

터보펌프용 극저온 베어링/실 성능시험설비

곽현덕* · 전성민* · 김진한*

Cryogenic Bearing and Seal Test Facility for a Turbopump

Hyun D. Kwak*, Seong Min Jeon*, Jinhan Kim*

Key Words : Bearing and seal test facility(베어링/실 성능시험설비), Turbopump(터보펌프), Liquid nitrogen(액체 질소), Floating ring seal(플로팅 링 실), Inter-propellant seal(IPS)

ABSTRACT

To perform a cryogenic development test for Tribo-elements in a turbopump, a cryogenic bearing and seal test facility (BSTF) is designed and currently under construction in KARI. The working fluid is liquid nitrogen operating at a temperature -197°C . The maximum operating pressure and volume flow rate of BSTF are 100 bar and 10 liters per second, respectively. The development tests of floating ring seals, inter-propellant seals (IPS) and cryogenic ball bearings in a turbopump will be performed using the BSTF. This paper briefly described design requirements and procedures of BSTF.

1. 서론

2002년 11월 한국 최초의 액체로켓인 KSR-III의 발사성공을 기점으로 하여 우리나라는 KSLV 발사체 개발에 전력을 다하고 있다. 알려진 바와 같이 KSR-III는 가압식엔진으로 구조적으로 간단한 이점이 있으나, 엔진 비추력 및 구조비의 한계가 있다. 반면에 터보펌프(turbopump)를 사용하여 산화제와 연료를 고압으로 공급하는 터보펌프 방식의 액체로켓엔진은 구조적으로 복잡해지는 단점에도 불구하고 엔진 비추력 및 발사체 구조비를 비약적으로 향상시키는 장점을 가지고 있다.^[1] 이에 한국항공우주연구원 터보펌프그룹에서는 액체로켓엔진에 사용되는 터보펌프의 국산화 개발을 수행하고 있다.

현재 한국항공우주연구원에서 개발 중인 터보펌프는 액체산소와 케로신을 이용한 30톤급 개방형(open cycle) 액체로켓엔진에 적용하기 위한 것으로 2003년 5월에 개발을 시작하였다. 개발 중인 터보펌프는 액체

산소 및 케로신을 공급하기 위한 단단 원심형 펌프들과 단단 증동식 터빈으로 구성되어 있다. 또한 일축식으로 구성되어 있어 액체산소와 케로신이 펌프 안에서 혼합되는 것을 방지하기 위하여 액체산소펌프와 케로신펌프 사이에 IPS(Inter-propellant seal)를 두고 있다.

이처럼 터보펌프에는 한정된 공간 내에 액체산소로 인한 극저온 환경 및 터빈으로 인한 고온 환경이 공존한다. 또한 반응성이 높은 액체산소와 케로신을 동시에 사용하며 축 계통 부품의 고속 회전이 이루어지는 터보펌프는 기계적으로 열악하고 위험한 환경에서 운용된다고 할 수 있다. 이에 터보펌프의 국산화 개발을 위해서는 주요 부품들에 대한 성능시험이 필수적이며, 특히 회전축계의 안정성에 직접적으로 영향을 미치는 베어링 및 액체산소와 케로신의 기밀을 담당하는 실링(sealing) 요소들의 검증시험은 필수적이다.

이와 관련된 국내의 연구를 살펴보면 (주)로템과 한국항공우주연구원이 공동으로 액체산소를 매질로 하여 터보펌프에 사용되는 실링요소의 시험을 수행한 경향이 있으며, 한국과학기술연구원(KIST) 트라이볼로지

* 한국항공우주연구원 터보펌프그룹

E-mail : hdkwak@kari.re.kr

연구센터에서는 터보펌프용 플로팅 링 실의 수류환경에서의 성능을 시험하여 설계에 필요한 데이터베이스를 지속적으로 구축하고 있다. 그러나 액체산소를 이용한 실링요소의 시험은 시험부의 유량한계로 인하여 실제 운용조건에서의 검증이 불가능한 단점이 있으며, 수류환경에서의 시험 역시 설계에 매우 유용한 데이터를 제공하나 극저온 환경에서의 성능을 예측하고 검증하기에는 부족하다.

