2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

KSTAR 장치 TF 자석 용 접합부의 수평 / 수직 설치를 위한 납땜 기술

Soldering Technique for the Horizontal / Vertical Installation of TF coil joints in the KSTAR Device

이호진, 김기백, 남현일*, 홍계원, 김기만**

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150
* 충북대학교
**삼성종합기술원

요 약

차세대 초전도 핵융합 연구 (KSTAR) 장치 코일들을 연결하기 위해 제시된 수평 혹은 수직으로 설치되는 소선-소선 접합부의 납땜 특성을 조사하였다. 열풍기로 가열하는 기존 납땜 방법을 사용하는 경우 국부적인 가열로 인해 소선과 소선 사이로의 땜납 침투가 어려우며, 중력에 의해 작업 중 용융 된 땜납이 접합부 아래로 흘러내리는 현상을 확인하였다. 소선-소선 접합을 위해 기존 랩 (lap) 접합부에 사용되는 슬리브 (sleeve) 개념을 이용해 소형로 (furnace) 로 가열되는 주형 (mold) 를 제작하였으며, 70 개의 구멍을 갖는 두 개 열의 공기 냉각장치를 설치하여 가열 중 용융되어 흘러내리는 땜납을 냉각 고정 시킨 결과 용융 땜납의 누출 없이 첫째 공기구멍 열 위치와 거의 일치하는 납땜 선을 얻을 수 있었다. 또한 주형 압축 효과에 의해 소선 사이의 간격이 유지됨으로써 용융된 땜납의 젖음성 (wetting) 이 향상되어 땜납 침투가 쉽게 이루어지는 것을 확인하였다.

Abstract

The soldering process for horizontal and vertical installation of strand-to-strand joint which was suggested using in KSTAR device was investigated. In case of conventional soldering using a heat blower, the infiltration of solder into cable was not sufficient to fill the joint, and the flow-down of molten solder due to its weight was observed. The mold assembly for soldering strand-to-strand joint was designed and fabricated using the concept of the sleeve of lap joint. Small furnace was installed in the mold to heat the joint uniformly, and two hole-lines with 70-air holes each for solidify the molten solder were machined to prevent the leakage of solder out of the joint. The solidification line of solder along the first hole-line in the mold was observed. The wetting property in the cable may be improved because the cable was compacted by the mold, and the infiltration of solder into the cable was sufficient to fill the joint.

1. 서론

차세대 초전도 핵융합 연구 (KSTAR : Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) 장

치는 토카막 형태로서 장 시간 프라즈마 운전이 가능하도록 TF (Toroidal Field) 자석과 PF (Poloidal Field) 자석 모두 초전도 코일을 사용하도록 설계 되어있다. TF 자석은 16 개의 코일로 구성되며 중심부의 자기장이 3.5T, 최대 자기장이 7.5T 이다. TF 코일 권선 도체는 CICC (Cable in Conduit Conductor) 형태로서 2.8 mm 두께 Incoloy 도관 (conduit) 안에 486 개의 Nb_3Sn 초전도 소선 (strand) 들로 꼬여진 (twisting) 케이블이 들어 있다. 이 케이블은 외부 자기장하에서 35.2 KA 의 대 전류가 흐르도록 설계되어 있으며, 16 개의 TF 코일들은 서로 전기적으로 접합되어 자장을 발생시킨다[1].

초전도 코일 사이의 접합은 주로 그림 1(a) 와 같은 랩 접합 형태를 기본으로 하여 초전도 자석의 특성에 맞도록 수정 적용 시키는 방법을 사용하여 왔다. KSTAR 장치의 접합부는 작은 직류저항과 적은 교류손실 이외에 핵융합 장치의 치밀화를 위해 작은 크기의 접합부라는 새로운 개념이 필요하게 되었다. 이와 같은 조건을 만족시키는 접합부로서 소선과 소선을 서로 접촉시키는 그림 1(b) 와 같은 소선-소선 (strand-to-strand) 접합부가 제시되었다[2].

