

## 고자장 플라즈마 연구를 위한 초전도자석 시스템의 개발 및 운전

박갑래, 박영민  
 국가핵융합연구소 KSTAR 운영사업단

### 1. 서론

장시간 동안 고온의 플라즈마를 안정적으로 유지하고, 제어하기 위해서는 고자기장이 필수적으로 요구된다. 기존의 핵융합 장치에 사용되는 상전도 자석은 운전 시 저항에 의한 막대한 전력 손실로 인하여 장시간 운전이 어려움이 있었다. 따라서 핵융합 상용화를 위해서는 장시간 운전이 가능하며, 전력 손실이 거의 없는 초전도자석을 사용하여야 한다. KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) 장치는 이러한 고자기장을 지속적으로 유지하기 위해 모든 자석을 초전도 도체를 사용하여 제작하였다.

KSTAR 장치의 초전도자석 시스템은 16개의 TF (Toroidal Field) 코일과 8개의 CS (Central Solenoid) 코일 그리고 6개의 PF (Poloidal Field) 코일로 구성되어 있다. TF 초전도자석은 플라즈마 영역에 3.5 테슬라의 자장을 형성하기 위해 16개의 D자형 코일이 모두 직렬로 연결되어 있으며 직류 정상상태로 운전된다[1]. CS 및 PF 초전도자석은 14개의 원형 코일이 상하 대칭구조로 설치되어 있으며 펄스 전류로 운전된다.

초전도자석에 대전류를 공급하기 위한 전송선도 초전도 도체를 사용하여 40 kA의 대전류를 안정적으로 수송 할 수 있도록 제작하였다. 초전도전류전송 시스템은 상온에 있는 power supply의 버스라인과 극저온의 초전도전송선을 연결하는 전류인입선과, 초전도자석과 전류인입선 사이를 연결하는 초전도 송전선으로 구성되어 있다. 그림 1에 KSTAR 초전도 자석과 전류전송시스템의 개략도를 나타내었다.

KSTAR 초전도시스템은 2007년 3월에 제작 설치가 완료되었으며, 2008년 3월 말에 냉각을 위한 헬륨공급 장치가 연결되었다. 2008년 4월 3일에 모든 초전도 시스템에 대

한 냉각을 착수하여 4월 26일에 4.5K의 극저온까지 냉각을 완료하여 초전도 전이를 확인하였다. 냉각 후 초전도자석 시운전과 최초 플라즈마 발생 시험을 진행하였다.

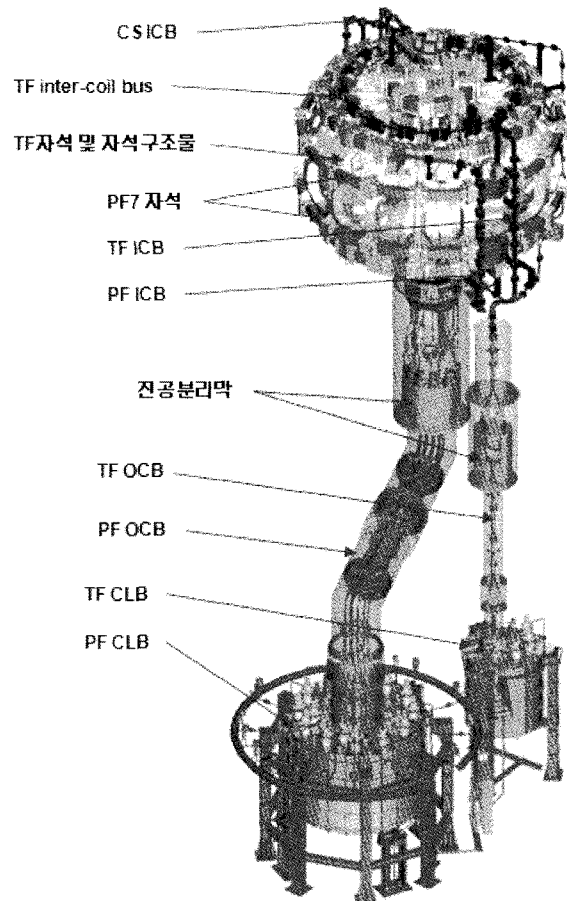


그림 1. KSTAR 초전도 시스템.

### 2. 초전도시스템 제작

KSTAR 초전도자석은 플라즈마 중심에서 최대 3.5 T 정도의 고자장이 요구되므로 NbTi, Nb<sub>3</sub>Sn 등과 같은 저온 초전도체를 사용하였고, TF, CS, PF5 초전도자석에는 Nb<sub>3</sub>Sn 선재를 PF6, 7 초전도자석과 초전도 송전선에는 NbTi 선재를 사용하였다. 냉각 방식은 냉매를 초전도 도체 내부로 흘리는 강

제유동냉각(forced flow cooling)방식 이다. 자석 제작은 2002년도부터 착수하여 2006 년도에 총 30개의 초전도자석 제작을 완료하였다. 제작 과정에서 각각의 단계별로 초전도 자석의 성능과 규격을 만족하는 검증시험과 검사를 수행하였으며, 별도의 시제품 초전도 자석을 제작하여 극저온 상태에서 전류인가 시험을 수행하여 성능을 확인하였다.

