핵융합과 초전도자석, 그리고 KSTAR

임 병 수, 이 상 일, 박 갑 래, 김 기 만, 박 주 식
핵융합연구센터

1. 꿈의 에너지 핵융합

요즈음 고유가와 대체 에너지 문제 그리고 이에 따른 환경 및 안전 문제 등에 대한 소식을 자주 접할 수 있다. 이와 같이 에너지의 경제적, 환경적, 안전성 등의 문제 등을 고려해 볼 때 대체에너지 중, 가장 강력한 후보로 핵융합 발전이 거론되고 있다.

핵융합 발전은 보통 중수소와 삼중수소와 같은 두 개의 가벼운 원자핵이 하나로 합쳐지면서 질량결손에 의하여 발생되는 막대한 에너지를 전기의 생산에 이용하는 것을 말하는데, 핵융합 발전의 주된 연료인 중수소는 바닷물에서 얻어지기 때문에 화석연료와 달리 무한정에 가까운 에너지 부존량을 가지고 있고, 온실효과와 방사성 폐기물과 같은 환경적 문제도 걱정할 필요가 없다.

핵융합 발전의 상용화 직전 단계에 있는 지금 인류는 핵융합 플라즈마를 장시간 유지시킬 수 있는 기술의 확보와 엄청난 열부하에 견딜 수 있는 재료의 개발 등 미해결 과제를 해결하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있다. 이를 위해 국제협력을 통해 2015년경 건설이 완료되어 가동 예정에 있는 ITER 장치가 공학적인 면에서 핵융합의 상용화 가능성을 실증하고, 그 이후 2030년경 세계 각국은 시범 상용 핵융합로인 DEMO 장치를 건설하고자 계획하고 있다.

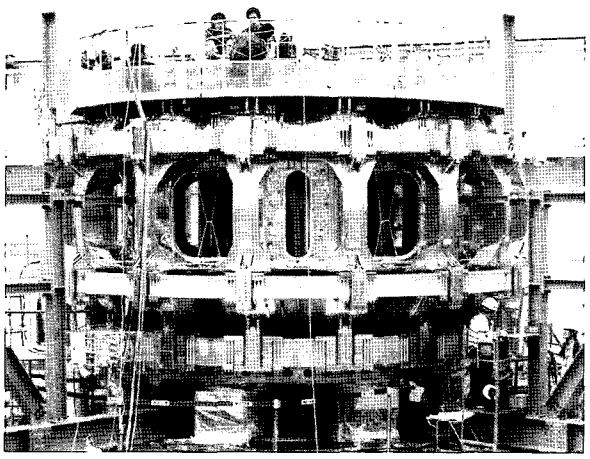


그림 1. 현재 건설 중인 KSTAR

우리나라도 이러한 핵융합 발전의 상용화의 실현에 중요한 역할을 수행하고자 1995년에 KSTAR로 이름 지어진 '차세대 초전도 핵융합 연구 장치'의 개발 사업을 시작하여 2007년 장치 건설을 완료할 예정으로 있다. 이러한 KSTAR 장치는 향후 ITER의 Pilot Plant로서 역할을 수행할 것으로 기대되고 있다(그림 1).

본 글에서는 핵융합 장치와 핵융합에 있어서 초전도자석의 역할 및 발전과정에 대해 살펴보고, 이와 더불어 KSTAR 장치를 위한 초전도자석의 제작 공정 및 현황, 개발된 주요 기술, 그리고 앞으로의 전망 등에 대하여 논의하고자 한다.

2. 핵융합과 초전도

핵융합 반응이 일어나는 온도는 보통 1억도 이상으로써 이와 같은 초고온에서 핵융합 연료 물질은 이온(원자핵)과 전자로 분리되어 전기적으로 중성인 플라즈마 상태로 바뀐다. 핵융합 반응을 지속적으로 일으켜 끊임없이 에너지를 얻기 위해서는 이 핵융합 플라즈마를 잘 가둘 수 있어야 하는데, 하전입자에 자기장을 걸어 주면 이 자기장을 따라 하전입자가 움직이는 성질을 이용하여 플라즈마 알갱이를 가두는 방식을 자기가둠(Magnetic Confinement) 방식이라 한다. 이런 방식의 핵융합 장치는 수 테슬라 이상의 자기장을 필요로 하며 이는 보통 전자석 코일에 전기를 흘려 발생시킨다.

