

터보펌프 시스템용 베어링/실 시험설비 개발

우관제*, 김경호**, 우유철***

Development of bearing/sealing test facility for turbopump system

K. J. Woo, K. H. Kim, Y. C. Woo

ABSTRACT

The bearing/sealing test (BST) facility is intended for tests of bearing and seal for turbopump of liquid rocket engine (LRE) in various media (water, liquid nitrogen, liquid oxygen). The bearing test for serviceability is fulfilled with the estimation of the flow rate of cooling medium through the test bearing separator and with the simulation of axial and(or) radial loading. The purpose of seals test is the determination of magnitude of leakages through the seal and a time variation of this magnitude.

초 록

베어링/실 시험설비 (BST)는 다양한 매체 (물, 액체질소, 액체산소)에서 액체로켓 엔진의 터보펌프를 위한 베어링과 실을 시험하기 위한 장비이다. 베어링 성능특성 시험은 베어링을 통과하는 냉각 유량과 축 방향 및 반경방향의 하중을 모사하여 시험이 수행된다. 실 시험의 목적은 실을 통과하는 누수량과 시간에 따른 누수량의 변화를 결정하기 위함이다.

Key Words : Turbopump(터보펌프), Bearing/seal(베어링/실), LRE(액체로켓엔진)

1. 서 론

액체로켓 엔진 터보펌프의 기본 구조는 <그림1>과 같이 산화제 펌프 - 세퍼레이팅 유닛 - 연료 펌프 - 실링 유닛 - 터빈으로 구성되었다. 세퍼레이팅 유닛은 연료와 산화제의 혼합을 막기 위한 역할을 하고 터빈가스가 연료펌프로 진

입하는 것을 막기 위한 실링 유닛이 설치되어 있다. 이러한 배열은 실링 유닛의 Failure 발생 시 터빈 작동 유체인 Fuel Rich의 연소가스가 산화제와 혼합되어 폭발로 이르는 경우를 최소화하기 위한 방법이다.

일반적으로 액체로켓 엔진 고장의 60% 이상이 터보펌프 오작동에 의해 발생하며 특히 터보펌프의 오작동은 베어링과 실 유닛의 문제로 야기된다. 터보 펌프는 50,000 rpm 이상의 높은 회전수와 rotating speed 및 -200C이하의 극저온 환경에서 작동하는 특징이 있어 베어링 및

* 현대모비스 기술연구소 우주부문
** 현대모비스 기술연구소 우주부문
*** 현대모비스 기술연구소 우주부문

실에 대한 동특성 연구는 고 난이도의 총체적 기술이다.

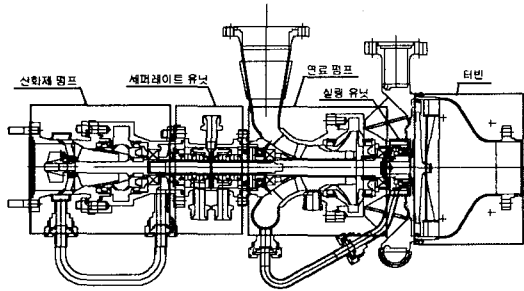
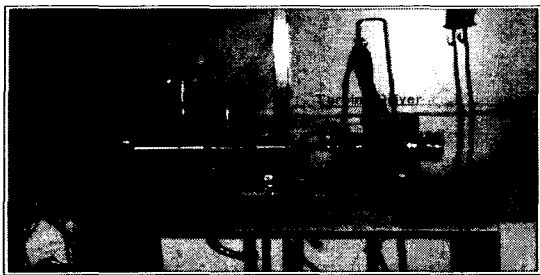
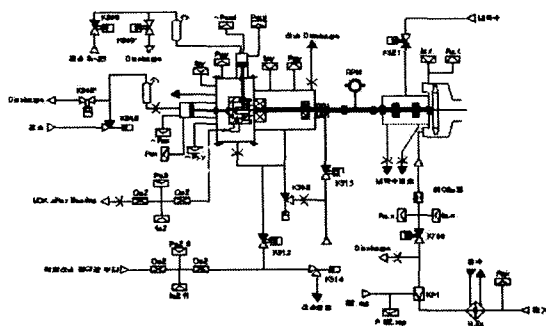


그림 1 터보펌프 시스템 구조 및 부품 배열

터보펌프의 성능시험은 시험설비 및 시험비용이 고가일 뿐 아니라 시험 실패로 인해 터보펌프 자체에 손상을 입었을 때 막대한 손실을 가져온다. 따라서 터보펌프 오작동의 핵심 요소인 베어링과 실 유닛의 별도 시험평가를 위한 시험설비 개발은 터보펌프 시스템 개발을 위해 반드시 필요한 단계이다.



