

KSTAR 전류인입선 및 헬륨냉매 제어시스템 제작 및 설치

송낙형·우인식·이영주·곽상우·방은남·이근수·김정수·장용복·
박현택·홍재식·박영민·김양수·최창호·박주식

국가핵융합연구소, 대전 305-333

(2007년 8월 22일 받음)

KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) 전류인입선(CL; Current Lead)은 4.5 K의 저온에서 운전되는 초전도 버스라인과 300 K의 실온에서 운전되는 MPS (Magnet Power Supply)를 전기적으로 연결하는 장치이다. 초기 플라즈마 발생시험을 위하여 TF (Toroidal Field) 및 PF (Poloidal Field) 리드박스에 전류인입선이 설치된다. TF 자석용 CL은 17.5 kA급 4 개의 CL에 최대 35 kA의 DC 전류가 인가되며, PF 자석용은 13 kA급 14 개의 CL에 350초간 20 ~ 26 kA의 펄스 전류가 인가된다. 각각의 전류인입선은 TF 및 PF 자석에 전류를 인가하기 위한 버스라인이 연결되어 있으며, 전류인입선을 통해 초전도 버스라인으로 전달되는 전도열 및 전류인가시 발생하는 주울(Joule) 열을 차단하기 위한 헬륨냉매 제어시스템이 KSTAR 주장치와는 별도로 설치되어 있다. 리드박스 내·외부의 배관 및 제어시스템 설치완료 후 고진공 배기, 헬륨 누설 검사, 전류인입선 유량 검사 및 액체질소 냉각시험을 실시하여 장치의 성능검증을 완료하였다.

주제어 : KSTAR, 전류인입선, 리드박스, 헬륨냉매 제어시스템

I. 서론

KSTAR 전류인입 시스템(CLS; Current Lead System)은 실온(300 K 영역)에서 운전되는 MPS (Magnet Power Supply)와 극저온 환경(4.5 K)에 놓인 초전도 송전선을 전

기적으로 연결하는 장치로서 실온의 송전선으로부터 극저온 환경으로 유입되는 열을 차단하는 전류인입선(CL; Current Lead), 극저온 환경에서 전류인입선 운전을 위한 리드박스(CLB; Current Lead Box), 리드박스 내에 설치되는 극저온 장치 냉각을 위한 헬륨라인, 각종 제어계측 센서, 헬륨냉매 제어시스템, 리드박스외 초전도 버스라인을 포함한 저온용기용 진공배기 시스템(VPS; Vacuum Pumping System) 및 시스템 전반에 필요한 각종 유틸리티(Utility) 등으로 구성되어 있다 (그림 1, 그림 2, 및 표 1) [1, 2]. 전류인입 시스템에 있어서 핵심 품목인 전류인입선

