

## KSTAR 저온헬륨설비 시운전 결과

## Commissioning results of the KSTAR helium refrigeration system

조광운<sup>1\*</sup>, 장현식<sup>2</sup>, 박동성<sup>2</sup>, 주재준<sup>2</sup>, 문경모<sup>2</sup>, 김양수<sup>2</sup>, 박주식<sup>2</sup>, 양승한<sup>3</sup>, 에릭포브<sup>4</sup>K.W. Cho<sup>1\*</sup>, H.-S. Chang<sup>2</sup>, D.S. Park<sup>2</sup>, J.J. Joo<sup>2</sup>, K.M. Moon<sup>2</sup>, Y.S. Kim<sup>2</sup>, J.S. Bak<sup>2</sup>,  
S.H. Yang<sup>3</sup>, E. Fauve<sup>4</sup>

**Abstract:** To keep the superconducting (SC) magnet coils of KSTAR at proper operating conditions, not only the coils but also other cold components, such as thermal shields (TS), magnet structures, SC bus-lines (BL), and current leads (CL) must be maintained at their respective cryogenic temperatures. A helium refrigeration system (HRS) with an exergetic equivalent cooling power of 9 kW at 4.5 K without liquid nitrogen (LN<sub>2</sub>) pre-cooling has been manufactured and installed for such purposes. In this proceeding, we will present the commissioning and initial operation results of the KSTAR HRS. Circuits which can simulate the thermal loads and pressure drops corresponding to the cooling channels of each cold component of KSTAR have been integrated into the helium distribution system of the HRS. Using those circuits, the performance and the capability of the HRS, to fulfill the mission of establishing the appropriate operating condition for the KSTAR SC magnet coils, have been successfully demonstrated.

**Key Words:** KSTAR, helium refrigeration system, cold box, distribution box, circulator.

## 1. 서 론

국가핵융합연구소(NFRI)에 건설된 차세대 초전도 핵융합연구장치인 KSTAR 토카막에는 초전도 성분이 Nb<sub>3</sub>Sn 또는 NbTi로 이루어진 30개의 대형 초전도 자석 코일이 사용된다. KSTAR 장치가 정상적으로 플라즈마를 가두고 제어하기 위해서는 이러한 코일들을 액체헬륨 (liquid helium: LHe) 온도 (5 K) 영역에서 초전도 상태로 유지하여야 한다. 그러기 위해서는 자석 코일들 뿐 아니라 자석 지지구조물, 각종 전류인

입 시스템 (SC BL과 CL), 그리고 열차폐 시스템(TS)을 각각의 적절한 극저온 상태로 냉각 및 유지시켜야 하는데 이러한 목적을 수행하기 위해서 저온헬륨설비 (HRS)가 설치되었다 [1].

KSTAR 장치의 극저온 냉각대상물 질량은 300여 톤에 달하는데 냉각을 위해서는 약 18,000 리터 분량의 액체헬륨이 사용된다. 이러한 대량의 극저온 헬륨을 효율적으로 생산·공급하기 위해 설치된 HRS는 운전 전에 필요한 헬륨을 저장하고 처리하기 위한 Gas Management System (GMS), 상온상압의 기체헬륨을 상온고압으로 압축시키는 Warm Compression System (WCS), WCS에서 압축된 헬륨을 팽창시킴으로써 극저온의 헬륨을 생산하는 Cold Box (C/B), 그리고 C/B에서 생산된 극저온의 헬륨을 KSTAR 냉각에 적합한 형태로 변환 및 분배하는 Distribution Box (D/B)로 구성된다. HRS C/B의 총 냉각성능은 액서지로 환산할 경우, 설계치 기준 4.5 K에서 9 kW이다.

