

# KSTAR 저온용기 내부의 헬륨라인 설치 및 검사

방은남·박현택·이영주·박영민·최창호·박주식

핵융합연구센터, 대전 305-333

(2007년 2월 3일 받음)

KSTAR 장치의 저온 component에 헬륨을 공급하기 위한 헬륨라인은 크게 두 가지로 이루어져 있다. 냉동기에서 KSTAR 저온용기 외부까지의 트랜스퍼 라인과, 저온용기 내부의 헬륨라인이다. KSTAR 장치는 3가지 종류의 헬륨을 사용하여 각 저온 component를 냉각하는데, 초전도 자석 시스템과 버스라인에는 초임계 헬륨, 전류인입장치에는 액체 헬륨, 열차폐체에는 가스 헬륨을 공급한다. 저온용기 내부의 헬륨라인은 냉동기에서 저온용기 근처까지 연결된 배관을 저온용기 내부의 각 장치에 최단 거리로 열손실 없이 설치하여 각 장치가 정상 작동하도록 하는데 그 목적이 있다. 저온용기 내부의 헬륨라인은 최대 20bar로 가압되는 운전시간 동안에 헬륨누설 없이 설치되어야 한다. 그리고 상온으로 부터의 복사열을 차단하기 위하여 다층절연체로 배관을 감싸주어야 하고 고전압 부분은 프리프레그 테잎으로 절연되어야 한다. 전기절연체는 세라믹과 스테인레스 스틸 튜브를 브레이징 접합 방법으로 연결하여 만들어진 것으로, 배관과 배관, 배관과 저온 component간의 절연을 위해 사용되고, 헬륨라인과 동일하게 4.5K 초임계 헬륨온도에서 누설이 없어야 한다. 따라서 모든 전기절연체는 액체질소에 침전시켜 열충격을 가하고, 내부에 30 bar를 가압하여 진공 누설시험을 한다. 그리고 초전도 자석과 배관의 절연체로 사용되므로 15kV 고전압 절연 검사를 한다. 전기절연체의 세라믹 부분은 구조적 보강을 위하여 추가적으로 표면에 절연 작업을 한다. 현재 대부분의 저온용기 내부의 헬륨 라인 설치 완료되어 있으며, 최종 검사가 진행 중이다.

**주제어 :** 저온용기 내부의 헬륨라인, 세라믹 전기절연체, 헬륨누설을

## I. 서 론

KSTAR 장치에서 저온으로 냉각되어야 하는 component는 초전도 자석과 자석구조물, 전원장치에서 자석까지 전원을 공급하는 전류인입장치와 버스라인, 저온용기 내부의 초전도 자석과 전류인입장치용 단열차폐체등이 있다. 초전도 자석은 16개의 TF (Toroidal Field) 자석과 4쌍의 CS(Central Solenoid) 자석, 3쌍의 PF(Poloidal Field) 자석으로 구성되어 있다[1,3]. 모든 자석과 자석구조물, 버스라인은 4.5 K 초임계 헬륨으로 냉각되고, 모든 단열차폐체는 55 K, 18 bar로 공급되는 헬륨가스로 냉각된다. KSTAR 냉동기는 4.5 K 기준 9 kW 용량으로 설계되어 있다. 냉동기 자체가 차지하는 정상작동 상태에서의 열 부하량은 4.5 K 기준으로 서큘레이터(circulator) 2개의 경우 각각 900 W, 저온 컴프레서(cold compressor)의 경우 170 W, 그 외의 장치는 300 W 정도이다. KSTAR 장치의 각 component가 제 역할을 하기 위해 필요한 냉매를 냉동기에서 각 component까지 공급하기 위하여 distribution box(DB)#1, transfer line(TL), In-cryostat helium line 등이 필요하다. 그림 1은 냉동기에서 각 component까지 헬륨의 흐름을 나타낸 개략도이다. 모든 헬륨라인은 진공

내부에 설치되기 때문에 진공에서의 헬륨누설율이 기준치 이하이어야 하며, 이를 위하여 제작 완료된 헬륨라인에 대하여 그에 준하는 검사가 필요하다.