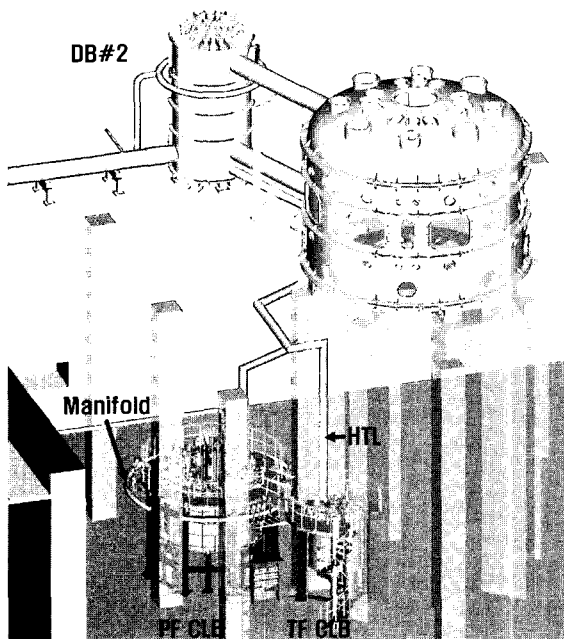


그림 1. 전류인입 시스템 3차원 도면

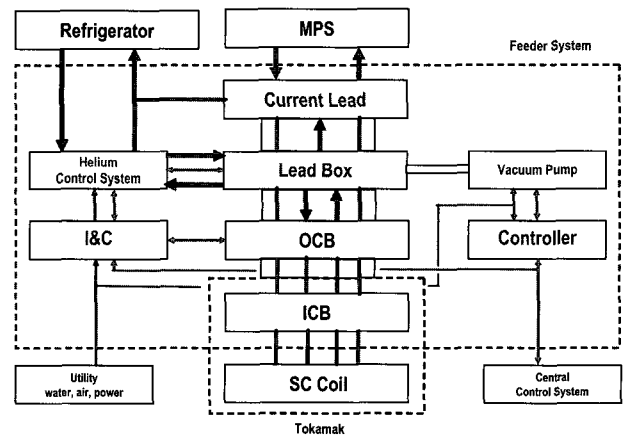


그림 2. 전류인입 시스템 개념도

표 1. 전류인입 시스템 구성 하드웨어 리스트

아이템	단위	TF 시스템	PF 시스템
CL	EA	4	14(18)
CLB	EA	1	1
VPS	SYS	1	1
헬륨냉매 제어시스템	SYS	1	1
저온 밸브	EA	8	18
유량계(차압계 포함)	EA	12	39
압력계	EA	5	9
온도 센서	EA	17	40
헬륨 레벨 센서	EA	1	1
세라믹 히터	EA	4	14(18)
E/B			
- 저온 용기 내부	EA	13	50
- 저온 용기 외부	EA	4	14(18)
- CL 절연	EA	4	14(18)

표 2. 전류 인입 시스템 구축 이력

아이템	연구 개발 내용	날짜
전류 인입선	E/D 종료	2003.11
	PF 자석용 시작품 제작/시험	2004.11
	TF 자석용 시작품 제작/시험	2006.02
	본체품 제작/설치	2007.01
CLB	E/D 종료	2003.12
	제작/설치	2005.05
	진공 및 TS 냉각 시험 완료	2005.08
VPS	제작/설치	2005.06
헬륨 배관 및 제어 시스템	E/D 완료	2006.03
	제작/설치	2007.03
	검사 및 시험	2007.08

은 다년도 계획을 수립하여 자체 연구개발 및 성능평가, 제작 및 운전비용 절감, 대형 초전도자석 전류전송라인에 설치됨에 따른 운전 안정성 확보 및 실용화 목표를 가지고 국내외 연구개발 동향 정보수집, 설계코드 연구개발, 소규모 전류인입선 시작품(200 A급) 개발 및 시험, KSTAR 장치용 대전류(35 kA급) 연구개발 및 성능평가 등의 R&D 과정을 통해 제작 및 설치되었다 (표 2) [2-4]. 리드박스를 포함한 전류인입선 이외의 다른 모든 CLS 핵심품목들은 해외 전문가의 기술자문 및 기초설계, 구조해석 및 공학설계, 액체질소 냉각시험을 포함한 각종 성능시험을 통해 고진공 (1×10^{-6} mbar), 극저온(4.2 K), 대전류(35 kA) 및 고전압

(15 kV)과 같은 극한의 환경을 요하는 공학기술 과제들을 모두 검증한 이후에 제작 및 설치되었다 [1-5].

II. 전류인입선

전류인입선은 실온에서 운전되는 MPS와 초전도 코일을 전기적으로 연결하는 동시에 실온 영역에서 초전도 코일의 운전 온도인 4.5 K의 극저온으로 유입되는 열을 차단하는 역할을 하는 전기적 연결 단자이다. KSTAR 전류인입선의 구조 및 사양은 그림 3 및 표 3과 같다. KSTAR 프로젝트를 포함하여 대형 토카막 응용 연구장치에 활용되는 전류인입선은 냉각방식 및 핵심 소재에 따라 여러 가지가 있으며 공통적으로 요구되는 조건은 다음과 같다 [5-7].

- 전기 절연 : KSTAR 장치의 경우 15 kV 절연 내전압이 요구됨.
- 운전 및 연구개발 비용절감 : 상용 상전도 전류인입선 대비 50% 이상 절감.
- 펄스 운전에 따른 온도 및 헬륨냉매 유량의 불안정한 변화 문제 대비 운전 안정성.
- 대형 토카막 응용 연구장치에 활용하기 위한 장기간의 운전 안정성(10년 이상).

리드박스과 전류인입선 사이의 전기절연을 위해 높이가 300 mm인 세라믹 재질의 절연체(Electrical Isolator)가

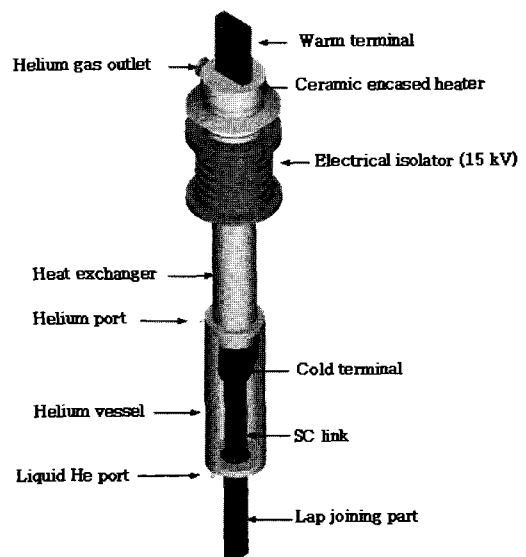


그림 3. 전류인입선 3차원 모델링 도면

표 3. 전류인입선 사양

Item	Unit	Value	Remark
Overall length	m	2.4	
Weight	kg	280	
Design current	kA	17.5	TF leads(4 EA)
		13.0	PF leads(14 EA)
Diameter of brass wire	mm	1	
Length of brass wire	m	1.16	
Total cross sectional area of brass wires	mm ²	10000	
Number of wire	ea	12960	
Zinc contents of the brass wire	wt%	20	TF leads
		35	PF leads
Void fraction	%	50	
Heater exchanger diameter	mm	160	
Helium vessel diameter	mm	220	

