 하여 소규모 CICC 를 제작하였다. 길이는 약 45 cm 이며, 외경은 8.1 mm 로 volume fraction 은 약 37 % 였다. 또한 열처리 후 CICC 간의 접합을 위한 연결 매체 (jumper)로 사용하기 위해 32 개의 NbTi strand 를 갖는 CICC 를 제작하였으며, 2 개의 Nb₃Sn CICC 와 연결시키기 위해 U 자 형태로 bending 하였다.

연결할 두개의 Nb₃Sn CICC cable 과 U bending 된 NbTi CICC cable 은 각각 12 개 strand 를 갖는 3 개의 sub-cable 로 나누고, 각 sub-cable 을 0.15mm 두께의 얇은 구리판으로 감싼 후 flat 한 ribbon 형태로 만들었으며, 이 ribbon 안의 cable 은 접합저항을 줄이기 위해 열처리 후 soldering 하였다. 이 경우 구리판이 얇아 compaction 은 하지 못했다. 한 개의 sub-cable 의 접합 단말부 크기는 길이 42 mm, 폭 10 mm, 두께는 약 1.8 mm 정도였다.

Table 1. Heat treatment scenario

25°C/hr heating	220°C 175 시간 유지
50°C/hr heating	340°C 96 시간 유지
75°C/hr heating	650°C 180 시간 유지
100°C/hr cooling	

열처리 조건은 표1 과 같이 수행하였으며, 열처리 후에 NbTi cable ribbon 을 끼워 넣기 위한 틈을 확보하기 위해 열처리 전 1 mm 두께의 stainless steel 을 sub-cable sleeve 들의 사이에 미리 끼워 넣었다. Argon gas 를 140 cc/min 의 속도로 공급하면서 열처리하였다[4].

열처리 후, 3 개의 sub-cable 를 갖는 두

개의 CICC 와 U bend 된 NbTi CICC cable 를 그림 1과 같이 Sn60Pb40 solder 로서로 접합시켰다. 접합부의 전체 두께는 12mm, 접쳐진 길이는 약 35mm 정도였다.

위와 같은 과정으로 제작된 시편과 외부 전원을 연결하기 위해 구리 튜브에 solder 를 채우고 용융 시킨 상태에서 시편의 끝단을 끼워 넣어 굳혀 연결하였다. 시험 중 시편의 고정을 위해 섬유강화된 Baiklite clamp 를 사용하였다. 접합부의 저항을 측정하기 위해 그림과 같이 voltage tap 을 설치하였다.

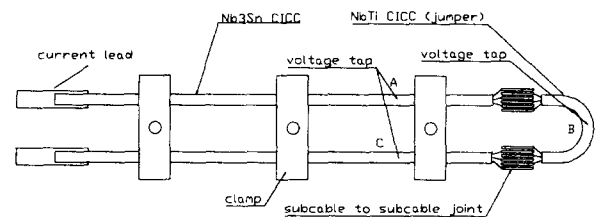


Fig.1 Schematic drawing of sub-cable to sub-cable joint sample

2.2 dc 접합 저항 측정

Glass 저온조를 사용하여 시편을 액체헬륨 온도로 냉각하였다. Glass 저온조는 진공 층을 갖는 두 개의 bottle 로 구성되어 있다. 외부의 bottle 에는 액체 질소를 채우고, 내부의 bottle 에는 액체 헬륨을 채워 시편을 냉각시킨다. 접합 측정은 4 단자 법을 사용하였으며, 10 - 200 A 사이의 dc 통전 전류 영역에서 전압 강하를 측정하였다. 10-200 A 사이에서의 접합 저항은 직선적으로 ohm 의 법칙을 따른다고 가정하여, 전류 전압 관계에서 기울기를 계산하여 저항을 구하였다. 전압강하는 nano voltmeter 를 사용하여 측정하였다.