## II. 저온용기 내부의 헬륨라인

### 2.1 저온용기 내부의 헬륨라인 설치

저온용기 내부의 헬륨라인은 두개의 TL을 통하여 저온용기의 두 포트(C-AuC-00, C-AIc-00)로 공급된다. 표 1은 두개의 포트에 공급되는 헬륨라인이며, 각 component의 공급, 회수 배관의 크기 및 수량을 나타내었다. 두개의 포트에서 각 component까지의 헬륨라인은 냉매의 온도변화를 최소화 하며, 각 component와의 절연을 유지하면서 최단 길이로 제작, 설치된다.

16개의 TF 자석에는 4개의 배관으로 초임계 헬륨이 공급되고, 하나의 배관으로 회수된다. TF 자석에서 회수된 헬륨은 냉동기의 열교환기에서 다시 냉각되어 TF 자석구조물을 냉각한다. TF 자석구조물도 TF 자석과 마찬가지로 4개의 배관으로 초임계 헬륨이 공급되고, 하나의 배관으로

\* [전자우편] bang14@nfrcl.re.kr

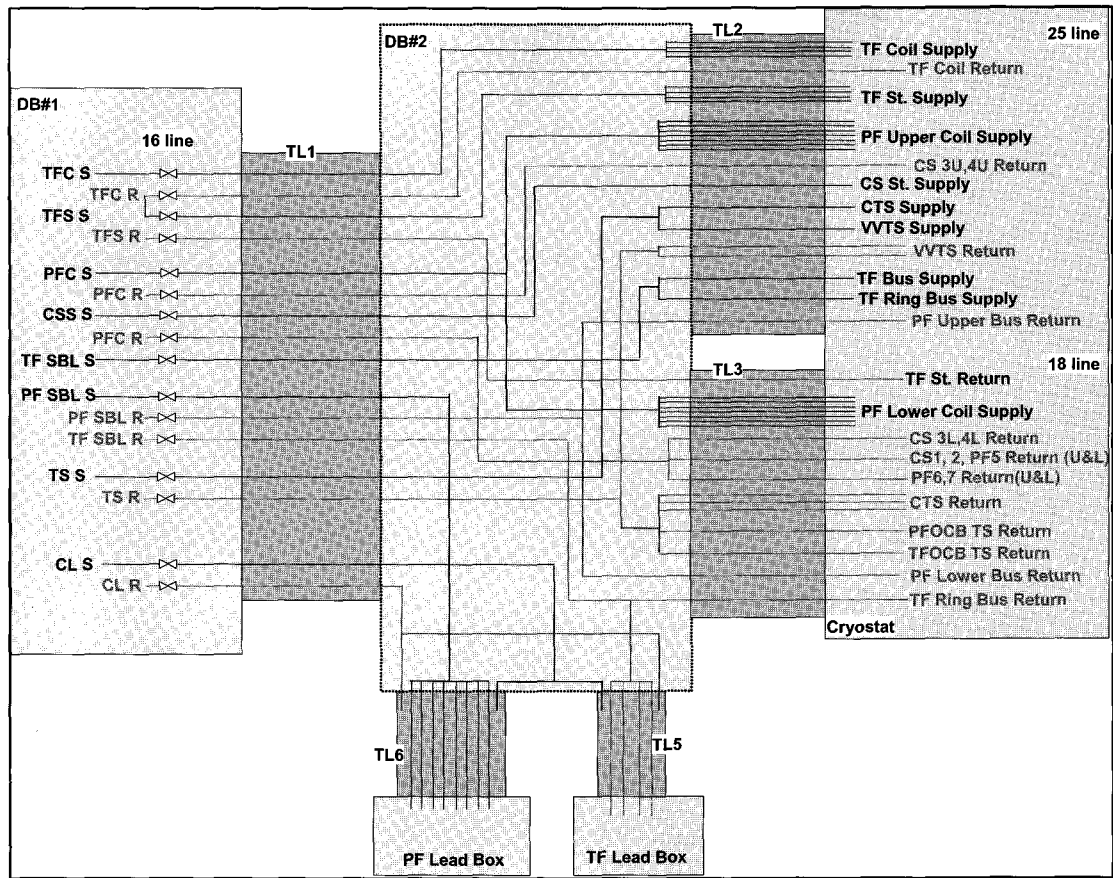


그림 1. KSTAR 장치의 헬륨 flow diagram

표 1. 두 포트의 헬륨라인

Port	Helium Line	Size	No.	Total No.
C-AuC-00 (I.D.770mm)	TF Coil Inlet Manifold	32A	4	25
	TF Coil Outlet Manifold	65A	1	
	TF Structure Inlet Manifold	32A	4	
	PF Upper Coil Inlet Manifold	20A	7	
	CS Structure Inlet Manifold	32A	1	
	PF Upper 3,4 Coil Outlet Manifold	32A	1	
	CTS, VVTS Inlet Manifold	65A	2	
	VVTS Outlet Manifold	32A	2	
	TF Coil Bus Inlet Manifold	20A	1	
	TF Return Coil Bus Inlet Manifold	1/2"	1	
	PF Upper Coil Bus Outlet Manifold	32A	1	
	C-AiC-00 (I.D.1200mm)	TF Structure Outlet Manifold	65A	
PF Lower Coil Inlet Manifold		20A	7	
PF Lower 3,4 Coil Outlet Manifold		32A	1	
PF 1~5 Coil Outlet Manifold		65A	1	
PF 6,7 Coil Outlet Manifold		32A	1	
CTS Outlet Manifold		32/40A	3	
PF Lower Coil Bus Outlet Manifold		20A	1	
Toroidal Ring Outlet Manifold		1/2"	1	
PFOCB TS Outlet Manifold		20A	1	
TFOCB TS Outlet Manifold	1/2"	1		