부착되어 있으며 초전도 케이블이 부착되는 랩조인트부(Lap Joining Part)를 제외한 리드박스 안쪽으로 들어가는 CL의 모든 표면은 3 mm 두께의 G10 에폭시 글라스(Epoxy Glass)를 몰딩(Molding) 기법으로 부착 하였다.

기존의 무산소동(OFHC Copper; Oxygen Free High Conductivity Copper) 재질의 전류인입선은 초전도자석 응용 연구장치 전체가 필요로 하는 헬륨냉동기 부하량의 30% 정도를 차지하는 반면, KSTAR 프로젝트에서 채택한 황동 재질의 전류인입선은 이를 50% 이상 절감하는 장점을 가지고 있다. 세계적으로 개발되어 사용되고 있는 HTS(High Temperature Superconducting) CL은 황동 재질의 전류인입선보다 50% 이상 더 냉동기 부하량을 줄일 수 있지만 13 kA급 정도까지 실용화 단계에 있는 상태이며 HTS 소재의 장기간 운전에 따른 특성 변형 및 초전도 상태에서 상전도 상태로의 상전이에 따른 안정성, 연구개발 비용절감 등과 같은 면에 있어서 연구개발 과제가 남아 있다. 이에 반해 황동 재질의 전류인입선은 HTS CL에 비해 냉동기 부하량은 두배 정도 크지만 대형 연구 프로젝트에서 요구하는 조건을 모두 만족시키고 있다 [5, 6].

KSTAR 프로젝트에서 요구되는 최대 35 kA급 CL 연구 개발을 목표로 200 A급 전류인입선 설계, 제작 및 성능 시험을 먼저 수행하였다 [1]. 이를 기반으로 러시아 쿠르차토프(Kurchatov) 연구소의 전류인입선 전문가들과 함께 PF

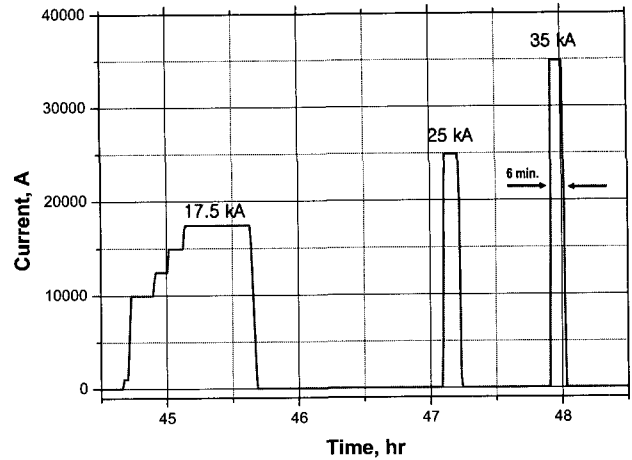


그림 4. 35 kA급 전류인입선 전류인가 시험 그래프

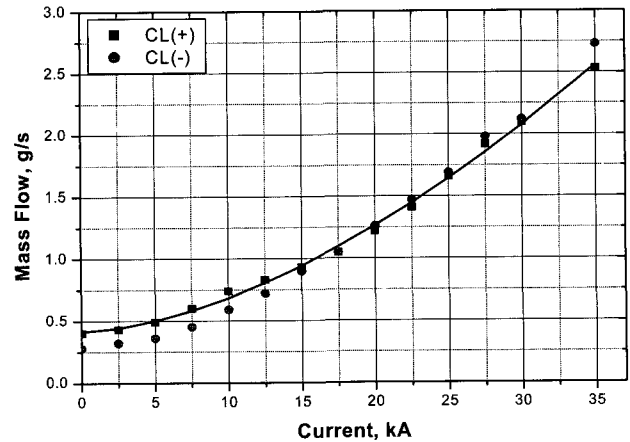


그림 5. 전류인가에 따른 전류인입선의 헬륨 소모량 변화 그래프. 실선은 CL(+) 데이터를 $a + bI^p$ 함수로 플롯한 결과임.