2007년 8월말 HRS의 설치 완료 [1] 후 각 구성 시스템별 개별 성능시험을 거쳐, D/B 내부에 설치된 KSTAR 냉각대상물 simulation 회로를 활용하여 2 MA 플라즈마 전류 운전 시나리오의 냉각방식에 대응하는 단독 시운전을 수행하였다 [2]. 2008년 4월부터 8월초까지는 KSTAR 장치를 상온 (300 K)에서 극저온 (4.5 K)까지 냉각시키고 안정적으로 냉각온도 (5 K)를 유지하면서 KSTAR 초기 플라즈마 운전과 상온까지 승온시키는 승온운전을 성공적으로 완수하였다.

본 논문에서는 주로 KSTAR HRS의 단독 시운전 결과와 KSTAR 장치의 초기 냉각운전결과에 대하여 기술하였다. HRS의 사양과 KSTAR 냉각대상물의 특성은 별도의 논문에 상세히 기술되었다 [1, 3].

## 2. 저온헬륨설비 단독 시운전 결과

## 2.1. Gas Management System과 Warm Compression System

GMS의 성능을 점검하기 위해서 비순수 기체헬륨 (gaseous helium: GHe) 저장용기를 이용하여 2기의 50 m<sup>3</sup>의 가스백(gas bag)을 GHe으로 가득 채웠다. 가스백에 채워진, 100 ppm 이상의 N<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O로 오염된 GHe은 최대 유량 32 g/s로 회수압축기에 의해 최대 25 bar까지 압축된다. 이렇게 회수된 GHe은 별도의 헬륨전용 정제기로 이송되어 불순물 1 ppm 이하의 GHe으로 정제된다. GMS의 연속적인 성능점검을 위해 가스백의 상류측과 정제기의 하류측을 임시로 연결하는 폐회로를 형성시켜 시운전을 수행하였다.

WCS 성능시험의 주목적은 C/B의 운전 전에 필요한 GHe의 3가지 압력(low/medium/high pressure: 저압/중압/고압)이 장기간 안정적으로 유지되는 것을 점검하

<sup>1</sup>정 회원 : 국가핵융합연구소 연구원

<sup>2</sup>비 회원 : 국가핵융합연구소 연구원

<sup>3</sup>정 회원 : 세이지온 대표이사

<sup>4</sup>비 회원 : Air Liquide DTA사 공학자

\*교신저자 : kwcho@nfri.re.kr

원고접수 : 2008년 10월 02일

심사완료 : 2009년 03월 02일

게재확정 : 2009년 03월 02일

는 데 있다. 그림 1(a)에 나타난 바와 같이 저압과 중압측 GHe의 압력은 밸브 100PV600A/B와 100PV603에 의해 각각 조절된다. 고압측 GHe는 밸브 100PV601A(100PV601B)를 통해 순수 GHe 저장용기를 충전(방전)하면서 압력을 감소(증가)시킨다. WCS의 압력조정은 그림 1(b)에 보이는 바와 같이 안정적으로 유지되었으며 보다 자세한 성능점검 결과는 별도의 논문에 기술하였다 [4].

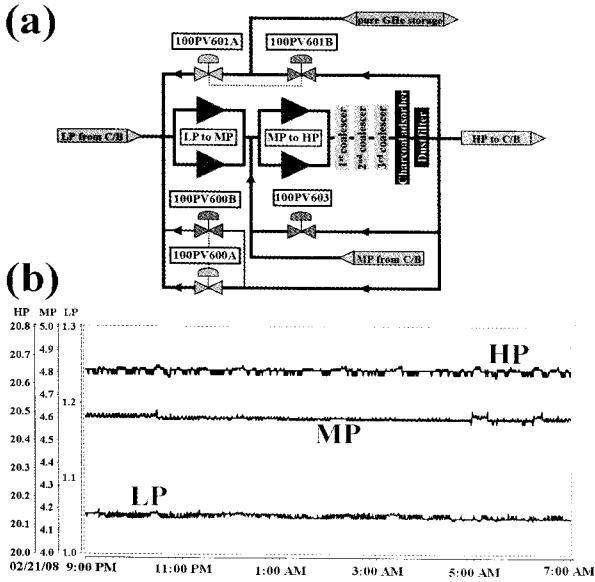


Fig. 1. (a) Simplified process flow diagram of the WCS pressure control scheme; (b) plot of the three WCS pressure levels for 10 hours.