이에 한국항공우주연구원 터보펌프그룹에서는 2004년 12월부터 터보펌프에 사용되는 베어링 및 실링 요소들의 극저온 환경 검증시험을 수행하기 위하여 극저온 베어링 및 실 시험설비(Bearing and Seal Test Facility, BSTF)를 구축하고 있다. 이에 본 논문에서는 BSTF의 개요, 설계 및 현재까지의 구축현황에 대하여 간략히 기술하고 BSTF를 이용하여 향후 이루어질 검증시험에 대하여 논하고자 한다.

2. 검증시험 항목

2.1 극저온 볼 베어링의 성능시험

앞서 기술한 바와 같이 극한의 상황에서 운전되는 터보펌프의 안정성을 유지하기 위해서는 회전축계를 지지하는 요소인 베어링의 신뢰성 확보가 중요하다.^[2] 특히 액체산소펌프에 사용되는 베어링은 액체산소에 잠긴 상태에서 극심한 하중을 받으며 고속으로 회전하게 된다. 따라서 베어링의 미세한 파손이 발생하더라도 비정상적인 진동을 야기하여 터보펌프의 운전을 불가능하게 할 수 있으며, 이는 곧 발사체의 실패로 이어지게 된다. 그러므로 주어진 하중 조건 및 운전 속도 하에서 작동요구시간 동안 베어링이 안정적으로 회전하는지를 검증하는 것은 필수적이다. 실제로 해외 터보펌프 개발 기관에서는 터보펌프에 사용하게 될 베어링의 규격이 정해지면, 실제 운용조건을 모사하여 하중시험 및 내구시험을 통과한 베어링만 터보펌프에 사용하도록 규제하고 있다. 그 뿐만 아니라 하중시험 및 내구시험을 통과하여 성능이 입증된 동일 규격의 베어링이라 하더라도 제작사, 생산년도, 생산ล็อต 등 베어링 성능에 변화를 줄 수 있는 차이점이 존재하면 예외 없이 베어링의 성능시험을 수행한 후 터보펌프에 사용한다.

이에 한국항공우주연구원 터보펌프그룹에서는 (주)로템과 협력하여 2004년 1월부터 2월에 걸쳐 국내 최초로 액체산소 환경에서 베어링 하중시험 및 내구시험

Table 1 Verification test list and design requirements of BSTF for cryogenic ball bearing

Verification Test List	
Load capacity test	Axial and radial loading test
Endurance test	No failure allowed under maximum loading in cryogenic environment
Heat generation test	Measure temperature increasement of cooling flow due to friction
Material test	Verification of material compatibility in cryogenic environment
Design Requirements of BSTF	
Max. RPM	20,000 rpm
Working fluid	Cryogenic Fluid (Liquid Nitrogen)
Temperature	-197°C
Flow rate range	0 ~ 2 liters/sec
Pressure range	0 ~ 10 bar

을 수행한 바 있다.^[3] 그러나 시험부 유량한계 및 기타 설비운용의 제약으로 인해 지속적인 시험은 어려운 상황이며, 이에 본 설비구축을 통해 향후 진행될 베어링의 성능시험을 수행할 예정이다.

터보펌프에 사용되는 베어링 성능을 검증하는 변수로는 최대허용하중(maximum allowable load), 정격수명(service life time), 최대한계속도(maximum allowable speed) 및 냉각유량(cooling flow rate) 등을 들 수 있다. 성능 시험 시에는 위에 언급한 파라미터들을 터보펌프의 작동 조건과 동일하게 모사한 후 검증 실시하게 된다. 현재 개발 중인 터보펌프의 작동 조건을 기준으로 하며 선정된 극저온 볼 베어링의 성능시험 항목 및 파라미터의 범위는 table 1에 기술되어 있으며, BSTF는 table 1의 요구조건에 만족하도록 설계되었다.

