KSTAR 프로토타입 TF 코일 테스트

추용, 이상일, 박갑래, 백설희, 정우호, 임병수, 박현기, 오영국, 김기만
한국 기초과학 지원 연구원

Test of the KSTAR Prototype Toroidal Field Coil

Y.Chu, S.Lee, K.Park, S.Baek, W.Chung, B.Lim, H.Park, O.K.Oh, K.Kim
Korea Basic Science Institute

ychu@kbsi.re.kr

Abstract - The KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) prototype TF (Toroidal Field) coil was tested in the superconducting coil test facility in KBSI (Korea basic Science Institute). The test was divided into several campaigns according to the objectives. The objectives of the first campaign were to cool the coil into operating temperature and to find any defect in the coil such as cold leaks. From the results of the first campaign, which was carried out during Jan. 2003, any defect in the TF prototype coil was not found. At the second campaign, the large-current charging experiment was one of the major issues, and was carried out during Aug. 2003. In this paper, the test preparation, and the test results of the second campaign were presented.

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[1].

TF 코일의 CICC는 Nb3Sn 초전도 선재와 Incoloy 908을 Jacket 재료로 사용한다. TF 코일의 설계 및 제작에서의 공학적인 논점을 검증하는 것과 TF 코일의 전기적, 기계적 안정성 평가를 위해 프로토타입 TF 코일, TF00, 이 제작되어 테스트 되어졌다.

1차 테스트 캠페인에서 상온, 극저온 헬륨가스 누설과 같은 TF00 자체의 결함은 발견되지 않았다. 또한, TF00 코일의 RRR (Residual Resistivity Ratio)은 200 이상으로, KSTAR 설계치를 만족시켰으며, 임계온도는 대략 18 K 였다[3]. 2차 테스트는 TF00 코일의 대전류 인가 및 퀜치 특성이 주요 논점이었다. 본 논문에서는 TF00 2차 테스트 캠페인을 위한 테스트 장치 셋업 및 테스트 결과에 대해 기술한다.

2. 테스트 준비

2.1 프로토타입 TF 코일

사용된 CICC는 2.8 mm 두께의 Incoloy 908 로 만들어진 Jacket 내부에 3×3×3×3×6의 케이블 형상을 갖는 486 가닥의 소선이 놓여져 있다.. 이 중 2/3은 크롬 코팅된 Nb3Sn 소선이며, 1/3은 크롬 코팅된 OFHC (Oxygen Free High Conductivity Copper) 소선이다. KSTAR TF 코일과 동일한 형태의 프로토타입 TF 코일은 연속권선방식에 의해 만들어진다. 아래의 표 1과 2에 초전도 도체와 TF00 코일의 사양을 표시하였다.

Table 1. Parameters of the conduct

Parameter	Value
Strand material	Nb3Sn
Ratio Nb3Sn/Cu	1:1.5
Strand diameter	0.78 mm after chrome plating
Number of strands	486 (SC 324, Cu 162)
Cr plating thickness	1-2 μm
Cabling pattern	3×3×3×3×6
Conduit material	Incoloy 908
Conduit dimension	25.65(h)× 25.65(w)× 2.86(t)
Void fraction of the conductor	38.2%
RRR	> 100
Hydraulic diameter	0.42 mm
Wetted perimeter	1.19 m

Table 2. Characteristic data of TF00

Number of pancake	8
Number of turns/pancake	7
Total number of turns	56
Coil Area	8.6 m^2
Rated current	35.2 kA
Inductance	19.8 mH
Insulation between turns	0.81 mm
Ground Insulation	5.6mm

2.2 TF00 코일지지 구조물

코일을 극저온용 진공용기에 설치하기 위해서는 안정적으로 코일을 지지해줄 수 있는 구조물의 제작이 필수적이다. TF00의 테스트를 위해 제안된 구조물은 지지 케이스, 지지발, 그리고 지지팔로 구성되어져 있으며, 초저온에 의한 열변형과 전자력에 의한 응력을 견딜 수 있도록 설계·제작되어졌다.

2.2.1. 자석 지지 케이싱

TF00 Coil을 지지해 줄 수 있는 구조물은 운전중에 대단히 큰 자기력 의한 변형과 냉각에 의한 열변형을 동시에 받게 되므로 전자석만 설치할 경우에는 심한 변형이 일어나므로 이에 견딜 수 있는 TF00 코일 지지구조물을 구조해석을 통하여 설계하였으며, 아래 그림 1에 실제 형상이 보여진다.

