

KSTAR 헬륨냉동기의 압축시스템 시운전 결과

박 동 성[†], 장 현 식, 주 재 준, 문 경 모, 조 광 운,
김 양 수, 박 주 식, 권 일 근*, 조 면 철*, 양 승 한**

국가핵융합연구소 KSTAR 연구센터, *삼성물산(주) 건설부문, **CEI 저온

Commissioning Results of the Warm Compression System for the KSTAR Helium Refrigeration System

Dong-Seong Park[†], Hyun-Sik Chang, Jae-Joon Joo, Kyung-Mo Moon, Kwang-Woon Cho,
Yang-Soo Kim, Ju-Shik Bak, Il-Keun Kwon*, Myeon-Chul Cho*, Seung-Han Yang**

KSTAR Research Center, National Fusion Research Institute, Daejeon 305-333, Korea

Samsung C&T Corporation, Seoul 137-857, Korea

Cryogenic Engineering Inc., Goyang, 411-718, Korea

ABSTRACT: The main components of the KSTAR helium refrigeration system (HRS) can be classified into the warm compression system (WCS) and the cryogenic devices according to the operating temperature levels. The WCS itself consists of the compressor station (C/S) and the oil removal system (ORS). The process helium is compressed from 1 bar to 22 bar maximum in the C/S and downstream, the ORS removes the oil mixed in the helium to less than 10 ppbw as per the operation criteria of the cryogenic devices of the KSTAR HRS. After the installation, the pre-commissioning and commissioning activities were started on July, 2007. Before the start-up of the C/S, vibration measurement and the skid reinforcement jobs were performed for stable operation of the C/S. The results of the WCS performance tests met the requirements of the KSTAR HRS but satisfied the vibration level criteria only at the compressors' full load condition.

Key words: Helium refrigeration system (헬륨냉동기), Warm compression system (헬륨압축 시스템), Compressors station (압축기스테이션), Oil removal system (오일제거장치), Commissioning (시운전)

1. 서 론

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-870-1953; fax: +82-42-870-1619

E-mail address: dspark@nfri.re.kr

KSTAR 저온헬륨설비는 KSTAR 초전도자석과 초전도자석 구조물, 초전도 전류전송 시스템, 열차폐체 등의 냉각대상물을 극저온냉각 시키기 위해 제작·설치되었다. 이러한 열부하의 효과적인 냉각을 위해 KSTAR 저온헬륨설비는 다양한 운전조건에 대응할 수 있도록 설계되었으며 자동운전이 가능하도록 제작·설치되었다.⁽¹⁾

WCS는 1 bar 의 헬륨을 18 ~ 22 bar 의 고압으로 압축하는 압축기스테이션과 헬륨 냉각사이클에 유입되는 헬륨에 포함된 오일을 관리하기 위한 오일제거시스템으로 구성되어 있다. 압축기스테이션은 압축효율을 고려하여 2단으로 설계되었다. WCS는 진동 및 소음이 발생하므로 운전자의 보건안전을 위해 별도의 건물에 설치되었다. WCS의 시운전은 설치 후 약 3개월이 소요되었으며, 시운전은 압축기 가동 전 시운전 과 가동 후 시운전의 2단계로 나누어 수행되었다.

2. 헬륨압축시스템 (WCS)의 구성

헬륨압축시스템 (WCS)은 Fig. 1과 같이 저압의 헬륨을 고압으로 압축하는 압축기 스테이션과 헬륨에 포함된 오일을 제거하는 오일제거장치로 구성되어 있다. 압축기스테이션은 압축효율을 고려하여 1 → 5 bar로 압축하는 저압압축기스테이션과 5 → 22 bar 로 압축하는 고압압축기 스테이션으로 분리하여 설계, 제작하였다.

각각의 압축기 스테이션은 압축을 위한 급유식스크루압축기와 공냉식 2극 모터, 유회시스템을 위한 오일펌프 및 필터시스템, 1차 오일분리를 위한 유분리기로 구성되어 있다. 특히 유회시스템은 압축기 가동에 매우 중요한 장치이므로 오일펌프 및 오일필터를 이중화하여 제작하였다. 이 모든 장비들은 하나의 스킵에 설치되어 장비설치에 필요한 공간의 절약을 도모하였다.