2.2 플로팅 링 실의 성능시험

터보펌프에서는 회전축과 일정한 간극을 유지하도록 설계된 비 접촉식 실(non-contact seal)의 일종인 플로팅 링 실(floating ring seal)을 사용하여 작동유체의 가압밀봉 상태를 유지한다. 그러나 비 접촉식 실은 필연적으로 작동 유체의 누설을 야기하기 때문에 회전축과 실 사이의 반경 방향 간극을 줄임으로써 누설량을 최소화하는 설계를 적용한다. 그러나 이는 실 간극

Table 2 Verification test list and design requirements of BSTF for floating ring seal

Verification Test List	
Leakage performance test	Leakage characteristics in cryogenic environment
Endurance test	No failure allowed under maximum operating pressure in cryogenic environment
Dynamic characteristic test	Measure stiffness and damping coefficients
Material test	Verification of material compatibility in cryogenic environment
Design Requirements of BSTF	
Max. RPM	20,000 rpm
Working fluid	Cryogenic Fluid (Liquid Nitrogen)
Temperature	-197°C
Flow rate range	0 ~ 10 liters/sec
Pressure range	0 ~ 100 bar

내에서의 급격한 압력 강하, 유체의 스웰(swirl) 유동 및 운전 시 진동에 의한 회전축과 실의 마모 등과 같은 이유로 심각한 문제를 야기할 수 있다. 실제로 외국의 개발과정을 살펴보면 실매질을 사용하는 지상연소시험 중에 액체산소펌프의 플로팅 링 실이 회전축과 마모되어 엔진의 폭발이 발생한 사례도 있다. 따라서 플로팅 링 실의 성능 및 안정성을 검증하는 시험은 터보펌프개발과정에서 중요하다. 특히 극저온 환경에서는 소재의 열변형에 의해 플로팅 링 실의 간극이상온에서 보다 작아지게 되기 때문에 극저온 환경에서 플로팅 링 실을 검증하는 시험은 필수적이라 할 수 있다.

플로팅 링 실의 성능 및 안정성을 가늠하는 인자로는 누설특성, 플로팅 링의 고정 위치, 실 간극에서 발생하는 강성 및 감쇠의 크기 등이 있다. 특히 플로팅 링 실의 강성 및 감쇠는 실 자체의 안정성뿐만 아니라 터보펌프 회전체 시스템 전체의 안정성에 중요한 영향을 미치게 된다.^[4]

이에 국내에서는 플로팅 링 실의 형상에 따른 성능 및 안정성에 관한 연구를 수류환경에서 지속적으로 수행하고 있으며^[5,6], 액체산소 환경에서 플로팅 링 실의 누설특성 및 소재의 적합성을 시험한 바 있다.^[7] 수류 시험의 경우 극저온 환경에서의 플로팅 링 실의 성능을 정성적으로 추측하는 기본적인 데이터를 제공하나, 실제 운전조건에서의 플로팅 링 실의 성능을 검증하기는 불가능한 실정이다. 또한 액체산소 환경에서 수행

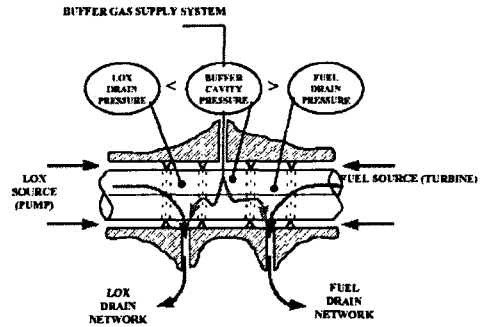


Fig. 1 Operating scheme of IPS

한 시험의 경우 누설특성 및 소재의 적합성은 검증하였으나, 강성 및 감쇠를 측정하지 못해 안정성을 검증하지는 못하였다. 이에 본 설비구축을 통하여 극저온 환경에서의 플로팅 링 실의 누설특성, 소재의 적합성, 강성 및 감쇠 등을 측정할 예정이다. 플로팅 링 실의 작동조건에 의해 도출된 BSTF의 요구조건 및 시험항목은 table 2에 기술되어 있다.

