

핵융합 자석 용 Nb₃Sn 관내연선도체의 Butt 접합기술

Butt Joining Techniques of Nb₃Sn Cable-in-Conduit Conductors for Fusion Magnet

이호진, 김기백, 이봉상, 김기만*
한국원자력 연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150
* 한국기초과학지원연구원

요 약

3kHz, 30 kW 용량의 유도가열 장치를 사용하여 약 15 분 만에 butt 접합 용 시편의 온도를 700 °C 까지 상승시킬 수 있었으며, 700 - 750 °C 사이에서 시편의 온도를 일정하게 제어 유지할 수 있었다. 진공 용기 안에서 시편을 730 °C 로 약 40 분간 200 kgf 가압하면서 유지 시킨 결과 양호한 확산 butt 접합부를 얻을 수 있었다. 좀 더 적합한 확산 접합 변수를 얻기 위해서 시편 접촉면에 작용하는 면압 변화에 따른 butt 접합 정도를 확인하는 것이 필요하다.

Abstract

The temperature of specimens are controlled and maintained constantly in the range of 700 - 750 °C by the induction heating apparatus of capacity of 3 kHz and 30 kW, which can heat up the butt joint specimens to 700 °C within 15 minutes in vacuum. The robust butt joint is obtained by using the induction heating technique in the condition of 200 kgf loading for 45 minutes at 730 °C in a vacuum chamber. The investigation of joining characteristics with changes of contact surface pressure is needed to get a better diffusion bonding condition.

1. 서론

핵융합용 자석과 같이 대형 초전도 자석을 제조하기 위해서는 자석 도체의 길이, 자석

설치 방법 그리고 자석 코일의 처리 등을 고려하여 소형 단위 코일을 제작한 후 이것들을 연결하여 전체 자석 계통을 구성하는 방법을 사용한다. 초전도 코일에서 접합부는 상전도 영역을 가지고 있으므로 제일 취약한 부분이므로 작은 직류저항, 교류손실 그리고 기계적으로 충분한 강도를 가지도록 설계 제작된다. 관내연선도체 (Cable-in-Conduit Conductor) 는 전력 손실이 적고 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 접합 등으로 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 끝단을 고상 확산 (diffusion) 접합시키는 방법이다. 이 방법은 접촉 면적이 작고, 접합부 전체 크기가 작으므로 코일 내부에서도 접합이 가능하며, 교류 손실이 적어 외부의 자기장이 급격히 변하는 CS 혹은 PF 코일 근처에서 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다.

그러나 접촉 면적이 lap 접합 방법에 비해 작으므로 접촉면에서의 완벽한 접합상태를 유지하여 전기 저항을 저항을 최소화해야 하고, 기계적으로 충분한 강도를 갖도록 해야 한다. 또한 이 방법은 기존의 납땀이나 가압 방법과는 달리 재료 사이의 확산에 의해 접합이 이루어지므로 접합면의 표면상태, 가열온도, 가압력, 그리고 분위기 등에 의해 접합 특성이 크게 변할 수 있다. 따라서 적절한 적합한 접합 조건을 찾는 것이 건전한 butt 접합에 매우 필요한 기술로 예상되고 있으며, 이러한 접합조건을 찾고, 적절한 장비를 제조하는 경우 다른 접합 방법에 비해 표준화 및 자동화가 수월하다[2,3].

본 논문에서는 KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) 연구와 관련하여 Nb₃Sn 관내연선도체의 butt 접합에 사용된 유도가열장치 (induction heating equipment) 의 특성에 대하여 서술하였으며, 이 장치를 이용하는 확산접합 방법에 대한 기반 기술과 시편 제작 및 결과에 대하여 서술하였다.