오일제거장치는 헬륨설비의 저온부에 유입되는 오일의 양을 최소화하기 위해 설계되었으며, 오일 제거를 위해 3단계의 필터를 설치하고 보다 미세한 오일차단을 위해 활성탄이 충전된 용기를 3단계 필터 후단에 위치시켜 오일을 10 ppbw 미만까지 감소시킬 수 있다. Table 1에 WCS의 주요장비의 제원과 성능을 나타내었다.

WCS는 무게가 많이 나가고 고속으로 회전하는 장비이기 때문에 장비의 설치에 세심한 주의를 기울여야 한다. 장비가 설치된 건물은 장비의 중량을 고려하여 설계·건설되었으며, 특히 중량물이 집중적으로 배치되는 부위에 두께 1,000 mm 의 철근콘크리트로 지면과 직접적으로 접촉하도록 건설되어 장비의 진동에 대비하였고, 장비가 건물에 미치는 영향을 최소화하기 위해 진

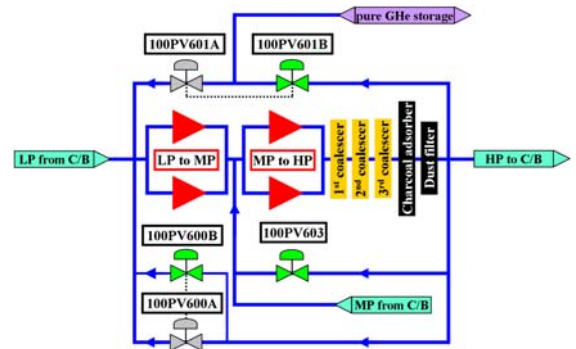


Fig. 1 Simplified P&ID of the warm compression system (WCS)



Fig. 2 Photo of the WCS installation

Table 1 Specifications of the WCS

Item	LP-C/S	HP-C/S	ORS
Compressor (MYCOM)	400S	320S	NA
Motor (SIEMENS)	5010S	5810S	NA
Oil separation	11×F0-120	11×F0-120	3×CGF09 & charcoal
Flow rate	536 g/s	1,046 g/s	NA
Shaft power	2×549 kW	2×981 kW	NA
Oil removal	100 ppm	100 ppm	< 10 ppb
Weight	39,592 kg	43,207 kg	30,860 kg

동이 발생하는 압축기스테이션 하부기초와 건물기초 사이에 분리판을 설치하여 건물에 전달되는 진동을 차단하였다. 주요장비의 설치사진은 Fig. 2에 나타나 있다.

3. 가동 전 시운전 (Pre-commissioning)

3.1 모터 상태점검 및 축연결

Table 2 Motor vibration measurement result

Items		Result (mm/s RMS)	Remark	
LP	Skid 100	V	0.4	Accept
		H	0.9	Accept
		X	1.7	Accept
	Skid 200	V	0.4	Accept
		H	1.7	Accept
		X	1.2	Accept
HP	Skid 400	V	0.7	Accept
		H	0.9	Accept
		X	0.3	Accept
	Skid 500	V	1.0	Accept
		H	0.9	Accept
		X	0.1	Accept

Table 3 Alignment criteria and result between motor and compressor

Items		Result (mm) [0°/90°/180°/270°]	Criteria
LP	Skid 100	O.D	[0/ +0.01 / +0.02 / +0.01]
		Face	[0/ +0.01 / +0.02 / +0.01]
	Skid 200	O.D	[0/ -0.01 / -0.02 / -0.01]
		Face	[0/ +0.01 / +0.01 / +0.00]
HP	Skid 400	O.D	[0/ -0.02 / -0.02 / -0.00]
		Face	[0/ +0.01 / +0.03 / +0.02]
	Skid 500	O.D	[0/ +0.05 / +0.05 / 0.00]
		Face	[0/ +0.01 / +0.02 / +0.01]

압축기와 모터를 연결하기 전에 우선 모터만 가동하여 모터의 상태를 점검해야한다. 모터 단독시험의 경우 제작사에서 제시한 진동 규정치를 만족해야하며, 진동치를 만족하는 경우 압축기와 모터를 연결할 수 있다. 제작사에서 규정한 모터 단독 운전 시 진동은 4.0 mm/s RMS 미만이다. 모터단독 시험결과는 Table 2에 나타나 있다. 압축기와 모터의 축연결은 모터 제작사의 절차에 따라 수행되었으며 모터와 압축기의 연결 후 편심 규정치와 측정값은 Table 3 나타나 있다.⁽²⁾

