

KSTAR 전류전송계통 진공배기계 구축 및 시운전

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

국가핵융합연구소, 대전 305-333

(2007년 8월 27일 받음)

KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) 전류전송계 (Current Feeder System)는 4.5 K의 저온에서 운전되는 초전도자석과 300 K의 실온에서 운전되는 전원장치 (Magnet Power Supply)를 전기적으로 연결하는 장치이다. 전류전송계는 최대 35 kA의 DC 전류가 인가되는 TF 자석용 및 350초간 20 ~ 26 kA의 펄스 전류가 인가되는 PF 자석용으로 분리되어 있으며 리드박스 내부는 전류인입선, 초전도버스라인, 열차폐체 및 냉각라인 등이 설치되어 있다. 리드박스과 초전도 버스라인 진공덕트는 KSTAR 주장치와는 별도로 진공배기 시스템이 구축되어 있으며, 전체적으로 아령 형상을 하고 있는 진공공간을 효율적으로 진공배기하기 위하여 버스라인 덕트와 주장치 저온용기 사이에 진공 분리막 (Vacuum Separator)이 설치되어 있다. 진공배기를 위한 초벌배기계는 로터리펌프 및 부스터펌프 (Mechanical Booster Pump)로 구축되었으며 고진공 배기계는 4대의 크라이오펌프 (Cryo-pump)로 구축되었다. 진공장치 운전을 위해 PLC 기반의 로컬 제어시스템을 구축하였고 장치 안전을 위한 자체 인터록과 중앙인터록 시스템 및 중앙제어 연계시스템이 함께 구축되어 있다. 전류전송계 설치완료 후 진공배기 시운전을 통해 배기시스템의 자가진단 및 리드박스 내부에 설치되어 있는 헬륨배관의 진공누설 검사를 완료하였으며, 액체질소를 사용하여 전류인입선 냉각시험을 완료하였다.

주제어 : KSTAR, 전류인입선, 리드박스, 토카막장치, 진공배기 시스템

I. 서 론

KSTAR 초전도 전류전송시스템은 상전도 버스와 초전도 버스라인을 전기적으로 연결하는 전류인입선, 초전도자석과 전류인입선을 연결하는 초전도버스라인, 전류인입선 및 초전도 버스라인의 운전에 필수적으로 수반되는 극저온 (4.2 K), 고진공($< 1 \times 10^{-4}$ mbar) 조건을 충족하기 위한 진공 및 열차폐 장치, 헬륨 냉각장치 및 하드웨어 제어시스템 등으로 구성되어있다[1, 2]. 초전도전류전송계통 및 토카막 장치의 배치는 그림 1과 같다. 토카막 장치에는 PF(Poloidal Field) 자석 14개와 TF (Toroidal Field) 자석 16개를 합하여 총 30개의 초전도자석이 설치되었다[3]. TF 자석은 35 kA의 직류 전류가 공급되는 반면, PF 자석은 초기 플라즈마운전 시에 10 kA 미만의 펄스전류 (20분에 70초간 전류공급)가 공급된다. 펄스로 운전되는 PF 자석은 TF 자석과는 달리 최대 3 kV의 전위를 띄게 된다. 상대적으로 대전류가 흐르지만 낮은 전압으로 운전되는 TF 자석의 운전 안정성을 위해 초전도 전류전송계통은 PF와 TF 자석용으로 분리되어 있다. 그림 1에서와 같이 토카막 장치 바로 하단의 초전도 버스라인에 진공분리막을 설치하여 토

카막 장치와 초전도전류전송계통의 진공배기시스템을 별도로 구축하였다. TF 전류전송계통에는 각각 4개의 전류인입선 및 초전도버스라인이 설치되어 있으며 PF 전류전송계통에는 총 22개의 초전도버스라인 및 14개의 전류인입선이 설치되어 있다. 전류인입선 설치 및 운전을 위한 리드박스(CLB; Current Lead Box)와 초전도버스라인 진공 덕