표 4. 전류 인입선 제작, 설치 및 시작품 성능시험 관련 주요 성능 시험 결과

아이템	요구 조건	결과
진공 누설	$<1 \times 10^{-9}$ mbar·l/s	$<1 \times 10^{-9}$ mbar·l/s
절연 내전압	15 kV	누설 전류 $<5 \mu\text{A}$, 저항 $>10 \text{ G}\Omega$
무산소동 RRR	>100	130
실온 전기 저항		
- TF	$<10 \mu\Omega$	$9.95 \pm 0.05 \mu\Omega$
- PF	$<12 \mu\Omega$	$11.54 \pm 0.11 \mu\Omega$
DC 전류 인가 시험	17.5 kA, 8 hr	20 kA, 8 hr
펄스 전류 인가 시험	35 kA, 6분, 8회	20 kA, 8 hr
헬륨 소모량		
- TF(0A/17.5 kA)	0.44/1.1 g/s	0.41/1.1 g/s
- PF(0A/26 kA)	0.33/2.5 g/s	0.25/2.5 g/s
조인트 저항	$<5 \text{ n}\Omega$	1.3 nΩ

자석용 전류인입선 (13 kA급) 시작품을 제작하여 6분간 26 kA 전류인가 시험을 수행하였다. 성능시험 결과 무산소동 및 SS (Stainless Steel)와의 용접부에서 생기는 진공누설, 황동선재, 초전도 링크 (SC Link) 및 무산소동 재료들 간의 전기 접합부 (납땀)의 전기 접촉저항에 의한 헬륨냉매 소모량 증가 문제점 등에 대한 개선을 필요로 하였다 [3]. 이중 재료간의 용접 문제는 전자빔 용접 기법으로, 접촉저항 문제는 접합부에 온도급을 하는 것으로 설계 개선하여 국내의 “하늘엔지니어링”에서 TF 자석용 시작품 한쌍을 제작 하였고 핵융합 연구센터에서 성능검증을 수행하였다. 그림 4, 그림 5 및 표 4는 35 kA급 CL의 주요 성능시험 결과를 보여주고 있다 [2]. 전류인입선 저온냉각 및 성능시험 내용은 다음과 같다.

- 전류인가에 따른 헬륨 소모량 측정
- PF 자석용 전류인입선 제작을 위한 과부하 전류인가 시험
 - 360 초 펄스전류 인가 (35 kA, 1회)
 - 70 초 펄스전류 인가 (20분 간격으로 8회, 35 kA)
- 20 kA DC 전류인가 (8 시간)
- 랩조인트 전기저항 측정
- 액체헬륨 액면 조절 시험
- 헬륨냉매 공급 차단시의 안정성 시험
- 전류인입선용 히터 시작품 테스트
- 진공누설 시험 : 헬륨 허용 누설량 1×10^{-9} mbar-l/s

전류인가에 따른 헬륨냉매 소모량은 그림 5와 같으며 설계 대비 10% 이내의 정밀도를 보여주고 있다. PF 전류인입선의 경우 설계 전류량인 13 kA의 두배인 26 kA 까지 한 시간에 최대 350초간 펄스 과부하 전류를 공급하게 된다. 과부하 전류를 인가할 경우 상전도 송전 케이블이 연결되는 CL 상단에 위치하는 연결 단자 (Warm Terminal)의 온도가 상승하게 된다. 이와 같은 현상을 모사하기 위하여 360초간 35 kA의 전류를 인가한 결과 CL 상단의 온도는 310 K를 넘지 않는 결과를 얻었다. PF 자석 전류인가 시나리오 중 전류인입선 상단 온도증가에 미치는 가장 큰 요인은 20분에 70초간 하루 총 8회의 펄스전류를 인가하는 것이다. 실험 결과 펄스전류 인가 횟수가 증가함에 따라 CL 상단의 온도가 조금씩 증가하기는 하였으나 실온을 유지하였다. TF 자석용 CL은 하루에 8시간 동안 35 kA의 DC 전