3.2 ORS 활성탄 충전 및 건조작업

장비의 운송 시 편의성과 안전상의 이유로 ORS 활성탄베드 (charcoal bed) 내부가 빈 상태로 운송되고 내부에 충전 되는 활성탄은 별도의 용기에 담겨 운송되었다. 해상운송 시 활성탄 내

부에 수분이 침착되므로 활성탄을 ORS를 활성탄 베드에 충전 후 재생작업을 별도의 절차에 따라 수행하였다.⁽³⁾ 본 작업을 위해 액체질소를 기화시킨 기체질소를 35 kW 용량의 전기가열기를 사용하여 질소의 온도를 약 160°C까지 가열시켜 활성탄 내부에 침착된 수분을 제거하였다. ORS 활성탄 건조작업은 활성탄을 통과한 기체질소에 포함된 수분이 10 ppm 미만이 될 때까지 연속적으로 수행되었으며, 본 작업을 위해 260시간동안 100,000 l의 액체질소가 소비되었다.

활성탄 건조작업 종료 후 활성탄 베드의 내부에 약 0.5 barG의 기체질소를 충전하여 외부에서의 수분침투를 방지하였다. 건조작업 후의 수분 측정값은 자체 측정 장비로 측정하였을 때 8 ppm이 측정되었으며, KRISS에 의뢰하여 측정한 내부 수분 함유량은 4 ppm으로 확인되었다. ORS 건조작업 기간 동안의 질소유량, 내부의 수분함유량 변화 트렌드는 Fig. 3에 나타나 있다.⁽⁴⁾

3.3 오일충전 및 WCS conditioning

헬륨압축기의 윤활유로 사용되는 BREOX[®] 오일은 수분에 매우 취약하므로 운송 전에 수분제거작업을 거친 후 밀폐용기에 보관하여 수분의 침투를 방지하였다. BREOX[®] 오일의 충전 시 수분과의 접촉이 최소화되도록 세심한 주의를 기울여야 한다. 오일 충전 후 헬륨압축시스템의 내부에 존재하는 N₂, O₂, H₂O 등의 불순물을 제거하기 위해 반복적인 진공 및 헬륨충진 작업을 통해 헬륨이외의 총합불순도가 50 ppm 미만이 될 때까지 제거하였다.

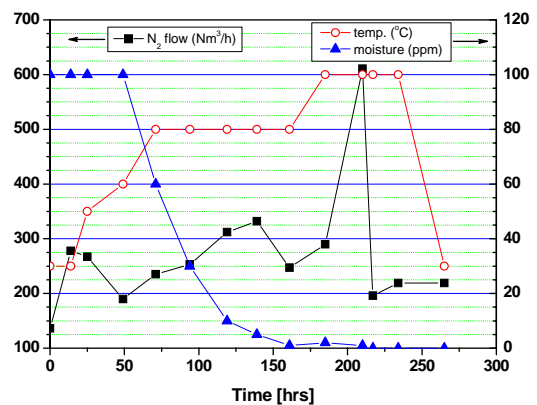


Fig. 3 Trends of the ORS charcoal drying procedure

Table 4 Motor operation temperature guideline and DCS trip set values

Equipment		Alarm temp.	Trip temp.	DCS trip set.
LP motor (class F)	Winding	155℃	170℃	155℃
	Bearing	100℃	105℃	105℃
HP motor (class F)	Winding	155℃	170℃	155℃
	Bearing	90℃	95℃	95℃

4. 가동 후 시운전 (Commissioning)

4.1 압축기 기동

모든 수동밸브의 정상위치, 윤활유 상태 및 적정량, 냉각수 및 전력, 압축공기 등의 유틸리티 점검이 완료되면 압축기를 기동한다. 기동 전 점검 시 MCC의 설정값과 DCS의 작동상태도 같이 점검하였다. 제어밸브의 설정 값이나 가동시퀀스 등의 제어 파라미터는 시운전을 통해 최적화 하였다.