2.3 IPS의 성능시험

일반적으로 단일 축 터보펌프에서는 액체산소펌프 및 연료펌프에서 축을 따라 누설되는 액체산소와 케로신의 혼합을 방지하기 위하여 Inter-Propellant Seal(IPS)을 사용한다. IPS의 기본적인 작동원리는 다음과 같다. 액체산소펌프 및 연료펌프에서 일정한 압

Table 3 Verification test list and design requirements of BSTF for IPS

Verification Test List	
Leakage performance test	Leakage characteristics in cryogenic environment
Endurance test	No failure allowed under maximum operating pressure in cryogenic environment
Material test	Verification of material compatibility in cryogenic environment
Design Requirements of BSTF	
Max. RPM	20,000 rpm
Working fluid	Cryogenic Fluid (Liquid Nitrogen)
Temperature	-197°C
Flow rate range	0 ~ 0.5 liters/sec
Pressure range	0 ~ 10 bar

력을 가지고 축을 따라 누설된 유체는 IPS 내부에 축과 수~수십 마이크로미터의 간극을 가지도록 설치된 다수의 탄소 링(carbon ring)을 통과하면서 압력이 감소하게 된다. 이 때 Fig. 1에 나타난 바와 같이 양쪽에서 유입된 액체산소 및 연료가 섞이지 않고 각각의 드레인으로 배출될 수 있도록 고압의 완충가스(buffer gas)를 공급하게 된다. 이때 완충가스의 압력은 근접한 드레인의 압력보다 높아야 하는 것이 기본적인 작동조건이며, 완충가스로는 헬륨, 질소 같은 비활성 기체를 사용한다. 만약 터보펌프 운전 중에 액체산소와 케로신이 혼합될 경우 예기치 않은 점화를 일으켜 엔진의 치명적인 파손을 야기할 수 있기 때문에 IPS의 신뢰성을 검증하는 것은 개발단계에서 필수적이다. 이에 BSTF를 이용하여 IPS의 성능시험을 수행할 예정이며, 시험항목 및 BSTF 요구조건은 table 3에 기술되어 있다.

3. 성능시험설비의 설계

3.1 성능시험설비의 작동방식

기본적으로 BSTF는 극저온의 작동유체를 시험부에 장착된 시험장치에 원하는 압력으로 공급하는 역할을 담당하게 되며, 이를 구현하기 위한 방식으로는 펌프를 이용하는 방식이나, 고압의 기체를 극저온 유체가 저장된 탱크에 가압하여 일정한 압력으로 밀어내는 blow-down 방식 등이 있다. 그러나 펌프를 사용할 경우 본 설비의 압력 및 유량 요구조건을 만족시키기 위해 매우 대용량의 펌프가 필요하며, 압력 및 유량이 펌프의 성능에 의해 좌우되기 때문에 시험범위가 제한되는 단점을 가지고 있다. 이에 본 설비에서는 고압 기체를 이용하는 blow-down 방식을 사용하였다. BSTF의 개략적인 구성도는 Fig. 2에 나타나 있으며, 주요 규격이 table 4에 정리되어 있다.

