

KSTAR TF Coil 용 CICC 보수 용접 및 접합

임병수, 이상일, 김정수, 김동진, 최정열, 정우호, 박현기, 추용, 박갑래, 백설희, 김기만
한국기초과학지원연구원 초전도자석팀

Repair Welding and Joint of KSTAR TF CICC

B. Lim, S. Lee, C. Kim, D. Kim, J. Choi, W. Jung, H. Park, Y. Chu, K. Park,
S. Baek, K. Kim

Korea Basic Science Institute Superconducting Magnet Team

bslim@kbsi.re.kr

Abstract - The KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) superconducting magnet system which consists of 16 TF coils and 14 PF coils. The magnet system adopt a superconducting CICC(Cable-In-Conduit Conductor) type. The KSTAR TF CICC uses Nb₃Sn superconducting cable with Incoloy 908 conduit. To prepare for TF CICC jacket defect, repair welding of TF CICC is studied. And to confirm join method of TF CICC joint part, the welding method and the joint part design are also discussed.

1. 서 론

현재 KSTAR 초전도 자석의 경우, 연선된 초전도 선재 케이블을 강도가 큰 구조재료로 에워싼 형태의 관내연선도체(Cable-In-Conduit, CICC)를 사용하고 있다[1]. 이러한 CICC 형태의 초전도 자석의 경우, 양호한 기계적 안정성, 높은 전기 절연 강도, 낮은 교류손실, 그리고 냉각용 액체헬륨의 소모량을 줄일 수 있다는 장점이 있다.

이와 같은 CICC 형태의 초전도 자석을 제작하기 위해 현재 KSTAR에서는 초전도 선재(Nb₃Sn, NbTi)에 연속 조관 과정(Tube mill process)을 통한 Jacketing을 실시하여 CICC를 제작하고 있다. 그런데 이러한 조관 작업은 조관 용접 과정이 필수적 행해지는데 이 과정에서 어쩔 수 없는 용접 결함이 발생할 수 있는 가능성이 내포되어 있기 때문에 이에 대한 보수 용접 대책이 필요하다.

한편 CICC 제작 후 CICC에 He를 공급해주는 He 인입부(He feed through) 제작이나, CICC 양쪽 끝에 위치하여 전원 공급장치로부터의 전류 공급을 위한 역할을 하는 Lead 부위의 Joint Piece 접합 등을 위해 CICC에 용접이 행해 지는데 이에 대한 접합 방법 등이 요구되고

있다.

따라서 본 연구에서는 CICC 제작 후 발생할 수 있는 결함에 대한 보수용접의 방법과 기준을 마련하고 또한 실제 KSTAR TF 자석 제작에 필요한 CICC 각종 접합부의 용접 방법 및 용접 설계에 대해 살펴 보고자 한다.

2. 본 론

2.1 실험 방법

2.1.1 CICC 보수용접

CICC 보수 용접 시험을 위해 실제 TF Coil 용 CICC로 사용되고 있는 CICC를 1m 길이로 하여 시험 편을 제작하였다. Fig. 1에 시험에 사용된 TF CICC의 형상을 나타내었다. CICC의 재질은 Ni-based super alloy의 일종으로 열팽창 계수가 Nb₃Sn 초전도체와 거의 같고, 저온에서 기계적 특성이 우수한 Incoloy 908을 사용하였다. 이에 대한 화학 조성을 Table 1에 나타내었다[2].

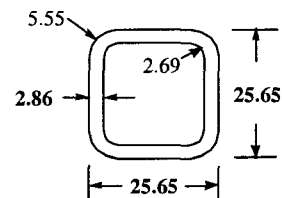


Fig.1. Dimension of TF CICC

시험을 위한 인공 결함 가공과 보수 가공은 Fig. 2와 같은 형태로 행하였고 이에 대한 실제 가공 치수를 Table 2에 나타내었다. 여기서 W는 공 폭, L은 가공 길이, D는 가공 깊이, H는 인공 결함 직경이다. 그리고 Table 2에서 Sample 1은 인공결함 주위를 Drill hole 만으로 가공한 것이고 Sample 2~5는 End Mill을 사용하여 가공한

Table 1. Chemical composition of Incoloy 908

Ni	Cr	Nb	Ti	Al	Si	Mn	C	Fe
49.0	4.0	3.0	1.5	1.0	0.15	0.04	0.01	Bal.

것이다.

각 시편은 보수가공 후 TIG 용접기로 용접하고 용접 Bead 부위를 연마하여 CICC 원래의 형상으로 가공한 후 Leak 시험, 성형 시험, 저온 냉각 후 Leak 시험 등을 행하였다.