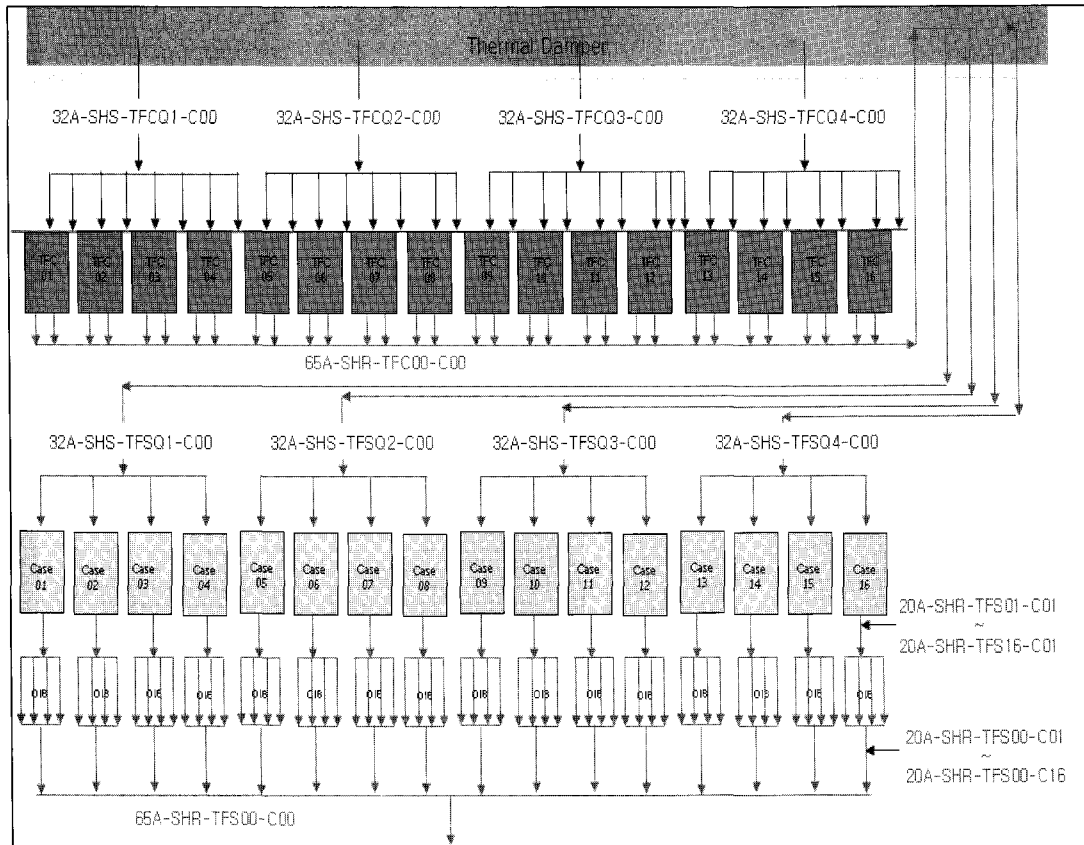


그림 2 . TF coil & structure flow diagram

회수된다(그림 2). 4쌍의 CS 자석과 3쌍의 PF 자석에는 각 자석별로 1개씩, 총 14개의 배관으로 초임계 헬륨이 공급되어진다. 이들 중 CS3U, CS4U와 CS3L, CS4L 자석으로 공급되어진 헬륨은 헬륨냉동기의 DB(distribution box)에서 하나로 합쳐진 후 다시 냉각되어 CS 자석구조물을 냉각시키기 위해 공급되어진다. CS1, CS2 자석과 CS 자석구조물을 냉각시키고 나온 헬륨은 PF5 자석을 냉각시킨 헬륨과 합쳐져 하나의 배관으로 회수되어진다. PF6과 PF7 자석에 각각 공급되어진 초임계 헬륨은 하나의 배관으로 합쳐진 후 DB로 보내어진다. 저온용기와 진공용기의 단열차폐체는 55 K로 냉각된 가스 헬륨이 18 bar의 압력으로 공급되어진다. 저온용기 단열차폐체는 lid, cylinder, base로 구성되어 있으며 각 부분은 16개의 sector로 나누어져 있고, 모든 sector들은 전기적으로 절연되어 있다. 저온용기 단열차폐체로 공급되는 헬륨은 하나의 배관으로 구성되어 있고, 각 sector의 열부하와 헬륨채널의 임피던스를 고려하여 세 개의 그룹으로 나누어진다. 즉 회수되는 배관의 수는 3개이다. 진공용기 단열차폐체를 냉각하기 위한 헬륨 배관도 저온용기 단열차폐체와 같은 개념으로 제작되었으