핵융합 발전의 상용화를 이루는데 가장 가능성이 있는 장치로 평가받고 있는 것이 자기가둠 방식을 사용하는 토카막(Tokamak) 장

치이다. KSTAR는 물론 국제협력으로 추진 중인 ITER 역시 토카막 형태의 핵융합 장치이다. 토카막 장치가 플라즈마를 발생, 구속 제어하기 위해서는 전자석 코일이 필요하며, 이를 위한 토카막내의 전자석 코일을 기능적으로 살펴보면, 플라즈마를 구속하기 위한 TF (Toroidal Field) 코일과 플라즈마를 발생·유지하기 위한 CS (Central Solenoid) 코일, 그리고 플라즈마의 위치 및 형상을 제어하기 위한 PF (Poloidal Field) 코일 등이 있다.

핵융합 플라즈마의 온도는 1억도 이상으로 매우 높아서 지구상에 이를 견딜 수 있는 재료가 없다. 이를 해결하고자 토카막 장치에서는 도우넛 모양의 진공용기 내부에서 플라즈마가 발생되면서 이 플라즈마 전류에 의한 폴로이달 자기장과 TF 코일에 의한 토로이달 자기장이 함께 소위 '자기장 용기(Magnetic Vessel)'를 만들게 된다. 플라즈마가 일차적으로 이 '자기장 용기' 안에 갇히게 되므로 고온의 플라즈마가 직접 진공용기 벽에 닿는 일은 없다.

또 다른 종류의 자기가둠 핵융합 장치로 토카막과 비슷한 모양을 가지고 있고 핵융합 상용화에 있어 토카막 장치와 서로 경쟁을 벌이고 있는 '헬리컬 장치'가 그것이다. 일본의 LHD와 독일의 W7-X가 대표적인 장치이다. 이 장치는 '자기장 용기'를 만드는데 있어서 플라즈마 전류를 이용하지 않고 헬리컬 자석에 의해서만 만든다.

한편 핵융합 장치에 사용되는 전자석은 종래에는 상전도자석을 사용하였는데, 막대한 전력 손실로 인하여 장시간 운전이 전혀 불가능하였다. 따라서 장시간 운전이 되어야 하는 상용의 핵융합로에는 반드시 전력 손실이 거의 없는 초전도자석을 사용하여야만 한다. KSTAR를 비롯하여 EAST(중국), ITER(국제공동) 등 근래에 건설되고 있는 핵융합 장치는 필요한 자석 모두 초전도자석으로 만들고 있다.

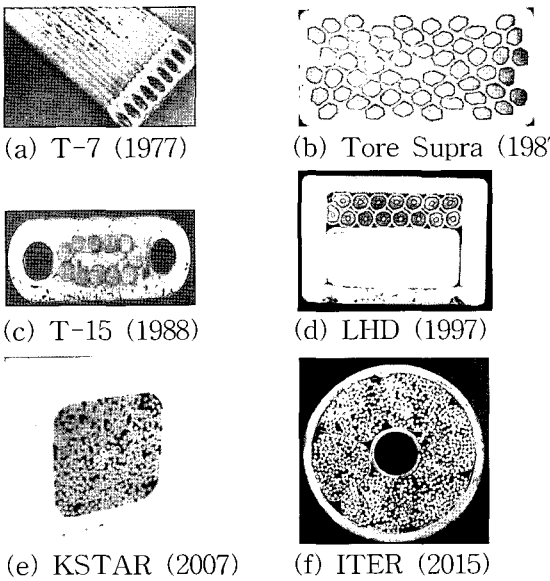
3. 핵융합용 도체 개발을 위한 노력

소형 초전도자석의 경우는 초전도선재를 바로 코일 형태로 감아서 만든다. 그러나 핵융합 장치에 쓰이는 초전도 자석은 크기가 큰 것은 10 m가 넘을 정도로 거대하므로 초전도자석의 재료가 되는 도체는 초전도선재를 여러 가닥 합쳐서 만들게 된다.