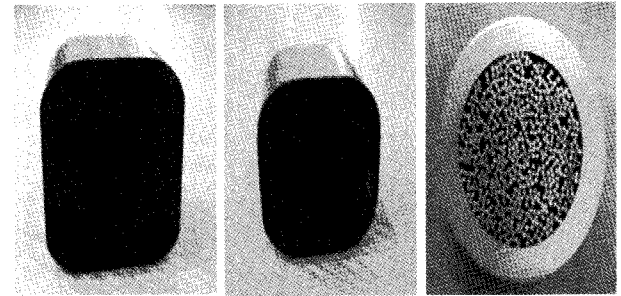
### 2.1. 초전도 도체 제작

초전도 자석에 사용된 도체 제작은 연속 조관 공정(continuous tube mill process)을 적용하여 단위 길이가 최대 1.7 km가 되도록 제작하였다. 초전도 송전선은 자석과 달리 최대 길이 13 m 이므로 무결목강관(seamless pipe)를 사용하여 제작 하였다. 이와 같이 제작되는 도체를 관내연선도체(CICC : Cable in Conduit Conductor)라 한다.

Nb<sub>3</sub>Sn/Cu 초전도선재를 사용할 경우에는 Nb<sub>3</sub>Sn을 초전도체로 만들기 위해서 자석 제작과정 중 열처리공정을 거쳐야 한다. 이때 열처리 중 선재 간의 소결을 방지하고 초전도 자석 운전시 선재 사이의 전기저항을 키워 교류손실을 낮추기 위해 선재에 2미크론 두께의 크롬도금을 실시하였다. 크롬도금을 실시한 후 초전도선재와 무산소동선재의 비율을 2:1로 혼합하는 연선화 작업과 단계별로 꼬아서 집합연선화(cabling)하는 작업을 수행하고 최외곽에는 SS316L 필름을 감아준다. 집합연선은 TF의 경우 486 가닥((2+1)×3×3×3×6), PF의 경우 360 가닥((2+1)×4×5×6)으로 이루어져 있다. PF 6번과 PF7번 자석의 경우 NbTi/Cu 선재를 사용하므로 열처리 공정은 진행하지 않는다. 초전도송전선에 사용된 집합연선은 567 가닥(2:1×3×3×3×7)으로 송전선의 저온질량(cold mass)를 증가시키고, 초전도체의 퀘치시 퀘치가 빠르게 전파하는것을 방지하기 위해 81가닥의 무산소동 선재가 추가로 삽입되어있다.

선재의 집합연선 작업이 끝난 후 조관(jacketing)작업을 진행하는데 Nb<sub>3</sub>Sn/Cu 초전도선재는 Incoloy 908 합금을, PF 6, PF7 자석용 NbTi/Cu 초전도선재는 STS316LN을 조관재료로 선택하였다. 그리고 초전도 송전선은 원형의 STS316L 강관을 사용하였다. KSTAR 초전도시스템에 사

용된 각 도체의 단면 형상을 그림 2에 나타내었다.



TF Conductor      PF Conductor      Busline Conductor

그림 2. CICC형 초전도도체 단면.

### 2.2. 초전도 자석 제작

#### (1) Nb<sub>3</sub>Sn 초전도 자석 제작

초전도 자석제작공정은 도체의 누설검사, 권선공정, 열처리 준비공정, 열처리 공정, 절연 공정, 진공함침 공정으로 이루어진다. 특히 자석 중간에 전기적 연결부인 조인트가 없도록 연속권선공법을 개발하여 적용하였다.

#### 가. 도체 누설검사

연속 조관 공정으로 제작된 CICC는 누설검사를 통해 누설유무를 검사하여 누설이 발견되면 부분가공을 한 후 보수 용접을 통해 누설 부위를 보수한다. 검사 방법으로 도체 내부에 헬륨 가스를 약 50 bar 정도 가압 후 헬륨 검출기에 의한 누설부위 검출하는 방법과 가압된 도체를 물이 담긴 수조에 넣어서 누설부위를 찾는 두가지 방법으로 진행되었다.

#### 나. 권선 공정

권선공정은 도체를 원하는 자석의 형상으로 성형하는 공정이다(그림 3 권선 공정). 먼저 도체 제작과정에 발생하는 도체의 잔류응력을 제거해 주는 그릿블래스팅(grit blasting) 공정, 도체를 성형되는 속도에 적합하도록 이송하고, 연속 권선 공정에서 자석의 길이를 정밀 제어하는 공정과 자석 모양대로 직선 및 곡선으로 성형하기 위한 3-roll 밴딩 장치가 작동하는 공정 그리고 성형 후 형상을 유지할 수 있도록 하는 고정 장치(clamping) 공정 등으로 진행되어졌다.

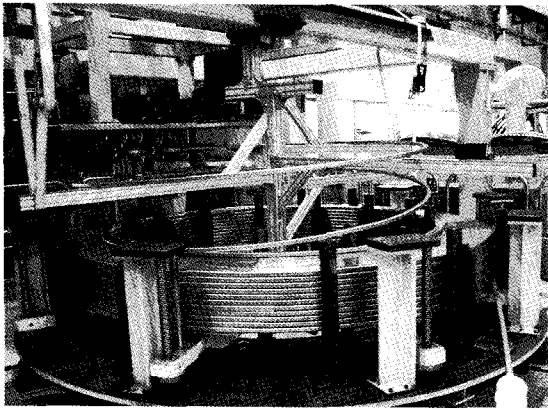


그림 3. 연속 권선 공정.

다. 열처리 준비 공정

열처리 준비공정은 상온에서부터 660도까지 온도변화에 의한 자석 형상의 변화 방지를 위한 열처리 지그의 조립, 자석 양 끝단에서 전류를 공급하기 위한 말단 접합부 설치작업 그리고 극저온 헬륨냉각을 위한 헬륨 공급부 설치 작업이 진행된다.

