

# KSTAR PF Coil 용 CICC 제작

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

## Fabrication of KSTAR PF CICC

B. Lim, S. Lee, 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 consist of 16 TF(Toroidal Field) and 14 PF(Poloidal Field) coils. Internally-cooled cabled superconductors will be used for the magnet system. The magnet system adopt a superconducting CICC(Cable-In-Conduit Conductor) type. The KSTAR PF 6, 7 CICCs use NbTi Superconducting cable with stainless steel 316LN conduit while the other PF CICC use Incoloy 908 conduit. For the fabrication of PF CICC, superconducting cables have been fabricated and the cable has the diameter of 22.3mm. A continuous CICC jacketing system is developed for the CICC jacketing and the jacketing system uses the tube-mill process, which consists of forming, welding, sizing and squaring procedures. The cabling and the jacketing process is described. The welding condition and design specification of CICCs are also discussed. The fabrication results including the geometrical specification and the void fraction will be discussed.

## 1. 서 론

KSTAR용 초전도 도체를 제조하기 위해서는 초전도 선재를 Cabling하는 기술과 이를 CICC (Cable-in-conduit Conductor: 관내 연선도체) 형태의 초전도 도체로 제작하는 기술이 필요하다 [1]. CICC를 형태를 KSTAR 초전도 도체로 선택한 이유는 Helium 소모량이 적고, 강한 힘이 작용하는 환경 하에서 기계적으로 안정하며, 절연이 용이하여 전기 절연 강도를 높일 수 있다는 장점을 갖고 있다. 따라서 핵융합장치와 같은 거대 장치에서는 CICC가 근래에 들어 필수적으로 채택되고 있으므로 초전도 도체 형태를 CICC 형태로 선택하게 되었다

CICC를 제작하기 위해서는 초전도 선재를 집합, 연선하는 Cabling 과정과 이러한 Cable을 감싸주는 Jacketing 과정을 거치게 된다. 이를 위해 TF CICC와 PF 1-5 CICC의 경우 Incoloy 908을 Jacket 재료로 사용하고 Nb3Sn을 초전도 선재로 이용하여 CICC를 제작하고 있다. 한편 PF 6, 7 CICC의 경우 스테인레스 316LN을 Jacket 재료로, NbTi를 초전도 선재로 이용하여 CICC를 제작하고 있다. 특히 Jacketing의 경우 연속공정에 의한 CICC 제작을 위해 조관 방식 (Tube Mill Process)을 이용한 CICC 제작 연구를 수행하고 있다.

따라서 본 절에서는 초전도 도체를 제작하기 위한 초전도 선재의 Cabling 연구와 이를 CICC 형태로 제작하기 위한 조관 과정 및 이를 바탕으로 한 실제 PF 6, 7 CICC 제작에 관해서 기술하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 실험 방법 및 사용 재료

#### 2.1.1 초전도 도체 연선(Cabling)

초전도 도체를 만들기 위한 연선 작업에는 초전도 선재가 필요한데 PF6-7용 도체에는 NbTi 선재가 사용되었다. NbTi 선재는 임계전류밀도가 5 T, 4.2 K에서 2800 A/mm<sup>2</sup> 이상이고, ±3 T 사이클에서 교류손실이 150 mJ/cc 이하의 특성을 가지고 있다. NbTi 선재의 사양을 Table 1에 나타내었다.

집합연선(Cable)은 PF의 경우 360 개의 선재로 이루어져 있다. 최초 연선 단계인 3연선 (Triplet)은 초전도 선재 두 가닥과 무산소동 선재 한 가닥으로 이루어져 있다. 따라서 최종적으로 만들어지는 케이블은 초전도 선재가 2/3 만큼 차지하고 무산소동 선재가 1/3 만큼 차지하도록 하여 제작하였다.

#### 2.1.2 조관(Jacketing)

NbTi 초전도 재료를 사용하는 PF 6,7 coil용 CICC의 경우 오스테나이트계 스테인레스 강의 일종인 스테인레스 316LN을 사용하였다. 이들 재료에 대한 화학조성과 기계적 성질은 Table 2, 3과 같다.

스테인레스 316 LN의 경우 고온에서 발생하는 입계부식(Intergranular corrosion)을 억제할 목적으로 C 함량을 0.02 wt% 이하로 조성을 낮추고 이에 따른 강도저하를 막기 위해 N 함량을 0.1 ~ 0.16 wt%로 조절한 합금으로 저온에서의 기계적 특성이 우수한 특성이 있다. 따라서 STS 316 LN의 경우 열처리 과정이 수반되지 않는 NbTi 초전도 선재를 위한 Jacketing 재료로서 적합한 재료로 판단되었다.