초전도선재의 기술이 발전한 것과 같이 핵융합용 초전도 도체도 끊임없이 발전하여 왔다(그림 2)[1]. 일반적으로 핵융합용 초전도자석은 고자장이 요구되므로 NbTi, Nb_3Sn 등과 같은 저온 초전도체를 사용하는 경우가 대부분이고 이 때문에 이를 냉각시켜 주기 위해 불활성 기체인 헬륨을 냉매로 사용하는 헬륨 냉동기가 필요하다.

초전도자석을 적용한 최초의 토카막 장치는 1977년에 완공된 러시아의 T-7 장치이다. 이 장치는 TF 자석만 초전도로 만들었으며 냉매를 초전도 도체 내부로 흘리는 강제유동 냉각(Forced Flow Cooling)방식을 사용하였다. 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 도체 내부에 헬륨이 흐를 수 있도록 9개의 냉각통로가 형성되어 있고 초전도체가 보다 잘 냉각될 수 있도록 냉각관에 최대한 가까이 NbTi 선재를 배치하였다. 그런데 선재를 평행하게 배치하는 바람에 교류손실이 매우 커져서 공칭전류(Nominal Current)의 80%밖에 흘릴 수 없었다.

T-15은 1988년 완공된 러시아의 두 번째 초전도 토카막 장치이다. 이 장치 역시 TF 자석만 초전도로 만들었다. 그런데 이 장치는 NbTi보다 성능이 우수한 Nb_3Sn 도체를 사용하였다. Nb_3Sn 초전도자석의 경우 지금은 초



(a) T-7 (1977) (b) Tore Supra (1987)
(c) T-15 (1988) (d) LHD (1997)
(e) KSTAR (2007) (f) ITER (2015)

그림 2. 핵융합 장치용 초전도 도체의 변천

전도 도체를 먼저 코일 형태로 감고 나서 열처리하는 W&R (Wind and React) 방법을 사용하고 있으나, 이 당시에는 열처리한 후에 코일로 감는 R&W (React and Wind) 방법을 사용하였기 때문에 권취시에 Nb_3Sn 초전도체에 과도한 응력이 걸려서 임계전류가 상당히 낮아지는 문제가 발생하였다.

프랑스는 Tore Supra라는 장치를 T-15보다 1년 먼저 제작하여 1988년 운전에 들어갔다. T-7 및 T-15 장치와 마찬가지로 TF 코일만 초전도로 만들어졌으나 그들과 달리 초전도 자석의 냉각은 강제유동냉각방식이 아닌 4.2 K 액체헬륨 및 1.8 K 초유동헬륨에 담가서 냉각하는 침지냉각(Pool Cooling)방식을 사용하였다. 이 방식의 경우 냉매와 도체와의 접촉을 좋게 하기 위해서는 도체 바깥으로 절연층을 두껍게 할 수가 없으므로 절연상태가 나쁘고, 또한 국부적으로 퀜치가 발생하면 기포가 발생하여 그 부분에서 냉각이 잘 안 되는 단점이 있다.

일본의 LHD 장치는 헬리컬 장치로는 세계 최초로 필요한 자석 모두 NbTi 초전도체로 만들었으며 특히 PF 자석에 관내연선도체(Cable-In-Conduit Conductor, CICC)를 처음 사용한 핵융합 장치이다. 헬리컬 자석은 직경 1.74 mm의 NbTi 선재 15가닥을 사용한 모놀리식 도체(Monolithic Conductor)를 감아서 만들었으며 침지냉각방식을 사용한다. 이 도체는 그림 2(d)에서 보는 바와 같이 극저온 안정성을 높이기 위하여 구리재질의 하우징 안에 면적이 큰 안정화 알루미늄을 넣은 것이 특징이다. 그러나 향상된 극저온 안정성으로 인하여 당초 13 kA의 전류를 흘릴 수 있을 것으로 예상하였으나 기대와는 달리 11.3 kA밖에 도달하지 못하였다. 헬리컬 코일과는 달리 관내연선도체를 사용한 PF 자석은 초임계헬륨에 의한 강제냉각방식을 사용하는데 아직까지 순조롭게 안정적으로 운전되고 있다.