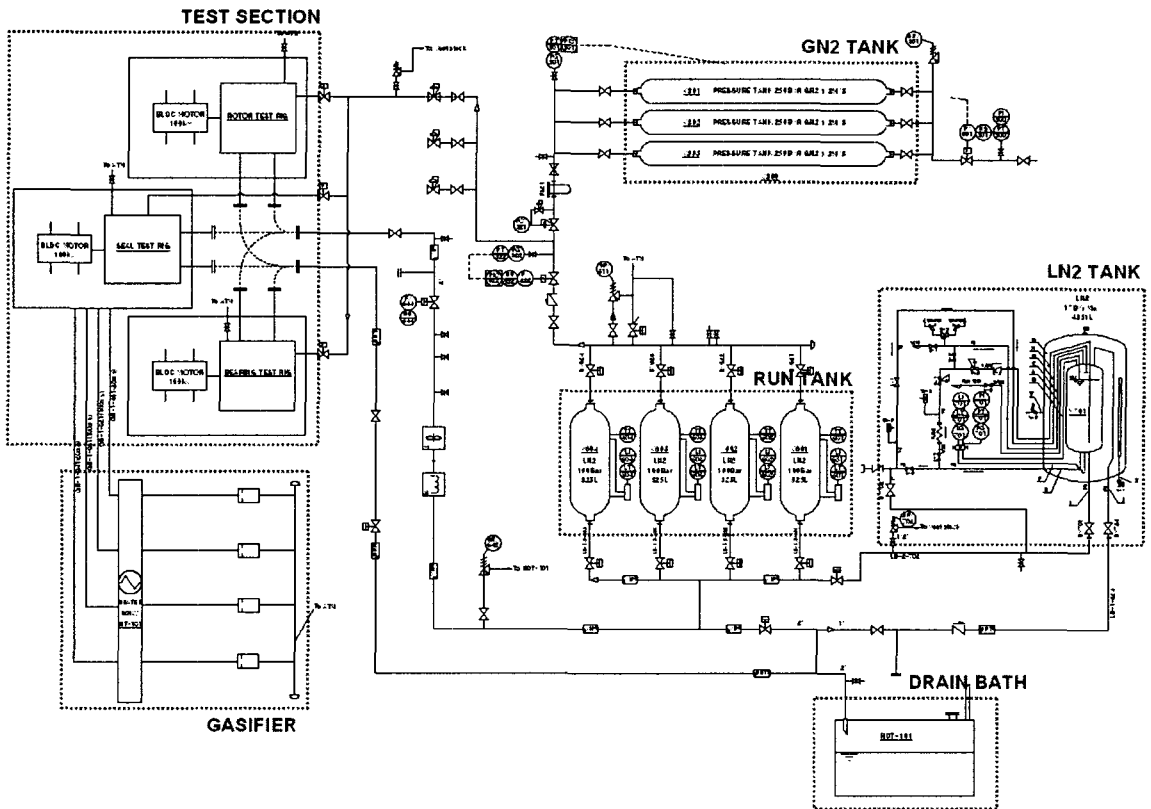


Fig. 2 Conceptual drawing of BSTF

Table 4 Design specifications of BSTF

Type	Blow-down of LN2 using high pressure GN2
Working fluid	LN2 for cryogenic test GN2 for blowing-down of LN2
Max. pressure	100 bar (LN2), 270 bar (GN2)
Max. flow rate	10 liters/sec (LN2)
Max. test time	300 seconds at max. flow rate
Driving type	Motor
Max. rpm	30,000 rpm
Max. power	100 kW

실제 BSTF에는 안전밸브, 체크밸브, 필터, 압력센서 및 온도센서 등 여러 가지 장치가 설치되어 있으나 Fig. 2에서는 생략하였다. BSTF는 크게 시험부(test section), 고압기체질소탱크(GN2 tank), 고압액체질소탱크(run tank), 저압액체질소탱크(LN2 tank), 드레인 베스(drain bath) 및 기화기(gasifier) 등으로 구성되어 있다. 저압액체질소탱크는 액체질소를 보관하는 역할을 하며, 시험 직전 액체질소는 고압액체질소탱크로 이송되어 각 부 배관의 예냉을 실시하게 된다. 예냉이 완료되면 고압기체질소탱크에 저장되어 있던 고압의 기체질소가 압력조절기를 통하여 고압액체질소탱크의 상부로 공급되며, 기체질소의 압력으로 인해 액체질소는 일정한 압력과 유량으로 시험부로 공급되게 된다. 시험부를 통과한 액체질소는 대기 중에 개방된 드레인 베스로 배출되어 자연기화 된다. 한편 시험부에서 IPS를 시험할 경우 IPS를 통과한 질소는 급격한 압력강하로 액상과 기상이 동시에 존재하는 이상유동(two phase flow)의 형태를 가지게 되는데, 이때의 유량을 측정하기 위해 기화기를 사용하게 된다. 기화기를 사용하여 이상유동을 순수한 기체유동으로 변환시킨 다음 오리피스를 이용한 질량 유량 측정 장치를 사용하여 시험조건에서의 IPS의 액체질소의 누설량을 측정하도록 하였다.

