

## 초전도 핵융합장치의 고진공 및 극저온 냉각 운전

장 현 식, 김 광 표, 조 광 운  
국가핵융합연구소 KSTAR 운영사업단

### 1. 서 론

KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)의 토카막으로서의 가장 큰 특징은 플라즈마 제어에 사용되는 모든 자석 코일들이 액체헬륨(LHe) 온도의 극저온으로 냉각시켜야만 정상운전이 가능한 저온초전도체(Nb<sub>3</sub>Sn, NbTi)를 소재로 제작되었다는 것이다. 이러한 저온초전도체의 채용으로 일반 구리 자석 대비 저전력·고자장으로 장시간(수백~수천초) 안정적인 플라즈마 실험이 가능해져 미래 발전 장치로서의 토카막의 목표와 부합하기도 한다. 그러나 초전도 자석들의 운전 가능 상태를 계속 보존하기 위해서는 고진공 및 극저온을 발생하고 유지시키는 특수 장비가 필수적이다. KSTAR에서는 그러한 목적으로 각각 고진공과 극저온을 발생·유지시키는 VPS(Vacuum Pumping System)와 HRS(Helium Refrigeration System)를 설치하였다.

### 2. VPS의 목적과 현황

KSTAR의 VPS는 크게 Vacuum Vessel용(VV-VPS) 그리고 Cryostat용(CR-VPS)으로 분류할 수 있다. VV-VPS의 주목적은 실제 플라즈마 반응이 일어나는 KSTAR Vacuum Vessel을 최대한 배기시켜 플라즈마가 생성되고 반응할 수 있는 고진공상태를 유지하는 것이다. CR-VPS의 경우 Cryostat를 배기시켜 내부에 있는 초전도 자석을 비롯한 KSTAR의 모든 극저온 냉각대상물들을 외부의 상온 전도열로부터 보호하는 단열진공을 생성하는 것이 주목적이다. 각각의 VPS는 터보 펌프 그룹, 러핑 및 backing 펌프 그룹, 그리고 각종 운전 관련 장비들로 이루어져 있으며 터보 펌프의 고속 회전 시KSTAR 발생 자기장으로 인한 뒤틀림을 방지하기 위해서 pumping duct를 사용하여 낮은 자기장 영역에 설치하

였다 [1].

KSTAR VPS의 설치 현황 조감도는 그림 1에서와 같고 관련 주요 장비들의 사양은 표 1에 나열하였다.

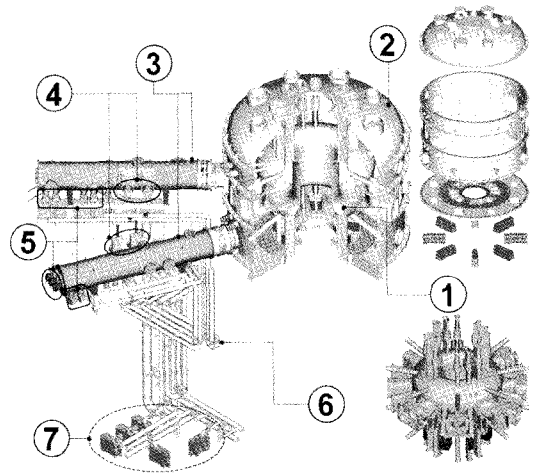


그림 1. KSTAR VPS 현황 3차원 조감도(①~⑦ 번호들은 표 1 참조).

표 1. KSTAR VPS 관련 장비 사양.