초전도 도체개발의 역사를 통하여 내릴 수 있는 결론은 침지냉각방식보다 강제유동냉각방식이, 모놀리식도체보다 관내연선도체가 좋다는 것이다. 우연인지는 모르겠으나 LHD 이후에 출현한 장치들은 모두 강제유동냉각 방식을 사용하는 관내연선도체를 채택하였다.

4. KSTAR 초전도자석의 개발

KSTAR 장치의 초전도자석 시스템은 16개의 TF 코일, 8개의 CS 코일과 6개의 PF 코일로 구성된다. TF 초전도자석은 플라즈마 영역에 3.5 테슬라의 자장을 형성하기 위해 16개의 D자형 코일이 모두 직렬로 연결되어 직류 정상상태로 운전된다[2]. CS 및 PF 초전도자석은 14개의 원형 코일이 상하 대칭구조로 설치되어 펄스로 운전된다. 이러한 초전도자석의 제작은 초전도 도체를 제작하는 공정과 초전도 도체를 이용하여 자석을 제작하는 공정으로 이루어진다.

(1) 초전도 도체 제작

초전도 도체를 제작하기 위해 KSTAR에서는 Nb_3Sn을 초전도체로 사용하였다. Nb_3Sn 초전도선재는 자석 제작과정 중 열처리공정이라는 과정을 필수적으로 거치게 되는데, 이 과정 중 선재 간의 소결을 방지하고 선재 사이의 전기저항을 키워 교류손실을 낮추기 위해 선재에 2미크론 두께의 크롬도금을 실시한다.

다음으로 크롬도금된 초전도선 수백가닥을 단계별로 꼬아서 집합연선화(Cabling)하는 작업을 수행한다. 즉 초전도선과 무산소동선의 비율을 2:1로 혼합하여 연선화 작업을 수행하고 최외곽에는 SS316L 필름을 감아서 후속공정인 조관작업에 의한 초전도선재의 손상을 막는다. 제작된 초전도 집합연선의 외경을 제어하기 위해 압착공정을 수행한다. 집합연선은 TF의 경우 486 가닥, PF의 경우 360 가닥의 선재로 각각 이루어져 있다.

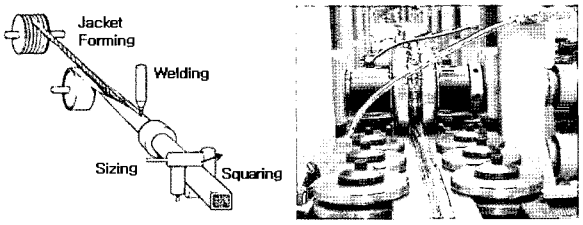


그림 3. KSTAR 초전도 케이블의 조관공정

CICC는 초전도 케이블을 사각형의 금속관으로 둘러싸는 공정인 조관공정(Jacketing)을 통해 제작된다(그림 3). 이를 위해서는 적합한 조관재료를 선택하여야 한다. KSTAR에서는

Nb_3Sn 초전도체의 경우 초전도체에 걸리는 응력이 커지면 임계전류의 저하 문제가 발생되기 때문에 냉각시 응력을 최소화하기 위하여 초전도체와 열수축율이 비슷한 Incoloy 908 합금을 조관재료로 선택하였다. 조관 공정은 성형공정과, 조관 용접 공정, 사이징(Sizing) 공정, 스퀘어링(Squaring) 공정으로 이루어진다. 초전도 케이블을 조관재료로 감싸는 성형공정은 성형 롤(Roll)을 거쳐 원형 파이프 형태로 초전도 케이블을 조관재료로 감싸는 공정이다. 원형 파이프 형태로 성형된 조관재료는 조관재료의 길이방향 단부를 용접하는 조관 용접 공정을 통해 원형단면을 가진 CICC가 된다[3]. 다음으로 원하는 CICC 크기 및 형태를 만들기 위해 원형파이프의 직경을 줄이는 사이징 공정과 목표로 하는 사각단면의 CICC로 성형하는 스퀘어링 공정을 통해 CICC 제작이 완성된다. 제작된 CICC는 이후 누설검사를 통해 누설유무를 검사한 후 누설이 발견되면 부분가공을 한 후 보수 용접을 통해 누설 부위를 보수한다.