(a) BST 설비 Layout



(b) BST 설비 schematic

그림2. 베어링/실 성능시험 설비

BST 설비의 주요 구성품은 <그림2>와 같이 Technological part, working part (replacement units), 하중실린더, Turbine driver, Spline shaft와 Mounting plate로 구성되어 있다. Technological part는 로터가 장착되는 부분으로 technological bearing으로 지지되며 시험대상에 따라 베어링 작동 축, 실링 작동 축을 장착할 수 있다. Working part (replacement units)는 시험대상에 따라 다양한 베어링과 실을 장착하는 Units이다. 하중실린더는 베어링 특성시험을 위한 축 방향과 원주방향에 하중을 가하는데 사용한다. 주어진 회전수로 로터를 회전시키기 위해 Turbo driver를 사용하며 고온질소 가스를 이용하여 구동시킨다. Turbo driver와 로터는 spline shaft를 이용하여 연결되며 Mounting plate 위에 설비를 조립하고 고정시킨다. 시험설비의 사양은 표1과 같다.

표 1. 설비 작동유체 사양

작동매체	온도[K]	유량[kg/s]	압력[atm]
물	~300	0.5 - 4	150
액체질소	~170	0.5 - 4	150
액체산소	~190	0.5 - 4	150

Turbo driver는 작동매체가 액체산소이므로 방폭을 고려하여 고온 질소가스에 의해 구동되며 Rotating Speed는 20,000 ~ 30,000 rpm이다.

2. 본 론

2.1 베어링 시험

2.1.1 시험 목적

베어링 시험의 목적은 베어링의 냉각에 필요한 유량을 결정하기 위해 베어링을 통과하는 작동매체의 유량 측정의 가능성과 터보펌프 작동 중에 발생하는 축 하중과 반경하중의 모사 가능성을 검토하여 향후 고압 터보펌프용

베어링과 실을 개발하기 위함이다.

2.1.2 시험 조건

베어링 시험은 극저온 산화제에서 사용하는 5-2050 베어링을 이용하여 액체산소 매질에서 수행 하였다. 5-2050 베어링의 사양은 표 3과 같으며 시험조건은 표4에서 보여준다.

표2. 5-2050 베어링 사양

종류	내경	외경	넓이	볼수	볼지름	비고
5-2050	25	52	15	9	7.94	

표3. 베어링 시험조건

No	Measured Parameter	Dimen-sion	Value
1	Test time	sec	150
2	RPM	r/min	18,000
3	Pressure in working part	atm	70
4	LOx flowrate	kg/sec	3.5
5	Axial force	kgf	~100
6	Radial force	kgf	~100
7	Bearing loading time (axial/radial)	sec	10/20
8	N2 purging pressure	atm	70
9	Water pressure for turbine cooling	atm	4

2.1.3 시험 결과

터보펌프의 작동상태를 모사하기 위해서 액체 산소 공급 압력은 터보펌프의 floating ring seal 후단에 걸리는 압력 70atm을 공급하였으며 베어링을 통과한 액체산소의 feedback 라인에 6mm의 orifice를 장착하여 배출되는 유

량을 측정하였다. 베어링 하중은 아래 식과 같이 계산하여 민군과제로 개발하고 있는 10톤급 터보펌프의 해석 결과에 맞게 가해 주었다. 그림 3은 시간 변화에 따른 rpm 변화이고 그림4, 5는 베어링을 통과한 유량과 하중 실린더에 의해 가해진 loading을 나타내었다. 베어링에 가한 하중은 식 (1)과 (2)에 의하여 계산되어진다.

$$R(y, x) = P_{cy}F - P_{w.s}f \quad (1)$$

$$P_{cy} = [R(y, x) + P_{w.s}f]/F \quad (2)$$

P_{cy} - the pressure in the loading cylinder [kgf/cm²]

F - the area of loading cylinder piston [cm²]

$P_{w.s}$ - the pressure in the working section [kgf/cm²]

f - the area of the rod [cm²]