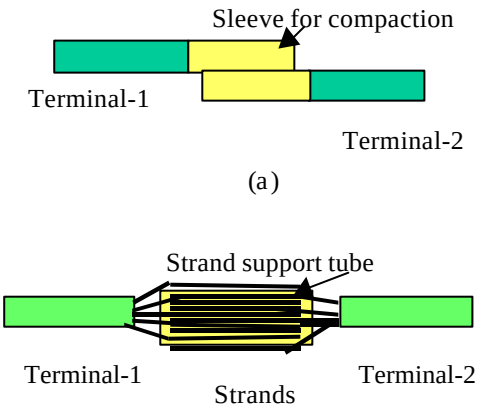

Fig. 1. Schematic drawing of (a) Lap joint and (b) Strand-to-Strand joint

랩 접합은 접합부의 케이블을 보호하고 케이블의 공극 공간 (void volume) 을 유지하기 위해 구리와 같이 전기전도도가 좋은 재질로 가공된 슬리브를 사용하여 케이블을 압축하여 감싼 후 슬리브 사이에서 접합이 이루어 지도록 한다. 그러나 소선-소선 접합은 접합 면적을 넓게 하고, 전류 흐름 거리를 줄이기 위해 압축 슬리브 없이 소선과 소선이 직접 접합되는 형태이다. 소선-소선 접합부의 납땜 작업의 경우 슬리브에 의한 케이블 압축 효과가 없음으로 소선과 소선 사이의 공간이 커져 땜납의 젖음성이 좋지 않으며, 수직/수평 방향으로 설치되는 경우 젖음성이 나쁘므로 용융된 땜납이 중력에 의해 접합부 안으로 침투되지 못하고 밑으로 흘러내리기 쉬운 형태이다.

본 연구에서는 KSTAR 장치의 TF 코일의 접합 방법으로 제시된 소선-소선 접합부가 수평 혹은 수직방향으로 설치되는 경우, 기존 납땜 방법에 의해 발생하는 땜납의 불 충분한 침투

현상, 소선과 소선 사이의 공간유지의 어려움, 그리고 중력에 의해 용융된 땜납의 흘러내리는 현상들을 확인하고자 하였다. 또한 압축 슬리브 개념을 이용하여 소형 가열로와 공기 냉각장치가 설치된 주형을 설계 제작하여 접합부의 땜납을 수행하였으며, 이 방법으로 수행된 납땜 상태와 기존 방법에 의한 납땜 결과를 비교하고자 하였다.

2. 소선-소선 접합 개념 및 제작방법

접합부는 초전도 자석 도체가 받는 외력을 견딜 수 있는 기계적인 강도를 가져야 하며, 핵융합로가 운전되는 동안 계속 그 특성을 유지해야 한다. 또한 잘 정의된 절차를 따라 쉽게 제작되고, 설치 중 발생할 수 있는 위험요소를 최소화 할 수 있도록 품질관리가 되어야 한다. 초전도 자석에 쓰이는 접합부는 전기 저항을 작게 함으로써 joule 열로 인해 도체 냉매로 쓰이는 헬륨의 온도 상승을 적게 해야 하며, 충분한 냉각 안정성을 가지도록 설계하여 접합부에서의 초전도체 온도가 전류분배 온도 (current sharing temperature) 이상으로 상승되지 말아야 한다. 또한 외부 자기장이 급격히 변하는 경우 생기는 교류 손실을 최소화 되도록 설계 제작 되어야 한다[3].

위와 같은 조건에 대하여 소선-소선 접합부의 경우 전류 흐름의 거리가 짧고, 접촉 면적이 크므로 작은 직류저항을 가지고 있을 것을 예상되며, 구리와 같이 전기 전도도가 큰 재료를 사용하지 않으므로 교류 손실이 적을 것으로 예상된다. 54 개의 소선을 갖는 소규모 소선-소선 접합부를 이용하여 실험할 결과 1.8 K 온도에서 약 0.4 n-ohm 의 직류저항 값을 얻었으며, 이 값을 이용해 486 개의 소선을 갖는 접합부로 환산한 결과 약 0.1~1 n-ohm 정도의 직류저항 값을 얻을 수 있을 것으로 예상된다[2]. 그러나 슬리브 없이 노출 된 수많은 소선들의 취급이 어렵고, 형상이 복잡하여 납땜 작업이 복잡하므로 품질관리 면에서 볼 때 불리한 형태이다. 따라서 소선-소선 접합부의 경우 작업을 표준화하고 단순화하여 현장 작업 중 발생하기 쉬운 접합부 결함을 최소한 줄이는 방법이 필요하다. 수평 혹은 수직 방향으로 설치되는 소선-소선 접합부는 소선 사이의 젖음성이 나쁘므로 접합부 밑에서 올려보는 자세로 납땜을 하는 경우 중력에 의해 땜납이 밑으로 흘러내리게 되어 소선 사이로 땜납의 침투가 어려울 것으로 예상된다.