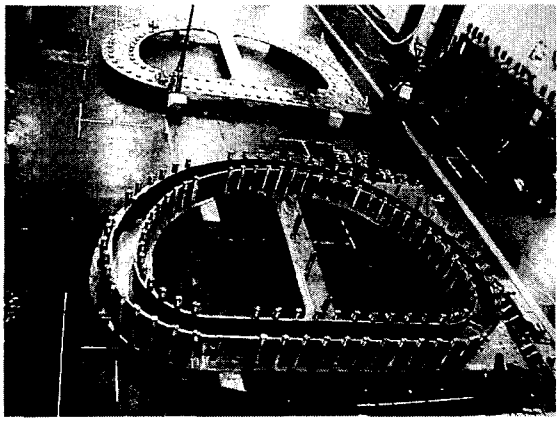


Fig. 1. Supporting Housing for TF00 Coil

2.2.2. 자석발

초전도 자석의 지지 케이싱 하부에 설치되는 것으로, 각기 다른 형태의 자석에 호환되어야 하며, 실험용 진공극저온 용기내에 설치 사용된다. 그림 2에서 처럼 자석발에는 자석을 지지하는 구조물과 지지상태를 감지하는 로드셀 및 변위계, 그리고 이들의 지시계를 가지고 있어 지속적인 모니터링이 가능하게 되어졌다. 자석발은 진공용기내의 열 차폐판을 뚫고 설치됨으로써 아래의 상온부의 열전달이 크게 문제가 될 수 있다.

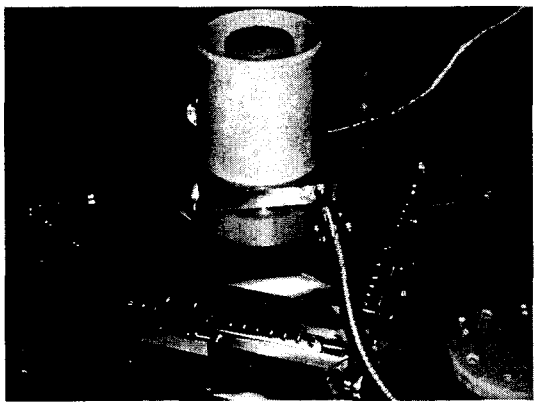


Fig. 2. Supporting Legs for TF00 Coil

따라서, 하중을 이겨낼 수 있는 한도 내에서 가능한 두께가 크지 않는 G-10 소재를 사용하여 상온부와의 열전달을 최소화하도록 하였다.

2.2.3. 자석팔

초전도자석의 지지 케이싱의 상, 하부에 각 4개씩 설치되는 것으로, 진공극저온 용기내에 설치 사용된다. 여기에는 자석을 지지하는 구조물과 지지상태를 감지하는 Load Cell 및 변위계, 그리고 이들의 Indicator 등으로 구성되며, 그 형상이 그림 3에서 나타나있다. 또한, TF00와 지지구조물이 결합되어 실험용 극저온 용기에 놓여진 형상이 그림 4에서 보여진다.