라. 열처리 공정

KSTAR 초전도자석의 경우 극저온에서 초전도성질을 가지기 위해 Nb와 Sn의 반응에 의한 Nb<sub>3</sub>Sn 화합물 초전도체를 형성시키기 위해 도체 내부 불순물 제거 단계인 460도 온도 구간, A15 형성 1단계 570도 구간, A15 형성 2단계인 660도 구간으로 총30일간의 진공 열처리 공정이 진행 된다.(그림4. 열처리로) 열처리로 내부 환경은 온도 균일도는 ±1.5℃ 이내이며, 시간당 변화는 ±3℃ 이내이다. 또한 Incoloy908 자켓 재질의 특성에 따른 SAGBO(Stress Acceleration caused by Grain Boundary Oxidation) 고온산화 현상 발생을 예방하기 위해 진공도는 산소분압을 기준으로 660℃ 고온상태에서 0.08 ppm 이하를 유지하여야 한다.

마. 절연테이핑 공정

절연테이핑 공정은 자석의 절연을 위해서 Kapton과 S-glass 테이프를 사용하여 도체 사이와 자석 전체에 감아주는 공정이다.(그림5. 절연테이핑 공정) 또한 이 공정에서 CS, PF5자석은 자석의 운전 중 발생할 수 있는 이상 전압을 검출하는 목적의 센서를 설치하였다. 이러한 작업은 자석의 절연 성능 확보는 물론 극저온에서자석의 기계적 강도를 유

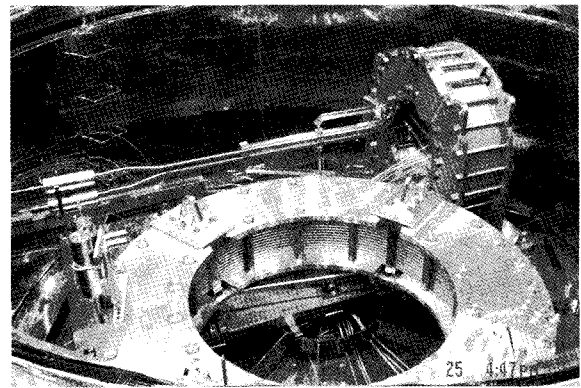


그림 4. 열처리로 자석 설치.

지시켜 주는 역할을 한다.

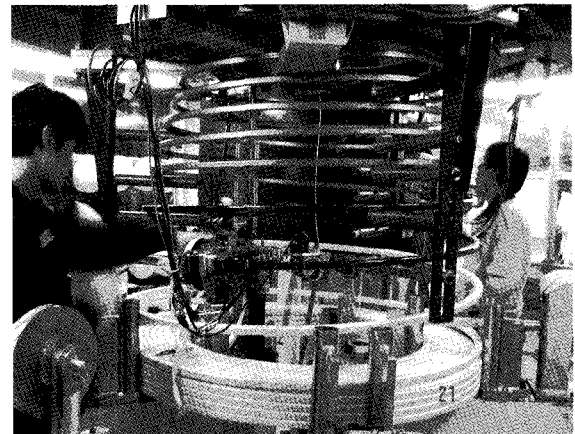


그림 5. 절연테이핑 공정.

바. 진공함침

진공함침(VPI : Vacuum Pressure Impregnation) 공정은 절연테이핑용 테이프 사이에 에폭시를 침투시킴으로서 전기적 절연 및 구조적 강도를 유지하는 공정이다. 이 공정은 몰딩금형 조립, 진공배기, 에폭시 주입, 양생(curing), 자석분리의 5단계로 진행된다. 이 과정을 마지막으로 비로소 자석제작이 완성된다.(그림 6. 진공함침 공정)

(2) 제작 과정에서의 검사

초전도자석 제작 공정에 따른 검사 항목은 도체 제작 완료 후 헬륨 누설 검사, 권선 공정에서 치수 관리 검사, 열처리 준비 공정에서 용접부 누설검사, 열처리공정에서 누설검사와 열처리 온도 관리, 진공함침 완료 후 냉각 채널간 유량검사, 형상검사, 절연검사 등을 수행하고, 최종적으로 열처리된 자석의 동일한 선재를 사용하여 12 T 자장 하에서 750

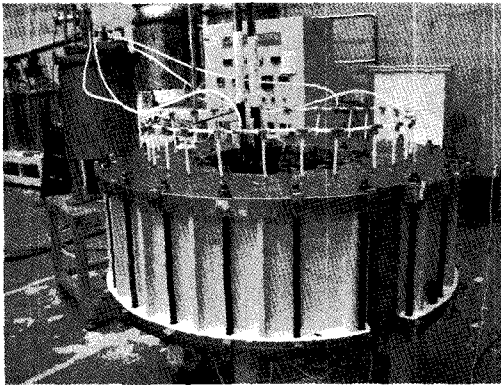


그림 6. 진공함침 공정.

A/mm<sup>2</sup> 이상이 되는지 검사하는 임계전류(Jc) 검사를 수행한다. 유량검사는 냉각 채널간 유량분포를 측정하기 위해 8기압의 아르곤가스를 흘려주어 채널간 불균형을 측정 그 값이 ±10% 이내에 들어야 한다. 형상검사는 진공함침 완료 후 치수가 허용공차(±2 mm) 만족 여부를 정밀 측정한다. 그리고 절연검사는 DC 15 kV와 AC 10 kV를 인가하여 절연상태를 확인, double pancake간 약 2 kV 임펄스 전압을 인가하여 파형간 오차(5% 이내 기준)를 측정하여 층간 절연상태를 확인한다.(그림 7. 상온검사)

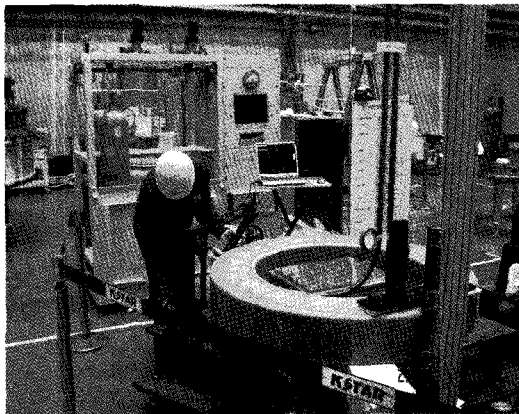


그림 7. 코일 제작 완료 후 상온 치수 검사.

