

접촉 면압에 따른 Nb₃Sn 도체의 Butt 접합부 특성

이호진, 김기백, 김기만*
한국원자력연구소, * 삼성전자(주) 기반기술연구소

Properties of Butt Joint in Nb₃Sn Conductors with change of Surface Pressure

Ho Jin Lee, Ki Baik Kim, Kee Man Kim*
Korea Atomic Energy Research Institute
* Samsung Advanced Institute of Technology

hjlee1@kaeri.re.kr

Abstract - Since a butt joint is smaller than a lap type joint, it is expected to have smaller AC losses. The butt joint is produced by the diffusion bonding of the contacting surface under pressured and heated condition. It is important to find robust joining conditions, because butt joint has small contact area and has the shape by which the quality of bonding is hard to be checked. In this research, the loading pressure is considered as the joining parameter to find optimum joining condition. The DC resistance of the joint may be changed by the surface pressure during joining process, because the superconducting strands near the contact surface are failed by large plastic deformation. The range from 10 MPa to 18 MPa is expected optimum surface pressure in the conditions of 1 hour heating time and 750 °C temperature in the vacuum furnace.

1. 서 론

핵융합용 자석과 같이 대형 초전도 자석을 제조하는 경우 단위 코일을 제작한 후 이를 연결하는 방법을 사용한다. 따라서 코일 접합부는 작은 직류저항, 교류손실 그리고 기계적으로 충분한 강도를 가지도록 설계 제작되어야 한다. 도관 케이블 도체 (Cable-in-Conduit conductor)는 전력 손실을 적게 하고 대 전류를 흘릴 수 있으므로 대형 자석의 도체로 사용되고 있으며, 이에 대한 접합 방법으로는 그 특성에 따라 크게 lap 접합, butt 접합 그리고 strand-to-strand 접합으로 구분할 수 있다[1].

Butt 접합 방법은 ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) 연구와 관련하여 일본의 CS (Central Solenoid)

모델 코일 연구에 사용된 형태로서 도체를 서로 맞대어 접합시키는 형상을 가지고 있다. 이 방법은 접촉 면적이 작고, 접합부 전체 크기가 작으므로 교류 손실이 적어 외부의 자기장이 급격히 변하는 위치에 사용할 수 있는 장점을 가진다. 또한 적절한 접합조건을 찾고, 장비를 제조하는 경우 다른 접합 방법에 비해 표준화 및 자동화가 수월하다[2,3].

그러나 접촉 면적이 lap 접합 방법에 비해 작으므로 접촉면에서의 완벽한 접합상태를 유지하여 전기 저항을 저항을 최소화해야 하고, 기계적으로 충분한 강도를 갖도록 해야 한다. 여러 가지 접합 변수에 대하여 접합부의 형상 및 특성이 크게 변할 수 있으므로 적합한 접합 조건을 찾는 것이 건전한 butt 접합에 매우 필요한 기술로 예상되고 있다.

2. 본 론

2.1 Butt 접합부 제조

접합부에서 접촉 거리를 줄이고 높은 강도를 얻기 위해 납땀 작업 대신 고상 확산 접합을 사용한다. Butt 접합 방법으로 현장에서 코일을 연결하는 경우 유도 가열 (inductive heating) 방법이 유리하지만 본 연구에서는 접합 면압에 따른 접합부의 접합 양상을 살펴보기 위해 전기가열로에 유압을 사용하는 가압 장치를 부착하여 butt 접합부를 제조하였다.

접합 시편을 제조하기 위해 486 개의 소선을 갖는 KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) 의 TF (Toroidal Field) 용 도관 케이블 도체를 사용하였다. 도체의 jacket를 제거하고, 약 40 mm 길이의 구리 슬리브 (sleeve) 에 케이블을 끼운 후 그림 1 과 같이 외경을 24.2 mm 까지 compaction 하였으며, 최종 시편의 void volume fraction 은 약 15 % 였다. 두 개의 compaction 된 케이블을 제작한 후 서로 접촉하는 면의 평행도 및 정밀한 표면 거칠기를 얻기

위해 wire 절단 방법으로 면을 가공한 후 #2000 까지 연마하였다.

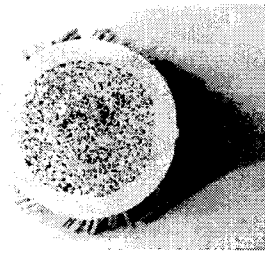


Fig. 1. Cross section of the compacted cable (V_f :15%).

두 개의 시편을 접합하기 위해 그림 2 와 같이 진공 가열로에 시편을 정렬시킨 후 750 °C 까지 가열하고, 여러 크기의 압력을 가하여 1 시간 유지시켜 접합하였다. 두 개의 접합면 사이에는 소선들 사이의 접합 면적을 크게 하기 위해 0.1 mm 의 구리 박판을 끼워 넣었다.

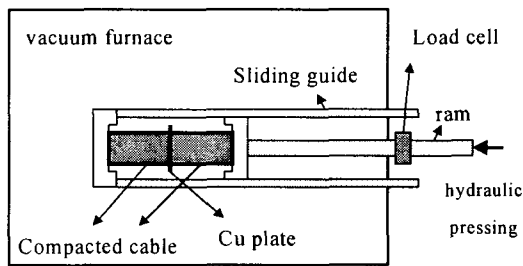


Fig. 2. Schematic drawing of device for diffusion bonding the two terminal specimens.

750 °C 까지 시편을 가열하는 경우, 진공 가열로의 가열과 유지, 냉각양상은 그림 3 과 같다.