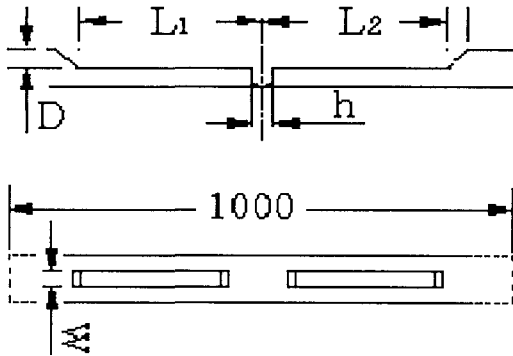


Fig.2. Schematic of CICC sample for repair test

Table 2. Each sample dimension for repair test

Sample	L1 (mm)	L2 (mm)	H (mm)	W (mm)	D (mm)
1	-	-	1	-	-
2	12.7	12.7	1	2	1.7
3	12.7	12.7	1	1.7	1.7
4	12.7	12.7	1	3.0	1.9
5	12.7	12.7	1	1.5	1.7

2.1.2 CICC 접합부 용접

TF 자석 제작을 위한 CICC 접합부 용접은 He feed through, Joint piece 접합 등이 있다. 이 중 He feed through 부는 Ni-Cu 합금의 일종의 일종으로 강도와 내식성이 우수한 Monel 400 합금을 사용하여 CICC와 접합하였다. 그리고 Joint piece 접합 부위는 Monel 400 합금과 스테인레스 316L 합금을 이용하여 CICC와 접합하였다. 이 중 스테인레스 316L 합금은 오스테나이트계 스테인레스 강의 일종으로 입계 부식에 대한 저항성이 우수한 합금이다. Monel 400 합금과 스테인레스 316L 합금의 화학 조성을 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Chemical composition of stainless 316LN and Monel 400(wt%)

	C	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Fe
316L	<0.02	<2	10-14	16-18	2-3	-	Bal.
Monel 400	-	2-	63	-	-	28-34	2.5

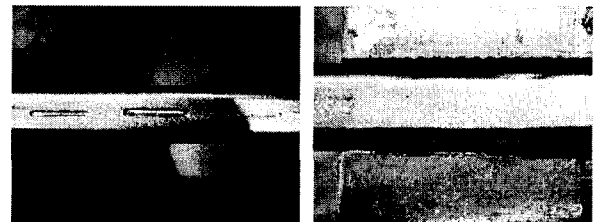
한편 최적 형상의 Joint piece 부 용접 설계를 위해 여러가지 형상으로 Joint 형상 및 삽입재를 가공하여 시험하였다.

2.2 실험 결과

2.2.1 CICC 보수용접

Table 2에 나타낸 모든 시험편을 조건에 맞게 가공 후 보수 용접을 실시하였다. 이때 용접 전류는 CICC 내부에 초전도 선재를 보호하기 위해 비교적 낮은 용접 전류인 70A로 20초 이내에서 실시하였고, CICC 내면을 He를 사용하여 대기압으로 Purge 하면서 용접하였다. 또한 전극 봉은 직경 1.6mm, Th-W 전극봉을 20~30° 가량 연마한 전극 봉을 사용하였고, 용가재는 모재와 동종인 Incoloy 908을 사용하였다. 그리고 용접 종료 시 발생하는 Crater 결함을 방지하고자 용접 Arc 점멸 시 전류를 Down sloping 하였다.

이러한 방법으로 용접한 결과 모든 시험 편에 용접은 가능하였으나 용이한 용접 및 확실한 보수를 위해서는 Drill 가공보다는 End mill을 사용하는 가공이 요구되었으며, L1, L2= 12.7 mm, W=2 mm, D=1.7mm로 보수 가공을 하는 것이 가장 적합한 것으로 판단되었다. Fig. 3 에 보수 가공 및 보수 용접 후 가공된 사진을 나타내었다.



(a) Machining (b) After repair

Fig.3. (a)Machining of CICC and (b) after repair

용접 Bead 부위를 연마하여 원래의 CICC 형상을 만든 후, 시험 편에 He를 30기압으로 가압하여 Leak 시험을 실시하였다. 모든 시험 편에서 Leak는 발생하지 않았다. 또한 권선 등에 의해 발생하는 CICC의 소성 변형을 고려하여 1차, 2차에 걸친 U-Bend를 행한 후 각각 Leak test를 실시하였다. 이 경우도 모든 시험 편에서 Leak는 발생하지 않았다. 이후 Nb3Sn 초전도체의 열처리과정에 따른 잔류 열 응력과 저온에서의 열 수축 등에 대해 견딜 수 있는지의 여부를 알아보고자 660℃에서 240 시간 열처리하고, -198℃로 냉각한 후 각각 30 기압으로 가압 후 Leak Test를 실시하였다. 이 경우도 모든 시험편에 Leak는 발생하지 않았다.