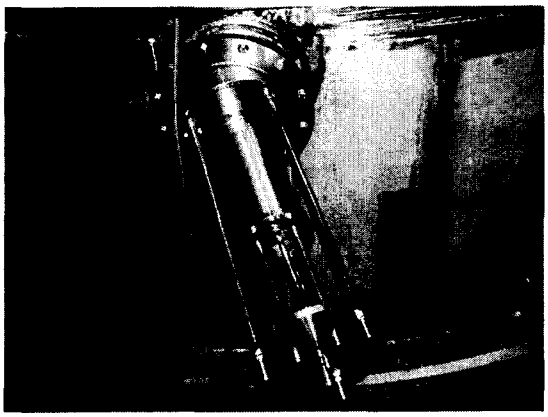


Fig. 3. Supporting Arms for TF00 Coil

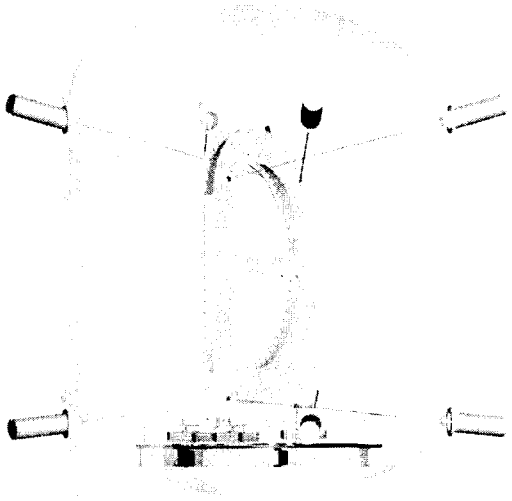


Fig. 4. Cryostat for TF00 Coil Test

2.3 냉각계통

액체헬륨의 생산과 전류 인입선 및 초전도 버스라인을 냉각하기 위해 120 l/hr, 350 watts, 23 g/s 정상유량을 갖는 2대의 액화기 겸 냉동기와 3대의 액화기용 압축기가 사용되고, 액화된 헬륨은 3,000 liter 용량의 저장조에 저장된다. 또한, TF00 코일의 냉각에는 1 kW 급 액화기가 안정된 초임계헬륨의 생산에 사용된다.

2.4 전류인입계통

2.4.1. 전원장치

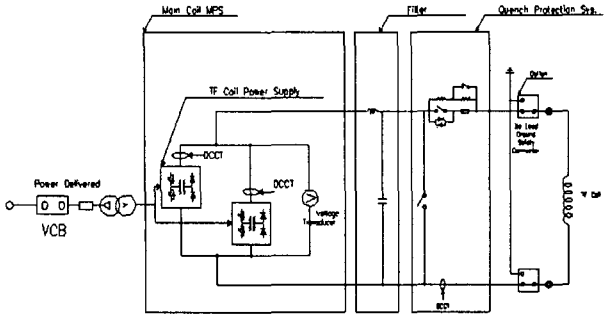


Fig. 5. Electrical Circuit for TF00 Coil Test

TF00 코일의 테스트를 위한 전원장치의 전력회로는 그림 5와 같다[3]. 입력 전류 파형의 개선과 출력전류 리플 및 전압 리플을 줄이고, 저전압, 대전류 특성을 가지며, 전류의 1상한 운전을 필요로 하는 TF 코일의 운전을 고려하여 전력회로는 16대의 Full-bridge 인버터를 병렬화하여 40kA 출력의 컨버터를 구성한다. Quench protection을 위한 energy dump 회로는 TF00 코일과 직렬로 연결되어 있으며, 덤프 시정수는 대략 2초 이다.

2.4.2. 전류인입선

상전도 도체로 공급되는 전원이 초전도체에 연결되기 위해서는 상전도로부터 초전도체로 이행되는 연결부위 VCCL(Vapor Cooled Current Lead)가 사용된다. 이들 전류인입선은 다시 높이 1.9m x 직경 1.0m 규모의 극저온 용기에 설치되며, 전류인입선과 초전도 자석의 연결부위와는 연결용 초전도 버스에 의해 연결된다. 전류인입선의 하부에는 헬륨 box가 설치되어 액체헬륨을 저장조로서 사용된다. 이러한 액체 헬륨의 증발에 의해 전류인입선은 냉각되어진다.

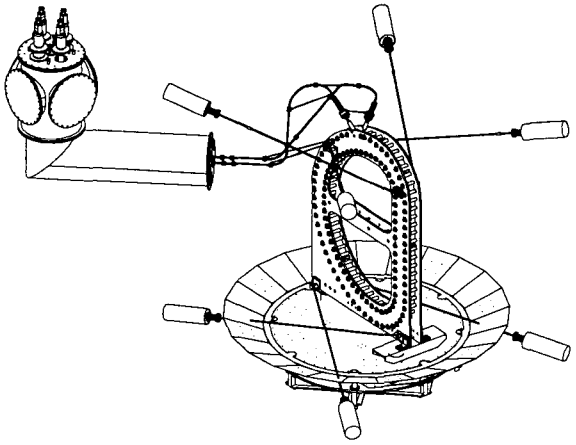


Fig. 6. Superconducting current feeding system

2.4.3. 초전도 버스 라인

초전도 버스 라인은 전류인입선으로부터 원거리에 위치한 초전도자석까지 전류를 수송하는 장치로써 내부의 초전도체가 NbTi/Cu 선재를 사용한다는 것을 제외하고는 TF00 CICC와 동일한 형태의 CICC가 사용된다. 이러한 버스라인과 전류인입선, 그리고 TF00 코일은 Lab Joint에 의해 연결되어졌다[2].