한편 본 실험에서는 CICC Jacketing은 연속 조관 과정을 거쳐 완성되었다. PF CICC의 개략적인 형상을 Fig 1.에 나타내었다.

Table 1. Specification of NbTi strand for KSTAR

Parameter	Unit	PF6-7
Superconductor type		NbTi
Strand diameter, unreacted, after coating	mm	0.78±0.02
Critical Current Density (Jc@12 T, 4.2 K)	A/m <sup>2</sup>	
Critical Current Density (Jc@5 T, 4.2 K)	A/m <sup>2</sup>	> 2,800
n-value		> 20
AC Loss (per ±3 T cycle)	mJ/c	< 150
Residual Resistivity Ratio (RRR)		> 100
Cu/Non-Cu ratio		2.8±0.15:1
Coating material		Cr
Coating thickness	μm	1±0.5
Twist Pitch	mm	9±1
DfEff	μm	10

Table 2. Chemical composition of stainless 316LN

C	Mn	Ni	Cr	Mo	N	Fe
<0.02	<2	10-14	16-18	2-3	0.1-0.16	Bal.

Table 3. Mechanical properties of stainless 316LN(at 298)

Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
375	700	36

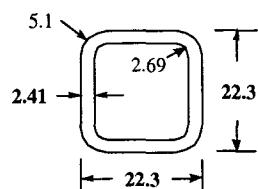


Fig. 1. Dimension of PF CICC

## 2.2 실험 결과

### 2.2.1 초전도 도체 연결(Cabling)

TF 자석의 경우 기본적으로 DC로 운전되기 때문에 피치 길이가 그다지 중요하지 않으나, PF 자석의 경우에는 자장의 세기와 변화율이 매우 큰 영역에서 운전이 되므로 교류 손실을 줄이기 위해서는 피치 길이를 가능한 작게 하는 것이 중요하다. 지금까지 연구를 통하여 각 연선 단계에서 작업이 가능한 최적의 피치 길이를 결정하였으며, 그 결과 Table 4에서 보는 바와 같이 PF 도체의 연선 사양을 결정하였다.

한편 초전도 선재의 펜치를 검출하기 위해서는 초전도 케이블 내에 전압 탭 센서(VTS, Voltage Tap Sensor)가 요구된다. 그 제작 방법은 Fig. 2에서 살펴 볼 수 있듯이 먼저 외경 0.3 mm인 스테인리스 심선 위에 유리사로 편조를 하고, 그 위에 65 μm 스테인리스 세선으로 편조를 한 다음 최종적으로 센서를 보호할 목적으로 외경 1.32 mm의 스테인리스 피복을 입혔다. 사용되는 스테인리스 재질은 모두 316L이고 유리사는 S-2 Glass로 직경 9 μm의 이었다.

케이블에 전압탭 센서를 삽입하는 방법은 초전도 선재 케이블링 과정의 마지막 연선 단계에서 중심에 6 개의 내부 전압탭 센서를 삽입하고 폭 30 mm, 두께 0.05 mm인 SS 316L 테입으로 40 % 겹쳐서 케이블의 외면을 나선형으로 감쌌다. 이렇게 해서 생산되는 최종 케이블의 직경은 PF의 경우 20.7±0.3 mm이 요구된다. 이를 위해 Sizing Roll이 개발되었다. 즉, 총 4 세트가 수직-수평-수직-수평으로 설치되어 상하, 좌우 Roll이 맞물려 돌아가며 21.4 mm → 20.7 mm → 20.4 mm → 19.9 mm로 Cable을 규제하였다.

### 2.2.2 조관(Jacketing)

CICC의 조관 과정은 스테인레스 Strip을 Pipe 형상으로 성형하기 위한 Forming 과정, Forming된 Pipe 형상을 용접하는 용접 과정, 용접 후 용접 bead를 가공하는 Bead 가공 과정, 용접부의 결합 검사과정, 원하는 크기 및 형상의 CICC를 제작하는 Sizing 및 Squaring 과정 등으로 이루어진다. 이를 구체적으로 살펴보면 Table 5에서 알 수 있듯이 직경 20.7 mm의 초전도 케이블을 두께 2.41 mm, 폭 82.1 mm 규격의 스테인리스 316LN Strip으로 forming하여 내경 22.79mm로 용접을 한 후, 목표로 하는 CICC 형