(2) 초전도자석 제작

KSTAR 초전도 도체가 제작되면 초전도자석 제작공정을 통해 비로소 원하는 초전도자석 제작이 완성된다. 초전도자석 제작공정은 권선, 열처리 준비, 열처리, 절연, 진공함침 등의 공정들로 이루어진다. 그림 4는 KSTAR 초전도자석의 전체 제작공정을 보여준다.

권선공정은 초전도도체를 원하는 자석의 형상으로 성형하는 공정이다(그림 5). 이를 위해서는 도체의 잔류응력을 제거해 주는 그릿블래스팅(Grit Blasting) 공정, 도체를 이송하고, 직선 및 곡선으로 성형해 주는 공정, 자석 형상을 유지할 수 있도록 하는 클램핑(Clamping)하는 공정 등으로 구성되어 있다. 그릿블래스팅 공정은 도체 표면에 미세한 입자 충돌에 의한 압입작용으로 도체 표면에 묻어 있는 이물질을 제거하고, CICC에 존재하는 잔류응력을 제거하는 공정이다. 또한 이를 통해 열처리 공정 이후 테이핑(Taping) 공정시 도체와 절연 테입과의 접착성을 향상시킬 수 있다. 권선공정 중 CICC를 이송하는 공정은 정밀제어가 가능한 롤러(Roller)를 통해 이루어진다. 그리고 CICC를 원하는 자석의 형상으로 성형하려면 3-롤 밴딩 롤러를 거쳐 성형한다.

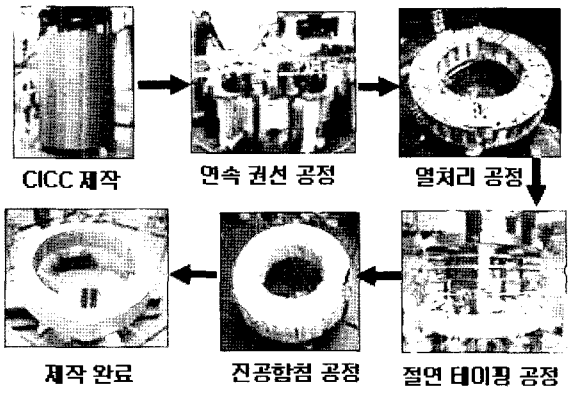


그림 4. KSTAR 초전도자석 제작공정

열처리 준비공정은 코일에 헬륨을 공급해 주는 헬륨인입부 (Helium Feed- thru) 설치작업과 코일 양쪽 끝에 위치하여 전원공급 장치로부터의 전류 공급 역할을 하는 단말부(Terminal) 설치작업 등을 수행하는 공정이다.

열처리 공정은 Nb와 Sn의 반응에 의한 Nb_3Sn 화합물 초전도체를 형성시키기 위한 공정이다. KSTAR 초전도자석의 경우 극저온에서 초전도성질을 가지기 위해 30일간의 진공 열처리가 요구된다. 이때 요구되는 온도 균일도는 공간적으로 ±1.5℃ 이내이며, 시간적으로는 ±3℃ 이내이다. 또한 자켓(Jacket) 재료가 Incoloy 908이므로 자켓 재질의 특성 등을 고려할 때 내부 진공도는 산소분압을 기준으로 660℃ 고온상태에서 0.08 ppm 이하를 유지하여야 한다. 이러한 조건이 충족되지 않은 상태에서 진공 열처리 반응이 수행될 경우에는 자켓에서 SAGBO(Stress Acceleration caused by Grain Boundary Oxidation)라고 하는 고온산화 현상이 발생될 가능성이 높아져 재료의 구조적인 안정성을 해칠 가능성이 높아지게 된다. 이 때문에 진공 열처리 공정은 KSTAR 초전도자석 제작공정에 필수적으로 정밀하고 섬세한 제어가 요구된다.