2.2. Cold Box

C/B의 주기능은 표 1에 요약된 3가지의 극저온헬륨을 생산하는 것이며 간략화된 헬륨의 process flow diagram는 그림 2에 나타나 있다. C/B의 냉각성능은 LN<sub>2</sub> 전냉각장치 없이 순전히 터빈 6기(그림 2의 T1~T6)의 준 등엔트로피 (isentropic) 팽창에 의해 달성되었으며 시운전은 터빈의 최적 회전속도 조율로 완성되었다.

표 1. Cryogenes produced in the C/B and corresponding KSTAR cold components.

냉매	온도	압력	냉각대상물
기체헬륨	<55 K	<20 bar	열차폐 시스템 (TS)
액체헬륨	4.5 K	1.3 bar	초전도 자석 (isothermal), CL (non-isothermal)
초임계헬륨	~5 K	>5.5 bar	SC bus-lines

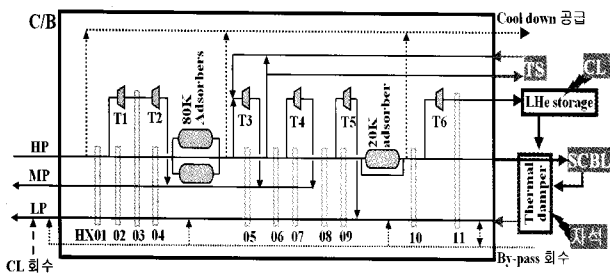


Fig. 2. Schematic process flow diagram of the C/B internals and an outline of the helium distribution.

터빈들의 최적속도 미세 조정 결과는 그림 3(a)와 표 2에 나타나 있다. T4를 제외하고는 터빈들의 등엔트로피 효율은 75%를 상회하였다. T3가 T4의 운전영역의 일부까지 운전되면서 T4는 설계치에서 약간 벗어난 영역에서 운전되어 효율이 다른 터빈에 비해 낮고 (표 2의 \*), T3과 T6의 상대적 고효율은 터빈 입출구 온도센서의 부정확성에 기인한 것으로 판단된다 (표 2의 \*\*).

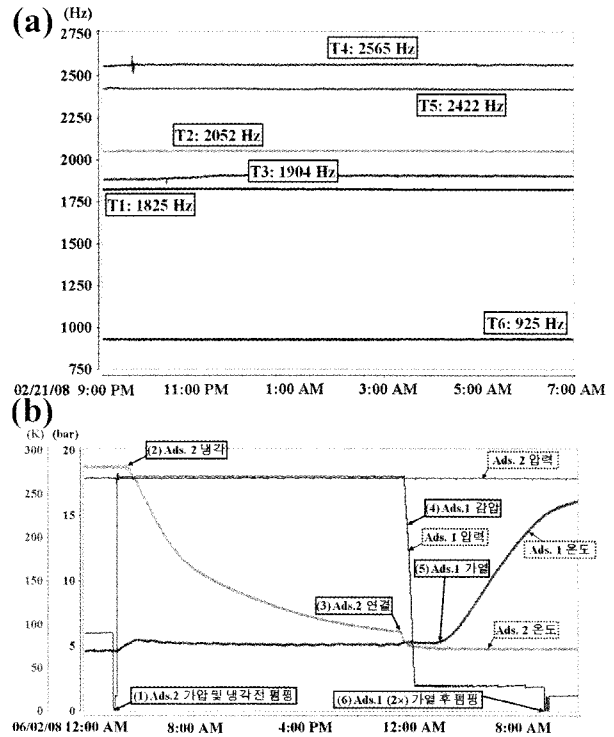


Fig. 3. (a) Rotational speed curves of the turbines T1~T6; (b) Trends of automatic regeneration and connection of the 80 K adsorbers.