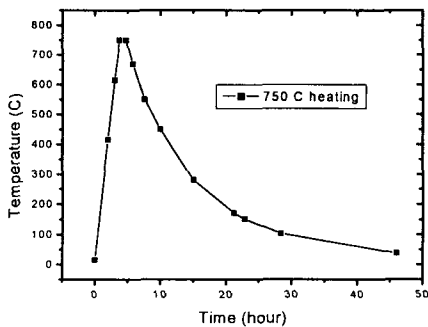


Fig. 3. Cooling behavior of the furnace heated to 750 °C.

2.2 접촉 면압에 따른 butt 접합부 양상

일본 JAERI 의 CS 모델 코일의 경우 butt 접합부의 가압력은 약 30 MPa 정도로 보고 되었으나, 장치 및 케이블에 대한 자료가 충분하지 않으므로 이에 대한 확인 연구가 우선 수행되었다.

순수한 구리의 경우 750 °C 에서 항복 강도는 거의 없는 것으로 알려져 있으나, 케이블의 경우 소선들이 Nb 와 복합재 형태를 이루고 있으며, 인발 과정을 통해 가공 경화가 이루어 졌을 것으로 예상할 수 있다. 또한 슬리브로 사용된 무산소동 역시 가공 경화에 의해 항복강도가 증가하므로, 사용된 시편은 750 °C 에서 어느 정도의 항복강도 가지고 있음을 예상할 수 있다[4].



(a-1)



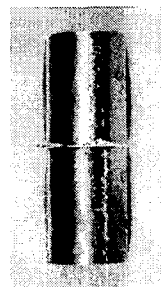
(a-2)



(b-1)



(b-2)



(c-1)



(c-2)

Fig. 4 Diffusion bonded specimens and their cross sections pressed with 30 MPa (a-1,2), 18 MPa (b-1,2), and 10 MPa (c-1,2), respectively.

가열로를 10^{-5} torr 로 진공 작업을 한 후, 시편을 750 °C 로 가열하고 30 MPa 의 면압 (surface pressure : load/cross section area calculated with out diameter of specimen) 을 가하는 경우 시편이 크게 소성 변형되었다. 실험 중 초기 면압 30 MPa 에서 변형이 크게 발생하여 17 MPa 로 압력을 줄여

1 시간 동안 750 °C 에서 확산 접합하였다. 그림 4(a-1) 에서 보듯이 초기의 면압에 의해 형상이 크게 변형하였음을 알 수 있다.

접촉 면압이 큰 경우 접촉면적이 커지고, 접합 강도의 증가를 예상할 수 있으나, 4(a-2) 의 단면에서 볼 수 있듯이 소선들이 과도한 면압에 의해 물결처럼 굽힘 변형되어 초전도성을 잃어버리게 된다. 따라서 초전도성을 갖는 도체와 도체 사이의 거리가 증가하게 되어 큰 전기 저항을 가지게 될 것을 예상할 수 있다. 이처럼 접촉 면적을 되도록 늘이면서, 초전도체와 초전도체 사이의 거리를 최소로 하는 것이 butt 접합의 가장 중요한 요소 기술이다.

그림 4(b-1) 은 18 MPa 면압을 초기에 가하고, 12.8 MPa 까지 서서히 면압을 줄여 750 °C 에서 1 시간 동안 유지한 시편이다. 초기 18 MPa 면압에서 약 1.5 mm 의 변형이 발생하였으며, 실험 후 총 2 mm 의 변형이 발생하였다. 또한 소성 변형에 의해 접합부의 직경이 24.2 mm에서 24.7 mm 로 증가하였다. 접합부에서 케이블들의 접합 상태는 4(b-2)에서 보듯이 우수하였으며, 구리 슬리브에서는 부분적인 접합이 관찰되었다.

그림 4(c-1) 은 10 MPa 로 750 °C에서 1 시간 유지한 시편의 경우이며, 이 경우 거의 소성 변화를 확인할 수 없었다. 그림 4(c-2) 의 단면에서 보듯이 케이블 부분의 접합 상태는 우수하였으며, 슬리브의 경우 역시 부분적인 접합이 관찰되었다.

슬리브에 부분적인 접합이 발생한 이유는 접촉면 가공 중 시편 바깥쪽 슬리브의 마모 량이 크고, 케이블과 슬리브 재료의 열적 변형 특성이 다르기 때문으로 생각된다.

3. 결 론

도관 케이블 도체를 750 °C 온도에서 1 시간 유지하여 확산 접합으로 butt 접합시키는 경우, 약 10 MPa - 18 MPa 사이의 면압에서 건전한 접합부를 얻을 수 있었다. 또한 접촉부의 가공 정도가 좋지 않은 경우 약 18 MPa 면압에서 시편에 미소한 소성변형이 발생시킴으로써 좋은 접합부를 얻을 수 있을 것으로 예상되었다.

본 연구는 차세대 핵융합 연구장치 개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] P. Bruzzone et al., "Design and R&D Results of the Joints for the ITER Conductor", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.7, No.2, pp461-464, 1997
- [2] Y.Takahashi, et al., "Development of 460kA Nb₃Sn Conductor joint for ITER Model Coils", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 10, No. 1, pp580-583, 2000
- [3] Y. Nunoya, et al., "Development of 46kA Layer to Layer Joint for ITER-CS Model Coil", ICEC16/ICMC proceedings, pp775- 778
- [4] Metal Handbook 9th Edition, Vol.2, Nonferrous Alloys and Pure Metals, American Society for Metals, 1979