WCS의 가동은 기동 시퀀스에 의해 고압축 압축기스테이션 (HP-C/S)부터 기동되고 HP-C/S가 기동 후 LP-C/S를 기동하였다. 압축기 기동 시 기동부하를 경감하기 위해 모든 압축기 용량 제어밸브는 최소용량에 위치한다. 기동 전류의 최소화를 위해 리액터 (reactor) 기동법이 사용되었다. MCC의 전압설정 값은 HP-C/S의 경우 65%, LP-C/S의 경우 90%로 설정하였다. LP-C/S의 경우 기동 시 고관성 모터의 특성을 갖고 있어 모터의 보호를 위해 별도의 속도센서 및 릴레이를 추가하였다.

모터의 안정적인 운전을 위해 모터권선 및 베어링온도는 주기적으로 점검해야 하며, Table 4에 모터권선과 베어링의 권선온도 및 위험온도와 DCS상에서 정지 설정값을 나타내었다.

WCS가 가동되면 순수기체헬륨저장탱크에 저장된 기체헬륨이 압축기스테이션을 지나면서 압축되며, 기체헬륨에 함유된 오일은 ORS를 지나면서 제거된다. 압축된 기체헬륨 중 일부는 ORS의 후단에서 분기되어 LP-C/S와 HP-C/S의 입구로 되돌아가면서 헬륨압축시스템의 운전압력을 조정하게 된다. 이러한 고압/중압/저압의 압력조정은 압력조정밸브들과 순수기체헬륨저장탱크를

사용하여 조정한다. WCS의 고압은 Fig. 1에 나타나 있는 100PV601A/601B를 사용하여 조정하고, 저압 및 중압의 압력조정은 100PV600A/600B와 100PV603을 사용하여 조정한다. 모든 압력 및 유량제어는 DCS에서 자동으로 제어되며, 헬륨압축시스템의 모든 운전파라미터는 성능측정을 위해 DCS에서 모니터/기록하였다.

4.2 진동측정

헬륨압축시스템의 안정적인 운전을 위해서는 압축기 및 모터의 진동이 매우 중요하다. 본 설비는 진동이 ISO-2327에 준하도록 제작되었으나, 초기 가동 시 일부 부위에서 규정치를 초과하는 진동이 발견되어 보강작업을 실시하였다. 보강작업 전후의 진동 측정 결과는 Table 5와 Table 6에 나타나 있다.

보강작업 후에 압축기 전부하시 진동은 규정치를 만족하였으나, HP-C/S 부분부하 운전 시 진동의 개선이 없었다. 이러한 진동관련 부적합 사항은 제작사인 TES (미)와 MYCOM (일)에서 원인분석이 완료하였으며, 주계약자인 삼성물산(주)/AL-DTA에서 보강작업을 준비 중이다.

Table 5 Vibration measurement of the HP-C/S at full load operation

Condition		Before reinforcement			
		C400 (100%)		C500 (100%)	
Equipment		V	A	H	Y/N
Direction		V	A	H	Y/N
M400	DE	3.28	1.60	3.14	Y
	NDE	1.76	4.95	2.02	N
C400	DE	2.70	1.98	5.17	Y
	NDE	2.12	3.46	1.80	Y
M500	DE	3.62	4.38	2.98	Y
	NDE	5.78	5.69	2.25	N
C500	DE	8.85	8.99	5.28	N
	NDE	8.48	6.65	2.38	N
Condition		After reinforcement			
		C400 (100%)		C500 (100%)	
Equipment		V	A	H	Y/N
Direction		V	A	H	Y/N
M400	DE	2.71	3.30	1.93	Y
	NDE	2.97	2.16	2.73	Y
C400	DE	3.83	4.14	1.79	Y
	NDE	3.58	0.91	2.88	Y
M500	DE	2.73	1.86	2.81	Y
	NDE	1.89	1.13	2.92	Y
C500	DE	2.94	4.89	2.90	Y
	NDE	2.52	3.04	1.83	Y