며, 하나의 헬륨 공급배관과 2개의 회수 배관으로 구성되어 있다. TF return coil 버스라인은 각각 하나의 배관으로 공급되고, 회수된다. CS, PF 자석 버스라인은 PF 전류인 입장에서 각각의 배관으로 초임계 헬륨이 공급되고, 저온용기의 상부와 하부에서 각각 1개씩의 배관으로 회수된다.

2007년 1월 현재 모든 초전도 자석과 자석 구조물이 조립완료되었고, 헬륨라인 또한 설치 및 검사가 모두 완료되었다. 그림 3은 저온용기 내부의 헬륨라인 3D 모델링 및 설치 완료된 상태를 보여주고 있다. TF 자석과 자석 구조물의 헬륨라인은 PF6U 자석구조물 16개에 지지대를 부착하여 원형 모양으로 설치되었다. CS 자석과 자석 구조물의 헬륨라인은 CS 자석구조물의 상하부에 유사한 방식으로 설치되었으며, PF 자석 헬륨라인은 각 해당 자석구조물의 윗면과 옆면에 지지대를 부착하여 설치되었다. 저온용기 단열차폐체 공급라인과 진공용기 단열차폐체의 공급·회수라인은 저온용기 리드(Lid)에 설치되어 있고, 저온용기 열차폐체의 회수라인은 저온용기 base에 설치되었다.

