

7톤급 터보펌프 기계평면실의 성능 시험 연구

배준환[†] · 곽현덕 · 최창호

한국항공우주연구원 터보펌프팀

Study on the Mechanical Face Seal Performance for a 7-ton-Class Turbopump

Joonhwan Bae[†], Hyun D. Kwak and Changho Choi

Turbopump Department, Korea Aerospace Research Institute

(Received July 8, 2016; Revised August 19, 2016; Accepted August 21, 2016)

Abstract – This paper presents an experimental study of the leakage performance and endurance performance of a mechanical face seal in the 7-ton-class turbopump of the Korea Space Launch Vehicle 2 third-stage engine. We install a mechanical face seal between the fuel pump and turbine to prevent the mixing of the fuel and turbine gas. We design and manufacture a prototype mechanical face seal, which has two parts, namely, a bellows seal assembly and mating ring. We set up a test facility to measure the leakage and endurance of the mechanical face seal. For the similarity tests, we use water under real operating conditions such as high rotational speed, high temperature, and high pressure. Through investigation of the leakage and carbon wear rate, it is possible to evaluate the performance of the mechanical face seal. The results of the leakage and endurance performance test demonstrate the absence of any leakage from the prototype mechanical face seal after a trial run and clarify that the acceptable wear rate fully satisfies the turbopump requirements. Finally, we install a qualified mechanical face seal in a 7-ton-class turbopump and perform a validation test in the turbopump real-propellant test facility in the Korea Aerospace Research Institute. The test results confirm that the mechanical face seal works well under real operating conditions.

Keywords – turbopump(터보펌프), mechanical face seal(기계평면 실, MFS), wear rate(마모율), leakage(누설), performance test(성능 시험), turbopump real-propellant test(터보펌프 실매질 시험)

Nomenclature

- P_k : Contact pressure (kPa) (접촉압)
 P_o : Outside pressure (kPa) (외압)
 P_s : Pressure by bellows (kPa) (복원압)
 B : Balance ratio (밸런스 비)
 K : Pressure gradient factor (압력 구배 요소)
 V : Sliding velocity (m/s) (미끄럼 속도)
 T : Operating time (sec) (작동 시간)

1. 서 론

최근 통신 및 군사 기술의 발전으로 고성능의 인공 위성 수요가 급격히 늘어 나면서 발사체에 요구되는 탑재 하중이 증가하고 있으며, 이를 위해 발사체 개발을 담당하는 연구기관 및 업체에서는 성능이 우수한 발사체 엔진 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 일반적으로 높은 탑재 하중을 얻기 위해 발사체에는 무게 대 추력 비가 높은 터보펌프 방식의 엔진이 주로 사용되며, 이 때 터보펌프는 연소기에 산화제와 연료를 공급하는 역할을 담당한다.

터보펌프는 로켓의 발사 후 탑재물의 성공적인 운송까지 극저온, 상온, 고온의 다양한 환경 조건에서 고속

[†]Corresponding author : jhbae@kari.re.kr

Tel: +82-42-860-2899, Fax: +82-42-860-2679

© 이 논문은 한국윤활학회 2016년도 춘계 학술대회 (2016. 04. 14~15/한남대학교 공과대학) 발표논문임.

으로 회전하며 고압의 연료 및 산화제를 공급하므로 높은 신뢰성이 요구된다.

국내에서는 한국항공우주연구원에서 30톤 급 액체 로켓 엔진에 적용이 가능한 기술 시연 시제품 터보펌프를 개발한바 있으며, 현재 한국형 발사체에 사용될 7톤 및 75톤급 저 추력, 고 추력 엔진 용 터보펌프의 설계, 제작 및 성능 시험이 진행 중에 있다[1-4].

현재 개발 중인 7톤 및 75톤급 터보펌프는 산화제 펌프, 연료 펌프 및 터빈이 일렬로 연결되어 동력이 전달되는 구조로 산화제와 연료 및 터빈 구동 연소 가스의 혼합을 방지하기 위한 별도의 기밀 장치가 필요하다. 이를 위해 산화제 펌프와 연료 펌프 사이에는 추진제 혼합 방지 실(inter-propellant seal)이 장착되어 산화제와 연료가 혼합되는 것을 방지하고 있으며[5-6], 연료 펌프와 터빈 사이에는 연료와 터빈 구동가스의 혼합을 방지하기 위해 Fig. 1과 같이 기계평면 실(mechanical face seal)이 설치되어 있다.

터보펌프에서 사용되는 기계평면실은 고속, 고온 및 높은 차압에서 운용이 되므로 가동 중 파손이 쉽게 발생할 수 있으며, 이로 인해 터보펌프가 정상 작동하지

않을 경우 로켓 발사의 실패를 가져올 수 있다. 따라서, 터보펌프 개발에 있어 내부 기밀 장치들은 요구되는 실제 운용 환경과 유사한 특수한 시험 설비에서 성능 검증 시험을 수행하여 신뢰성을 검증해야 한다.