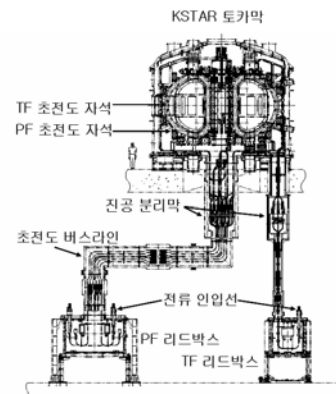


그림 1. KSTAR 초전도 전류전송계통 및 토카막 장치의 배치도

* [전자우편] iswoo@nfri.re.kr

트의 바로 안쪽에는 복사열 차단을 위한 열차폐체가 설치되어있다. 열차폐체는 두께 5 mm의 알루미늄 판과 냉각을 위한 1/2 인치 규격의 헬륨배관 및 30층의 MLI (Multi Layer Insulation)로 구성되어있다. MLI는 마일러 테일 (Aluminized Myler Tape)과 각 마일러 테일간 열 차단을 위한 섬유질의 스페이서 (Spacer)로 구성되어있다. 전류전송계통 내부에 설치된 모든 헬륨 냉각 배관에도 10층의 MLI가 부착되어 있으며 넓은 표면적 (전체 약 $1 \times 10^4 \text{ m}^2$)으로 인해 진공배기시 전류전송시스템 기체부하의 대부분을 차지하고 있다 ($4 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$). 또한, 고전압 절연을 위한 초전도버스타인과 전류인입선을 싸고 있는 복합소재와 진공공간 내에 지지구조물로 사용된 G10 소재도 기체 분출량이 많아 상온에서 고진공 도달에 방해 요소로 작용한다 ($2.6 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$).

II. 진공배기 시스템 구성

초전도전류전송시스템의 진공관련 자료는 표 1과 같다. 일반 실온 진공장치와는 달리 고전압 및 복사열차단을 위

표 1. 초전도 전류전송 시스템의 진공배기 관련 자료

	PF CLB	TF CLB
부피(m ³)	60	20
진공 표면적(m ²)	8000	2000
가스로드(mbar-L/s)	1.44	0.41
실온 진공조건(mbar)	<10 ⁻⁴	<10 ⁻⁴

한 섬유질 소재가 많이 포함되어있어 기체부하 값이 매우 크다. 반면, 저온 냉각이 시작되면 잔류기체의 응결이 시작되어 진공도가 좋아지기 때문에 실온에서 요구되는 진공도는 기체의 열전달 효과가 무시될 만큼 작아지는 조건인 $1 \times 10^{-4} \text{ mbar}$ 이내의 진공도를 만족시키면 된다[4]. 뿐만 아니라, 일반 진공 장치와는 달리 진공 표면에서 수분이 많이 나올 수 있기 때문에 수분 진공배기에 효과적인 크라이오펌프 (Cryo-pump)를 고진공배기 펌프로 선정하였다. 진공배기시스템의 기본구성 내용은 그림 2, 표 2에 나타내었다[5]. 초벌배기펌프는 PF 리드박스를 기준으로 1시간 정도의 시정수로 설계 되었으며, 고진공배기펌프는 PF 및 TF 리드박스에 대하여 각각 3시간 및 1시간으로 설계 되었다.

표 2. 진공배기 시스템 구성품목 리스트

구 성 품 목	PF CLB	TF CLB
Rotary Pump	250 m ³ /hr	
Roots Pump	2500 m ³ /hr	
Cryo Pump	30,000 l/s (H ₂ O)	10,000 l/s (H ₂ O)
Dry Pump	10,000 l/min (H ₂ O)	
Gate Valve	4 EA	2 EA
냉각수	25 °C, 18 lpm	25 °C, 7 lpm
Vacuum Gauge	Pirani2 EA Full Range1 EA Cold Cathode ...1 EA	Pirani2 EA Full Range1 EA Cold Cathode ...1 EA
PLC	Allen Bradley	
터치 스크린	14"	