### 2.3. 초전도 송전선 제작

초전도자석에 대전류를 전송하기 위한 초전도 송전선은 저온용기 내부에서 초전도자석과 연결되는 송전선(ICB : In-Cryostat Busline)과 저온용기 외부에서 전류인입선과 연결되는 송전선(OCB : Out-Cryostat Busline)으로 구

분되어져 있다. ICB와 OCB를 구분하는 경계는 그림 1에서과 같이 저온용기와 OCB 진공덕트 사이에 있는 진공 분리막이다.

#### (1) 초전도 송전선 제작 설치

TF 초전도자석에 35.2 kA의 전류를 공급하기 위한 초전도버스라인은 16개의 TF 자석을 직렬연결하기 위한 inter-coil bus와 ICB, OCB로 구성되어있다. TF 자석을 각각 연결하는 inter-coil bus는 시계방향으로 전류가 흐르게 됨으로써 전체가 하나의 원형 loop를 형성하게 되며, 운전 시 loop current에 의한 error field의 요인이 된다. 따라서 이 error field를 상쇄시키기 위해 inter-coil bus 바로 위쪽에 return bus를 설치하였다.

TF 초전도버스라인은 10시간 동안 연속 운전되는 TF 자석에 전류를 안정하게 공급하고, 전원공급 중단이나 자석의 켜치 등 응급상황이 발생하였을 때 500 MJ의 에너지를 짧은 시간 내에 내보내야하는 역할을 수행하여야 한다. 따라서 TF 버스라인은 이러한 비정상적인 운전상황에 대처하기 위해 TF ICB와 OCB는 두 쌍으로 제작되었다.

OCB는 cryostat과 진공을 구별하기 위한 진공 분리막이 설치되었다. 대용량의 전류가 흐르는 CICC는 진공분리막과 연결되기 때문에 이들 사이의 절연을 위해 15 kV의 내전압에 견딜 수 있는 radial electrical break를 설치하였으며, CICC가 저온으로 냉각될 때 열수축에 의해 발생하는 응력이 구조적으로 약한 electrical break에 인가되지 않도록 벨로우즈를 설치하였다. 또한 OCB CICC는 냉각 시 발생하는 열수축을 보상하여 구조적으로 안정하여야 한다. 따라서 TF OCB는 진공분리막 바로 아래에서 CICC가 원형으로 밴딩 되어있어, 냉각 시 열 수축을 보상 할 수 있게 하였다. PF OCB의 경우에는 OCB 구조가 크랭크 형태로 밴딩되어 있기 때문에 각각의 밴딩 부위에서 열수축을 보상한다. 그림 8에 TF OCB 제작 과정을 나타내었다.

PF 초전도자석 시스템은 14개의 PF 자석으로 구성 되어 있으며, 토카막 중심에 위치한 4쌍의 CS자석과 외곽에 위치한 3쌍의 PF 자석이 상하 대칭으로 설치되어 있다. PF 및 CS 초전도송전선은 PF 자석에 각각 20 ~

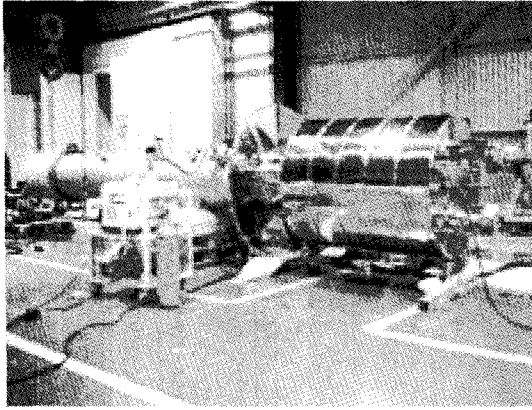


그림 8. TF OCB 제작 공정.

26 kA의 펄스전류를 공급한다. 운전시나리오에 따라 CS1, CS2, PF7 자석은 초전도 송전선을 사용하여 상하 자석 간에 직렬 연결되어 운전된다. 나머지 자석들은 상하 자석이 각각 분리되어 운전된다. 따라서 OCB는 총 11 pair의 CICC로 구성되어있다. 그림 9에 PF OCB의 초전도CICC 조립 형상을 나타내었다.

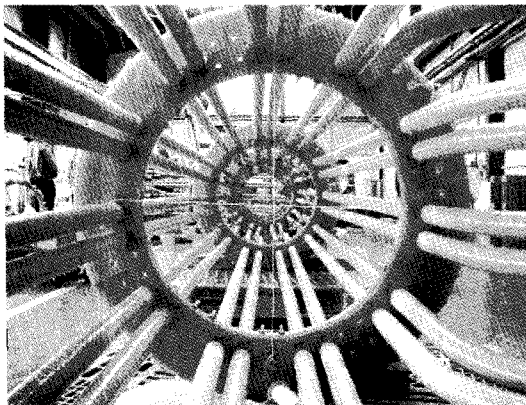


그림 9. PF OCB 내부구조.