표 2. Performance of the turbines. Rotational speed (RPS), suction/discharge helium parameters, and related isentropic efficiency of T1~T6. For \* and \*\* refer to corresponding parts in the text.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
RPS [Hz]	1825	2052	1904	2565	2422	925
T <sub>in</sub> [K]	212	125	69.5	50.5	28.6	7.9
T <sub>out</sub> [K]	188	95.2	45.9	38.9	13.5	5.5
P <sub>in</sub> [bar]	20.3	12.7	16.9	17.2	19.1	16.9
P <sub>out</sub> [bar]	13.7	4.90	4.90	4.92	1.28	2.94
효율	0.77	0.76	*0.87	*0.59	0.79	**0.88

C/B는 완전자동으로 운전되어야 하기 때문에 수많은 자동화 관련 프로그램 변수의 최적화는 시운전의 주요 목표이다. 그 중 20 K 및 80 K 저온 흡착기 (adsorber)의 자동 재생 운전은 가장 복잡한 프로그램 중의 하나이다. 그림 3(b)에 보이는 바와 같이 2기가 서로 병렬로 연결된 80 K 흡착기의 재생 및 연결은 HRS 전체 프로세스에 큰 영향을 미치지 않고 순조롭게 진행되었다. 프로세스 배관과 서로 병렬로 연결된 1기의 20 K 흡착기의 경우도 마찬가지로 완전자동 운전이 구현되었다.

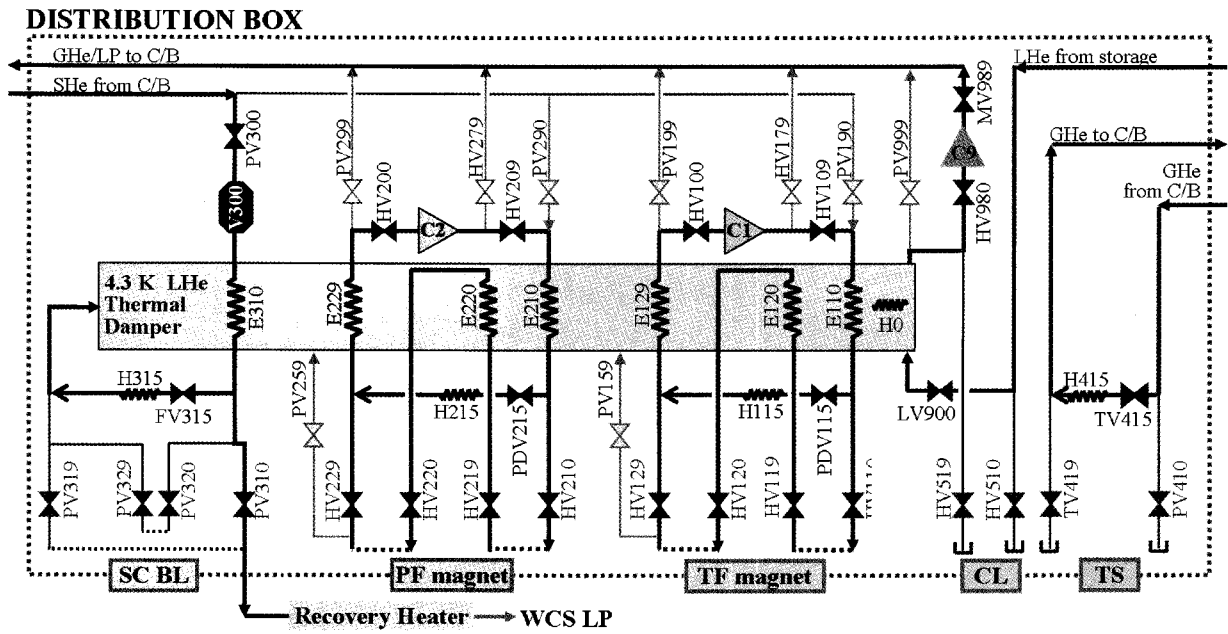


Fig. 4. Helium circuits of the D/B used during the commissioning and simulation of KSTAR cold components.