TF 자석과 return coil 버스라인, PF 자석 상부 버스라

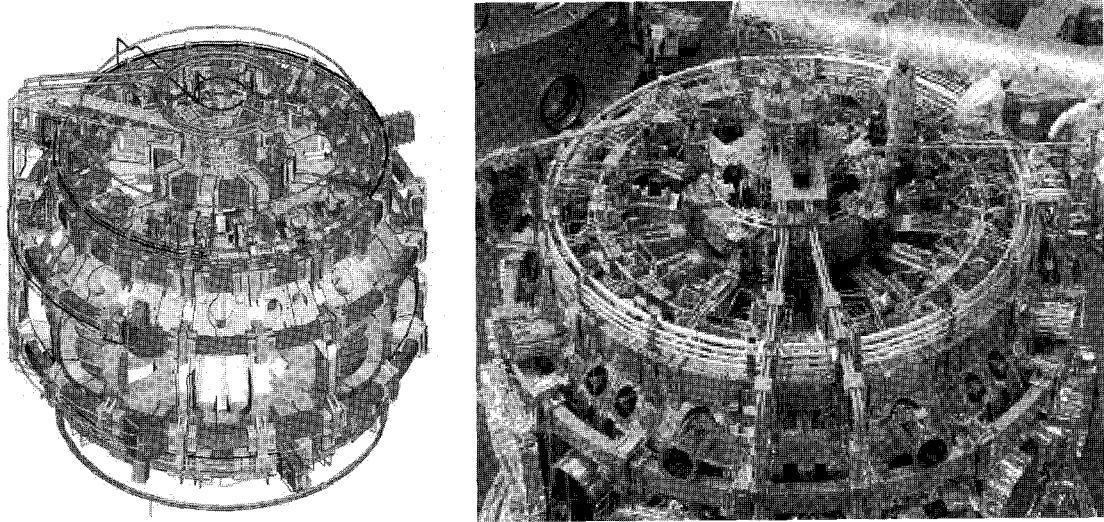


그림 3. 저온용기 내부의 헬륨라인

인의 헬륨라인은 TF 자석 헬륨라인과 함께 PF6U 자석구조물의 cover plate에 설치되어 있으며, PF 자석 하부 버스라인은 CS 자석 하부 구조물에 설치되었다. 설치된 저온용기 내부의 헬륨라인의 총길이는 약 1km 정도이고, 용접부는 4천 개소 정도이다. 모든 헬륨라인은 설치 단계마다 용접 후 가압 및 진공 누설시험을 실시하였을 뿐만 아니라 헬륨라인이 설치 완료된 이후에 최종 검사를 실시하여 진공 누설 여부가 검증 되었다. 각각의 자석, 자석구조물, 단열차폐체와 버스라인에 연결되는 헬륨라인은 4.5 K 에서 15 kV 이상의 절연 내전압을 가진 축방향 전기절연체(axial electrical break)로 절연되어 있다.

## 2.2 저온용기 내부의 헬륨라인 검사

헬륨라인이 설치되는 과정에서 용접 이후에는 모든 용접

부에 대한 누설 검사가 필요하다. 저온용기 자체가 진공상태이기 때문에 모든 배관은 진공누설 검사에서 헬륨누설율이  $1.0 \times 10^{-9}$  mabr · l/s 이하여야 한다. 자석의 경우 진공누설검사를 실시 할 수 없기 때문에 자석내부에 헬륨을 10 bar 이상 가압한 후, sniffer 측정기를 통하여 용접부의 누설율을 검사한다. 따라서 저온용기 내부의 모든 저온 구조물에 대한 헬륨라인을 설치한 이후 10 bar 가압(열차폐체의 경우, 30 bar)과 sniffer probe 누설검사, 진공누설시험 등의 최종검사를 실시하였다. 초전도 자석과 버스라인의 헬륨라인에 헬륨 가스로 10 bar 가압하여 용접부에 대한 bubble 검사를 실시하고, sniffer probe 누설검사를 실시하였다. Sniffer probe 누설검사에서는 모든 용접부에서 헬륨 함유량이 5 ppm 이하로 나타났다. Sniffer probe 누설검사는 배관의 내부에 헬륨을 가압하고, 외부에서 헬륨의 누설량을 검사하는 것으로, 대기의 헬륨 함유량이 5