## (2) 전기접합부(Joint) 제작

초전도 송전선은 저항이 0이기 때문에 운전시 Joule 열이 발생하지 않지만 초전도체와 초전도체를 연결하는 전기적 접합부인 joint는 Cu 재질로 되어있기 때문에 전류가 흐를 때 저항에 의한 열이 발생하게 된다. 따라서 초전도 송전선 제작 시 성능을 가장 크게 좌우하는 것이 송전선과 송전선을 연결하는 joint의 저항이다. KSTAR에서는 송전선의 joint 성능 저하 시 분리 및 재설치를 위해 서로 겹붙임(lap) joint를 개발하였다. Joint의 접촉저항을 최소화하기 위해 초전도선재의 Cr

코팅을 제거하고 은도금을 하였으며, 은도금된 선재와 Cu sole이 금속 접합이 되도록 solder 작업을 수행하였다. 초전도 송전선의 lap joint는 0.2 T에서 2 nΩ 이하의 DC저항을 유지할 수 있도록 개발 되었으며, 본 제품에 사용된 joint 샘플에 대한 저항측정 시험결과 1.5 nΩ 이하의 좋은 결과를 보였다. TF 자석을 서로 직렬 연결하는 joint는 선재와 선재를 직접 겹쳐서 접합하는 STS joint 방식(strand-to-strand joint)으로서 미리 초전도 선재에 납 코팅을 하고 초전도 선재를 연결 후 액상 납을 주입하여 joint의 저항을 0.2 T에서 0.5 nΩ 이하까지 낮출 수 있었다.

## (3) 초전도 송전선 절연

대전류가 흐르는 CICC는 15 kV 이상의 내전압에 견딜 수 있도록 절연되어야 한다. 초전도송전선의 절연작업은 1차 prepreg 테이프와 kapton 테이프를 재 권치(prepreg+kapton+prepreg)하여 50%가 중첩되게 2회에 걸쳐 감았다. 이때 50~60도의 열을 가하면서 CICC에 완전히 밀착되도록 하였다. 이후 초전도 송전선의 권치 측정을 위한 voltage tap sensor를 250 mm pitch로 일정하게 감은 후 최종 두께가 6 mm 이상이 되도록 prepreg 테이프를 감고 12시간 이상 진공상태에서 양생작업을 완료 하였다.

## (4) 초전도 송전선 설치

초전도송전선 중 OCB는 외부에서 단품으로 제작을 완료하여 현장에 설치하였다. ICB는 OCB joint와 자석 터미널 joint를 연결해야 하므로 크게 3단계로 나누어 작업하였다. ①Joint의 정확한 위치를 파악하기 위한 1차 가설치. 이때 CICC 양단에 mock-up joint를 사용하여 CICC 절단 길이를 체크 하였다. ②CICC의 jacket 제거 후 초전도 선재를 은도금 하였으며, 선재와 joint는 soldering으로 금속 접합을 하였다. ③각 joint의 접합면을 정확히 맞추기 위하여 2차 가설치 후 joint의 bushing을 CICC jacket에 용접 하였다. ④Joint 부상 용접 후 분해하여 (3)절에서 설명한 절연 작업을 수행하였다.

모든 설치가 끝난 후 leak test 및 내전압 시험 검사를 완료하였다.

(5) 전류인입선 제작 설치

Current lead는 300 K의 상온에서 운전되는 전원장치와 4.5 K의 극저온에서 전류를 수송하는 초전도 버스라인을 연결하는 장치이다. current lead에서 발생하는 열부하를 KSTAR 냉각장치의 규모를 결정하는 중요한 요인으로 작용하며 또한 운전 소요경비의 규모를 결정하는 데에 중요한 역할을 담당하기 때문에 current lead에 의한 열손실을 최소화할 수 있어야 한다. 특히 KSTAR의 PF 코일들은 baseline(upgrade) 모드에서 플라즈마가 발생하는 약 20초(300초) 동안만 펄스형태로 전류가 인가된다. 따라서 PF Coil 용 current lead는 펄스 운전시간을 제외하고는 전류가 흐르지 않고 저온으로 냉각되어 있는 stand-by 모드에 있게 된다. 이때 전류가 흐르지 않는 시간이 전류가 흐르는 시간보다 훨씬 길기 때문에, stand-by 모드에 있는 동안의 열손실을 최소화 할 수 있어야 한다. 따라서 KSTAR에 사용된 전류인입선은 기존의 구리로 만든 것과 달리 황동선재를 사용함으로써 전류가 흐르지 않을 때 극저온으로 유입되는 열을 최소화 하였으며, 짧은 시간 동안 전류인입선 설계 전류의 2배 이상을 전송할 수 있는 과부하 전류인입선을 개발 하였다. 그림 10에 과부하 전류인입선 사양을 나타내었다. 개발된 과부하 전류인입선은 냉매공급이 차단되었을 경우 최소 10분 이상 안정적으로 동작 할 수 있게 제작 되어 장치의 안정성을 확보하였다.

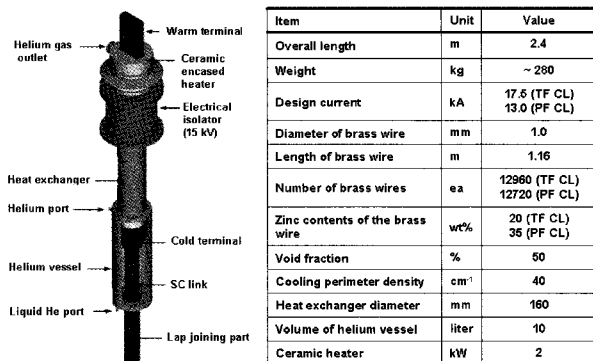


그림 10. 과부하 전류인입선.