류를 인가하게 된다. 설계전류가 17.5 kA인 전류인입선 두 개를 병렬로 연결하여 전류공급이 이루어지는데 20 kA의 DC 전류를 인가한 결과 CL 상단의 온도는 320 K를 넘지 않았다. 다음으로 가장 중요한 시험 중 하나는 헬륨냉매 공급을 차단한 상태에서 전류를 인가할 경우의 안정성 문제이다. 이러한 경우에는 CL 상단의 온도증가 뿐만 아니라 CL 하단의 헬륨용기 내에 있는 액체헬륨 레벨이 급격히 저하되어 CL에 연결된 초전도 송전 케이블 온도가 상승하게 되고 상전도 전이에 따른 케이블 손상 위험이 매우 커진다. 전류인입선에 10 kA의 전류를 인가한 상태에서 CL 한쪽의 헬륨 냉매공급을 차단한 결과 8분동안 CL 상단 온도는 320 K를 넘지 않았고 CL 하단에 연결된 초전도케이블 온도 변화는 측정되지 않았다. 헬륨냉매 차단 실험은 헬륨용기에 액체헬륨을 채운 이후 더이상 액체헬륨을 공급하지 않는 제약이 따랐기 때문에 장시간의 실험은 불가능 하였다. 실제 상황에서는 액체헬륨이 지속적으로 공급될 것이기 때문에 더욱 악조건 속에서 실험이 진행되었다. 위와 같은 성능 검증 이후 KSTAR 장치에 필요한 14개의 전류인입선을 제작 및 설치하였다. 제작 및 설치 공정에서 수행된 시험 내용은 표 4와 같다.

III. 헬륨냉매 제어시스템

리드박스 운전 및 초전도 버스라인 진단을 위한 리드박스 내외부의 헬륨라인 및 헬륨라인에 설치되는 하드웨어의 설치 개념도는 그림 6 및 그림 7과 같다. 헬륨라인은 전류인입선, 열차폐체 및 초전도 버스라인 냉각용으로 분리되

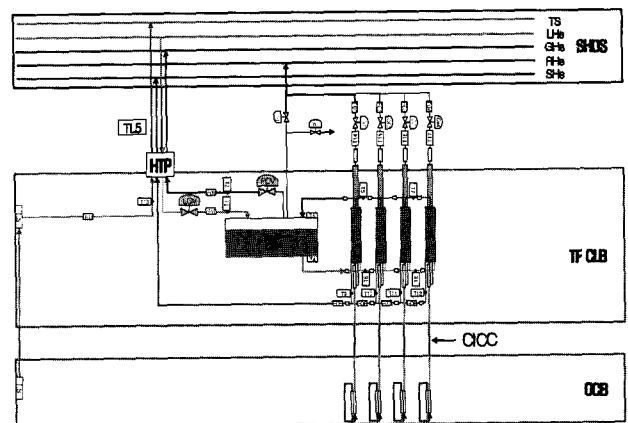


그림 6. TF 헬륨냉매 제어시스템

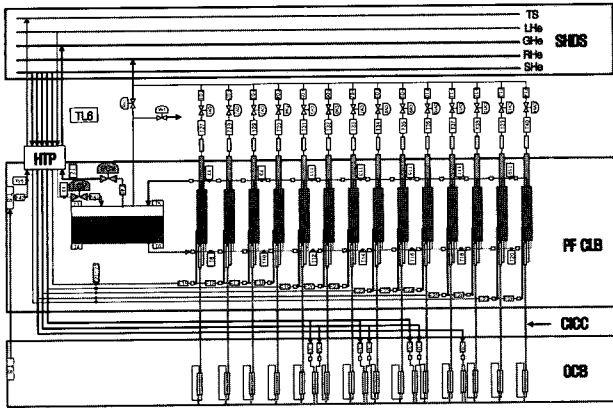


그림 7. PF 헬륨냉매 제어시스템

표 5. 헬륨 라인별 냉매 온도, 압력 및 유량 데이터

헬륨 상태	용도	온도 (K)	압력 (bar)	유량 (g/s)
LHe	CL 냉각	4.2	1.3	60
GHe	버퍼탱크 액체헬륨 기화	10~20	1.2	25
RHe	CL 냉각후 기화	300	1.2	50
	열차폐체 냉각	55	18	41
SHe	초전도 버스라인 냉각	4.2	3.5	96

어 있으며 표 5에 각 헬륨라인으로 흐르는 헬륨 유체의 온도, 압력 및 유량을 표기하였다. 각 헬륨라인에 부착되는 하드웨어들은 표 1과 같다. 초기 플라즈마 실험 시에는 총 14개의 전류인입선이 PF 자석용으로 설치되는 반면 보다 업그레이드 된 이른바 싱글널 (Single Null) 플라즈마 실험 시에 4개의 전류인입선이 추가로 설치되는 것을 고려하여 일부 하드웨어들은 4 세트를 더 설치하였다. 저온 밸브로는 "PHPK" 제품을 사용 하였으며 모두 전류인입선 운전엔 필요한 것들이다. 초전도 버스라인 냉각 헬륨 유량은 헬륨 냉동기 (HRS; Helium Refrigeration System)와 토카막 장치를 연결하는 2차 헬륨 분배계통 (SHDS; Secondary Helium Distribution System)에 설치된 저온밸브에 의해 조절되며 리드박스 내부에는 헬륨의 온도, 압력 및 유량을 측정하기 위한 센서들만 부착되어 있다. 전류인입선 냉각을 위한 액체헬륨은 HRS로부터 SHDS를 거쳐 헬륨 수송라인 (TL; Transfer Line) TL5 및 TL6를 통해 리드박스의 헬륨 저장용기인 버퍼탱크 (BT; Buffer Tank)로 공급된다. 버퍼탱크의 액체헬륨 레벨은 차압 레벨센서 (Differential Pressure Level Transmitter) 및 초전도 레벨센서로 측정되며 저온밸브 LCV (Level Control Valve)를 이용