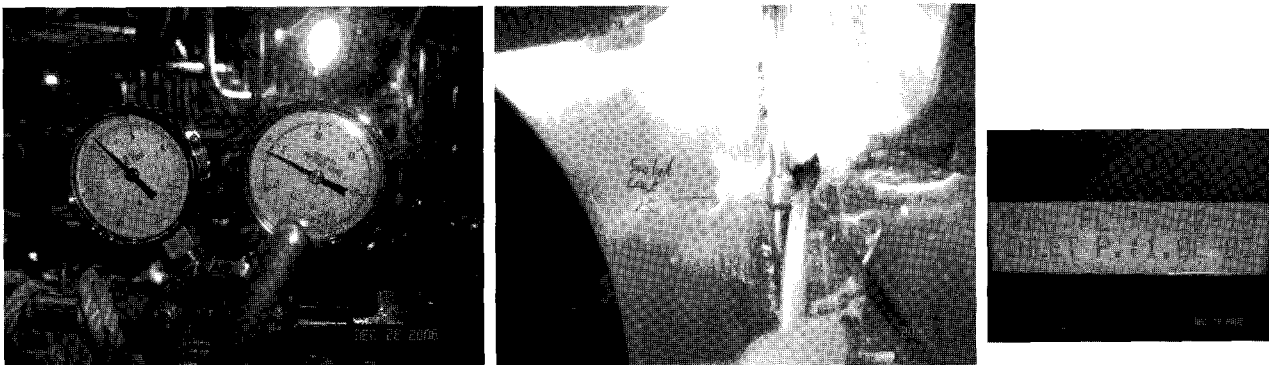


그림 4. 헬륨라인에 대한 가압, bubble 검사, 헬륨누설율

표 2. TF, CS 자석구조물 헬륨라인에 대한 헬륨누설검사 결과

작업명	TF St. Helium Line			
	대상물	가압Test (10 bar)	Helium Leak Test (mbar.l/s)	
TF 01	20A-S-R-TFS01-C00	O	4.0E-10	1.0E-10
TF 02	20A-S-R-TFS02-C00	O	3.0E-10	1.0E-10
TF 03	20A-S-R-TFS03-C00	O	3.0E-10	9.0E-11
TF 04	20A-S-R-TFS04-C00	O	5.0E-10	1.0E-10
TF 05	20A-S-R-TFS05-C00	O	5.0E-10	8.0E-11
TF 06	20A-S-R-TFS06-C00	O	4.0E-10	9.0E-11
TF 07	20A-S-R-TFS07-C00	O	2.2E-10	8.0E-11
TF 08	20A-S-R-TFS08-C00	O	2.0E-10	9.0E-11
TF 09	20A-S-R-TFS09-C00	O	2.2E-10	1.0E-10
TF 10	20A-S-R-TFS10-C00	O	4.0E-10	1.0E-10
TF 11	20A-S-R-TFS11-C00	O	5.0E-10	1.0E-10
TF 12	20A-S-R-TFS12-C00	O	2.0E-10	7.0E-11
TF 13	20A-S-R-TFS13-C00	O	2.0E-10	4.0E-11
TF 14	20A-S-R-TFS14-C00	O	4.2E-10	9.0E-11
TF 15	20A-S-R-TFS15-C00	O	4.4E-10	7.0E-11
TF 16	20A-S-R-TFS16-C00	O	4.0E-10	7.0E-11

작업명	CS St. Cooling Line 설치 (Manifold & Channel)			
	대상물	용접 (육안검사)	가압 (10bar)	Leak Test (mbar.l/s)
CS Structure	1/2"-SHS-CSS00-C01	O	O	3.2E-10
	1/2"-SHR-CSS00-C01	O	O	
	1/2"-SHS-CSS00-C02	O	O	
	1/2"-SHR-CSS00-C02	O	O	
	1/2"-SHS-CSS00-C03	O	O	
	1/2"-SHR-CSS00-C03	O	O	
	1/2"-SHS-CSS00-C04	O	O	
	1/2"-SHR-CSS00-C04	O	O	
	1/2"-SHS-CSS00-C05	O	O	
	1/2"-SHR-CSS00-C05	O	O	
	1/2"-SHS-CSS00-C06	O	O	
	1/2"-SHR-CSS00-C06	O	O	
	1/2"-SHS-CSS00-C07	O	O	
	1/2"-SHR-CSS00-C07	O	O	
	1/2"-SHS-CSS00-C08	O	O	
	1/2"-SHR-CSS00-C08	O	O	

ppm 이므로, 각 용접부에서 헬륨함유량이 5 ppm이하이면 누설이 없는 것으로 판단하게 된다. 자석구조물과 단열차폐체의 헬륨라인에는 냉각 시 수반되는 저온 구조물의 수축에 의한 물리적 충격 여부 검사를 위해 상온에서 10 bar (단열차폐체의 경우, 30bar)의 압력으로 10분씩 3회 아르곤 가압을 실시하였고, 마지막 가압 시에 모든 용접부에 대한 누설검사를 실시하였다. 이후, 각 배관에 대해 정밀 헬륨누설 시험기(calibration 후)를 이용하여 헬륨 누설 여부를 검사하였다. 모든 용접부에서의 헬륨누설율은  $1.0 \times 10^{-9}$  mbar · l/s 이하이어야 한다. 그림 4는 현장에서 실시한 가압 및 bubble 검사와 헬륨누설검사 과정 및 결과를 보여주고 있다. 표 2.는 예로 TF, CS 자석구조물 헬륨라인의 헬륨누설검사 결과를 나타내었다. 모든 용접부에서의 헬륨누설율이 기준치 이하로 나타났다.