3.2 시험부의 구성

앞서 기술한 바와 같이 본 설비에서 수행되는 시험은 크게 베어링, 플로팅 링 실 및 IPS의 성능시험으로 이루어지며, 현재 각 시험항목별로 시험장치의 설계 및 제작이 이루어지고 있다. 각각의 시험장치는 방진 설계된 정반위해 설치되며, 액체질소의 공급 및 배출 배관이 연결되게 된다. 시험장치의 구동은 100 kW 급의 전기모터를 통해 이루어지며, 최고 30000 rpm 까지

Table 5 Driving motor specifications

Type	Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)
Power	100 kW
Max. rpm	30,000 rpm
Motor cooling	Water
Bearing	Angular contact ball bearing lubricated by oil (include oil cooler)
Input power	3 phase 380 VAC

Table 6 LN2 and GN2 line specifications

LN2 Line	
Type	Super Insulated vacuum pipe
Size	50A sch 20 STS316 (inner pipe) 100A sch 10 STS304 (outer pipe)
Max. pressure	10 MPa
Degree of vacuum	Less than 10^{-5} Torr
Degree of heat exchange	Less than 1 W/m
Helium leak test	Less than 1×10^{-9} SCC/sec
GN2 Line	
Max. pressure	32 MPa
Type	ASTM A269(STS316TP) SMLS SS Tube

운용할 수 있다. Table 5에 모터의 주요 규격을 기술하였다.

3.3 배관 및 탱크 시스템의 구성

배관 시스템은 시험용 주배관, 배출용 배관, 기체질소 배관, 제어밸브 안전밸브 등 질소가 흐르는 부분을 총칭한다. 주배관 및 배출용 배관은 내부 유속과 시스템의 손실을 고려하여 결정하여야 하는데, 관 직경이 너무 작으면 유속이 빨라 시스템의 손실이 커지고 관 직경이 필요 이상으로 클 경우에는 배관의 설치비용이 증가할 뿐 아니라 초기 냉각에 필요한 액체질소가 과다하게 필요한 문제가 발생한다. 이에 본 연구에서는 배관시스템의 손실, 시험목적 및 설치비용 등을 고려하여 배관의 크기를 선정하였으며, 시험용 주배관 및 배출용 배관으로는 2 inch 진공배관을 선정하였다. 한편 액체질소를 가압하는 기체질소 배관으로는 1 inch 배관을 선정하였으며, 기타 안전방출, 밸브구동, 시험장치 공급 등을 위한 배관은 각각의 목적에 맞게 적절한 직경의 배관을 선정하였다. 배관의 주요 규격은 table 6에 정리되어 있다.

Table 7 LN2 and GN2 tank specifications

High Pressure LN2 Tank	
Type	Vacuum tank
Capacity	825 liters x 4 ea
Design pressure	15.3 MPa
Proof pressure	19.9 MPa
Temperature	-196 ~ 40 ℃
Degree of vacuum	0.05 Torr
Insulation	Perlite
Low Pressure LN2 Tank	
Type	Vacuum tank
Capacity	4851 liters x 1 ea
Design pressure	1.76 MPa
Proof pressure	2.7 MPa
Temperature	-196 ~ 40 ℃
Degree of vacuum	0.05 Torr
Insulation	Perlite
High Pressure GN2 Tank	
Type	High pressure vessel
Capacity	1300 liters x 3 ea
Design pressure	27.6 MPa
Proof pressure	41.4 MPa
Temperature	-40 ~ 93 ℃

시험설비에 사용된 탱크는 크게 고압기체질소탱크, 고압액체질소탱크, 저압액체질소탱크로 나뉘어 진다.