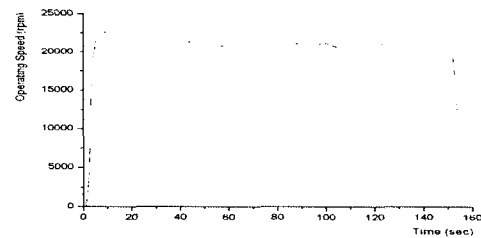


그림 3 시간 변화에 따른 rotor의 rpm 변화

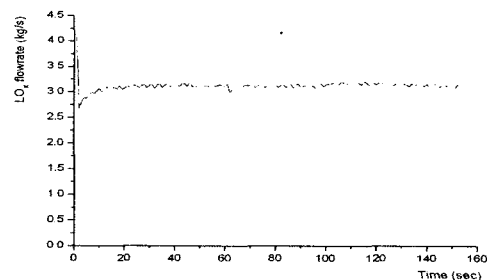


그림 4 시간 변화에 따른 베어링 통과 유량

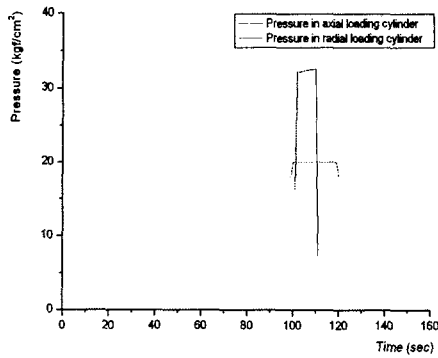


그림 5 축/반경 하중

2.2 실 시험

2.2.1 시험 목적

실 시험의 목적은 실의 누수량 측정과 시간에 따른 누수량 변화를 측정하여 실의 정특성을 파악하기 위함이다.

2.2.2 시험 방법

실 시험은 floating ring seal을 통과하는 유량과 세퍼레이팅 유닛에서 face type의 접촉 실을 통과하는 유량을 측정하는 것이다. floating ring seal을 통과한 유량은 유량이 상대적으로 많아 flowmeter로 측정하였으며 접촉 실을 통과하는 유량은 매우 작기 때문에 따뜻한 물을 통과유량 배관 외부로 흘려보내기화를 시키고 배관에 orifice를 설치하여 orifice 전단의 압력과 온도를 측정하여 유량을 계산하는 방법을 사용하였다.

2.2.3 시험 결과

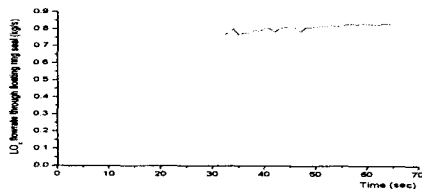


그림 6 floating ring seal 통과 유량 변화

그림7과 그림8에서 floating ring seal과 세퍼레이팅 유닛에서 face type의 접촉 실을 통과한 유량의 시간에 따른 변화를 보여준다.

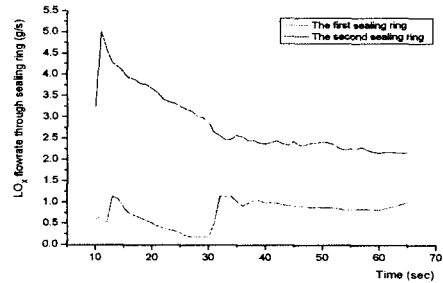


그림 7 세퍼레이팅 유닛 접촉실 통과 유량 변화

3. 결론

Bearing/sealing test facility는 액체로켓의 고압 터보펌프에 사용하는 극저온 bearing과 실링의 성능특성을 검증할 수 있는 시험설비이다. 본 설비는 터보펌프 해석결과 도출된 베어링과 실의 누수량 측정과 축/반경 방향 하중을 모사하여 선정된 베어링의 적용 가능성을 파악하는 것이다. 현재 이 설비를 이용하여 베어링과 실의 정특성만을 검토할 수 있지만 향후 베어링 부위에 가속도계를 설치하여 베어링 진동 특성을 연구하고 실의 거동을 연구할 수 있도록 구조 변경을 계획하고 있다.

참고 문헌

1. Schaz Ya. Yu. (1963) The sealing for bearing units
2. Goluvek A. I., Kondakov L. A., (1986) Sealing and sealing technic
3. Installation for testing seals and bearings (2001) HYSА-99-S0