### III. 헬륨라인용 종방향 전기절연체

KSTAR 저온용기 내부의 헬륨라인에는 초전도 자석과 헬륨라인간의 전기적 절연을 위하여 종방향 전기절연체가 사용된다. 전기절연체는 배관에 연결되어 헬륨이 흐르게

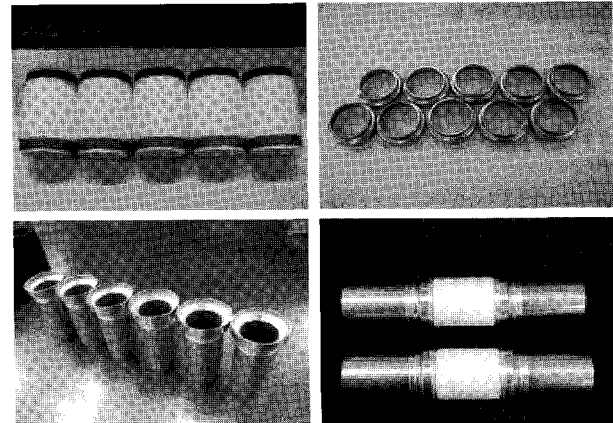


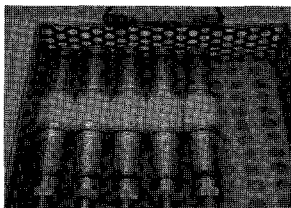
그림 5. 종방향 전기절연체의 부품과 완성품

되기 때문에 배관과 마찬가지로 30 bar 이상의 내압에 견디도록 설계 되었고, 절연강도 기준치는 15 kV 이상이며, 헬륨누설율은  $1.0 \times 10^{-9}$  mbar · l/s 이하로 제작되었다 [2]. 종방향 전기 절연체는 절연체인 세라믹, 스테인레스 스틸 및 세라믹과 스테인레스 스틸 사이의 연결부로 구성되어 있다. 세라믹의 연결부위는 Ag-Cu 합금재를 도포하여 "메탈라이징(metalizing)" 기법으로 접착되며, 연결부와 스테인레스 스틸 배관을 브레이징(brazing)한 후 다시 세라믹과 브레이징 된다.

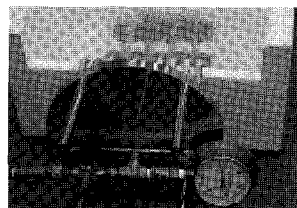
표 3. 종방향 전기절연체의 검사 요구조건

Test	Requirements
Thermal Cycle	5 times cool-down at 77K
Helium Pressure	30bar, 30 min. at 77K
Helium Leak Rate (300K)	Less than $1.0 \times 10^{-9}$ mbar l/s
DC Hipot	15 kV, 1 min.

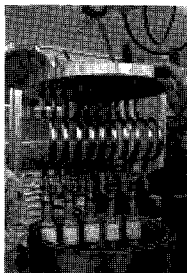
종방향 전기 절연체는 제작 완료 후 모든 제품에 대하여 가압 및 진공 누설검사, 전기저항 측정, "AC hipot." 검사를 실시하였다. 종방향 전기 절연체는 자석 및 자석구조물 등과 헬륨라인간의 절연을 위하여 설치되므로 자석의 절연 기준과 동일한 조건을 만족해야 하며, 헬륨라인의 가압 및 진공누설 기준도 만족해야 한다. 표 3은 종방향 전기 절연체의 검사 항목 및 요구조건을 나타내었다. 종방향 전기 절연체를 액체질소에 30분 침전한 후 다시 상온에 꺼내는 과정을 5회 실시 한다. 액체헬륨이 공급될 때의 thermal shock 을 가하는 것이다. 그리고 종방향 전기절연체를 액체질소에 침전된 상태에서 내부에 헬륨을 30 bar 가압하여 누설 여부를 관찰한다. 위 검사에서 문제가 없다면 종방향 전기 절연체를 진공 챔버에 장착한 뒤 내부에 헬륨을 30 bar 가압하여 진공헬륨누설율을 측정한다. 헬륨누설율은  $1.0 \times 10^{-9}$  mbar · l/s 이하여야 한다. 마지막으로 AC 15kV를 1 분간 인가하여 누설전류 발생 여부를 검사한다(그림 6).