3. 초전도시스템 시운전 결과

KSTAR 장치의 플라즈마 발생 실험을 위해서는 초전도자석과 자석구조물, 초전도송전

선, 전류인입선, 단열차폐체 등 총 300 톤에 달하는 구조물을 4.5K의 극저온으로 냉각하여야 한다. KSTAR 장치의 최초 운전은 2008년 04월 3일에 냉각을 시작하여 04월 26일에 4.5K로 냉각을 완료하였으며, 5월에 초전도자석 개별 성능검사 운전, 6월에서 7월에 플라즈마 발생운전까지를 수행한 후 승온을 시작하여 8월에 상온까지 승온을 완료하여 전체적인 성능검증과 성공적인 플라즈마 발생 운전을 수행하였다. 그림 11에 초전도 시스템의 냉각 곡선을 나타내었다. 초전도자석 운전은 TF개별운전, PF개별운전, TF와 PF 연동운전, 플라즈마운전 순서로 진행되었다

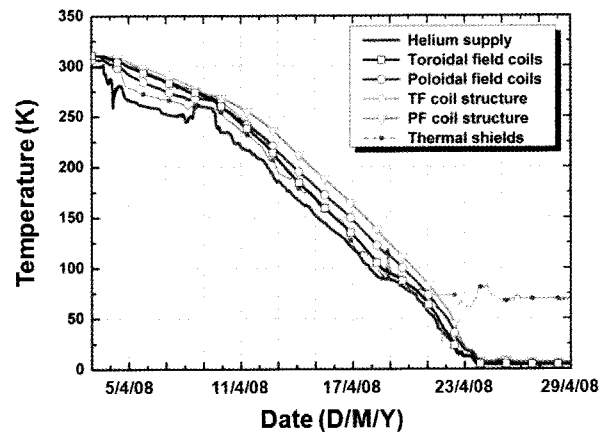


그림 11. 초전도 시스템 냉각 곡선.

(1) 초전도전이, 저항 측정

냉각 과정에서 코일에 1 kA 이내의 전류를 인가하여 지속적으로 코일 및 버스라인의 저항을 측정하여 초전도 전이 현상을 측정하였으며, 또한 냉각 완료 후, 접합부 저항에 대한 측정을 수행하였다. 초전도송전선을 연결하는 접합부 저항은 전체적으로 약 2 nano Ohm 이하로 측정되었다. (그림 12. 초전도 코일의 초전도전이, 그림 13. 초전도송전선의 초전도전이) Nb<sub>3</sub>Sn 초전도 자석 계통은 대략 18K에서, NbTi 초전도 자석인 PF6, 7 코일에서는 대략 9K에서 초전도 현상이 나타났다. 초전도자석의 RRR은 KSTAR의 설계 기준인 100 이상을 만족하였다.

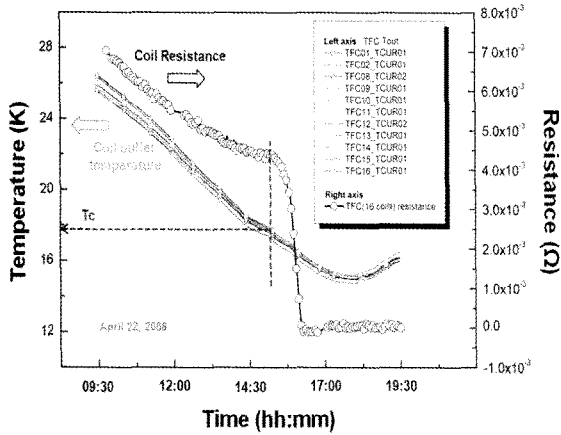


그림 12. TF 코일의 초전도 전이 측정 결과.

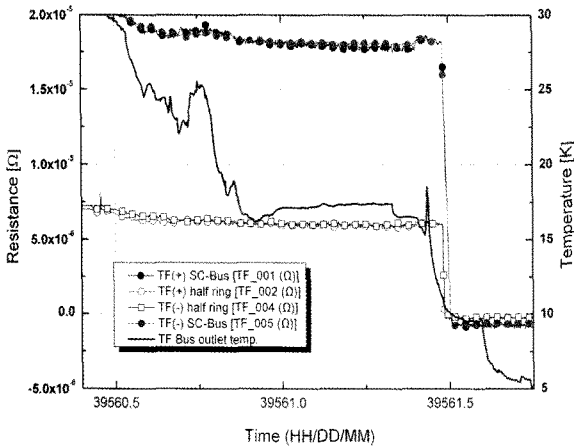


그림 13. TF 초전도송전선의 초전도전이.

(2) 초전도시스템의 절연특성 검사

극저온 냉각을 완료한 후 다양한 운전 시나리오에 따른 운전 전압과 발생될 수 있는 이상전압에 대하여 초전도자석 계통의 절연 안정성을 점검하기 위하여 내전압 시험을 수행하였다. 시험 전압은 운전 발생 전압의 2배에 1 kV를 더하여 최대 6 kV 전압을 인가하였다. 측정 결과는 누설전류가  $2\mu A$ , 저항으로 환산하면 3 GΩ 으로 기준값을 만족하는 안정된 상태를 보였다.

(3) 자석별 성능 시험

KSTAR 초전도 자석은 TF coil 16개와 PF coil 7쌍으로 이루어져 있다. 각 coil에 헬륨을 공급하는 개략도는 그림14과 같다.

4개의 inlet manifold를 통해 TF coil 16개에 헬륨이 공급되고, 1개의 outlet manifold로 헬륨이 회수된다. TF coil에서 회수된 헬륨은 thermal damper에서 재냉각되어 TF 구조물로 공급된다.

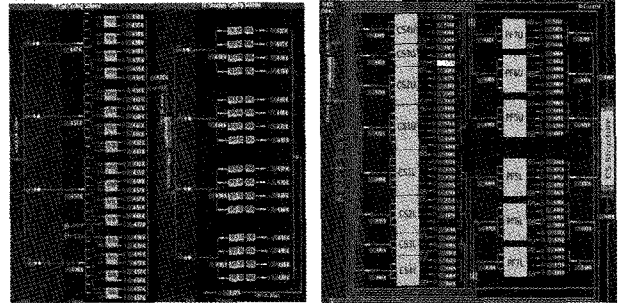


그림 14. TF, PF Coil & Structure P&ID.