Table 6 Vibration measurement of the HP-C/S at part load operation

Condition		Before reinforcement			
Equipment		C400 (30%)		C500 (30%)	
Direction		V	A	H	Y/N
M400	DE	3.62	4.38	2.98	Y
	NDE	5.78	5.69	2.25	N
C400	DE	8.85	8.99	5.28	N
	NDE	8.48	6.65	2.38	N
M500	DE	9.75	3.91	7.80	N
	NDE	12.26	3.04	4.37	N
C500	DE	10.49	22.25	8.10	N
	NDE	10.21	21.77	10.75	N
Condition		After reinforcement			
Equipment		C400 (30%)		C500 (30%)	
Direction		V	A	H	Y/N
M400	DE	5.86	0.92	2.15	N
	NDE	5.33	2.97	2.25	N
C400	DE	9.53	16.78	4.62	N
	NDE	9.34	19.63	5.12	N
M500	DE	4.84	0.92	3.60	N
	NDE	4.52	0.92	2.79	N
C500	DE	5.97	16.20	4.32	N
	NDE	8.29	0.92	2.96	N

Table 7 Summary of the WCS performance test

Item	Tested	Spec.	Remark
HP press.	22.1 bar	22.0 bar	Accept
MP press.	5.0 bar	5.0 bar	Accept
LP press.	1.05 bar	1.05 bar	Accept
Total flow rate	1040 g/s	1046 g/s	Accept
LP flow rate	516 g/s	536 g/s	Accept
Power consumpt.	3.6 MW	3.7 MW	Accept

4.3 성능시험결과

WCS의 성능을 나타낼 수 있는 최종지표는 압력과 유량이며 WCS 성능은 Table 1에 나타난 WCS 사양을 만족해야 한다. 성능시험결과는 표 7에 나타나 있다. Table 7에 나타난 WCS 성능 시험결과를 살펴보면 대부분의 성능지표는 만족하였으나, 유량의 경우 약 0.5% 미달되었다.⁽⁵⁾ 이러한 이유는 초기 시운전시 배관 혹은 열교환기나 오일용기 등에 잔존할 수 있는 이물질에 의한

압축기의 파손을 방지하기 위해 압축기 흡입측에 설치한 임시필터가 압축기의 흡입저항으로 작용하면서 성능을 저하시킨 것으로 판단된다. 시운전 이후 정상 운전 시 임시필터를 제거하고 측정된 결과에서는 Table 1의 사양을 만족하는 결과를 보여주었다.

5. 결론

KSTAR 저온헬륨설비의 헬륨압축시스템을 시운전한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) KSTAR 저온헬륨설비를 위한 헬륨압축시스템의 시운전은 압축기 가동 전 시운전과 가동 후 시운전으로 나누어 수행하였으며, 모든 시운전작업은 3개월에 걸쳐 완료하였다.

(2) 압축기 입구에 임시필터가 설치된 상태에서 약 0.5%의 유량부족이 관찰되었으나, 임시필터 제거 후 유량이 회복되어 요구사양을 만족하는 성능을 보여 KSTAR 저온헬륨설비의 냉각운전을 위한 유량 및 압력 요구조건을 충족하였다.

(3) 성능시험 기간 동안 발견된 압축기스테이션의 진동이 발견되어 보강작업을 수행한 결과 전부하 시 진동은 해결되었으나, 부분부하 시 진동은 미해결되었다. 부분부하 진동은 KSTAR 플라즈마 발생운전 종료 후 해결될 예정이다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 지원을 받는 KSTAR 건설사업의 일부로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Chang, H. -S., Park, D. S., Joo, J. J., Moon, K. M., Cho, K. W., Kim, Y. S., Bak, J. S., Kim, H. M., Cho, M. C., Kwon, I. K., Fauve, E., Bernhardt, J. -M., Dauguet, P., Beauvisage, J., Andrieu, F., Yang, S. -H. and Gistau Bager, G. M., 2007, 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

2. Siemens Energy and Automation Inc., 2002, Installation, Operation and Maintenance Manual, Norwood, OHIO, USA
3. TOROMONT Energy System, 2006, Adsorber Drying Procedure, KSTAR Helium Refrigeration System project internal release document
4. Fauve, E., Charcoal Drying Report, 2007, KSTAR Helium Refrigeration System project internal release document
5. Fauve, E., Maccagna, M. and Nobriga, D., 2007, WCS Performance Test Report, KSTAR Helium Refrigeration System project internal release document