		Vacuum Vessel	Cryostat
배기 진공 용기	직경/높이:	① 6 m/3.4 m	② 8.8 m/8.6 m
	내부면적:	100 m <sup>2</sup>	35,000 m <sup>2</sup>
	부피:	100 m <sup>3</sup>	450 m <sup>3</sup>
	포트:	72 ea	102 ea
③ 2기의 Main pumping duct	직경/길이/부피	1.6 m/8 m/10 m <sup>3</sup> 용기와 30 mm epoxy glass로 절연	
④ 터보 펌프 (TMP)	8×2,800 l/s	4×2,800 l/s 3×1,900 l/s	
⑤ 저온 펌프 (Cryopump)	2×10,000 l/s	2×10,000 l/s	
⑥ 러핑/backing pumping duct	직경 ISO200/ISO250 길이 30 m (VV-), 25 m(CR-)		
⑦ 전식 러핑/ backing 펌프	2×1,800 m <sup>3</sup> /h	3×1,800 m <sup>3</sup> /h	
진공 게이지	10 ea	8 ea	
게이트 밸브	23 ea	21 ea	
용기별 각 1기의 잔류 기체 분석기 (RGA) 장착			

### 3. HRS의 목적과 현황

KSTAR 토카막을 정상적으로 운전하기 위해서는 고온의 플라즈마를 가두고 제어할 수 있는 자기장을 만드는 총 30개의 초전도 (superconducting: SC) 자석들을 LHe 온도 (5 K) 영역에서 초전도 상태로 유지하여야 한다. 이를 위해서는 자석 코일들뿐 아니라 코일들을 보강하고 지지하는 각종 구조물, 극저온 전류인입 시스템 (SC bus-line과 Current Lead: SC BL과 CL), 그리고 열차폐 시스템(Thermal Shield: TS)을 각각의 적절한 극저온 상태로 냉각 및 냉각 상태를 유지시켜야 하는데 이러한 목적을 위해서 HRS가 설치되었다 [2].

KSTAR의 극저온 냉각대상물들의 총질량은 300여 톤에 달하며 HRS를 이용한 냉각을 위해서는 LHe 환산 약 18,000 리터의 양이 필요하다. 이러한 대량의 극저온 헬륨을 효율적으로 생산하고 KSTAR에 안정적으로 공급하기 위해 설치된 HRS는 운전에 필요한 헬륨을 저장하고 처리하기 위한 GMS (Gas Management System), 상온상압의 기체헬륨을 상온고압으로 압축시키는 WCS (Warm Compression System), WCS에서 압축된 헬륨을 팽창시킴으로써 극저온의 헬륨을 생산하는 C/B (Cold Box), 그리고 C/B에서 생산된 극저온의 헬륨을 KSTAR 냉각에 적합한 형태로 변환 및 분배하는 D/B (Distribution Box)로 구성된다. HRS C/B의 총 냉각성능은 설계치 기준 4.5 K에서 energy 동등 9 kW이다. 그림 2에서는 KSTAR HRS의 설치 현황을 보여주고 있으며 표 2는 HRS 각 시스템의 개략적인 사양을 표기하였다.

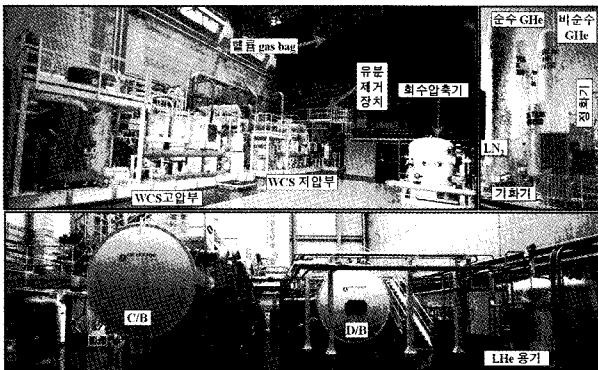


그림 2. KSTAR HRS 설치 현황 사진.

표 2. KSTAR HRS 사양 개요.