2.3. Distribution Box

D/B 내부에는 KSTAR 냉각대상물들의 운전 시, 헬륨에 미치는 영향(열부하와 압력강하)을 simulation할 수 있는 별도의 히터와 밸브가 장착되어 KSTAR와 연결되지 않은 상태에서 HRS의 성능 점검 시운전을 수행할 수 있었다. 그림 4에는 시운전 기간 동안 사용된 D/B의 헬륨회로를 표시하였다. 초기냉각 전용 공급 및 회수 배관 관련 회로는 그림의 간소화를 위해 생략되었다. 점선으로 이루어진 회로는 헬륨의 부분적인 흐름을 위해 임시로 연결한 배관들이며 시운전 종료 후 캡(□)으로 마감된 회로와 함께 극저온 배관을 이용하여 KSTAR에 연결되었다.

KSTAR 냉각대상물의 열부하 및 압력강하 simulation용 헬륨 회로는 표 3에 요약된 바와 같다. CL의 경우 D/B 내부에 별도의 simulation 장치가 없기 때문에 SC BL용 초임계헬륨 (supercritical helium: SHe) 일부를 임시 배관을 통해 D/B 외부로 뽑아내 상온에서의 열침입과 회수가열기를 사용하여 열부하를 simulation하였다.

표 3. Simulation circuit of the KSTAR cold components with corresponding {heater elements} and {valves}.

냉각 대상물	D/B 내부 simulation 헬륨 회로
TF 자석	C1(압축) → E110(냉각) → [PDV115](압력 강하) → {H115}(가열) → E129(냉각) → C1
PF 자석	C2(압축) → E210(냉각) → [PDV215](압력 강하) → {H215}(가열) → E229(냉각) → C2
SC BL	PV300(C/B에서 SHe 공급) → E310(냉각) → [FV315](압력 강하) → {H315}(가열) → TD로 자유 팽창
TS	(C/B에서 GHe 공급) → [TV415](압력 강하) → {H415}(가열) → (C/B로 GHe 회수)
CL	(PV310에서 SHe 뽑아냄) → {Recovery heater}(가열) → (WCS 저압으로 회수)

KSTAR HRS의 최대 냉각성능을 측정하기 위해 SC BL, TS, CL의 simulation 회로를 가동시켰다. KSTAR 초전도 자석의 냉각에 필요한 등온(isothermal) 냉각성능은 thermal damper(TD)의 LHe에 잠겨있는 히터 "H0"를 사용하여 simulation하였다. 극저온 GHe 압축기 "C9"는 TD 내부의 증기압을 감소시켜 LHe의 온도를 4.3 K로 유지하는 역할을 한다. 표 4는 KSTAR HRS의 최대 냉각성능 검사 결과를 요약한 것이다. D/B와 LHe 저장용기의 열침입(4.5 K에서 약 0.28 kW)을 고려할 경우 [5] KSTAR HRS의 최대 냉각성능은 4.5 K에서 exergy 동등 9.45 kW이며 이는 제작사가 보증한 9 kW보다 5% 정도 높은 값으로 5%의 설계 여유분과 일치하는 수치이다.

표 4. Simulation results of the KSTAR cold component.

	SC BL	TS	CL	H0	C9
히터 [kW]	0.20	21.27	~20	5.14	
유량 [g/s]	45	291	17.5		282
$T_{in}$ [K]	4.44	55.25	4.41	4.31	4.31
$P_{in}$ [bar]	6.80	19.97	4.83	1.10	1.10
$T_{out}$ [K]	4.31	69.20	~290	4.31	4.64
$P_{out}$ [bar]	1.10	17.49	~3	1.10	1.28
4.5 K 동등 [kW]	0.39	1.63	1.66	5.37	0.13

SHe 순환기 "C1" 및 "C2"는 각각 KSTAR TF (toroidal field) 및 PF (poloidal field) 초전도 자석의 냉각회로를 통과하면서 감압된 SHe를 가압시키는 역할을 수행한다. SHe 순환기의 성능을 점검하기 위해 표 3의 TF/PF 자석의 simulation 회로를 활성화시켰다. 순환기 입구측 압력은 밸브 PV190/PV290을 이용하여 항상 3.2 bar 이상이 되도록 유지시켰으며 출구측 압력은 밸브 PV159/PV259를 사

용하여 입구측과의 압력차가 3.4 bar 이하가 되도록 조정하였다. KSTAR의 2 MA 플라즈마 전류 운전 [6] 시 발생할 것으로 예상되는 열부하와 압력강하는 각각 히터 H115/H215과 밸브 PDV115/PDV215에 의해서 모사되었다.