2. Butt 접합부 제조

Butt 접합에서는 직류저항을 줄이고 높은 강도를 얻기 위해 납땀 작업 대신 고상 확산 접합을 사용한다. 접합 시편을 제조하기 위해 486 개의 소선을 갖는 KSTAR 의 TF (Toroidal Field) 용 도관연선도체를 사용하였다. 도체의 jacket 을 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. 그림에서 보듯이 케이블은 검은 부분으로 보이는 초전도 strand 와 안정화 재료로 사용되는 순수한 구리 strand 로 구성되어 있다. 두 개의 compaction 된 케이블을 제작한 후 서로 접촉하는 면에서 평행도 및 정밀한 표면 거칠기를 얻기 위해 wire 절단 방법으로 면을 가공한 후 #2000 까지 연마하였다. Butt 접합 방법으로 현장에서 코일을 연결하기 위해서는 접합

부의 국소 가열 및 급속 가열을 위해 유도 가열 (inductive heating) 방법이 유리하다.



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

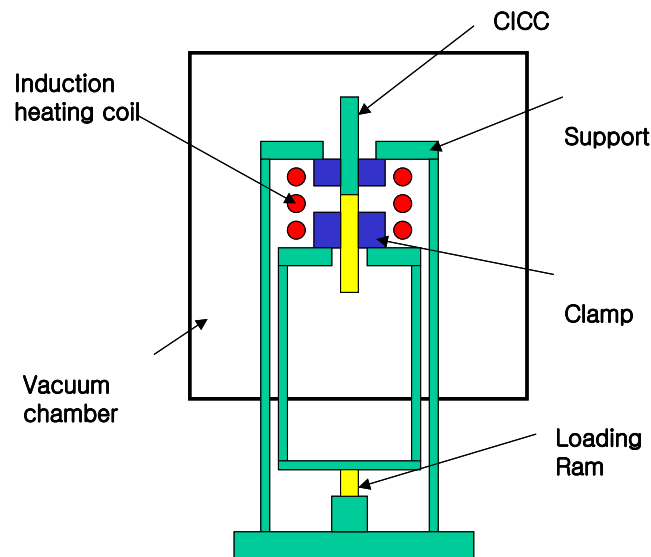


Fig. 2 Schematic drawing of apparatus for butt joining.

두 개의 시편을 butt 접합하기 위해 그림 2 와 같은 유도 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.

진공 중에서 730 °C에서 약 40 분간 200 kgf 로 가압하면서 유지 시켰다. 유도가열 능력은 약 15 분 만에 시편의 온도를 700 °C 까지 상승시킬 수 있었으며, 700 °C 에서 750

°C 사이에서 온도를 쉽게 제어할 수 있었다. 구리 슬리브로 compaction 된 시편을 고정 및 붙잡기 위해 저 탄소강으로 제작된 그림 3 과 같은 clamp를 사용하였으며, 현장에서 U 자 형태의 jumper cable 에 사용하기 위해 두개의 케이블을 한번에 접합할 수 있도록 제작하였다. Clamp 는 단말부를 서로 loading 하기 위해 케이블을 잡는 역할과, 가압 support 에 지지되어 시편에 가압력을 전달하는 역할을 한다. 또한 유도 가열 의해 clamp 가 가열되고 이 열이 케이블 도체에 전달되어 butt 접합이 이루어지는 역할도 같이 수행한다.



Fig. 3 Two CICC specimens are assembled by low carbon steel clamp.

Table 1 Specification of the induction heating power supply.

출력전력	최대 30kW
효율	90% 이상
회로방식	입력 : DCDC 컨버터(초퍼방식), 출력 : 풀브리지 고주파 인버터
제어방법	정전압, 정전류, 정전력
출력 주파수	2kHz ~ 3kHz
스위칭소자	IGBT
냉각방식	폐로형 수냉식

유도가열 장치는 표 1 과 같은 사양으로 제작되었다. 그림 4 에서 보듯이 약 730 °C에 서 전류 및 전압이 제어되어 온도가 잘 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 가열 코일은 외경이 약 16 cm 정도였으며 3 층으로 권선되었고 표면에는 절연처리를 하였다. 그림 5 는 butt 접합을 수행하기 위한 장치의 구성을 보여주고 있다.