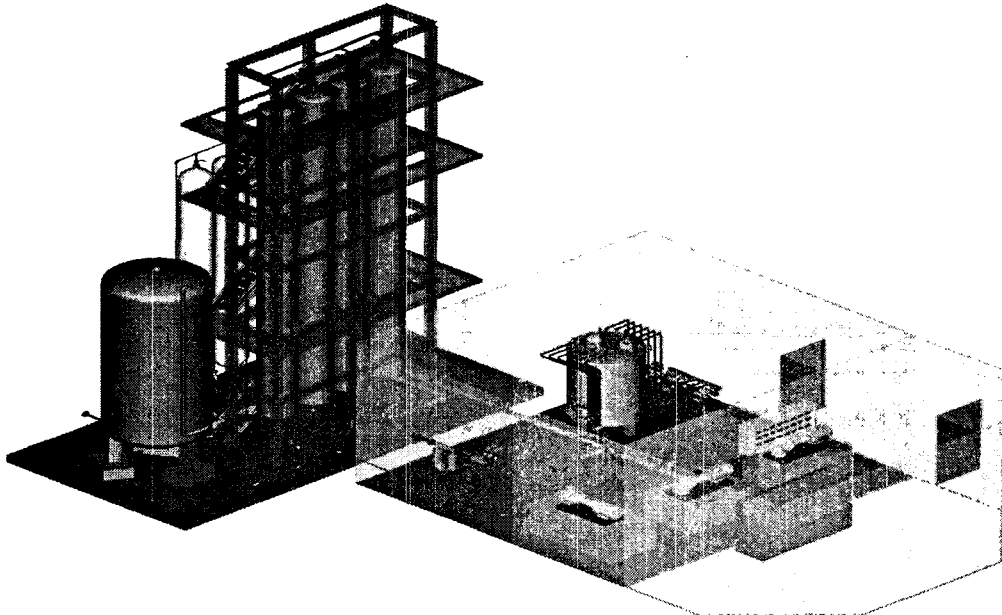


Fig. 3 3D schematic drawing of BSTF

앞서 table 4 에 기재된 최대시험유량에서의 시험시간을 고려하여 고압 및 저압액체질소탱크의 용량을 산정하였다. 시험 시 소요되는 액체질소 및 배관 예냉에 소요되는 액체질소의 양을 고려하여 저압액체질소탱크의 용량은 4,851 liter 로 산정하였다. 고압액체질소탱크의 경우 100 bar 이상의 설계압력을 가지는 대용량 단일 탱크를 사용할 경우 제작비용이 기하급수적으로 증가할 뿐만 아니라 크기가 매우 커지는 단점이 있어 이를 해결하기 위하여 825 liter 의 소형 탱크 4개를 사용하는 것으로 결정하였다. 두 개의 탱크 모두 이중단 열진공탱크로 열손실을 최소화 하여 시험 중이나 보관 시 액체질소가 기화하는 것을 방지하도록 하였다. 한편, 고압기체질소탱크는 최대시험압력 100 bar 로 고압액체질소탱크에 채워져 있는 액체질소를 모두 가압하여 밀어낼 수 있도록 270 bar, 1300 liter 의 용량을 가지는 탱크 3개를 사용하였다. Table 7 에 본 설비에 사용된 탱크의 규격을 정리하였다.