그림 5(a)는 SHe 순환기 "C1"보다 더 가혹한 조건에서 운전되는 "C2"의 플라즈마 전류 2 MA에서의 운전주기에 대한 모사시험결과를 보여주고 있다. SHe 순환기의 압력강하가 증가하면 SHe의 유량은 그림 5(b)에서와 같이 "일정속도곡선"을 따라가면서 감소한다. 순환기의 성능검정을 위해서 24 시간 동안 72 주기에 해당되는 모사시험이 수행되었으며, 그 기간 동안 HRS는 안정적으로 운전되었다. SHe 순환기의 등엔트로피 효율은 "C1", "C2" 공히 70 % 정도 기록되었으나, 본 수치는 해당부위의 온도센서의 오작동 등의 부정확성으로 인해 재검증이 필요하다.

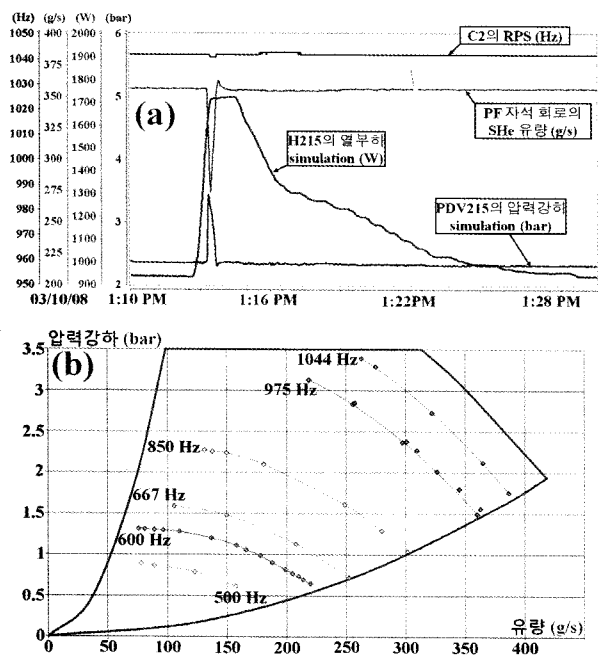


Fig. 5. (a) PF circulator "C2" related parameters during one KSTAR plasma shot period simulation; (b) Operability range (area inside the bold lines) and tested operation points (dots on the "constant rotational speed" curves) of the PF circulator "C2".

### 3. KSTAR 장치 초기냉각 운전 결과

그림 6은 상온에서 KSTAR 운전온도(~5 K)까지의 냉각(a)과 다시 상온까지의 승온(b) 과정을 보여주고 있다. CICC(cable-in-conduit conductor)로 이루어진 TF/PF 초전도 자석과 SC BL의 냉각·승온용 GHe는 그림 2에 표시된 별도의 cool down 전용 라인에서 공급 및 by-pass 라인에서 회수하였고, TS와 CL의 경우 정상운전용 공급/회수 라인을 이용하였다. 온도차에 의한 냉각대상물의 급격한 변형을 방지하기 위하여 공급 및 회수되는 GHe의 온도차는 50 K 이하를 유지하였고, 상온에서 KSTAR 정상운전 온도(극저온)까지의 냉각은 약 21일이 소요되었으며, 그 반대의 경우는 14일이 소요되었다. 냉각 및 승온을 위한 GHe의 공급부 온도변화는 냉각시 평균 0.6 K/hr, 승온시 0.73 K/hr로 각각 조정하였다. 냉각시 GHe의

온도는 터빈 T1~T6를 순서대로 가동시키면서 온도를 조절하였고, 승온시에는 승온을 위한 GHe 공급배관에 냉각되지 않은 상온(300K)의 GHe를 혼합하여 온도를 조절하였다. 다만 TS 냉각/승온시 온도의 경우 그림 2의 흐름도에 나타나있는 것처럼 T3 가동 시 T3의 출구온도의 영향을 받기 때문에 T3가 운전될 때에는 그림 6에 나타나있는 것처럼 공급온도가 회수온도보다 낮다.

