

KSTAR 초전도자석계통 개발현황

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

Present Status of the KSTAR Superconducting Magnet System Development

H.K. Park, K.M. Kim, K. R. Park, B. S. Lim, S. I. Lee, W. H. Chung, Y. Chu, S. H. Baek,
Korea Basic Science Institute, Daejeon, Republic of Korea

hkpark@kbsi.re.kr

Abstract - The KSTAR superconducting magnet system consists of 16 TF (Toroidal Field) and 14 PF (Poloidal Field) coils. Both of the TF and PF coil system use internally-cooled Cable-In-Conduit Conductors (CICC). The major achievement in KSTAR magnet system development includes the development of CICC, the development of a full size TF model coil, the development of a background magnetic field generation coil system, the construction of a large scale superconducting magnet. TF and PF coils are in the stage of the fabrication for the KSTAR completion in the year 2005.

1. 서 론

KSTAR 초전도자석계통은 16개의 TF(Toroidal Field) Coil과 8개의 PF(Poloidal Field) Coil로 구성되어 있다. 두 종류의 초전도 자석 모두 초임계 헬륨을 강제 순환시켜 냉각시키는 방식을 사용하도록 CICC(Cable-In Conduit Conductor : 관내연선도체)를 이용하여 자석을 제작하고 있다. TF Coil 은 플라즈마의 중심에서 3.5 Tesla 이고 TF 자석 내부에서의 최고 자장은 7.5 Tesla이며 저장된 자장에너지는 약 500 MJ 이다. 그리고 Nb3Sn 초전도 선재를 사용하고 Incoloy 908을 Jacket 재료로 사용한다. PF Coil 은 14개의 자석으로 되어 있는데 PF1-5의 10개의 자석은 Nb3Sn 초전도 선재와 Incoloy 908을 Jacket 재료로 사용하고 PF6-7의 4개의 자석은 NbTi 초전도 선재와 STS 316LN⁺을 Jacket 재료로 사용한다. PF Coil은 17 V-sec의 자장변화량을 일으켜 플라즈마를 발생시키고 2 MA의 플라즈마 전류를 20초간 유지할 수 있다. Fig. 1 은 KSTAR 초전도자석 계통의 구성도이다.

이러한 KSTAR 초전도자석 설계를 바탕으로 본 보고에서는 현재 진행 중인 초전도 자석 개발을 위한 각 단계 별 소개와 공정에 대해 간략히 설명하고, 현재 까지 진행된 개발 현황에 대해서도 기술하고자 한다.

2. 본 론

2.1 초전도 관내연선도체

초전도 도체를 만들기 위한 연선 작업에는 초전도 선재가 필요한데, TF 및 PF1-5용 도체에는 Nb3Sn 선재가, PF6-7용 도체에는 NbTi 선재가 사용된다. Nb3Sn 선재는 임계전류밀도가 12 T, 4.2 K에서 750 A/mm²보다 크고, ±3 T 사이클에서 교류손실이 250 mJ/cc보다 작은 KSTAR HP-III급이다. 각 자석에 사용되는 선재의 사양은 표 1에서 보는 바와 같다.

집합연선 (Cable)은 TF의 경우 486 개의 선재로 이루어져 있고, PF의 경우 360 개의 선재로 이루어져 있다. 최초 연선 단계인 3연선 (Triplet)은 TF나 PF 모두 초전도 선재 두 가닥과 무산소동 선재 한 가닥으로 이루어져 있다.

도체는 Forming, Welding, Sizing 및 Squaring공정으로 구성된 Tube Mill Process에 의해 제작되며, Fig. 2는 코일별 도체의 규격을 보여준다.

도체 재료인 Incoloy 908 합금은 TF 및 PF 1-5 CICC Jacketing 재료를 위해 제작된 Ni-Fe 합금으로, 극저온인 4K 까지 냉각할 때 Nb3Sn 초전도 선재와 열팽창계수가 같아 전류특성을 최대화하며, 인장강도, 파괴인성, 피로특성 등이 우수한 장점이 있다. 또한 Nb3Sn 초전도체를 위한 열처리 후 우수한 기계적 특성을 갖는다.