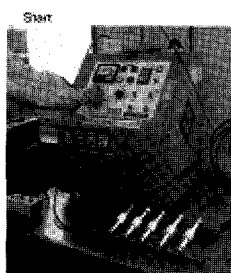
a. Thermal heat cycle 5 times 300K (-) 77K



b. 액체 질소에 침전 후 30 bar 가압 시험



c. 진공 챔버에 장착하여 진공 누설 검사



d. AC hipot. test at 15 kV for 1 min.

그림 6. 종방향 전기절연체의 검사 절차

모든 종방향 전기절연체에 대하여 위와 같은 검사를 실시하여, 모든 검사 요구조건을 만족하였다. 종방향 전기 절연체는 헬륨라인에 본 설치되고, 세라믹의 구조적 보강과 횡방향 전기절연을 위하여 S2-glass를 이용하여 표면을 2 차 절연하였다[4].

#### IV. 결 론

KSTAR 초전도 자석 운전을 위한 초임계 헬륨 공급배관 제작 설치 작업을 완료하였다. 헬륨배관 제작 설치시 모든 용접부에 대한 누설시험을 진행하였다. 초전도 자석과 자석구조물, 버스라인, 단열차폐체의 헬륨라인에 종방향 전기절연체가 설치 완료 되었고 이에 대한 최종 검사가 실시 되었다. 자석과 버스라인에 대한 가압과 누설검사에서 각 용접부에서의 헬륨누설량은 기준치인 5ppm 이하였고, 자석구조물과 단열차폐체의 헬륨라인에 대한 가압과 진공 누설검사 결과 용접부에서의 헬륨 누설율은  $1.0 \times 10^{-9}$  mbar · l/s 이하로 나타났다. 헬륨라인의 모든 용접부는 최종 검사 요구 조건을 모두 만족하였다.

#### V. 감사의 말

이 연구는 과학기술부 지원으로 수행하는 차세대 초전도 핵융합 연구장치 개발 · 운영 사업으로 진행하였다.

#### 참고문헌

- [1] Eun Nam Bang, "Cryogenic Helium Line Routing for In-lyostat Components of the KSTAR", 2006 Korean Nuclear Society (2006).
- [2] Eun Nam Bang, "Electrical Breaks for KSTAR In-Cryostat Helium Line" JKPS 49, S232 (2006).
- [3] Y. K. Oh, "Status of the KSTAR Tokamak construction and Assembly", JKPS 49, S1 (2006).
- [4] W. Chung, "Electrical Insulation of KSTAR Magnet Lead". JKPS 49, S228 (2006).

## Assembly and Test of the In-cryostat Helium Line for KSTAR

E.N. Bang, H.T. Park, Y.J. Lee, Y.M. Park, C.H. Choi, and J.S. Bak

*National Fusion Research Center, Daejeon 305-333*

(Received February 3, 2007)

In-cryostat helium lines are under installation to transfer a cryogenic helium into cold components in KSTAR device. In KSTAR, three kinds of helium should be supplied into the cold components, which are supercritical helium into superconduction(SC) magnet system, liquid helium into current lead system, and gas helium into thermal shields. Cryogenic helium lines consist of transfer lines outside the cryostat, in-cryostat helium lines, and electrical breaks. In-cryostat helium lines should be guaranteed of leak tightness for long time operation at high internal helium pressure of 20 bar. We wrapped the helium line with multi-layer insulator(MLI) to reduce radiation heat and insulated the surface of the high potential part with prepreg tape. The electrical break was fabricated by brazing ceramic tube with stainless steel tube. To ensure the operation reliability at operation temperature, all the electrical break have been examined by the thermal cycle test at liquid nitrogen and by the hydraulic test at 30 bar. And additional surface insulation was prepared with prepreg tape to give structural safety.

At present most of the in-cryostat helium lines have been installed and the final inspection test is progressing.

Keywords : In-cryostat helium line, ceramic electrical break, helium leak rate,

\* [E-mail] bang14@nfrc.re.kr