절연테이핑 공정은 초전도코일의 운전시 각 CICC 사이의 절연을 위해서 캡톤(Kapton)과 S-glass 테입을 사용하여 절연테이핑하는 공정이다. 절연테이핑시 절연재로는 종류가 각기 다른 캡톤과 S-glass를 복합하여 사용한다. 이는 방사선(radiation)에 의해 한쪽이 절연 파괴가 되더라도 다른 한쪽이 이를 보완하여 주기 위함이다. 절연테이핑이 완료되면 코

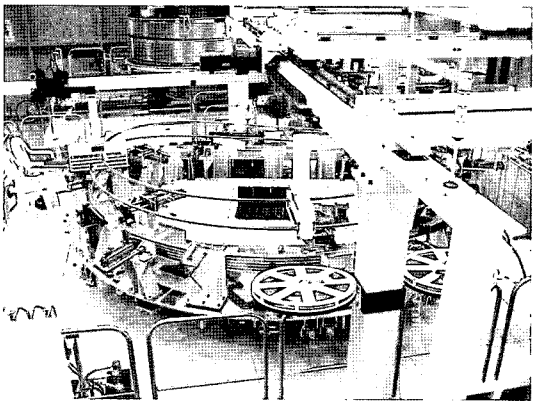


그림 5. KSTAR 초전도자석 권선공정

일 외곽에 S-glass 테입을 여러 겹 감아서 그라운드랩핑(Ground Wrapping, GW) 처리한다. 이는 후속 공정인 진공함침을 수행했을 경우 초전도코일의 전기적 절연을 유지시켜 줄 뿐 아니라 코일의 기계적 강도를 유지시켜 주는 역할을 한다.

진공함침(Vacuum Pressure Impregnation, VPI) 공정은 절연테이핑 및 GW 테입에 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.

(3) 제작 후 검사

초전도자석은 진공함침이 끝나면 선재의 임계전류(Jc) 검사, 가압유량검사, 형상검사, 절연검사 등을 수행한다. 선재 Jc 검사는 해당 초전도자석의 제작에 사용된 선재를 함께 열처리한 선재의 Jc를 측정하여 요구조건인 12 T의 자장 하에서 750 A/mm^2 이상이 되는지 검사하여 간접적으로 열처리의 이상 유무를 판단하는 것이다. 유량검사는 냉각 채널간 유량분포를 측정하는 것으로 8기압의 공정가스를 흘려주어 채널간 불균형이 ±10% 이내에 들어야 한다. 형상검사는 VPI 후에 설계치와 비교하여 허용공차(±2 mm) 이내에 들어오는지 확인하는 작업이다. 마지막으로 그라운드 절연 상태를 검사하기 위하여 DC 15 kV와 AC 10 kV$_{rms}$를 인가하여 누설전류가 각각 1 mA와 2 mA 이내에 들어오는지 확인한다. 그리고 Pancake간 절연 상태를 검사하기 위하여 Double Pancake간 약 2 kV 임펄스전압을 인가하여 각 파형간 오차(5% 이내 기준)를 측정한다.

5. KSTAR를 통해 얻은 주요 성과

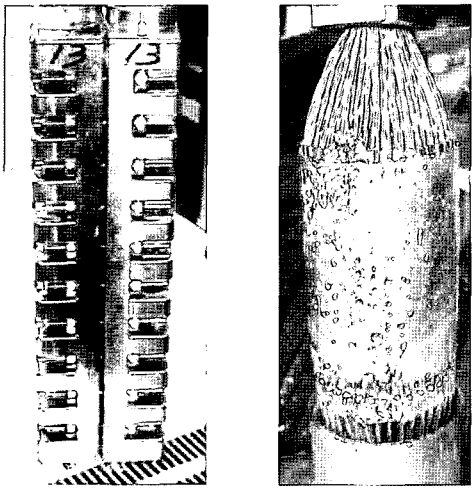
(1) 초전도 도체 제작 관련

초전도 도체 제작 과정에서 확보된 주요 기술을 살펴보면 크롬도금기술, 집합연선기술, 조관기술 등이 있다. 초전도 선재의 크롬도금기술은 선재 사이의 소결방지와 교류손실 저감을 위해 필수적인 공정으로 연속 크롬도금기술을 KAT (Kiswire Advanced Technology), 성균관대학교 등과 공동 연구하여 KAT에 양산 체제를 구축하였다. KAT에서 수행한 크롬도금은 도금두께의 균일도에 있어 1 ± 0.1 ㎛의 정밀한 수준으로 초전도선재 도금기술에 있어 세계 최고의 수준을 보유하게 되었다. 이를 통해 KSTAR 선재의 크롬도금뿐 만이 아니라 향후 ITER 선재 크롬도금도 기대되고 있다.