Table 4. Cabling method of NbTi strand for KSTAR

Stage	Element	No. Strands	Twist Pitch (mm)	Die Diameter (mm)
1	Triplet	3	40 ± 1	1.65
2	3x4	12	80 ± 2	3.64
3	3x4x5	60	145 ± 2	8.2
4	3x4x5x6	360	237 ± 3	20.3

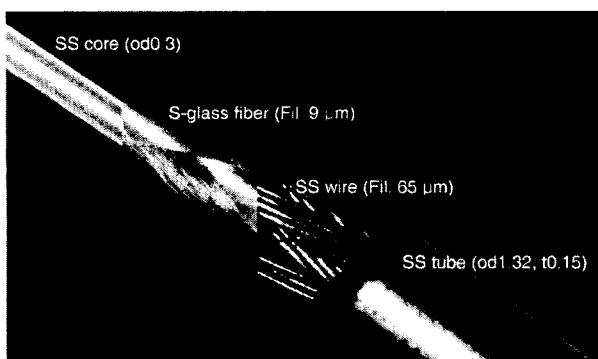


Fig. 2. Internal voltage tab sensor

상과 크기로 만들기 위한 sizing 과정을 통해 직경의 8%를 reduction한다. 그리고 최종적으로 Squaring 과정을 통해 폭 25.65 mm의 CICC를 제작하는 과정이다.

이 중 용접과정은 CICC 조관 과정에서 가장 중요한 공정이다. 특히 용접 후 조성 및 조직의 불균일과 결함발생으로 인해 생기는 악영향들은 CICC 작업환경인 극저온과 고자장의 상태에서 치명적인 문제를 야기할 수 있으므로 이러한 용접 시공 후 재료의 기계적 특성, 열화에 대한 평가 등이 확보되지 않으면 CICC 조관이 사실상 불가능하다. 본 실험에서 조관 용접은 TIG용접기를 사용하여 자동 용접을 행하고 있다. 이때의 용접변수로서 용접 전류, 용접 전압, 조관 속도, Shield gas의 종류 및 유량, 피용접재 간의 거리 등을 고려하여야 한다. 본 실험에서는 이와 같은 여러 용접변수들을 고려하여 Incoloy 908합금에 용접조건 설정을 위한 용접실험을 행한 결과 적정용접조건으로서 Table 6과 같은 결과를 얻었다. 여기서 주목할 것은 용접과정 중에 발생하는 용접 부 미세 Crack이나 기공 등과 같은 결함의 방지를 위해 용접 보호 가스를 Ar+H<sub>2</sub> 혼합가스를 사용하였다는 점이다. 이는 전극봉의 수명향상에도 큰 도움이 되었다.

조관 용접 후 용접 부를 광학현미경으로 관찰한 사진을 Fig. 3에 나타내었다. 사진에서 살펴볼 수 있듯이 용접부 미세조직은 익고 조직인 Dendrite 상을 관찰할 수 있으며 용접 열 영향부의 경우 용접 부에 비해 조직이 조밀화된 것을 관찰할 수 있다. 그리고 용접 부, 열 영향 부 모두 미세 crack이나 기공 등의 용접 결함은 관찰

할 수 없었다.

Table 5. PF CICC Fabrication procedure (unit:mm)

Strip size	2.41×82.1
Welding	Outer Dia.: 27.61
Reduction(8%)	Outer Dia: 25.4.
Squaring	22.3×22.3
Cable dia(Max.)	20.7±0.3
SUS tape	0.2
Roll groove size	21.7

Table 6. Welding Condition for PF CICC Jacketing

Current	170~190A
Voltage	22V
Welding Speed	0.47 m/min
Shield gas(Ar+He)	12 l/min(Ar) + 0.8 l/min(He)
Back shield gas(He)	4 l/min

이러한 모든 과정을 거쳐 PF 7 CICC를 제작한 후 CICC의 결함을 판단하는 Leak Test 결과 결함은 검출되지 않았다.



Fig. 3. Microstructure of stainless 316LN  
(a)weld and (b)heat affected zone

### 3. 결 론

Cabling 방법과 조관 방법의 학습을 통해 결함 없는 PF CICC 제작은 가능하였으며 이는 한 방법을 토대로 하여 향후 TF CICC 및 PF1~5 CICC 등의 제작에도 도움이 되리라 판단된다.

### (참 고 문 헌)

- [1] J. H. Schultz, KSTAR Design Description Doc., KSTAR Magnet Sys. Rev. T13/14, 1999.