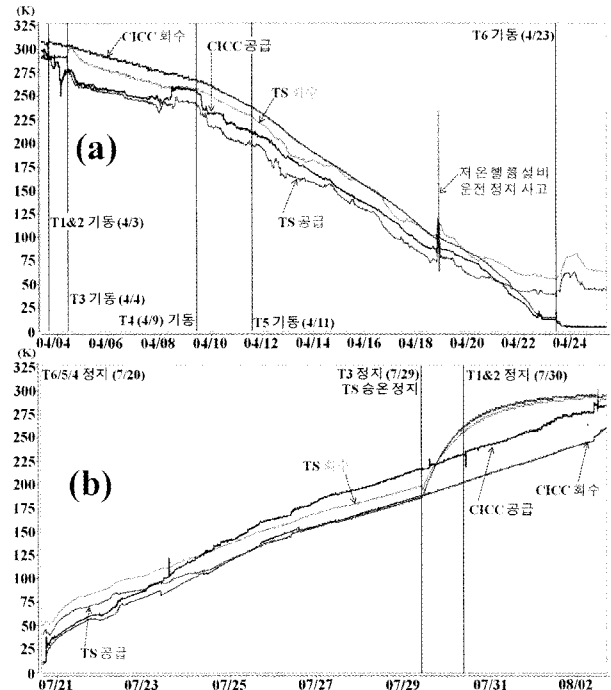


Fig. 6. (a) Cool down and (b) warm up curves of the CICC (TF/PF magnets and SC BL) and TS supply/return GHe temperatures.

초기 냉각과 승온 사이의 KSTAR 정상운전 기간 동안 HRS는 steady state로 운전되어 전체적으로 안정적인 상태를 유지하였다. KSTAR의 초기 플라즈마 발생 시 가장 열유체적 요동이 심한 냉각대상물은 PF 초전도 자석인데, 급격한 자석 CICC 내부의 헬륨의 요동 그리고 PF 순환기 입출구측 SHe의 압력의 변동에도 불구하고 그림 7에서와 같이 순환기의 입출구측 온도 및 회전속도와 SHe 처리 유량은 큰 변화 없이 장시간 안정적으로 지속되었다.

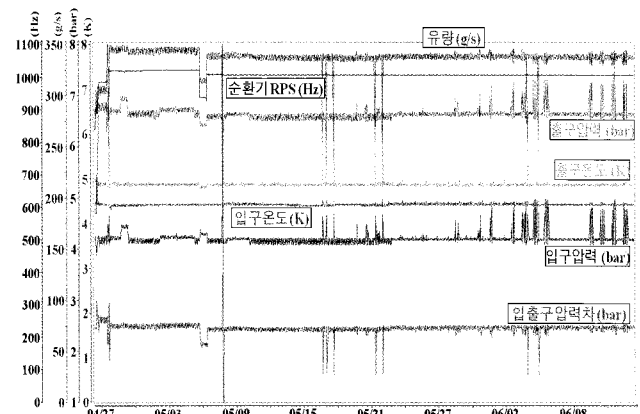


Fig. 7. SHe suction/discharge parameters of the PF magnet circulator for ~1.5 month.

#### 4. 결 론

KSTAR HRS의 시운전은 성공적으로 수행되었으며, KSTAR 토카막의 운전을 확실하게 뒷받침할 수 있는 성능을 보여주었다. D/B에 내장된 각종 히터와 밸브는 KSTAR에서 발생할 수 있는 열부하와 압력강하를 simulation함으로써 HRS의 성능을 입증할 수 있었다. 특히, 2기의 SHe 순환기가 KSTAR의 2 MA 플라즈마 전류 운전 simulation에서 HRS와 안정적으로 운전되는 것을 확인할 수 있었다.