또한 CICC를 제작하기 위해 개발된 연속조관 공정(Continuous Tube Mill Process)을 통해 CICC를 제작하여 현재 세계 최고의 CICC 조관기술을 갖게 되었으며 현재 제작된 KSTAR CICC의 최대 단위길이는 1.7 km로서 세계 최장이다. 또한 KSTAR 핵융합장치는 Nb_3Sn 초전도체가 가장 좋은 특성을 발휘할 수 있도록 개발된 Incoloy 908이라는 합금을 CICC의 재료로 사용한 세계 최초의 토카막이다.

(2) 초전도자석 제작 관련

KSTAR는 초전도자석 제작을 수행하는 과정에서 제작을 위한 다양한 방식과 장치들을 개발하였다. 그 중 독창적인 방식 중의 하나가 초전도 도체를 초전도자석 형태로 성형하는 방법이다. 초전도 도체인 CICC는 권선공정을 통해 원하는 형태의 초전도코일로 만들어 지는데, 이 과정에서 초전도자석의 전기적 접촉을 통해 발생하는 손실(Joint Loss)을 줄이는 방법이 요구되었다. 이를 위해 내부에 이음매(Joint)가 전혀 없는 연속 권선 방식(Continuous Winding Scheme)을 세계 최초로 개발하여 최대 CICC 길이 1,700 m의 이음매 없는 초전도코일을 성공적으로 권선하였다. 또한 권선된 초전도자석은 이후 진공 열



(a) PF 코일용 (b) TF 코일용

그림 6. KSTAR용 초전도 이음매

처리 과정을 거치게 되는데 이러한 진공 열처리 공정을 위해 국내 최대 규모의 대형 진공열처리로 설계 및 제작 기술을 확보하여 대형 진공열처리로의 진공기술, 제어기술, 열처리 기술 등을 체득하였다.

한편 KSTAR는 꾸준한 실험을 통해 저항치가 낮은 초전도 이음매를 개발하였다(그림 6). 토카막 내의 초전도 코일은 전원 공급 장치로부터 전류를 공급 받기 위해서 초전도 버스라인(Bus Line)이라고 하는 전류 공급 라인을 통해 전류를 공급받는다. 이를 위해 코일의 양쪽 끝 부분에 초전도 버스라인으로 부터 전류 공급을 받기 위하여 초전도 이음매가 사용된다. 초전도 이음매는 초전도가 아닌 물질을 사용하는 것이 불가피하기 때문에 전기적 손실이 발생하게 된다. 이 손실을 가능한 작게 만드는 것이 장치의 운전시 초전도자석의 열적 안정성을 위하여 매우 중요하다. 따라서 손실과 관련 있는 직류저항에 대한 규제치가 각 장치마다 존재하게 되는데 KSTAR 장치의 경우에는 5 nΩ 이하의 극소 저항이 요구된다. 이를 위해 집중적인 공정 개발의 결과 PF 초전도 코일을 위한 3 nΩ 이하의 이음매와, TF 코일에 사용하기 위한 1 nΩ 이하의 이음매 개발에 성공하여 안정적인 장치 운전이 가능하게 되었다.