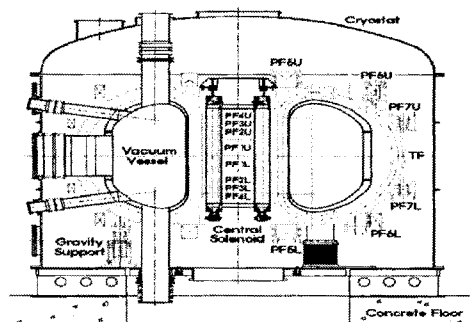


Fig. 1 KSTAR superconducting magnet system configuration

Table 1. TF and PF Conductor Parameters

| Parameter | Units | TF | PF1-5 | PF6-7 |
|-------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|
| Conductor | | NbTi | Nb3Sn | NbTi |
| Strand diameter | mm | 0.78±0.02 | 0.78±0.02 | 0.78±0.02 |
| Jc@12 T, 4.2K | A/mm ² | > 750 | > 750 | |
| Jc@5 T, 4.2 K | A/mm ² | | | > 2,800 |
| n-value | | > 20 | > 20 | > 20 |
| AC Loss(±3T) | mJ/cc | < 250 | < 250 | < 150 |
| RRR | | > 100 | > 100 | > 100 |
| Cu/Non-Cu | | 1.5±0.15 | 1.5±0.15 | 2.8±0.15 |
| Coating material | | Cr | Cr | Cr |
| Coating thickness | μm | 1±0.5 | 1±0.5 | 1±0.5 |
| Twist Pitch | mm | 13±1 | 13±1 | 9±1 |
| Dfeff | μm | 12.5 | 12.5 | 10 |

PF 6, 7 용 Jacket재료로 사용되는 STS 316 LN⁺의 경우 고온에서 발생하는 입계부식(Intergranular corrosion)을 억제할 목적으로 C 함량을 0.02 wt%이하로 조성을 낮추고 이에 따른 강도저하를 막기 위해 일반적인 STS 316LN 재료보다 질소의 함량을 2배(0.1 ~ 0.16 wt%) 증가시킨 합금이다.

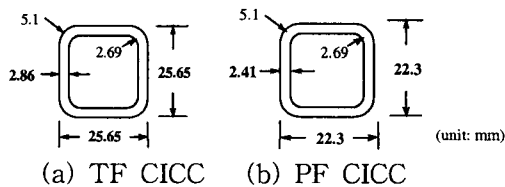


Fig. 2 Dimensions of (a) TF CICC and (b) PF CICC

현재 TF용(길이 640m) CICC 7개가 제작 완료 되었으며, Back Ground 용 BKG(길이 900m × 2), PF06(1,300m × 4), PF07(1,700 × 2) 용 CICC도 제작이 완료되었다. 제작된 CICC의 용접 Back bead의 높이는 1mm 이하, 단면 형상 공차는 0.05mm 이내이며, Void Fraction은 36% 이상이다.

2.2 초전도자석 제작

Nb3Sn 선재를 사용하는 TF 및 PF1-5 Coil의 주요 제작 공정은 CICC Leak Test, Grit Basting, 권선, He Feed-Through 및 Joint 작업, 열처리, 절연테이핑 및 Ground Wrapping. 진공 함침으로 구성되어 있으며, 주요 공정별 상세내

용은 다음과 같다.

제작된 CICC를 스푼(직경 3m, 높이 3 ~ 4m)에 담은 후 30기압의 He으로 가압하여 Leak check를 수행한 후 권선장비에 설치하였다. 그리고 CICC표면의 오염물질을 완전히 제거하고 CICC 표면의 잔류응력을 완화하기 위해 Zirconium Grit Blasting 작업을 권선장비 내에서 행하면서 권선 작업을 수행했다. 또한 권선작업 중 계속하여 CICC의 곡률을 측정하고 또한 CICC의 길이를 Encoder 및 Scale로 이중으로 측정하여 오차를 최소화하여, 권선 시 자석의 규격 오차는 0.2 mm 이내, CICC 길이의 오차는 전체 620m에서 2mm 이내로 유지하였다.