표 6. 헬륨 라인 및 제어시스템 구축 관련 주요 시험 결과 요약

아이템	요구 조건	결과
HCS 제작전		
- 누설 검사	$<1 \times 10^{-9}$ mbar·l/s	$<1 \times 10^{-9}$ mbar·l/s
- 내전압 검사(E/B)	15 kV	15 kV, >10 GΩ
HCS 제작후		
- 내압검사	10 bar, $<1 \times 10^{-5}$ ppm	10 bar, $<1 \times 10^{-5}$ ppm
- 누설검사	$<1 \times 10^{-9}$ mbar·l/s	$<1 \times 10^{-9}$ mbar·l/s
I&C 제작 후		
- 냉각 시험	CL Line < 100 K, 48 hr	< 85 K, 48 hr
- 냉각 후 누설검사	$<1 \times 10^{-9}$ mbar·l/s	$<1 \times 10^{-9}$ mbar·l/s
- 히터제어 검사	$>$ 이슬점 온도	히터 : 100 °C CL : 27 °C
- 유량제어 검사	유량제어 최단시간	40 sec(P=100, I=10, D=0)

표 7. 중앙 인터록 시스템 알람 처리 기준

인터록 레벨	주요 인터록 설정
알람 1	TF Coil fast discharge
알람 2	TF Coil slow discharge
알람 3	PF Coil fast discharge
알람 4	Next shot inhibit
알람 5	Local Alarm

하여 조절된다. 버퍼탱크와 모든 전류인입선 헬륨용기는 1/2 인치 규격의 헬륨배관으로 상하단이 서로 병렬로 연결되어 있어 버퍼탱크 레벨 조정만으로 모든 전류인입선 헬륨용기내의 레벨을 동시에 조절하는 구조로 설계되어 있다. 모든 초전도 버스라인 냉각용 헬륨라인에는 유량계가 각각 하나씩 설치되어 온도, 압력 및 유량을 진단할 수 있으며 진단 결과는 중앙제어 및 인터록 시스템과 연계하여 초전도 케이블의 상전도 전이에 따른 파손 위험에 대처할 수 있도록 제어시스템이 구축되어 있다. 헬륨라인, 헬륨라인에 설치되는 하드웨어 및 로컬 제어시스템은 모두 일련의 조립, 검사 및 시험과정을 통해 성능 및 운전 거동특성 검증 프로세스를 거쳐 설치되었다 (표 6).

헬륨냉매 제어시스템 구성의 기초 개념도는 그림 8과 같다. 제어 대상은 모두 4종류로 구분되며 PID 제어가 가능

한 범용 제어장치인 "Eurotherm Model 3504" 컨트롤러를 이용하여 "Allen Bradley" PLC (Programmable Logic

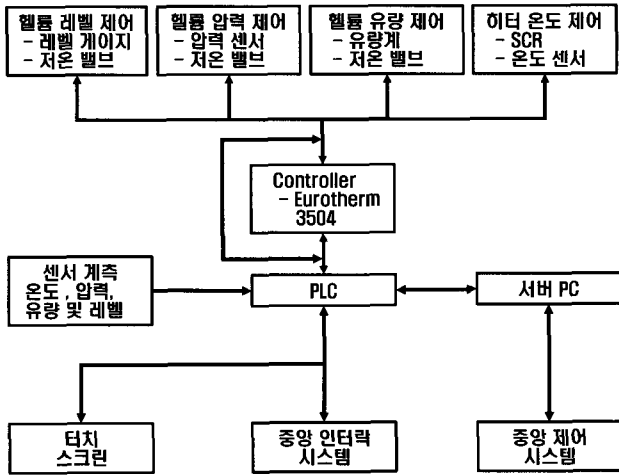


그림 8. 헬륨냉매 제어시스템 구축 개념도

Controller) 기반의 제어시스템을 구축하였다. 컨트롤러 3504를 통해 PID 컨트롤이 어렵거나 컨트롤러 장애발생 시의 제어 안정성을 고려하여 PLC에서 직접 제어가 가능하도록 추가적인 제어장치를 설치하였다. 로컬 제어시스템은 서버 PC를 통하여 중앙제어 시스템(SCS; Supervisory Control System)에서 직접 제어가 가능토록 하였다. 로컬 하드웨어의 단순한 장애 발생에 대해서는 PLC 자가진단, 알람신호 발생 및 시스템 보호를 위한 제어 프로그램이 구축되었다. 초전도 자석 운전에 직접적인 영향을 주는 인터락 신호는 표 7 및 표 8에 표기된 바와 같이 중앙제어 인터락 시스템(SIS; Supervisory Interlock System)에 알람 신호를 보내 초전도 자석을 보호하도록 구축하였다.