3. 수평 / 수직 방향으로 설치되는 접합부에서의 납땜 및 주형 설계

그림 1(a) 와 같은 랩 접합의 경우 단말부에서 케이블 내 소선 사이의 전기저항을 줄이고, 케이블이 충분한 강도를 가질 수 있도록 구리 슬리브를 사용하여 외부에서 케이블을 감싸 압축시킨다. 이 경우 슬리브 안의 케이블을 납땜하는 경우 소선 사이의 젖음성이 좋아져 쉽게 땜납이 케이블 사이로 침투되는 것을 관찰할 수 있다. 그림 1(b) 와 같은 소선-소선 접합의 경우 소선 사이의 간격을 줄일 수 있는 슬리브와 같은 케이블 고정 방법이 없어 소선 사이로 땜납의 젖음성을 얻기 어렵다[4]. 또한 기존의 집중열원을 사용하는 경우 접합부 내

부로 열의 전달이 늦어져서 땜납이 표면에서만 용융되고 내부로 침투 되지 못할 것을 예상할 수 있다.

소선-소선 접합에서 랩 접합부에서 사용되는 슬리브와 같은 효과를 얻기 위해 그림 2와 같은 주형을 제작 하였다. 케이블의 압축효과를 얻기 위해 장착 및 탈착이 가능하도록 주형을 두 조각으로 제작하였으며, 볼트로 조여 압축하도록 하였다. 또한 땜납이 충분히 침투될 수 있도록 접합부 전체를 가열하기 위해 외부에 소형 가열로를 설치하였다. 주형의 열린 옆 단면으로 용융 땜납이 누출되거나 혹은 케이블을 따라 땜납이 도체 안으로 젖어 들어가는 것을 방지 하기 위해 1.5 mm 직경의 구멍 70 개를 갖는 두 개의 공기구멍 열을 설치 하였다. 냉각을 위해 공기를 분사 시키는 방법을 사용한 이유는 복잡하게 꼬인 케이블 사이를 충분히 냉각 시키고, 작업 후 불순물이 도체 혹은 접합부에 남지 않도록 하기 위해서 이다.

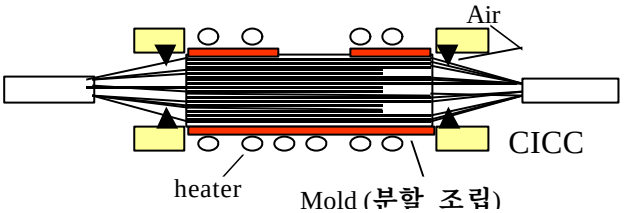

Fig. 2. Schematic drawing of mold assembly for strand-to-strand joint

4. 실험 방법

수평 혹은 수직으로 설치되는 소선-소선 접합부에서의 납땜 현상만을 확인하기 위해 초전도선재가 아닌 구리 케이블로 CICC 를 먼저 제작하였다. 486 개의 구리 소선을 3x3x3x3x6 단계로 꼬아 케이블을 제작한 후, 구리 테이프로 랩핑 (wrapping) 하였으며, 이 케이블을 외경 34 mm 인 316L 스테인레스 스틸 파이프 안에 넣고 인발 작업을 하였다. 최종 외경 30.2 mm , 내경 25.8 mm 이며 공극율 (void volume fraction) 이 52 % 인 CICC 를 제작하였다.

단말부를 만들기 위해 제작된 CICC 의 파이프와 랩을 약 25 cm 정도 벗겨 내고, 3 개 소선으로 꼬인 단위 케이블 (triplet) 로 풀었다. 이 단위 케이블은 꼬인 케이블에서 풀렸으므로 곧게 펴지지 못하여 그림 3과 같은 접합부의 단면도에서 보듯이 홈 (slot) 에 끼워 넣기 어려우므로 드릴의 회전을 이용하여 다시 꼬아 직선으로 곧게 펴 사용하였다[5].

두개의 단말부를 만들고 그림 3 과 같이 구리로 만든 소선 지지 튜브에 스테인레스 스틸 스패이서로 40 개의 홈을 만들고 각 홈에 3 개의 소선으로 꼬인 단위소선을 4 개씩 끼워 넣는다. 이후 다른 단말부의 단위소선 4 개씩을 스패이서를 하나씩 제거하며 끼워넣는다. 작업 중 소선을 고정하고 쉽게 다루기 위해 여러 개의 스틸 밴드 (band) 를 사용하였다. 소선과 소선이 겹치는 길이는 약 10 cm 정도로 하였으며, 접합부 외경은 약 65 mm 로 하였다.