PF1~7 coil에는 각각의 1개의 inlet manifold로 헬륨이 공급되고, PF 3,4 Coil의 헬륨이 하나의 outlet manifold로, PF1,2,5,6,7 coil의 헬륨은 다른 하나의 outlet manifold로 회수된다. PF 3,4 Coil에서 회수된 헬륨은 thermal damper를 거쳐 CS structure로 공급된다.[2]

가. TF 초전도자석

TF 초전도 자석에 전류를 15 kA 인가하였을 때, outlet channel의 헬륨온도가 최대 0.44 K 상승하였고, TF structure에는 eddy current가 structure 전체에 발생하기 때문에 온도가 약 0.5 K 정도 상승하였다. TF자석을 fast discharge하면 TF 코일은 약 0.08 K, TF structure는 약 1.1 K 정도 온도가 상승하였다. 이 결과는 TF 자석 운전안정성 해석 결과 온도 마진이 9 K 정도와 비교할 때 매우 안정된 수준에서 운전이 진행되었다.(그림15. TF자석 운전결과) [3]

나. PF 초전도자석

다양한 시나리오 운전에서의 PF자석 운전 안정성을 분석하기 위해 전류를 인가 ramp rate를 500 A/s, 1 kA/s, 1.3 kA/s로 변화를 주면서 4 kA까지의 전류 영역에서 변화를 측정하였다. 이때 PF coil 및 structure의 온도상승 정도에 변화가 있지만 각각의 ramp rate에서 최대 0.055, 0.105, 0.125

K 정도 온도가 상승하여 안정된 결과를 보였다.(그림 16. 측정 결과)

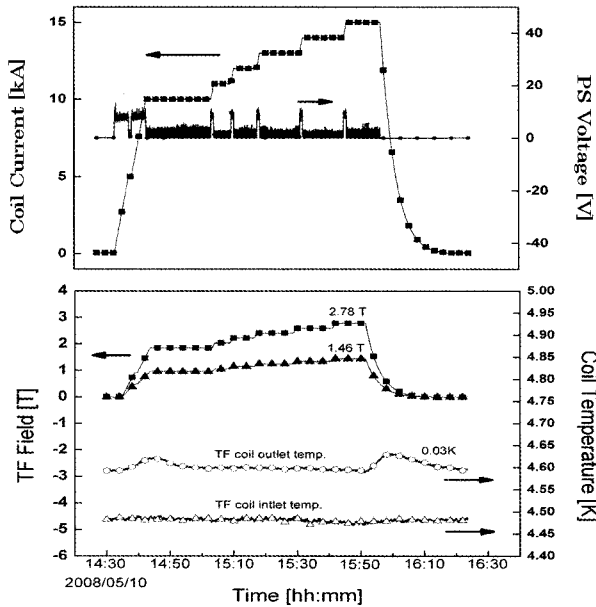


그림 15. TF15 kA 운전 온도, 자장측정 결과.

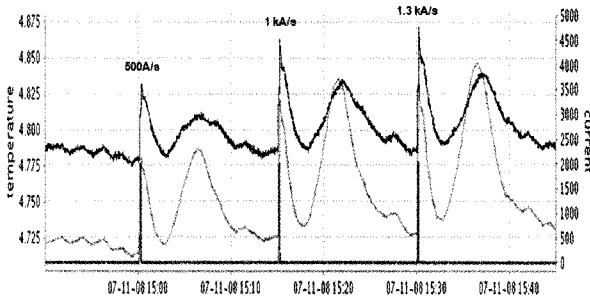


그림 16. PF coil ramp rate에 따른 온도 변화.

다. 전류인입선의 헬륨유량

전류인입선은 액체헬륨을 사용하여 상온에서 유입되는 열이 초전도 시스템에 전달되지 못하도록 설계되어있다(그림 10). 각각의 전류인입선에 액체 헬륨을 공급하기 위해서 대형의 헬륨탱크에 액체헬륨을 공급하고 이 탱크의 헬륨 레벨을 조절함으로써 모든 전류인입선의 헬륨레벨이 조절된다. 그림 17에 나타낸 바와 같이 TF 및 PF 전류인입선의 헬륨레벨을 측정하기 위하여 초전도 헬륨레벨 센서와 헬륨탱크의 상단과 바닥에서의 차압을 계산하여 레벨을 측정하는 두가지 센서가 설치되어 있으며, 헬륨레벨은 PLC에 의해 PID 방식으로 제어되어 졌다.

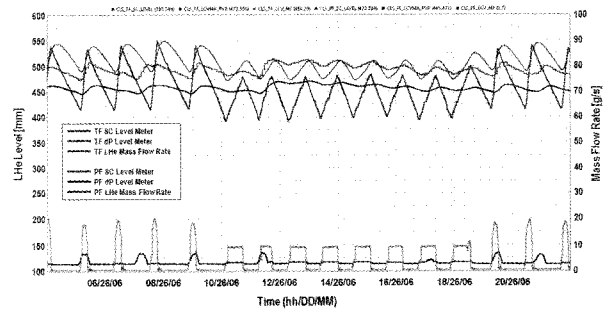


그림 17. 전류인입선의 액체헬륨 레벨.

(4) 자기장 측정

자기장 측정은 플라즈마가 발생하는 진공용기 내부에 이동식 측정장치를 이용하였으며, 토카막 내부에서는 초전도자석 표면에 센서를 설치하여 발생하는 자기장을 측정하였다. 측정 결과 TF자기장은 계산 결과와 측정값이 일치되는 결과를 얻었으나, PF 자석은 Incoloy908 자성재료에 의한 잔류 자기장이 존재함을 확인하였고 그 결과를 플라즈마 운전 시나리오에 반영하여 운전을 수행하였다.