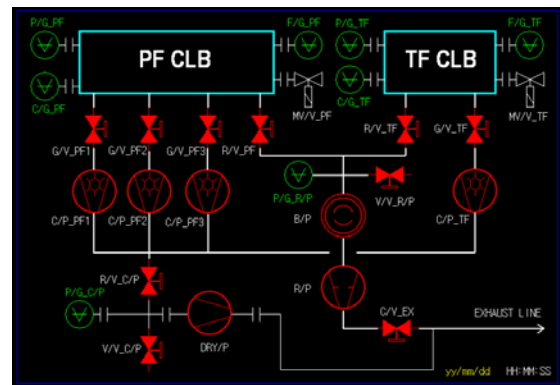


그림 2. 진공배기 시스템 구축 개념도

초벌배기시스템은 오일 역류현상 및 버스타인과 리드박스의 용적을 고려하여 “PFEIFFER” 제품의 로터리펌프 (DUO 250) 및 부스터펌프 (WKP 200)조합으로 구성하였다. 로터리 펌프 배기구에는 오일 트랩을 설치하였으며 펌프 오일의 수분오염을 줄이기 위해 밸러스트 (Ballast) 밸브를 설치하였다. 초기에 로터리 펌프 가동으로 진공도가 10mbar에 도달하면 부스터 펌프가 가동되어 $1 \times 10^{-2} \text{ mbar}$ 이하로 초벌배기를 진행하는 방식으로 구축 되었다. 로터리 펌프 및 부스터 펌프는 모두 공랭식을 채택하였다. 크라이오펌프는 “GENESIS ICP 300Q” 제품을 사용하였으며 보조펌프로는 크라이오펌프가 오일에 의해 오염되는 것을 방지하기 위해 “EDWARDS” 제품인 드라이펌프 (Dry-pump)를 설치하였다. 드라이펌프 및 크라이오펌프는 모두 수냉식으로 운전된다. 크라이오펌프를 이용한 고진공배기 시스템은 전용 컨트롤러를 이용하여 시스템 전체가 자동제어로 운전된다. 드라이펌프로 90 mbar 까지 크라이오펌프 내부를 진

공배기 하면 전용 컨트롤러가 진공누설 검사를 진행한 후 크라이오펌프 냉각 및 고진공배기가 시작된다. 크라이오펌프 내부는 80 K 이내의 온도를 유지하는 1차 냉각단과 셰브론 (Chevron) 타입의 배플 (Baffle), 15 K 이내의 온도를 유지하는 2차 냉각단 및 소형 냉동기 등으로 구성되어 있으며 1차 냉각단과 배플에서 대부분의 수분이 응축되고 2차 냉각단에서 잔류 기체들이 응축된다. 크라이오펌프 내부가 포화되면 1차 및 2차 냉각단의 온도가 상승하게 되는데, 1차 냉각단의 온도가 100 K 가까이 상승하게 되면 펌프를 재생 (Regeneration) 하게 된다. 재생을 시작할 경우에 기체질소를 먼저 흘려보내면서 펌프 내부에 설치된 히터를 가동하는 구조로 설계되어 있다. 크라이오펌프 재생 주기는 시스템을 냉각하지 않았을 때는 3개월이 넘는 것으로 관측 되었다. 토카막 장치의 안정적 운전을 위하여 장치냉각 이후에 재생 주기를 다시 측정할 필요가 있으며 재생주기의 절반이 되는 시점에서 플라즈마 실험을 하지 않는 야간에 재생을 하게 된다.

크라이오펌프 및 드라이펌프는 냉각수가 필요하며 토카막 장치가 운전되는 수개월 동안 안정적으로 운전되어야 하기 때문에 KSTAR 장치 전반에 필요한 냉각수 시스템에 문제가 발생할 경우를 고려하여 별도의 냉각수 순환장치를 추가로 설치하였다. 게이트밸브 개폐용 공압라인 또한 별도의 공기 압축기를 구비 하였으며 정전을 대비하여 드라이펌프용으로 공급되는 기체질소를 압축공기 대신 사용할 수 있도록 배치하였다.