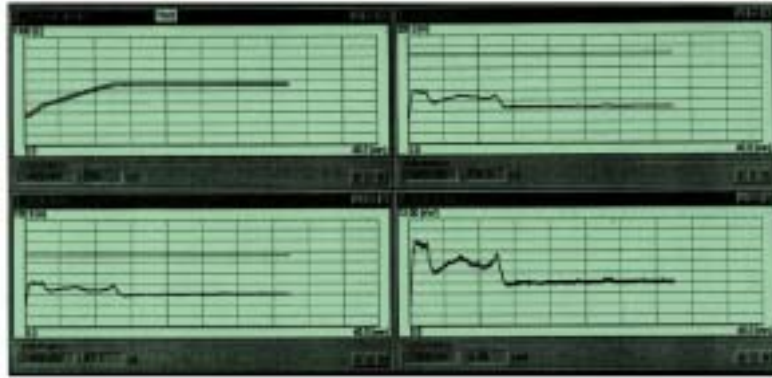


Fig. 4 Controlled temperature in the specimen by induction heating power supply

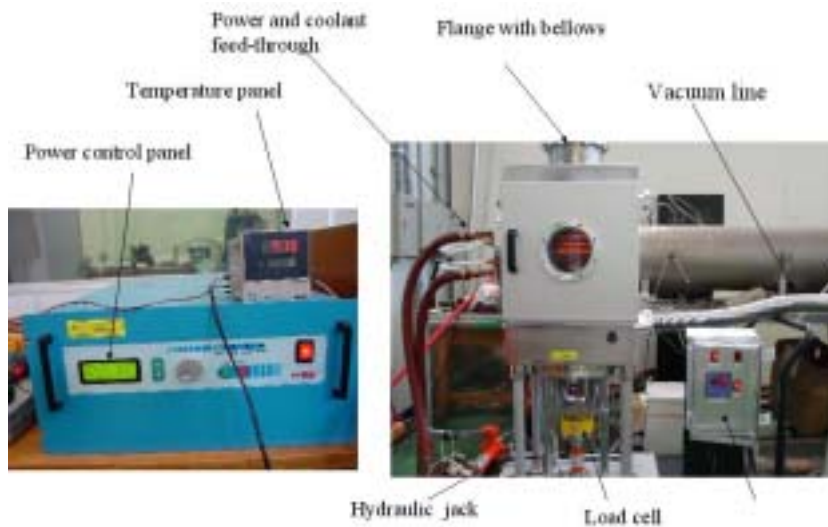


Fig. 5 Configuration of the equipment for butt joining

3. Butt 접합 결과

본 실험에 사용된 유도 가열 장치는 시편의 온도를 700 - 750 °C 로 10 - 20 분 안에 급속 가열할 수 있었으며, 거의 1 시간 동안 시편의 가열 온도를 일정하게 유지시킬 수 있었다. JAERI 의 CS 모델 코일의 경우 butt 접합부의 가압력은 약 30 MPa 정도로 보고 되었으나, 순수한 구리의 경우 700 - 750 °C 영역에서 항복 강도가 거의 없으므로 구리 sleeve 를 clamping 하는 경우 미끄러짐이 발생하였다[4]. 참고문헌[5]에 의하면 진공 열처리 로에서 수행한 실험에서 10 MPa 로 750 °C 에서 1 시간 유지한 시편의 경우 거의 소성 변화를 확인할 수 없었으며, 접합 상태는 우수한 것으로 발표되었다.

본 실험의 경우 730 °C 에서 40 분간 약 200 kgf (면압 : 2 MPa) 의 loading 을 가하u 접합하였으며, 이 경우 그림 6 (a) 와 같은 butt 접합 시편을 얻을 수 있었다. 이 면압은 앞의 참고 문헌[5]에서 언급한 면압에 비해 적었으나, 그림 6 (b) 의 접합 단면사진에서 볼 수 있듯이 비교적 양호한 접합 단면을 얻을 수 있었다. 접촉면에 설치한 0.1 mm 구리 sheet 를 사이에 두고 케이블 strand 들이 정연하게 배열되어 접합된 것을 확인할 수 있었다.