설치된 모든 헬륨배관은 2.5 ~ 10 bar 까지 헬륨가스로 가압하여 모든 용접부위에 대하여 스니퍼 프로브(Sniffer Probe) 및 비눗방울 누설검사를 수행하였다(표 6). 조립이

표 8. 중앙 인터락 시스템 연계 전류전송시스템 알람 신호 리스트

인터락 레벨	Failure mode	기준
레벨 1	- TF CLB 액체 헬륨 레벨 100 mm 이하	< 100 mm
	- TF CLB 헬륨 용기 압력 2 bar 이상	P > 2 bar
	- TF 전류인가 상태에서 전류인입선 유량 제어용 저온 밸브 제어 불능	< 50 %(0.6 g/s), 6 minutes
	- TF 버스라인 헬륨 온도 7 K 이상	T > 7.0 K
레벨 2	- TF CLB 액체 헬륨 레벨 150 mm 이하	< 150 mm
	- TF CLB 헬륨 용기 압력 1.7 bar 이상	P > 1.7 bar
	- TF 전류인가 상태에서 전류인입선 유량 제어용 저온 밸브 제어 불능	< 50 %(0.6 g/s), 4 minutes
	- TF 버스라인 헬륨 온도 6.5 K 이상	T > 6.5 K
레벨 3	- PF CLB 액체 헬륨 레벨 150 mm 이하	< 150 mm
	- PF CLB 헬륨 용기 압력 2 bar 이상	P > 2 bar
	- PF 전류인가 상태에서 전류인입선 유량 제어용 저온 밸브 제어 불능	< 50 %(0.6 g/s), 5 minutes
	- PF 버스라인 헬륨 온도 7 K 이상	T > 7.0 K
레벨 4	- PF/TF CLB 액체 헬륨 레벨 200 mm 이하	< 200 mm
	- PF/TF CLB 헬륨 용기 압력 1.5 bar 이상	P > 1.5 bar
	- PF/TF 전류인가 상태에서 전류인입선 유량 제어용 저온 밸브 제어 불능	< 50 %(0.6 g/s), 3 minutes
	- PF/TF 버스라인 헬륨 온도 6 K 이상	T > 6.0 K
레벨 5	- PF CLB 액체 헬륨 레벨 250 mm 이하	< 250 mm
	- PF CLB 헬륨 용기 압력 1.3 bar 이상	> 1.3 bar
	- PF 전류인가 상태에서 전류인입선 유량 제어용 저온 밸브 제어 불능	depend on I(kA), 0,33 g/s at I=0
	- TF CLB 액체 헬륨 레벨 250 mm 이하	< 250mm
	- TF CLB 헬륨 용기 압력 1.2 bar 이상	> 1.2 bar
	- TF 전류인가 상태에서 전류인입선 유량 제어용 저온 밸브 제어 불능	> 4 minutes, 0,44 g/s at I=0

완료된 이후에는 저온용기 전체를 진공배기한 후 진공누설 검출기를 이용하여 헬륨누설 여부를 검사하였다. 극저온 장치의 저온 누설 (Cold Leak) 여부를 검사하기 위하여 냉각이 가능한 리드박스 열차폐체 및 전류인입선 냉각계통에 대한 액체질소 냉각시험을 수행하였다. 저온 누설은 누설 검출기 한계 (1×10^{-9} mbar-l/s) 범위 내에서 검출되지 않았으며 저온밸브 및 전류인입선용 히터 온도제어도 병행하여 수행하였다. 저온밸브를 이용한 헬륨 유량제어는 3504 컨트롤러를 이용하여 PID 제어가 가능 하였으나 히터 온도 제어는 전류인입선 상단의 열용량이 커서 PID 셋팅값을 찾기가 매우 어려웠으며 히터에 공급되는 전기전력을 수동으로 조절하여 온도를 제어하는 것으로 계획을 변경 하였다.

IV. 결 론

극저온, 고진공, 고전압 및 대전류와 같은 극한의 환경에서 운전되는 전류인입 시스템 제작 및 설치를 완료하였다. 헬륨냉매 제어시스템은 장치 안전을 고려하여 이중 제어가 가능하도록 설치하였으며 중앙 인터록 및 제어시스템과 연계한 개별 시운전을 통해 운전 안정성을 검증 하였다. 다년간의 국가핵융합연구소 자체 연구개발 목표를 가지고 제작 및 설치 전 공정에 대해 위와 같은 극한 환경에 대한 검사 및 시험을 수행 하여 토카막 초전도 자석 전류전송에 있어서 핵심적인 전류인입 시스템 자체의 성능을 검증하였다.