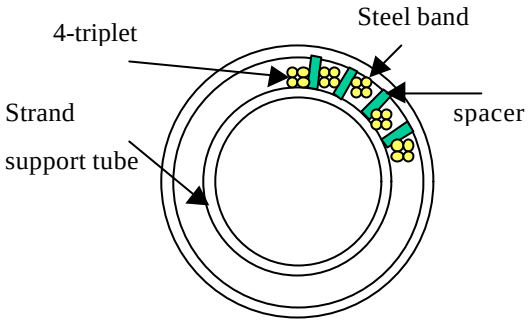

Fig. 3. Schematic drawing of cross-section of strand-to-strand joint

접합부 시편을 주형을 사용하지 않고 기존의 납땜 방법처럼 국소 열원인 1.4 KW 열풍기를 사용하여 납땜을 수행하고, 다른 시편은 소형로가 설치된 주형을 이용하여 납땜을 수행하였다. 납땜 작업은 코일이 설치 및 열처리 된 후 수행되므로 시편을 회전시키면서 아래보기 자세로 납땜할 수 없으므로 시편을 고정 시킨 상태에서 납땜 작업을 수행하였다.

그림 4 는 수직 설치되는 접합부 시편에 주형 및 소형로가 조립되어 있는 것을 보여 주고 있다. 사용되는 땜납은 40Pb60Sn 이며 한번에 소요되는 양은 약 1 kg 정도였다. 소형로의 전력은 1.2 KW 정도 였으며, 냉각을 위한 공기압은 약 1.0 기압 정도로 조절하여 분사 시켰다. 주형에 가공된 땜납 주입 구로 계속 납을 공급하였으며, 작업 후 주형을 탈착하여 납땜 상태를 확인 하였다.

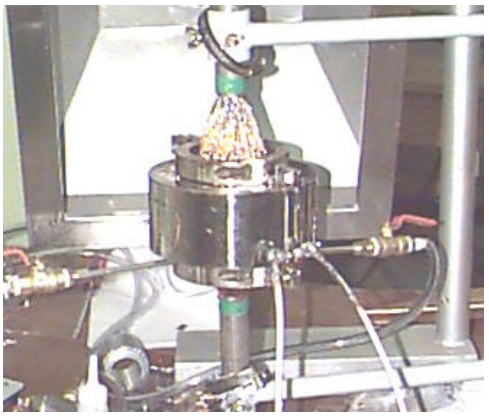

Fig. 4. Mold assembly for soldering vertical joint

5. 결과 및 토의

주형을 사용하지 않고 소선들을 임시 고정시키기 위한 스틸 밴드만을 사용한 후 국소 가열되는 열풍기로 수평 방향에서 납땜 작업을 한 결과 그림 5 와 같이 접합부 내부 소

선들 사이로 충분한 땜납이 침투되지 못하고 있는 것을 확인 할 수 있었다. 소선들과 소선들 사이 공간이 크게 되어 땜납의 젖음성이 나쁜 것은 물론 소선들 사이의 접촉면이 적어 외부에서의 가열 열이 접합부내부 소선 지지 튜브까지 충분히 전달되지 않으므로 소선과 지지 튜브 사이의 접합이 이루어 지기 어렵다.

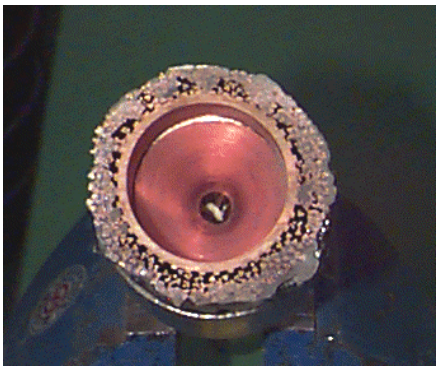

Fig. 5. Cross-section of the joint soldered with heat blower without mold

또한 접합부의 아래 부분을 올려보기 자세에서 납땜하는 경우 그림 5 에서 볼 수 있듯이 위 부분에 비해 그 침투량이 매우 적다. 이는 작업 중 땜납이 소선들 사이로 침투 되지 못하고 중력에 의해 밑으로 흘러내리기 때문이다. 집중 열원을 사용하여 소선들을 차례로 납땜하는 경우 이미 납땜이 진행되어 굳어진 부분의 땜납이 다시 용융되어 소선들의 접합이 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 외부의 형상이 불 균일하고 정확한 치수를 얻기 어려우므로 다음 조립 단계에서 조립이 불가능해질 수 있는 가능성이 크다.

주형을 사용하여 수직 방향에서 납땜 된 접합부의 경우 작업 중 땜납의 누출이 거의 없었으며, 작업 시간이 크게 단축되었다. 작업 후 접합부의 단면을 확인할 결과 그림 6 과 같이 내부의 빈 공간을 확인 할 수 없이 땜납이 소선 사이로 침투된 것을 확인할 수 있었으며 소선들과 소선 지지 튜브와 완전히 접합된 것을 확인 할 수 있었다. 정확한 외형 및 치수를 얻을 수 있으므로 다음 조립 단계에 매우 유리할 것으로 예상할 수 있었다.