권선작업이 완료된 후, 열처리시 자석의 형상을 고정시켜 주기 위한 열처리 지그에 조립하였으며, Layer Transition 부분의 빈 공간에는 미리 3차원 가공된 STS 316L 재료의 Transition piece를 장착하여 열처리시 변형이 최소화 되도록 하였다. 또한 자석 전류 인입부도 열처리 시 변형을 최소화하기 위하여 미리 3차원 가공된 STS 316L 재료의 Magnet Lead Holder를 장착하였다. 열처리 지그에 자석을 장착한 후 초온계 헬륨공급용 Feed-thru Stub 가공, 자석 접합/단말부 가공작업 등의 열처리 준비공정이 필요하였다. Feed-thru stub의 가공을 위하여 CICC에 초전도선재의 손상 없이 정밀하게 방전가공 방식으로 Feed-thru hole을 가공하였고, Monel 400 또는 Incoloy 908 소재의 Feed-thru stub를 제작하여 용접하였다. 여기서, TIG용접으로 Feed-thru stub를 CICC에 용접하는 과정에서 초전도선재 온도가 180도를 넘지 않도록 온도센서를 용접주위의 초전도 선재 부분에 설치하고, Feed-thru Stub내에 수냉관을 삽입하여 용접온도를 제어하면서 작업을 행하였다.

자석에 전류를 인가하기 위하여 접합/단말부가 필요한데, CNC 전용기를 이용하여 권선된 CICC 단말부의 Jacket을 제거하고 초전도 선재의 크롬도금을 제거한후 Strand-To-Strand Joint 가공작업을 하였다. 이 과정 중 용접시에도 CICC 부 초전도선재 온도가 180도를 넘지 않도록 작업을 수행해야 한다.

다음 단계로 진공 열처리작업에 필요한 순수(99.999%) 아르곤가스 퍼징과 오염 측정을 위한 Feed-thru 이외의 개방된 Feed-thru는 플러그로서 모두 밀봉한 후, 30기압의 He을 가압하여 Feed-thru stub 용접부의 Leak test를 실시하였다. 또한 진공 열처리로 내에 코일을 배관작업 등을 수행하여 설치하고 초전도 자석 내부를 He으로 10 기압으로 가압한 후 RGA를 이용하여 진공 열처리로 내부의 가스 성분을 조사하여 Leak test를 다시 수행하였다.

진공열처리로 내에 Leak test를 완료한 후, 진공열처리 공정을 진행하였는데, 진공열처리 방법은 우선 진공열처리로 내부를 4E-5 torr 이하로 진공배기 한 후 상온 → 460℃ 까지 6℃/hr로 올림 → 460℃에서 144시간 유지 → 660℃ 까지

6°C/hr로 올림 → 660°C에서 240시간 동안 열처리의 과정을 진행하였다. 이 과정에서 CICC 내부에 알곤 가스를 흘려주어 Purging함으로써 CICC 내부의 잔여물을 제거하고 산소농도를 0.1 ppm 이하로 유지하여 SAGBO(Stress Accelerated Grain Boundary Oxidation)이 발생하지 않도록 하였다.

열처리가 끝난 후, CICC의 Turn-to-Turn, Layer-by-Layer의 SUS316L 스페이서들을 모두 제거하고 Kapton과 S-glass tape(강화 유리섬유)로 절연 테이핑 작업과 S-glass로 그라운드 랩핑 실시하였다. 절연 테이핑은 두께 0.05mm, 폭 25.4 mm의 Kapton Tape로 50% 중첩시켜 1회 감은 후(0.05mm X 2) 그 위에 두께 0.1778mm, 폭 25.4mm의 S-Glass Tape로 50% 중첩시켜서 2회(0.1778mm X 4) 감았다. 절연 테이핑 시 Turn-to-Turn Winding으로 자석의 형태를 갖춘 상태이므로 CICC는 탄성한 내로 코일을 풀어서 작업 후 다시 원상태로 형태를 유지할 수 있도록 하였다. 또한, CICC의 둥근 모서리 형상으로 인해 생긴 turn과 turn 및 layer와 layer사이의 공간은 S2-glass 재질의 Roving Filler로 채워 넣으면서 절연 테이핑 작업을 수행하였다.