III. 진공배기 제어시스템 구성

진공배기 시스템을 위한 전용 제어시스템 구성은 그림 3과 같다. 전류전송계의 진공도는 초전도 토카막을 운전할 때 안정된 상태로 유지되어야 하며 진공도의 변화에 따라 즉시 제어가 되어야 한다. 시스템 안정성이 매우 중요하기 때문에 PLC (Programmable Logic Controller) 기반의 로컬 (Local) 제어시스템을 구축하였다. 그림 3에 나타낸 바와 같이 PLC를 통해 모든 하드웨어들을 제어하는 구조이며, 로컬 시스템에 PC를 두어 EPICS(Experiment Physics and Industrial Control system) 기반의 중앙제어 시스템과 연결되고, PLC 자체 인터록 및 중앙제어 연계 인터록 시스템이 함께 구축되어 있다. KSTAR 장치용 냉각수 순환

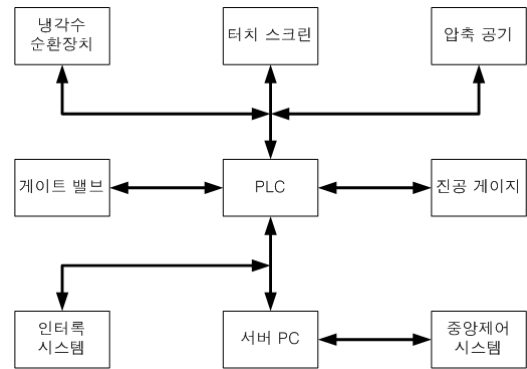


그림 3. 제어시스템 구축 개념도

계통에 장애가 발생할 경우, 추가로 설치된 냉각수 순환장치가 구동되며, 압축공기 공급이 중단될 경우에도 추가로 설치된 공기 압축기가 자동으로 운전된다. 진공펌프와 게이트 밸브는 모두 터치스크린을 통해 직접 제어가 가능하도록 설계되어 있으며, 정전과 유틸리티 고장에 대한 대책 또한 프로그래밍 되어 있다. 제어시스템에 연결된 모든 제어/계측 장비는 별도의 UPS (Uninterrupted Power Supply)에 연결되어 일반전원 정전 시에도 시스템을 안전한 상태로 유지할 수 있다. 초벌배기 펌프 가동 중에는 크라이오펌프와 전류전송장치 사이에 설치된 게이트 밸브를 열수 없도록 하였으며, 크라이오펌프를 정상가동 시킨 후 고진공 배기를 위한 게이트 밸브를 열 경우에는 초벌배기용 게이트 밸브가 열리지 않도록 하였다. 초벌배기 시스템의 배기라인에는 솔레노이드(Solenoid) 밸브를 설치하여 초벌배기 펌프 가동을 중지할 경우에 펌프와 전류전송장치 사이의 배관이 자동으로 벤트(Vent)되도록 하여 펌프 오일이 역류하지 않도록 구축되어 있다.

하드웨어 제어와 관련한 인터록은 PLC 프로그램을 통해 자가진단 및 제어가 구현되며 토카막 장치 안전에 직접적인 영향을 주는 진공도 변화는 중앙인터록 시스템과 연계하여 구동된다. 정상가동 시 진공도가 상승하게 되면 3단계에 걸쳐 중앙인터록 시스템에 경보신호를 보내게 된다. 최초 경보신호는 1×10^{-5} mbar에서, 2단계 알람 신호는 1×10^{-4} mbar에서, 최종 3단계 경보신호는 1×10^{-3} mbar에서 발생하도록 프로그램 되어있다. 진공도가 1×10^{-4} mbar 이상 상승하게 되면 장치 내의 잔류기체에 의한 열전달이 커져 장치 내부에 설치된 전류인입선, 초전도버스라인 등 저온구조물의 온도를 상승시키는 요인이 되며