2.3 결과 및 고찰

Sub-cable to sub-cable 접합의 특징은 sub-cable 단위로 compaction 이 가능하고, sub-cable 의 pitch 길이만큼 접합부의 길이를 줄일 수 있으며, ac loss 를 줄이기 위한 barrier 를 sub-cable sleeve 들 사이에 끼워 넣을 수 있는 공간을 확보할 수 있다. 작업성은 strand to strand 접합부에 비해서 수월하다.

접합시편에 초전도성을 주기 위해 수행한 열처리가 제대로 수행되었는지를 확인하기 위해 액체 질소에서, 즉 초전도성을 나타내지 못하는 온도영역에서 저항을 측정하고, 또 액체 헬륨 상태

에서 즉 초전도성을 가지는 온도영역에서 저항을 측정하여 이 값을 비교하고자 하였다. 액체 질소에 시편을 담아 측정한 결과, 통전 전류에 따른 그림 1의 A-C 사이의 전압강하는 그림 2와 같았다. 이 관계 도에서 저항을 계산하여 약 1×10^{-4} Ohm 정도의 값을 얻었다.

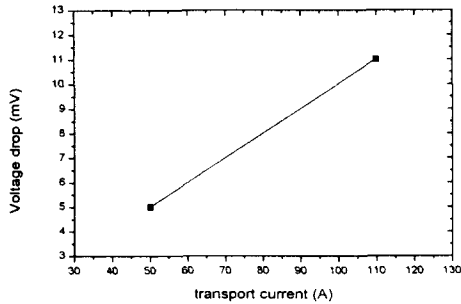


Fig.2 Voltage drop (V_{AC}) vs transport current relations at the temperature of liquid nitrogen

액체헬륨 온도에서 접합저항을 측정하기 위해 시편을 액체헬륨에 담근 후, 10A, 100A, 200A의 통전 전류를 설정하여 각각에 대하여 5분 동안 유지시키면서 전압을 측정하였다. 전압강하량이 작아 불안정하였으나, 일정시간 동안 전압이 안정하게 되는 영역을 찾아 전압 강하를 구하였다. 액체헬륨 온도에서 접합부 전체의 전류-전압강하(V_{AC}) 관계는 그림 3과 같았다.

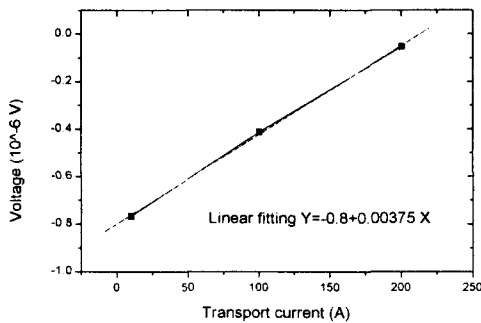


Fig.3 Voltage drop (V_{AC}) vs transport current relations at the temperature of liquid helium

그림 3에서 기울기를 least square method로 계산하여 약 3.8 n-Ohm 정도의 dc 접합저항을 얻었다

액체헬륨에서의 접합저항과 액체질소에서의 접합저항을 비교하면 약 10^{-5} 정도의 값의 변화를 가지고 있는데, 구리의 온도 강하에 따른 저항 감소가 0.1 배 정도라고 볼 때 이 저항 감소

는 시편의 초전도성에 의한 결과로 예상할 수 있다.

그림 1에서 한쪽 접합부에서의 전압 강하 (V_{AB})를 측정한 결과 그림 4와 같은 전류-전압강하 관계를 얻었으며, 기울기를 구하여 저항을 계산한 결과 약 2.4 nOhm 정도의 접합저항

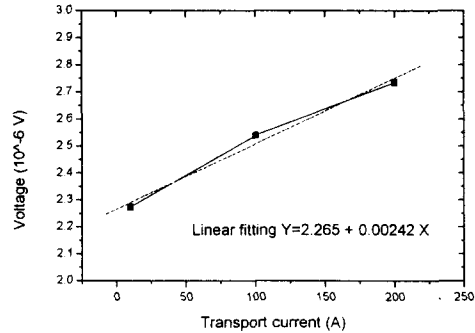


Fig.4 Voltage drop (V_{AB}) vs transport current relations at one side joint of sample