KSTAR 장치의 최초 냉각, 초기 플라즈마 발생을 위한 안정적 냉각온도 유지, 그리고 승온까지의 KSTAR 장치에서 발생하는 열부하와 압력강하에 안정적으로 대응하면서 HRS는 장기간 성공적인 운전을 수행하였다.

KSTAR 장치의 종합냉각 시운전은 계획된 시나리오에 의거 성공적으로 완료되었으며, HRS C/B의 극저온 헬륨 처리 유량에는 여유가 있어 향후 냉각운전에서는 WCS의 부분부하운전을 통해 효율을 향상시키는 것도 가능할 것으로 예상된다.

#### 감사의 글

본 사업은 교육과학기술부 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] H.-S. Chang, *et al.*, "The on-site status of the KSTAR helium refrigeration system", 2007 Cryogenic Engineering Conference and the International Cryogenic Materials Conference (CEC-ICMC) Chattanooga Tennessee USA, 2007.
- [2] H.-S. Chang, *et al.*, "Commissioning results of the KSTAR helium refrigeration system", International Cryogenic Engineering Conference - 22 (ICEC-22) Seoul, Korea, 2008.
- [3] C.-H. Choi *et al.*, "Helium Refrigeration System for the KSTAR", Fusion Engineering and Design 81, 2623-2631, 2006.
- [4] D.-S. Park *et al.*, "Commissioning results of the KSTAR warm compression system", International Cryogenic Engineering Conference - 22 (ICEC-22) Seoul, Korea, 2008.
- [5] P. Briend *et al.*, "Helium Refrigeration System for the KSTAR project - Distribution Box and LHe Storage Static Heat In-leak Calculation Notes(3)", KSTAR Helium Refrigeration System project internal release document, 2006.
- [6] A. Alekseev *et al.*, "Thermo-hydraulic analysis of the KSTAR magnet system", KSTAR project internal release document, 2002.

#### 저 자 소 개



**조광운(趙光雲)**  
1992년 건국대학교 기계공학과 (공학 석사), 현재 국가핵융합연구소 KSTAR 연구센터 헬륨설비팀장.



**장현식(張賢植)**  
1994년 포항공과대학교 물리학과, 1996년 포항공과대학교 물리학과 (석사), 2001년 포항공과대학교 물리학과 (이학박사), 현재 국가핵융합연구소 선임연구원.



**박동성(朴東成)**  
1995년 충남대학교 기계설계공학과, 1997년 충남대학교 기계설계공학과 (석사), 2006년 충남대학교 기계설계공학과 (공학박사), 현재 국가핵융합연구소 선임기술원.



**주재준(周在俊)**  
2003년 한밭대학교 소재생산가공공학과 (공학사), 현재 국가핵융합연구소 KSTAR 연구센터 헬륨설비팀 기술원.



**문경모(文庚模)**  
2007년 한밭대학교 제어계측공학과 (공학사), 현재 국가핵융합연구소 KSTAR 연구센터 헬륨설비팀 기술원.



**김양수(金良洙)**  
1988년 아주대학교 물리학과, 1991년 아주대학교 물리학과(석사), 1996년 아주대학교 물리학과 (이학박사), 현재 국가핵융합연구소 극저온연구부장.



**박주식(朴柱植)**  
1979년 서울대학교 원자핵공학과, 1981년 서울대학교 원자핵공학과 (석사), 1989년 서울대학교 원자핵공학과 (공학박사), 현재 국가핵융합연구소 KSTAR 연구센터장.



**양승한(양승한)**  
1981년 한국해양대학교 기계공학과 (공학사), 현재 세이저온 대표 이사.



**에릭 포브(Eric Fauve)**  
2002년 Entrale Marseille France Energy-Process Engineering (석사), 현재 Air Liquide DTA사 극저온 공학자.