2.2.2 CICC 접합부 용접

He feed through 용접은 용접 전에 CICC를 가공하여 He이 들어갈 수 있는 He feed through

hole을 만든 후, 그 위치에서 용접을 행하여야 한다. 이를 위해, 먼저 CICC를 방전 가공하여 초전도 선재에 영향이 미치지 않도록 주의하여 He feed through hole을 만들었다(Fig.4). 그리고 용접은 초전도 Nb3Sn 선재의 반응 열처리 전에 행하므로 용접 열에 의해 Nb3Sn 초전도체의 Sn이 용출될 우려가 있기 때문에 선재의 온도가 200 °C 이하가 될 수 있도록 조절하여 용접하였다. 또한 이때 용접 봉은 Incoloy와 Monel 400 합금의 이중금속 전용 용접봉인 Inconel 92 용접봉을 사용하여 용접하였다.



(a)Machining (b)Welding

Fig. 4. (a)Machining and (b)welding for He feed through

Joint piece 접합부 용접은 Incoloy 908 + Monel 400 + 스테인레스 316L의 순서로 조립하여 용접을 하였다(Fig. 5). Incoloy 908과 스테인레스 316L을 직접 용접하지 않고 가운데 Monel 400을 사용하는 이유는 Monel 400의 열팽창 계수(13.9 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$)가 Incoloy 908의 열팽창계수(8.59 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$)와 스테인레스 316L의 열팽창계수(16 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$) 사이에 있기 때문에 기계적인 완충 작용을 도모하기 위한 재료로서 사용되었다. 또한 이때 용접봉은 이중 금속 전용 용접봉인 Inconel 92 용접봉을 사용하여 용접하였다.

한편 Fig 5에서 살펴 볼 수 있듯이 Monel 400 Piece와 Incoloy 908 CICC 사이의 Joint 부 용접 시 용접 재의 두께 차이가 커서 용접 시 Monel 쪽에 용접 열의 집중이 곤란하여 두 금속을 완전히 융합시키기 곤란한 문제와 또한 Incoloy 908 CICC 내의 초전도선재를 보호하기 위해 저 전류 영역에서 용접해야 하는 문제가 발생하여 용접하기 곤란한 문제가 발생하였다.

이를 해결하고자 Fig. 6과 같이 Monel 400 Piece와 Incoloy 908 CICC 사이에 Incoloy 908 재질의 Insert disc를 삽입하도록 용접 설계를 하였다. 이를 통해 CICC와 Insert재 사이가 동종 접합이 되도록 하여 용접성을 향상시켜 완전 융합이 이루어지도록 하고, Monel 400 Piece와 Insert disc 사이는 이중금속 접합이 되나 CICC와의 용접 시와 같은 선재 손상의 우려가 없으므로 용접 전류를 높여 Insert재와 Monel 충분히 융합하도록 용접하였다.

이와 같이 용접한 시험편을 660°C, 240 시간 열처리 Test한 후 He을 30기압으로 가압하여 Leak test한 결과 결함이 발생되지 않음을 확인

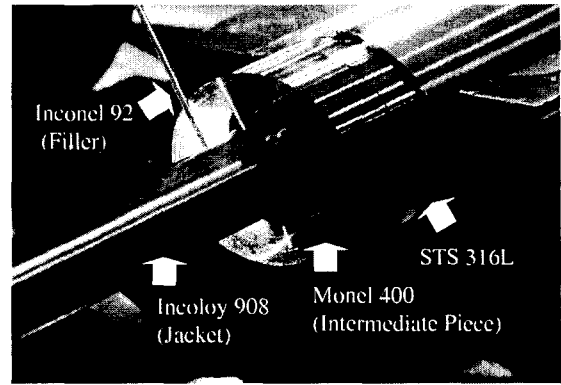


Fig. 5. Joint piece assembly

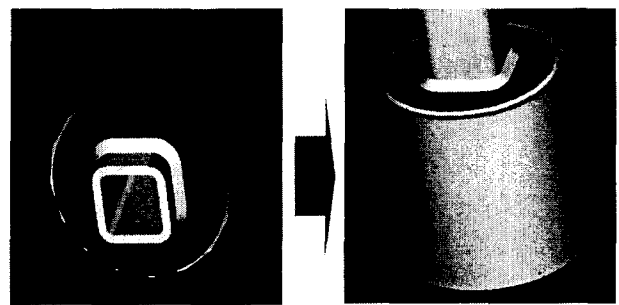


Fig. 6. Insertion of Incoloy 908 disc 할 수 있었다.

3. 결 론

CICC 보수 용접 시험 결과 향후 발생할 수 있는 CICC 부의 Leak에 대해 대처할 수 있다고 판단된다. 또한 이중 금속 접합 부위로 용접하기 곤란한 CICC 접합부도 용접방법의 확립 및 용접 설계 등을 변화 시키는 방법에 의해 이중접합부의 용접성을 향상시킬 수 있으리라 기대된다.

(참 고 문 헌)

- [1] J. H. Schultz, KSTAR Design Description Doc., KSTAR Magnet Sys. Rev. T13/14, 1999.
- [2] M. Morra., Alloy 908- Anew high-strength, low coefficient thermal expansion alloy for cryogenic applications, M.S Thesis, MIT.1989