(5) 플라즈마 발생 운전

플라즈마 운전 시 TF자석은 운전시나리오 따라 14 ~ 15 kA 영역에서 운전을 수행하였고 PF자석은 3.4 kA정도까지 전류로 운전이 진행되었다. TF자석은 자체 전류를 인가 운전 전류에 의한 AC loss에 의해 온도가 약 0.03 K 상승하였으며, 플라즈마 시나리오에 의한 PF자석전류를 인가했을 때 AC loss 및 TF 구조물의 Eddy current에 의해 약 0.01 K이하의 온도 상승을 보였다. 또한 동일한 시간의 PF자석 온도는 최대 1.4 K의 상승을 보였다. 초전도자석 전체적으로 플라즈마 운전 후 상승된 온도는 플라즈마 발생 운전 전단계의 온도로 복귀 되는데 약 10 ~ 15분 정도 소요되었다.(그림18. 플라즈마 운전에서의 TF 자석의 온도변화 결과)

(6) 자석 및 자석 구조물의 구조안정성

극저온, 대전류 운전 상태에서 초전도자석의 구조변화 안정성을 모니터링하기 위해 응력센서 및 변위센서를 설치하여 운전 환경에 따른 냉각수축 및 전자기력에 의한 자석구조물의 변형률을 측정하였다. 각 센서의 신호는 운전 기준에 의해 모니터링이 되도록 시스템이 구성되어 있고, 범위를 초과할 경우 인터록 등 보호장치와 연동되어 작동한다. 그림 19는 토로이달 링에 대한 냉각단계에서의 변



위량과 플라스마운전 중의 변위 변화를 나타낸 결과이며, 운전 전체기간에서 해석결과 범위내에서 동일한 경향의 변화를 보였다.[4]

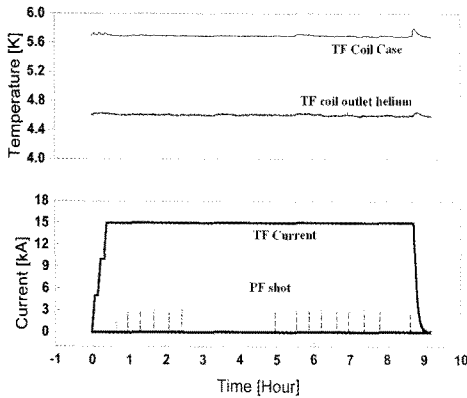


그림 18. 플라스마 운전에서의 TF자석온도 변화.

(7) 자석 및 자석 구조물의 구조안정성

극저온, 대전류 운전 상태에서 초전도자석의 구조변화 안정성을 모니터링하기 위해 응력센서 및 변위센서를 설치하여 운전 환경에 따른 냉각수축 및 전자기력에 의한 자석구조물의 변형률을 측정하였다. 각 센서의 신호는 운전 기준에 의해 모니터링이 되도록 시스템이 구성되어 있고, 범위를 초과할 경우 인터록 등 보호장치와 연동되어 작동한다. 그림 19는 토로이달 링에 대한 냉각단계에서의 변위량과 플라스마운전 중의 변위 변화를 나타낸 결과이며, 운전 전체기간에서 해석결과 범위 내에서 동일한 경향의 변화를 보였다.[4]

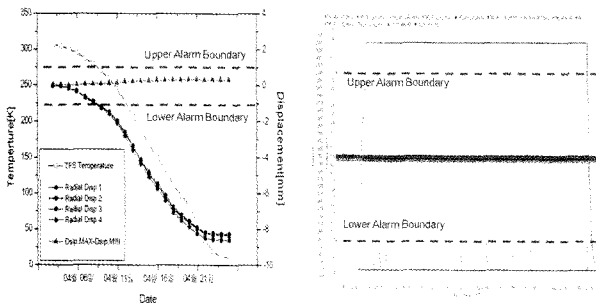


그림 19. Toroidal Ring 의 저온냉각(좌), 플라스마운전(우) 단계에서의 radial 변위.

4. 맺음말

KSTAR 장치는 장시간 연속운전을 위하여 CS자석과 TF자석을 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도선재를 사용하여 제작을 완료하였으며, 2008년 5월

부터 7월까지 2.5개월 동안의 장시간에 걸친 초전도자석 운전에서 안정적인 성능을 확인하였다. TF초전도자석은 다양한 운전 조건에서도 0.4 K 이하의 안정된 온도 변화를 보였지만, PF 초전도자석은 운전전류 3 kA 영역에서 PF1-4 온도 상승이 최대 1.4 K 정도를 보였다. 해석결과에 비교할 때 정격운전에서 온도마진이 확보 되어있다고는 하지만 PF 1-4 자석의 대전류, 장시간 운전조건에서 안정적인 운전 수행을 위하여 헬륨 유량 조정 등 추가적 운전방법 개발이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] K. Kim, et al. "Status of the KSTAR superconducting magnet system development", Nuclear Fusion Vol. 45 (2005) 1-7.
- [2] 방은남 외, "KSTAR초전도자석과 헬륨라인의 운전에 따른 온도변화", 2008 추계 초전도저온공학회.
- [3] K.R. Park, Y. Chu, et al. "Qualification test results of the KSTAR superconducting coils from the construction to the commissioning steps", ASC 2008.
- [4] 김영옥 외, "Operation result of the cryogenic and mechanical measurement system for KSTAR" 2008 추계 초전도저온공학회.

저자이력



박갑래 (朴甲來)  
2004년 한밭대학교 전기공학과 공학석사, 현재 국가핵융합연구소 책임기술원 및 KSTAR 운영 사업단 장치운전팀장.  
(krpark@nfri.re.kr)



박영민 (朴榮珉)  
1998년 명지대학교 이과대학 물리학과 이학박사, 현재 국가핵융합연구소 KSTAR 운영사업단 저온시스템개발 팀장.(ympark@nfri.re.kr)