1×10^{-3} mbar 이상으로 상승하게 되면 상전도전이 발생 시퀀치 (Quench) 보호시스템 작동에 따른 고전압 발생 (~ 6 kV)과 같은 초전도자석 운전과정에서의 진공방전의 위험이 커지기 때문에 중앙인터록 제어를 통해 초전도자석으로 공급된 전류를 급히 중단하도록 토카막 장치 전체 시스템이 구축되어있다. 또한, 각 경보신호가 발생하는 진공도를 터치스크린 및 중앙제어 시스템에서 직접 세팅할 수 있도록 하였다. 전류전송장치 내의 헬륨기체 분압은 별도로 설치된 RGA (Residual Gas Analyzer)를 이용하여 측정되며 중앙제어 시스템에서 직접 관리하도록 구축되었다. 전류전송장치 내에 헬륨누설이 발생할 경우, 크라이오펌프로는 대처하기가 어렵기 때문에 별도의 TMP (Turbo Molecular Pump) 설치를 진행 중이다. 이 TMP 기반의 진공배기 장치는 별도로 PLC 기반의 로컬 제어시스템을 이용하여 수동으로 운전되도록 설계되었다.

IV. 진공배기 시험 및 결과

진공과 관련된 모든 부품들은 개별적으로 진공누설 시험을 거친 이후에 설치되었다. 모든 진공부품의 진공누설량 허용 기준은 헬륨가스를 기준으로 1×10^{-9} mbar-l/s 이내이다. 하드웨어 설치와 PLC 프로그래밍 이후 로컬 인터록 및 제어관련 시험을 통해 시스템 자체의 운전 안정성을 확보하였다. 도즈 (Dose) 밸브를 이용하여 인공적으로 가스를 누출시켜 3단계 알람 신호처리 시험을 수행하여 시스템의 안전성을 검증 하였으며 전류 전송시스템의 주요 진공배기 시험을 완료하였다. 진공배기 시험에서 가장 중요한 이슈는 전류전송시스템 내에 설치된 헬륨배관의 헬륨누설

여부이다. 설치된 모든 배관들은 용접 이후에 개별 누설검사를 시행 하였으며 조립완료 이후에도 전류전송시스템 전체를 진공배기한 후 헬륨 누설 측정 장비를 설치하고 각 헬륨배관에 10 bar 까지 기체헬륨을 가압하여 누설 여부를 측정하였다. 저온 헬륨배관이 냉각되면서 발생할 수 있는 저온 진공누설 (Cold Leak) 여부를 검사하기 위하여 저온 냉각이 가능한 전류인입선과 리드박스, 열차폐체는 액체질소를 이용하여 100 K 이하로 냉각한 후에 누설검사를 실시하였다. 누설시험 결과, 헬륨가스 누설량은 기준치인 1×10^{-9} mbar-l/s 이하를 만족 하였으며 추가로 설치된 RGA 에서도 헬륨이 전혀 검출되지 않았다.

PF 및 TF 전류전송계통의 진공도 변화는 그림 4와 같다. 초벌배기부터 고진공 배기까지 완료되는데 약 일주일 정도의 시간이 소요되었다. 리드박스가 설치된 후 리드박스 자체만 진공배기 했을 경우의 진공도는 2.7×10^{-7} mbar 이었으며, 초전도버스라인이 추가 설치되고 난 후의 진공도는 2×10^{-6} mbar 로 초전도버스라인의 진공표면적 및 내부 장치의 기체부하 등에 의한 진공도의 차이를 확인할 수 있었다. 진공배기시험 후 진공을 파기할 때에는 공기중의 수분에 의해 장치 내부의 표면이 수분으로 오염되지 않게 수분을 제거한 건조한 공기나 기체질소를 사용하였다.