Gas Management System		
LHe 용기	4 m <sup>3</sup> (4.5 K 1.3 bar)	
기체헬륨 (GHe) 용기	순수용: 4×100 m <sup>3</sup> (25 bar 이하 저장) 비순수용: 1×100 m <sup>3</sup> (25 bar 이하 저장)	
GHe 회수 Bag	2×50 m <sup>3</sup> (대기압으로 회수)	
GHe 회수 가열기	24 kW 최고 32 g/s의 저온 GHe 상온으로 가열	
GHe 회수 압축기	Sauer&Sohn 왕복구동식 3기, 최대 32 g/s를 최고 25 bar로 압축 최종 유분 함량 < 8 ppb	
GHe 정화기	최고 700 ppm 오염 GHe를 최대 32 g/s로 50 hr 연속 정화 가능 (재생에 12 hr 소요) GHe 최종 불순물 농도 < 1 ppm	
LN <sub>2</sub> 용기	10 m <sup>3</sup> (정화기 내부 흡착기 냉각용)	
LN <sub>2</sub> 기화기	600 m <sup>3</sup> /hr (정화기 내부 흡착기 재생용)	
Warm Compression System		
모터 unit	저압부: Siemens 5010S (2×0.6 MW) 고압부: Siemens 5810S (2×1.2 MW)	
압축기 unit	저압부: MYCOM 400S-M 2기 고압부: MYCOM 320S-L 2기	
운전 압력	저압부: 1 → 5 bar 압축 (0.6 kg/s) 고압부: 5 → 22 bar 압축 (1.1 kg/s)	
유분 제거 장치	Coalescer 3기 Charcoal bed 및 filter 각 1기 최종 유분 함량 < 10 ppb	
Cold Box		
냉각 성능	4.5 K에서 9 kW (Exergy 동등)	
팽창 터빈 (Air Liquide 제작)	Model TC4-500, TC5-500 각 3기 Oil-free static gas (GHe) bearing Isentropic 효율: 0.7~0.8	
열교환기 (Linde 제작)	11기의 Al-plate fin 형식 각 4/4/1/2기씩 4개의 그룹으로 배열	
흡착기	80 K	Silica-gel 2 기, 병렬 연결, N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> /Ar 흡착
	20 K	Charcoal 1 기, H <sub>2</sub> /Ne 흡착
극저온 밸브	28 기 (Flowserve 제작)	
생산 냉매	GHe	140~270 g/s (55 K 18 bar), TS 냉각
	LHe	17.4 g/s (4.5 K 1.3 bar), CL 냉각 상온까지 가열됨
	초임계헬륨 (SHe)	45~80 g/s (4.5 K 5.5 bar), SC BL 냉각
	등온냉각	4.5 K에서 5.3 kW, 초전도 자석 냉각 (4.3 K 1.09 bar 250 g/s LHe 증발)
Distribution Box		
IHI 저온 회전 기계	SHe 순환기	2기, foil-type dynamic gas bearing 최대 400 g/s 4.4 K SHe을 3 bar 가압 Isentropic 효율: 0.68
	극저온 GHe 압축기	1기, ball bearing type 최대 310 g/s 4.3 K GHe을 0.2 bar 가압 Isentropic 효율: 0.68
Thermal Damper (TD)	6 m <sup>3</sup> 저온 용기, 최대 4 m <sup>3</sup> 의 LHe에 열교환기가 잠김	
열교환기 (Nordon 제작)	Al-plate fin thermo-siphon type TD의 LHe 증발로 process SHe 냉각	
극저온 밸브	49 기 (Flowserve 제작)	
열침입	4.5 K에서 300 W 이하	

### 4. VPS 및 HRS 운전 결과

VPS와 HRS는 KSTAR와 연계 운전 전 각각 별도의 단독 시운전을 통해 KSTAR 운전 요구 조건을 만족시키는 것을 확인하였다 [3,4].

KSTAR 운전을 위한 Vacuum Vessel과 Cryostat의 경우 목표 진공도는 각각  $5 \times 10^{-7}$  mbar과  $1 \times 10^{-4}$  mbar이다. 그림 3에서 보이는 바와 같이 KSTAR VPS의 정상 작동으로 전 실험 기간 동안 목표 진공도가 달성 및 안정적으로 유지되었다. 특히 Cryostat의 경우 KSTAR의 냉각으로 인하여 최저 진공값이  $10^{-8}$  mbar 영역에 머무를 수 있었다 (그림 3(c) 참조).