을 측정할 수 있었다. 전체 저항이 3.8 n-Ohm이므로 다른 한쪽은 1.4 n-Ohm 정도의 저항을 가지고 있음을 예상할 수 있으며, 따라서 같은 형태의 접합방법이라도 제작 조건에 따라 접합저항이 변할 수 있음을 확인할 수 있으며, 건전한 접합부를 제작하기 위해서는 표준화된 작업 공정을 가져야 할 것으로 생각된다.

두 CICC를 연결하는 전체 접합부에서의 저항값을 전체 접합 면적을 고려한 normalized resistivity로 나타내면 약 $6.7 \mu\text{Ohm}\cdot\text{mm}^2$ 의 값을 얻을 수 있다. 이 값은 통전 전류가 작아 다른 기존의 발표된 값과 직접 비교하기는 어려우나, 그 경향을 예상할 수는 있다. O. Herbelot가 발표한 소규모 Nb₃Sn 접합시편 data에 의하면 ribbon type의 lap 접합부에서 약 $0.5\text{-}2 \mu\text{Ohm}\cdot\text{mm}^2$ 정도의 값을 가지고 있다[5]. 위의 값과 비교할 때, 높은 normalized resistivity 값을 갖는 이유는 sleeve의 compaction을 수행하지 않아 strand 간의 접촉이 좋지 않고, 전체 접합부가 2개의 접합부로 구성되므로 저항이 커진 것으로 예상할 수 있다. 그러나 접합부가 층층이 병렬 형태이므로 접합 길이가 작아 compact한 장치에 적용될 수 있다.

MIT에서 제작된 소규모 NbTi CICC의 strand to strand 접합의 경우 $0.45 \mu\text{Ohm}\cdot\text{mm}^2$ 의 매우 낮은 값을 발표하였다. 이 시편은 strand 간의 접합이므로 접합부에서 전류 흐름 길이가 짧아 매우 낮은 전압 강하를 가질 것으로 예상할 수 있다[6]. 기존 발표된 full

scale 접합 시편의 경우 전류 값 및 크기가 달라 직접 비교할 수 없으나, 대개 1-100 μ Ohm-mm² 정도의 값들을 가지고 있다.

Sub-cable to sub-cable 접합부나, strand to strand 접합부와 같이 도체가 병렬 형태로 접합되는 시편의 경우 분리되는 도체사이의 저항 차이에 의해 통전 전류의 unbalance 가 발생할 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

3. 결 론

소규모 Nb₃Sn 초전도 CICC를 제작하고, 본 연구에서 제시된 sub-cable to sub-cable 접합방법으로 접합시편을 제작하였다. 액체헬륨 온도에서 접합 dc 저항을 측정된 결과 3.8 nOhm 정도의 값을 얻을 수 있었으며, 접합면적을 고려한 normalized resistivity 는 약 6.7 μ Ohm-mm² 로 계산되었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 수행하는 KSTAR project 의 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] P.Bruzzone, et al., "Design and R&D Results of the Joint for ITER Conductor", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.7, No.2, p461-464, 1997
- [2] M.M. Steeves, et al., "The demonstration Poloidal Coil", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.27, No.2, p2369-2372, 1991
- [3] H.Ogata, et al., "Design of the ITER Central Solenoid (CS) model Coil", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.32, No.4, p2320-2323, 1996
- [4] 김기만 외, " 차세대 초전도 핵융합 연구장치 개발사업", 과학기술부 연구 보고서 17-2-2, 1998
- [5] O.Herbelot, et al., "Superconducting Cable Joint Resistance", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.27, No.2, p1850-1853, 1991
- [6] S. Pourrahimi, "Fabrication of 40KA Superconducting sample-under-test for Samsung", MIT PSFC, final report, 1998