V. 결 론

KSTAR 초전도전류전송시스템을 위한 진공배기시스템 구축 및 성능시험을 완료하였다. 전류전송시스템의 외부 및 내부 헬륨배관의 헬륨 누설량은 허용치인 1×10^{-9} mbar-l/s 이하를 만족하였다. 실온에서의 도달 진공도는 계절에 관계없이 1×10^{-4} mbar 이하의 결과를 기준값을 만족하였다. 로컬 제어시스템과 중앙제어 연계 인터록 및 알람 신호처리 시험을 통해 수개월에 걸친 장기간 운전 안정성을 검증하였다. 추가로, 저온냉각시에 발생할 수 있는 저온 진공누설로부터 장치를 보호하기 위하여 기체헬륨의 진공배기에 효율적인 TMP 설치 및 구동시험을 진행 중이다. PF 및 TF 리드박스에 기체헬륨 기준으로 2000 l/s 규격의 TMP를 각각 2대 및 1대씩 설치된다.

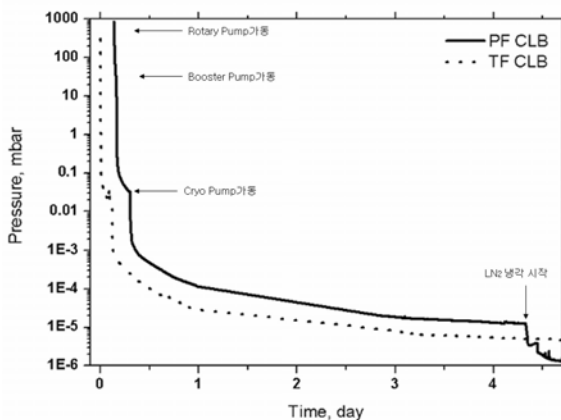


그림 4 PF 및 TF 전류전송장치의 진공도 변화 그래프.

감사의 글

본 논문은 과학기술부 차세대 핵융합연구장치 개발·제작
과제의 지원으로 작성되었다.

참고문헌

- [1] Y. M. Park, Y. J. Lee, S. W. Kwag, Y. B. Chang, C. S. Kim, K. S. Lee, N. H. Song, I. S. Woo, J. Y. Choi, E. N. Bang, C. H. Choi, and J. S. Bak, "Development Progress of the KSTAR Current Feeder System", IAEA Technical Meeting on Steady State Operation of Magnet Fusion Devices, Daejeon, Korea, **14-17** May 2007.
- [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, "Progress on KSTAR Current Lead System Development", IAEA Technical Meeting on Steady State Operation of Magnet Fusion Devices, Daejeon, Korea, **14-17** May 2007.
- [3] G. S. Lee, "Design and construction of the KSTAR tokamak", Nuclear Fusion, vol. **41**, pp. 1515 - 1523, 2001.
- [4] Guy K. White, "Experimental Techniques in Low-temperature Physics", Clarendon Press, Oxford, 1979.
- [5] 배석희, 인상렬, 정광화, 이영백, 신용현, "진공공학", 과학기술신서 **18**, 2000.

Construction and Tests of the Vacuum Pumping System for KSTAR Current Feeder System

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

National Fusion Research Institute(NFRI), Daejeon, 305-33

(Received August 27 2007)

Current feeder system (CFS) for Korea superconducting tokamak advanced research (KSTAR) project plays a role to interconnect magnet power supply (MPS) and superconducting (SC) magnets through the normal bus-bar at the room temperature (300 K) environment and the SC bus-line at the low temperature (4.5 K) environment. It is divided by two systems, i.e., toroidal field system which operates at 35 kA DC currents and poloidal field system wherein 20~26 kA pulsed currents are applied during 350 s transient time. Aside from the vacuum system of main cryostat, an independent vacuum system was constructed for the CFS in which a roughing system is consisted by a rotary and a mechanical booster pump and a high vacuum system is developed by four cryo-pumps with one dry pump as a backing pump. A self interlock and its control system, and a supervisory interlock and its control system are also established for the operational reliability as well. The entire CFS was completely tested including the reliability of local/supervisory control/interlock, helium gas leakage, vacuum pressure, and so on.

Keywords : KSTAR, current leads, current lead box, tokamak, vacuum pumping system

*[E-mail] : iswoo@nfri.re.kr