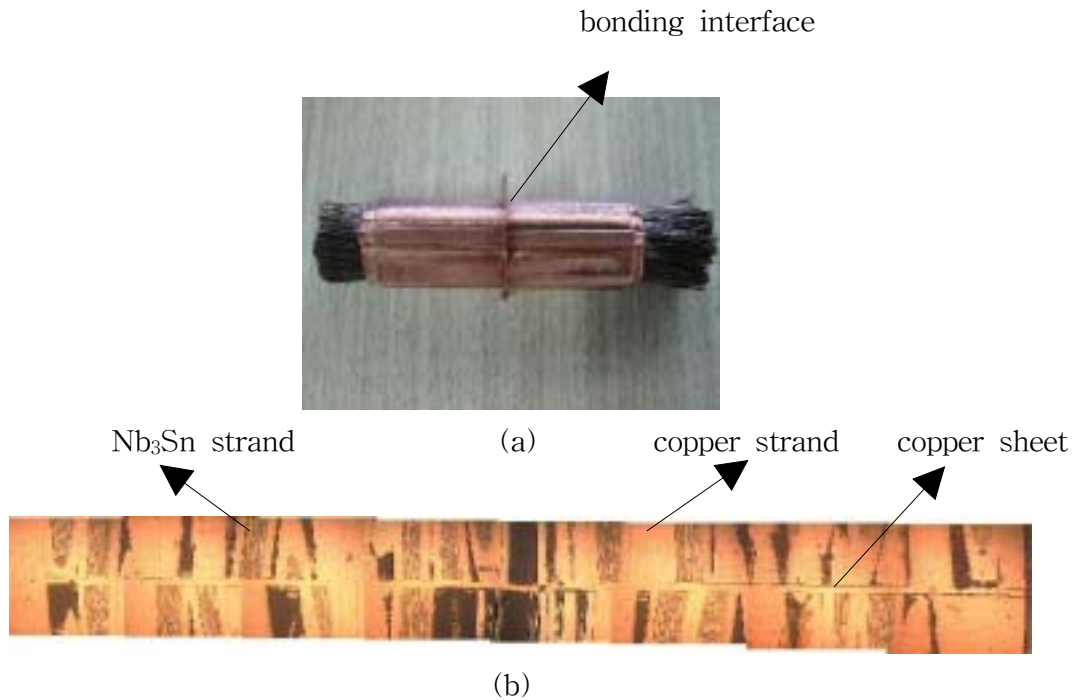


Fig. 6 (a) Butt joined specimen, (b) cross-section of diffusion bonding

확산 접합의 경우 온도, 가압력, 표면상태, 접합 분위기 등에 의해 접합 상태가 크게 변하는 것으로 알려져 있다. 온도 및 접합 분위기, 그리고 표면 가공 정도가 일정한 경우 앞에서 언급한 가압 면압 변화에 따른 접합 정도를 확인하는 것이 필요하다. 또한 현장에서 butt 접합을 수행하기 위한 주변 장치 개발과 도체와 진공 용기의 밀폐와 같은 경계 조건의 처리 기술이 필요하다.

4. 결론

3kHz, 30 kW 용량의 유도가열 장치를 사용하여 약 15 분 만에 시편의 온도를 700 °C 까지 상승시킬 수 있었으며, 700 - 750 °C 사이에서 시편의 온도를 일정하게 제어 유지할 수 있었다. 진공 용기 안에서 시편을 730 °C 로 약 40 분간 200 kgf 가압하면서 유지

시킨 결과 양호한 butt 접합부를 얻을 수 있었다. 적합한 butt 접합 변수를 얻기 위해 가압 면압 변화에 따른 접합 정도를 확인하는 것이 필요하며, 현장에서 butt 접합을 수행하기 위한 주변 장치 개발과 진공 용기의 경계 조건 처리 기술이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 차세대 핵융합 연구 장치 개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [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 46 kA 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
- [5] 이호진, 김기백, 김기만, "접촉면압에 따른 Nb₃Sn 도체의 butt 접합부 특성", 한국초전도저온공학회 2002 학술대회 논문집, pp253-255, 2002