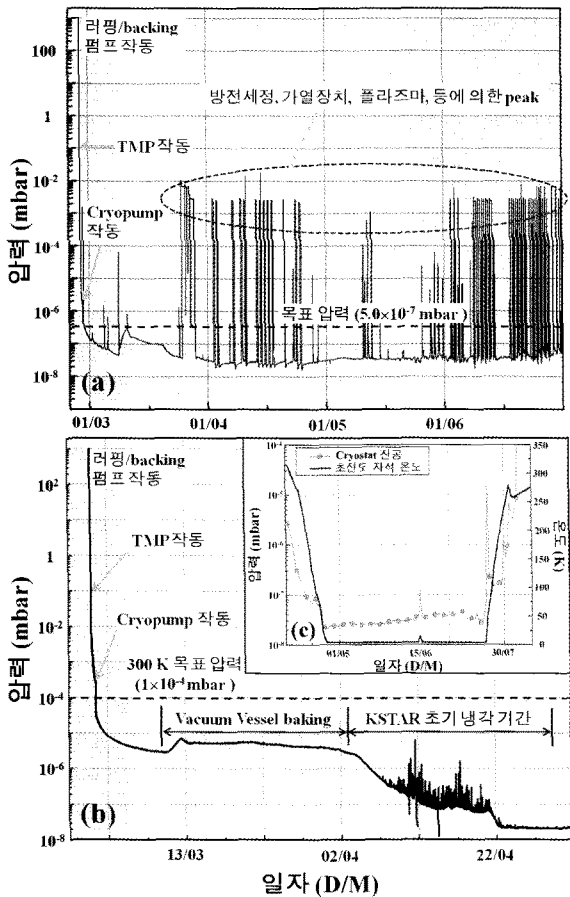


그림 3. 초기 플라즈마 전후 Vacuum Vessel 진공 (a) 및 Cryostat 진공 (b); KSTAR 냉각 중 cryostat 진공과 초전도 자석 온도 (c).

그림 4는 상온에서 KSTAR 운전온도(약 5 K)까지의 초기 냉각(a)과 다시 상온까지의

승온(b) 과정을 보여주고 있다. CICC(cable-in-conduit conductor)로 이루어진 초전도 자석과 SC BL의 냉각·승온용 GHe는 별도의 “cool down” 및 “by-pass” 전용라인에서 공급/회수하였고, TS와 CL의 경우 정상운전용 공급/회수 라인을 이용하였다 [2]. 온도차에 의한 냉각대상물의 급격한 변형을 방지하기 위하여 공급/회수 GHe의 온도차는 50 K 이하를 유지하였고, 상온[운전온도]에서 운전온도[상온]까지의 냉각[승온]은 약 21[14]일 소모되었으며 공급 GHe의 온도는 시간당 평균 0.6[0.73] K 감소[증가]시켰다. 공급 GHe 온도의 감소는 순차적으로 C/B의 팽창 터빈 T1~T6를 가동시키면서 그리고 승온 시 온도의 증가는 회수되는 GHe에 의해 냉각되는 공급 GHe에 인위적으로 300 K GHe을 혼합시켜서 달성하였다.

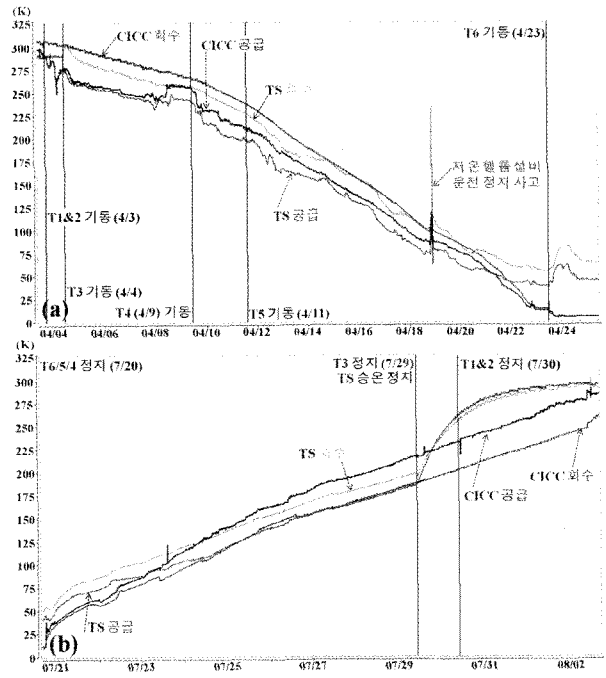


그림 4. KSTAR 초기 냉각(a) 및 승온(b) 곡선.