초전도 버스 라인의 지지를 위한 구조물에 대한 3차원 형상과 개략도를 그림 6에 도시하였다.

2.5 데이터 처리 시스템

센서로부터의 데이터들은 VME 시스템에 의해 처리되어, 자체 개발된 데이터베이스에 저장된다. VME 시스템은 실시간 계측 및 조절이 가능하도록 구성되는 데, EPICS (Experimental Physics & Industrial Control System)를 채택하여 보다 효과적인 Network상의 계측 및 제어가 TCP/IP를 통해서 가능하도록 설계되었다[3].

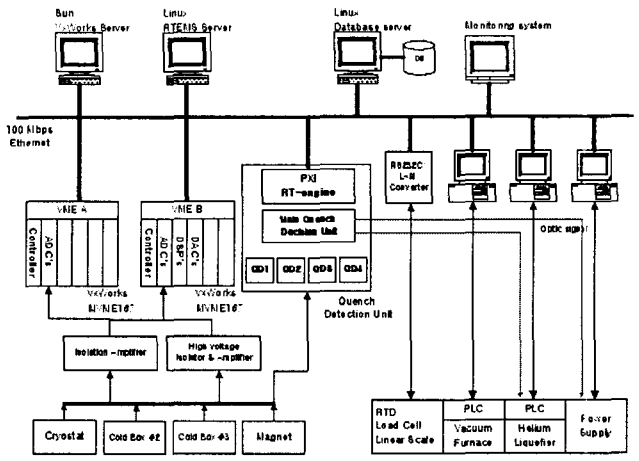
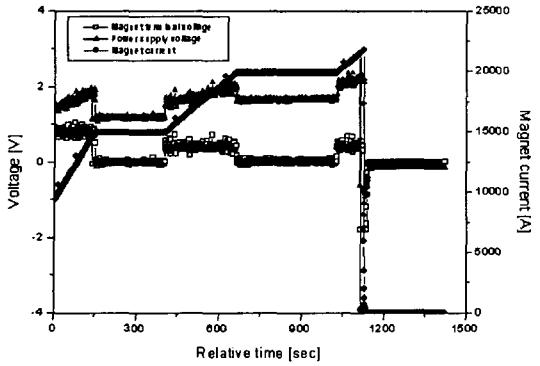


Fig. 7. Data Acquisition System for the test

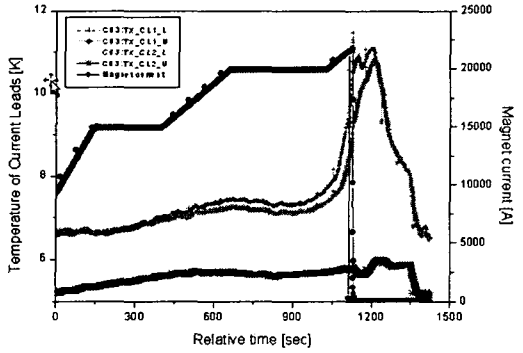
2.6 퀜치 검출 시스템

퀜치 검출 유닛은 층별 단위로 설계되었다. 즉, 다수의 서브 퀜치 검출기들에서 퀜치를 판별하여 상위의 퀜치 판단기로 신호를 보내면, 이 퀜치 판단기가 최종적으로 퀜치를 판단하여, 전원장치를 차단, 퀜치 덤프 모드로 전환시킴과 동시에 헬륨 액화기를 보호하는 신호를 발생시킨다. TF00 코일의 테스트에서는 아날로그 방식의 평형회로를 이용한 퀜치검출기가 설계, 제작되어 운영되었다. 운전도중 안정성을 확보하기 위해 모두 4개의 평형회로가 퀜치검출기로서 사용되었다. 평형회로의 전압이 일정값을 넘어서 일정시간동안 유지하게 되면, 퀜치로서 판단, 모든 일련의 퀜치보호 시퀀스가 이루어진다. 퀜치검출기의 튜닝은 1 kHz 신호를 자석에 인가하여 행해졌다.