그라운드 랩핑은 두께 0.254mm, 폭 38.1mm의 S-Glass Tape로 50% 중첩시켜서 원상태로 형태를 다시 갖춘 후 전체를 TF Coil의 경우 11회(0.254mm X 22), PF Coil의 경우 15회(0.254mm X 30) 감았다. 이때 Layer Transition 부분의 빈 공간에는 미리 3차원 가공된 G10 재료의 Transition Filler를 장착하여 진공함침시 Epoxy Rich Zone이 최소화 되도록 하였다.

에폭시 몰딩은 금형(자석의 정확한 치수로 0.05mm 정도의 공차내로 제작)에 자석을 조립하여 1E-2 torr이하로 진공배기 하였다. 이때 CICC 내부를 He으로 30 기압으로 가압하여 에폭시몰딩 금형 내부를 Helium Leak Detector로 검사하였다. 에폭시 Compound의 재료는 ITER CS Model Coil 제작시 사용된 재료와 같은 Vantico GY282(주제), HY918(경화제), DY073(촉진제)을 혼합하여 사용하였다. 몰딩 금형은 40도로 가열한 후 에폭시를 주입하고, 가압하여 에폭시가 충분히 충전되도록 한 후, 80도에서 12시간을 그리고 120도에서 24시간 동안 Curing을 실시하였다. 에폭시 몰딩이 끝나면, 자석을 금형에서 분리하고 모서리 부분의 Epoxy Rich Zone을 제거하여 필요에 따라 자석 표면을 설계수치로 정밀하게 가공하였다.

진공함침 후 Prototype coil인 TF00과 Back Ground용 BKG coil의 형상오차는 각각 1.7mm, 1mm 이하이었다.

3. 결 론

자석 테스트를 위한 Prototype coil인 TF00, Back Ground용 BKG 01, 02 Coil이 개발완료 되었으며, KSTAR용 초전도자석을 위한 거의 모든

제작공정이 확립되었다. 현재 PF7L, PF7U 및 TF01-04 Coil이 제작 중에 있다.

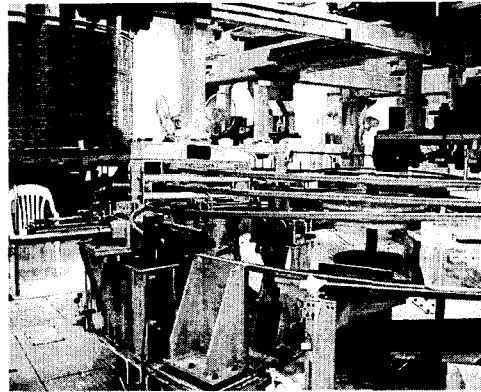


Fig. 3 TF Coil Winding

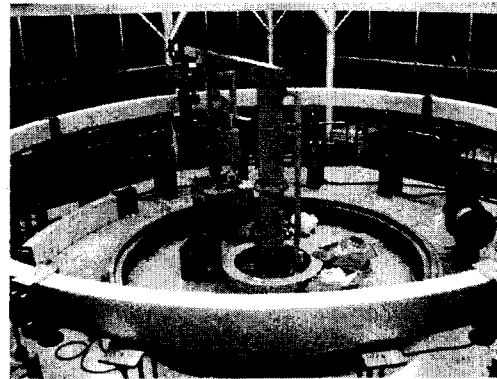


Fig. 4 PF07 Ground Wrapping

[참 고 문 헌]

- [1] G. S. LEE, et al., "Design and Construction of the KSTAR Tokamak", Nuclear Fusion 41, p1515, 2001.
- [2] G. S. LEE, et al., "The KSTAR Project: Advanced Steady-state Superconducting Tokamak Experiment", Nuclear Fusion 40 p575, 2000.
- [3] S. Lee, et al "Fabrication of cables for the background-field magnet system of SSTF," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 12, No 1, p583, B.
- [4] Lim, et al., "Fabrication of the KSTAR superconducting CICC," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 12, No 1, p591, 2002.2002.
- [5] B. Lim, et al., "Development of CICC for KSTAR TF Coil System," IEEE Transaction on Applied Superconductivity Conference 2002, Houston, Aug. 4-9, 2002.