초기 냉각부터 승온까지 4개월의 KSTAR 운전 기간 동안 HRS는 연속적으로 안정되게 운전되었다. 초기 플라즈마 발생 시 가장 열유체적 요동이 심한 냉각대상물은 poloidal field (PF) 초전도 코일인데, 급격한 코일 내부의 열유체적 요동과 PF 자석 냉각용 SHe 순환기 [2] 입출구 압력 변동에도 불구하고 그림 5에서와 같이 순환기의 입출구 온도,

회전속도, 그리고 SHe 처리 유량은 큰 변화 없이 장시간 안정적으로 지속되었다.

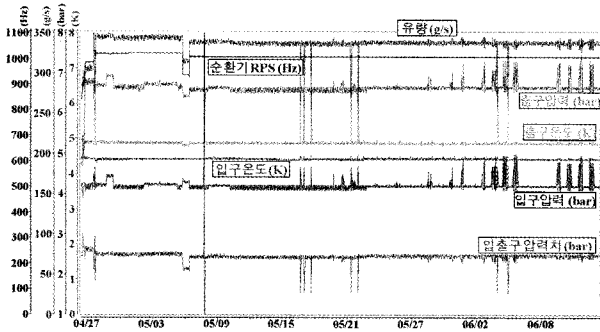


그림 5. 약 1.5 개월에 걸친 PF 자석 냉각용 SHe 순환기 입출구 SHe의 각종 특성.

### 5. 결 론

VPS와 HRS의 정상적인 운전에 힘입어 KSTAR 운영을 위한 가장 기초적인 진공과 극저온 환경이 조성되어 초기 플라즈마 발생을 성공적으로 완수하였다. 앞으로 설치될 Vacuum Vessel용과 플라즈마 가열장치인 NBI (Neutral Beam Injection) 시스템용 4 K cryopump와 관련 극저온 헬륨 냉각 시스템이 완수되면 더 장시간의 그리고 고온의 플라즈마를 발생시켜 KSTAR의 임무 완수에 한 발짝 더 다가설 것이다.

### 참고문헌

- [1] I.-K. Yu, *et al.*, "Design and test of the KSTAR vacuum pumping system", *Fusion Engineering and Design* 83, 117-122 (2008).
- [2] H.-S. Chang, *et al.*, "The on-site status of the KSTAR helium refrigeration system", *Advances in Cryogenic Engineering* 53, 437-444 (2007).
- [3] K.P. Kim, *et al.*, "Overview of the KSTAR vacuum pumping system", 25<sup>th</sup> Symposium on Fusion Technology (SOFT) Rostock, Germany (2008).
- [4] H.-S. Chang, *et al.*, "Commissioning results of the KSTAR helium refrigeration system", *International Cryogenic Engineering Conference 22 (ICEC-22)* Seoul, Korea (2008).

### 저자이력



장현식(張賢植)  
2001년 포항공과대학교 물리학과 이학박사, 현재 국가핵융합연구소 KSTAR 운영사업단 선임연구원.  
(chsik@nfri.re.kr)



김광표(金桃杓)  
2005년 한밭대학교 기계설계공학과 석사, 현재 국가핵융합연구소 KSTAR 운영사업단 장치운전팀 기술원.  
(kpkim@nfri.re.kr)



조광운(趙光雲)  
1992년 건국대학교 기계공학과 석사, 현재 국가핵융합연구소 KSTAR 운영사업단 저온장치팀장.  
(kwcho@nfri.re.kr)