감사의 글

본 논문은 국가핵융합연구소(NFRI; National Fusion Research Institute) KSTAR 프로젝트의 일환으로 작성되었다.

약어 설명

- 1, SC : Superconducting
- 2, OCB : Out-of-Cryostat Busline
- 3, ICB : In-Cryostat Busline
- 4, TS : Thermal Shield

- 5, LHe : Liquid Helium
- 6, GHe : Gas Helium
- 7, RHe : Recovery Helium
- 8, SHe : Supercritical Helium
- 9, CICC : Cable-In-Conduit Conductor
- 10, HTP : Helium Transfer Port
- 11, EB : Electrical Break
- 12, DB : Distribution Box
- 13, HCS : Helium Control System

참고문헌

- [1] Y. J. Lee, Y. M. Park, Y. S. Kim, S. B. Jin, W. C. Kim, Y. K. Oh, J. S. Bak, and G. S. Lee, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **14**, No. 2, June 2004.
- [2] Y. J. Lee, Y. M. Park, Y. S. Kim, N. H. Song, I. S. Woo, S. W. Kwag, Y. B. Chang, C. S. Kim, K. S. Lee, J. Y. Choi, E. N. Bang, H. T. Park, C. H. Choi, and J. S. Bak, IAEA Technical Meeting on Steady State Operation of Magnet Fusion Devices, Daejeon, Korea, 14-17 May 2007.
- [3] Y. J. Lee, Y. M. Park, Y. S. Kim, S. Y. Shim, E. N. Bang, S. W. Kwag, Y. B. Jang, J. S. Bak, G. S. Lee, V. E. Keilin, D. P. Ivanov, A. I. Boev, I. A. Kovalev, S. I. Novikov, V. I. Shcherbakov, M. P. Alekseev, O. P. Anashkin, and V. V. Lysenko, IAEA Technical Meeting on Steady State Operation of Magnet Fusion Devices and MHD of Advanced Scenarios, IPR, Gandhinagar, India, 1-5 February 2005.
- [4] 이영주, 김양수, 오영국, 김웅채, 박영민, 진승보, 박주식, 이경수, 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 2003.
- [5] A. V. Gavrilin and V. E. Keilin, 15th Magnet Technology Conf. Proc., Beijing, China, pp. 1254-1257, 1997.
- [6] Andrew V. Gavrilin, John R. Miller, Felix Schauer, and Steven W. Van Sciver, 17th Int. Conf. on

Magnet Technology, Geneva, Sept. 24-28, 2001.
[7] V. A. Glukhikh, S. A. Egorov, O. G. Filatov, V.
E. Korsunsky, E. A. Lamzin, S. E. Sychevsky, C.

M. Weber, R. R. Batchelder, K. D. Dixon, and V.
R. Karasik, IEEE Transactions on Applied Super-
conductivity, **10**, No. 1, March 2000.

Construction and Assembly of KSTAR Current Leads and the Helium Control System

N. H. Song, I. S. Woo, Y. J. Lee, N. H. Song, S. W. Kwag, E. N. Bang, K. S. Lee, J. S. Kim, Y. B. Jang, H. T. Park, J. S. Hong, Y. M. Park, Y. S. Kim, C. H. Choi, and J. S. Bak

National Fusion Research Institute(NFRI) Daejeon, 305-333

(Received August 22 2007)

KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) current lead system (CLS) has a role to interconnect magnet power supply (MPS) in room temperature (300 K) and superconducting (SC) bus-line, electrically. For the first plasma experiments, it should be assembled 4 current leads (CL) on toroidal field (TF) current lead box (CLB) and 14 leads on poloidal field (PF) CLB. Two current leads, with the design currents 17.5 kA, and SC bus-lines are connected in parallel to supply 35 kA DC currents on TF magnet. Whereas, it could supply 20 ~ 26 kA to each pairs of PF magnets during more than 350 s. At the cold terminals of the leads, there are joined SC bus-lines and it was constructed helium coolant control system, aside from main tokamak system, to protect heat flux through current leads and enhanced Joule heat due to supplied currents. Throughout the establishment processes, it was tested the high vacuum pumping, helium leak of the helium lines and hardwares mounted between the helium lines, flow controls for CL, and liquid nitrogen cool-down of possible parts (current leads, CL helium lines, and thermal shield helium lines for CLB), for the accomplishment of the required performances.

Keywords : KSTAR, current leads, current lead box, helium control system

* [E-mail] nhsong@nfrc.re.kr