3.4 기화기 및 기타 시스템의 구성

IPS 성능시험 수행 중에 사용하는 기화기는 전열식으로 100 kW 의 용량을 가지는 것으로 선정하였다. 이는 질량유량 기준으로 200 g/sec 의 액체질소를 0 ℃ 이상으로 가온할 수 있는 용량이며, IPS의 누설유량을 감안할 때 충분한 마진을 가지고 있다. 한편 BSTF

각종 밸브의 제어, 각 부의 압력 및 온도 측정 등을 위한 제어 시스템은 별도의 제어 판넬을 구성함과 동시에 LabView를 이용한 PC 기반의 시스템도 구성하여, 동시에 운용이 가능하도록 설계하였다. BSTF에는 시험과 데이터의 획득 뿐 아니라 안전설비를 포함한 여러 가지의 시설이 필요하다. 기체질소 및 액체질소가 고압으로 운용되며 회전체가 고속으로 회전하기 때문에 유사시에 대비하여 외부 설비와 시험실 사이에 방호벽을 설치하였으며, 시험실과 제어실 사이에도 철판 및 방호유리로 안전시설을 구비하였다. 또한 액체질소의 누설을 고려하여 산소 감지기를 시험실과 제어실에 설치할 예정이다. 또한 시험 중에 시험실과 외부 설비 주요 장비들의 작동상태를 감시할 수 있도록 폐쇄회로 카메라 시스템을 제어실에 설치하였다. 이상 기술한 내용을 바탕으로 한 설치 예상도를 Fig. 3에 도시하였다.

4. 결론

본 논문에서는 극저온의 액체질소를 이용하여 터보펌프에 사용되는 베어링, 플로팅 링 실 및 IPS의 성능 시험을 수행할 수 있는 설비를 설계하였다. 베어링 및 실 요소의 성능시험검증 항목 및 요구조건을 추출하여 시험압력 100 bar, 시험유량 10 liters/sec 및 회전속도 30000 rpm 으로 시험할 수 있도록 설비를 구성하였으며, 이를 통하여 베어링의 하중시험, 내구성시험, 발열량시험 및 소재시험 등을 실시하여 터보펌프에 사용될 베어링의 신뢰성을 확보할 예정이다. 또한, 플로팅 링 실 및 IPS와 같은 실링 유닛의 누설시험, 내구성시험, 소재시험 및 동특성시험 등을 수행할 예정이다. 이에 본 설비가 성공적으로 완성되어 앞서 기술한 시험들을 수행하게 되면 현재 개발되고 있는 국산화 터보펌프의 연구 및 개발 성공에 크게 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) 김진한, 이은석, 홍순삼, 최창호, 전성민, 정은환, 2004, "액체로켓엔진용 터보펌프 개발현황," 제5회 우주발사체기술 심포지움, pp. 38~51.
- (2) 이용복, 김창호, 곽현덕, 하태웅, 우유철, 2001, "탄성 링을 갖는 볼 베어링 지지의 터보펌프 임계속도에 관한 연구," 유체기계공업학회 유체기계저널, 제4권, 제2호, pp. 22~28.
- (3) 곽현덕, 전성민, 김진한, 조광래, 김선용, 우관제,

- 2004, "터보펌프용 극저온 볼 베어링의 성능검증," 한국윤활학회 춘계 학술대회, pp. 117~122.
- (4) Kwak, H. D., Lee, Y. B., Kim, C. H., Ha, T. W. and Woo, Y. C., 2002, "Prediction of Rotordynamic Stability for the High Pressure, High Speed Turbopump Unit," IFToMM 6th Int'l Conf. on Rotordynamics, pp. 478~485.
- (5) 신성광, 이용복, 곽현덕, 김창호, 장건희, 2003, "고압터보펌프용 플로팅 링 실의 거동과 동특성의 상관관계에 관한 실험," 한국소음진동공학회 추계학술대회, pp. 471~477.
- (6) 하태웅, 이용복, 김창호, 2001, "터보펌프 고압 후로팅 링 실의 누설량 및 회전체 동역학적 특성 해석," 유체기계공업학회 유체기계저널, 제4권, 제3호, pp. 29~38.
- (7) 곽현덕, 전성민, 김진한, 2004, "국산화 터보펌프용 플로팅 링 실의 누설특성 및 소재검증," 한국군사과학기술학회 종합학술대회, pp. 583~586.