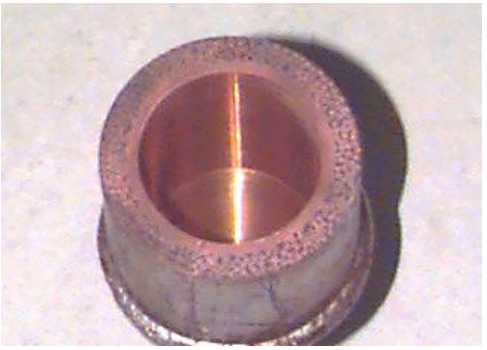

Fig. 6. Cross-section of the joint soldered with mold

수직 방향으로 설치되는 접합부의 경우 두 개의 공기 냉각구멍 열을 이용해 냉각하는 경우 그림 7 과 같이 작업 후 땜납의 굳은 선을 확인한 결과 첫 번째 공기 구멍 열과 거의 비슷한 선을 따라 굳은 것을 확인 하였다. 이것은 용융 된 땜납이 첫번째 열의 구멍에서 분사되는 공기에 의해 냉각이 되었으며, 굳은 땜납에 의해 첫번째 열의 공기 구멍이 막히는 경우에도 두 번째 공기 구멍 열의 공기 분사에 의해 접합부의 소선들이 냉각되었음을 알 수 있다.

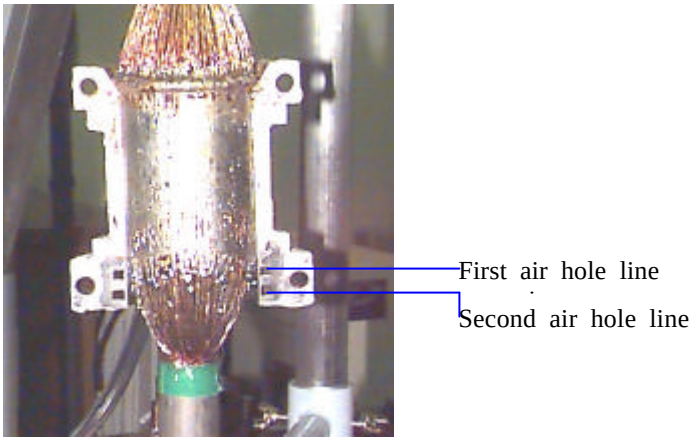

Fig. 7. Side view of soldered vertical joint

6. 결론

KSTAR 장치의 TF 코일을 연결하기 위해 제시된 소선-소선 접합부를 수평 혹은 수직 방향으로 설치하는 경우 기존의 납땜 방법으로는 소선과 소선 사이로의 땜납 침투가 어려웠으며, 접합부 아래 부분은 소선들 사이에 충분한 젖음성을 가지지 못해 중력에 의해 땜납이 밑으로 흘러내리는 현상을 확인하였다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 기존 랩 접합부에 사용되는 슬리브 개념을 갖는 주형을 설계 제작하여 납땜을 수행한 결과, 소형 로에 의해 충분히 접합부 전체가 가열되었고, 소선들 사이의 젖음성이 향상되어 충분한 땜납이 침투 된 것을 확인 하였다. 또한 70 개의 구멍을 갖는 두 개 열의 공기 냉각장치에 의해 용융 땜납의 누출 없이 납땜을 수행하였으며, 첫째 공기구멍 열 위치와 거의 일치하는 응고된 땜납 선을 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 “차세대 초전도 핵융합 연구장치 개발사업” 의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고 문헌

1. KSTAR Magnet System Review proceedings, Samsung Advanced Institute of Technology, pp

T13&14-3 ~ T13$14-19, August 1999

2. Shahin Pourrahimi et al., Fabrication of 40 kA Superconducting Sample-Under-Test for Samsung, MIT PSFC final report, 1998

3. P. Bruzzon et al., " Design and R&D Results of the Joint for the ITER Conductor" IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.7, No.2, pp461-464, 1997

4. Dave Smith, Welding Skills and Technology, Gregg Division/Mecgraw-Hill, pp151-167, 1984

5. **김기만 외**, " **차세대 초전도 핵융합 연구장치 개발 사업 – 초전도자석계통 개발**" **삼성전자㈜ 기반기술연구소**- 1 **단계연구보고서**, 1998