3. 테스트 결과



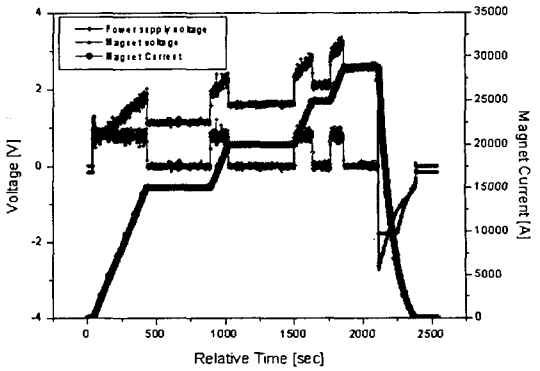
(a)



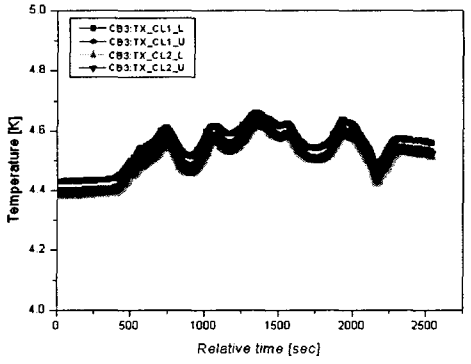
(b)

Fig. 8. (a) Voltage, magnet current data, (b) Temperature of Current feeding lines when a quench occurred at current of 21.7 kA and a fast discharge was activated

그림 8의 (a)는 전류 충전 및 퀜치 발생에 따른 에너지 덤프 시퀀스의 가동을 보여준다. 퀜치는 전류 충전 도중 21.7kA 부근에서 발생되었다. 퀜치 검출기의 퀜치전압 문턱값은 10 mV로, 퀜치 유지 시간은 0.5 sec 로 각각 설정되어 있었다. 20 kA에서 25 kA 로 전류를 20A/s로 충전하는 도중, 초전도 전류 인입 라인에서 퀜치가 발생하였다. 아래의 그림 8의 (b)에서 보듯 1번(- polarity) 2번(+ polarity)의 초기 온도가 대략 6.5 K와 5.2 K 였다. 이는 전류 인입 라인으로 액체헬륨이 충분히 인가되지 않았고, 또한 두개의 전류 인입 라인으로 인가되는 액체헬륨이 불평형 되어짐을 알 수 있다. 이러한 불출분한 액체헬륨 인가와 불평형 헬륨 흐름에 의한 조기 퀜치를 막기 위해 온도 증가에 따른 액체헬륨의 유량을 제어할 필요가 있다. 그림 9의 (a)와 (b)는 전류 인입 라인으로 유입되는 헬륨의 유량조절은 행한 후, 28.9 kA까지 TF00 코일을 충전한 후, 천천히 방전시킨 과정을 보여주는 그림이다. 충전속도는 40 kA/s 이었으며, 전류 인입 라인의 온도 변화율은 0.3 K 이내로 제어되었다. TF 코일용 전원장치는 어떠한 전류 오버슈팅 (Overshooting) 현상도 보여.



(a)



(b)

Fig. 9. (a)Voltage, magnet current data , (b) Temperature of Current feeding lines when a peak current was 28.9 kA and a slow discharge was carried out

지지 않았으며, 리플전압은 40 mV 이내로 안정적으로 운전됨을 확인하였다

4. 결 론

프로토타입 TF 코일, TF00 코일이 테스트되어졌다. 1차와 2차 테스트를 위한 필요조건으로 여러 장비들이 개발, 운영되어졌다. 본 논문에서 주로 언급하는 2차 테스트는 2003년 8월 4일부터 8월 22일까지 행해졌으며, 총 23차례의 전류 충전 동안 자석 자체에서는 퀜치가 발생하지 않았다. 1차와 2차 테스트 동안 TF00 코일 자체의 전기적, 극저온 특성에 문제가 없음을 확인할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

[1] G.S.Le, et al., "Design and Construction of the KSTAR Tokamak", Nuclear Fusion 41, p1515, 2001

[2] S. Lee, et al., "Current feeder system for the KSTAR prototype TF coil", Submitted to the EUCAS 2003 conference

[3] Y. Chu, et al., "The data aquisition and quench protection system of the KSTAR prototype TF coil", Submitted to the EUCAS 2003 conference