6. 맺음말

1977년 건설된 러시아의 T-7 장치를 시작으로 KSTAR 장치에 이르기까지 초전도자석을 채용한 많은 핵융합 장치들이 개발되었다. 그 동안 초전도 도체의 설계 및 제작 기술이 발전하여 1990년대에는 전류를 보다 안정적으로 흘릴 수 있는 도체 형태인 관내연선도체(CICC)가 개발되었다. 이러한 흐름에서 KSTAR 장치는 필요한 모든 초전도 자석을 CICC를 사용하여 제작하였고, 특히 바깥쪽에 설치되는 네 개의 PF 코일을 제외한 모든 코일의 경우 Nb_3Sn 선재와 Incoloy 908 자켓으로 이루어진 CICC를 사용하여 제작하게 되었다. 이는 그동안 NbTi 선재와 스테인레스강으로 이루어진 CICC로 초전도자석을 제작한 여타 장치에 비해 성능이나 안정성 면에서 월등히 우수한 장점을 가지고 있다는 점에서 차별화되어질 수 있다. Nb_3Sn CICC의 경우 토카막에서 가장 우선적으로 요구되는 높은 자기장을 발생시키는 능력과 장치 운전 시에 온도 안정성이 NbTi CICC에 비해 월등히 우수한 장점이 있음에도 불구하고, 제작공정이나 취급이 훨씬 까다롭기 때문에 그 동안 여타 장치에서는 사용을 미뤄왔다. 그러나 KSTAR의 경우 타 장치와의 차별화된 성능을 목표로 하여, 여러 연구 개발을 통해 Nb_3Sn 선재 사용 방법을 확립하여 타 장치에서는 기대할 수 없는 우수한 성능을 Nb_3Sn 선재를 통해 실현시킬 수 있게 되었다. 또한 Jacket 재료로 사용된 Incoloy 908 합금은 Nb_3Sn 초전도체와 수축율이 비슷하기 때문에 냉각 시에 초전도체에 주는 응력을 최소화하여 스테인레스강을 사용한 경우에 비하여 임계전류를 높게 유지시킬 수 있을 뿐만 아니라 기계적 강도 또한 월등히 높은 장점이 있어 CICC의 성능을 향상시키는데 있어 크게 기여할 수 있다. 이와 같은 도체 구성은 ITER의 경우와 비슷하며 KSTAR 장치의 운전 경험이 ITER에 있어서 매우 중요하게 되는 이유가 여기에 있다.

이와 같이 우수한 성능의 KSTAR 초전도 도체와 자석 개발을 토대로 다른 토카막 장치들에서는 어려웠던 다수의 과학적, 기술적 문제들을 해결할 수 있을 것으로 기대되며, 향후 ITER 장치의 건설이 완료되어 운영단계에 접어들었을 때 많은 도움을 줄 수 있을 것이다. 따라서 KSTAR 장치의 성공적인 건설과 정상 가동을 통하여 우리나라도 세계 수준의 핵융합 연구를 수행할 수 있는 능력을 확보할 수 있고 나아가 세계 핵융합 선진국과 동등한

수준의 연구결과를 창출할 수 있을 것으로 확신한다.

참고문헌

[1] Pierluigi Bruzzone, "30 years of conductors for fusion, a summary and perspectives", MT-19 Conference, Genova, September 2005.

[2] K. Kim, et al, "Status of the KSTAR superconducting magnet system development", Nuclear Fusion Vol. 45 (2005) 1-7.

[3] B. S. Lim, S. I. Lee, K. Kim, J. Y. Choi, et al., "Fabrication of the KSTAR superconducting CICC," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 12, p591, 2002.

저자이력

임병수(林秉守)
1968년 8월 15일생, 1991년 성균관대 공대 금속공학과 졸업, 1993년 동 대학원 금속공학과 졸업(공학석사), 1998년 동 대학원 금속공학과 졸업(공학박사), 현재 핵융합연구센터 선임연구원

이상일(李相一)
1969년 8월 25일생, 1992년 서울대 공대 원자핵공학과 졸업, 1994년 동 대학원 원자핵공학 과 졸업(공학석사), 현재 핵융합연구센터 선임연구원

박갑래(朴甲來)
1964년 3월 19일생, 2004년 한밭대학교 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 핵융합연구센터 책임기술원/초전도자석팀장

김기만(金起萬)
1960년 11월 18일생, 1983년 서울대 공대 원자핵공학과 졸업, 1985년 동 대학원 원자핵 공학과 졸업(공학석사), 1989년 미국 일리노이주립대 대학원 원자핵공학과 졸업(공학박사), 현재 핵융합연구센터 책임연구원

박주식(朴柱植)
1956년 6월 28일생, 1979년 서울대 원자핵공학과 졸업, 1989년 서울대학교 대학원 원자핵공학과 졸업(공학박사), 현재 핵융합연구센터 책임연구원 /KSTAR 사업 단장