한국항공우주연구원에서는 이미 30톤 급 터보펌프 기계평면실에 대해 국내에서 누설 성능 및 환경 인증에 대한 수락 시험을 통해 성능 검증을 수행한 바 있으며[7], 75톤급 터보펌프 기계평면실도 개발을 완료하였다[8].

본 연구에서는 현재 개발 중인 한국형 발사체의 3단 엔진에 들어갈 7톤급 터보펌프에 사용되는 기계평면실에 대한 시제품 제작 및 성능 시험 검증에 대한 내용을 기술하였다.

2. 시제품 제작 및 검증 방법

2-1. 시제품 제작

터보펌프 기계평면실은 터보펌프의 연료 펌프와 터빈 사이에 장착되어 연료와 터빈에서 유입되는 연소 가스의 혼합을 방지하는 역할을 한다. 기계평면실의 기본 구조는 Fig. 2와 같으며, 개발되는 터보펌프에 따라 적용되는 형상 및 크기는 변할 수 있으나 강성을 가진 접촉면이 적절한 접촉압력으로 이에 맞닿는 면과 맞물려 회전하며, 기밀을 유지하는 실의 원리와 구조는 유사하다.

7톤급 터보펌프 기계평면실은 Fig. 3과 같이 벨로우즈 실 어셈블리(bellows seal assembly)와 메이팅 링(mating ring)으로 구성되어 있다. 벨로우즈 실 어셈블리는 카본이 부착된 일정한 강성을 가진 금속 벨로우즈와 이를 고정하는 홀더 등으로 구성이 되어 터빈 쪽

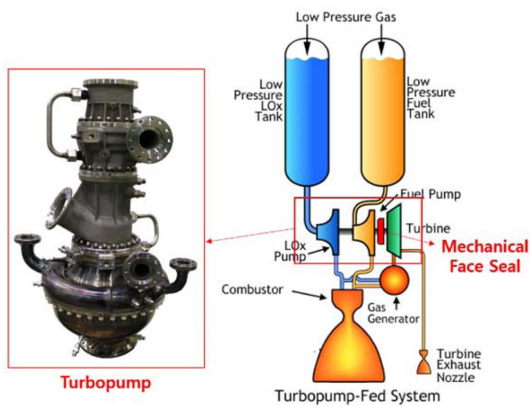


Fig. 1. Configuration of 7-ton class turbopump and layout of turbopump type rocket engine.

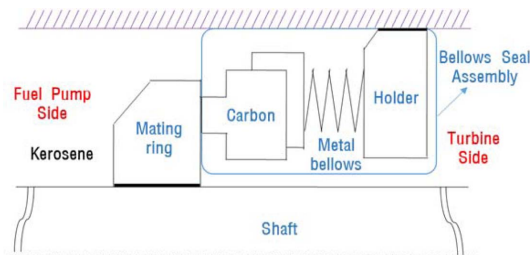


Fig. 2. Layout of turbopump mechanical face seal.



Fig. 3. Prototype of turbopump mechanical face seal.

터보펌프 케이싱에 부착되며 카본과 회전축에 고정되는 메이팅 링 사이에 형성되는 접촉면에서 기밀이 이루어 진다.

터빈 구동 가스의 온도가 약 900K 내외로 운용되므로 터빈의 고온 환경에 견디기 위해 벨로우즈 실 어셈블리와 메이팅 링은 내열 합금 소재로 제작되며 카본 실은 흑연 소재로 제작된다.

기계평면실의 시험 조건은 시험기의 작동 조건을 고려하여 실제 터보펌프가 운용되는 조건과 최대한 유사하게 결정된다. 7톤급 터보펌프의 경우 기계평면실의 연료 펌프 측은 상온에서 약 8~10 기압(bar) 상태로, 터빈 측은 700~900K 에서 약 2 기압 상태로 작동된다. 따라서 기계평면실은 약 6~8기압 정도의 차압을 가지고 약 27,000 rpm의 회전 속도로 한 쪽은 상온, 한 쪽은 고온의 환경에서 운용된다.

한국형 발사체의 7톤급 터보펌프의 실제 작동 시간은 약 500초이며 요구되는 성능 시험 수락 조건은 실제 작동 시간의 10배인 5000초 이상의 정상 작동을 검증 기준으로 잡고 있다.

2-2. 성능 검증 방법

제작사에서 가공, 제작된 터보펌프 기계평면 실의 성능 검증은 정적 누설 성능 시험, 동적 누설 성능 시험 및 내구 성능 시험으로 구성된다.

정적 누설 성능 시험은 터보펌프에 장착된 기계평면 실이 연료와 터빈 연소 가스가 채워진 상태에서 정상적인 기밀 유지가 되는 지를 확인하는 시험이며, 실제 장착 상태를 모사하기 위하여 터보펌프 내부의 기계평면 실 장착부위와 동일한 형상 및 가공 공차를 가지는 시험기를 제작하여 터보펌프의 작동 시간 동안 누설이 얼마나 발생하는 지를 확인하는 시험이다.

동적 누설 성능 시험은 시험실에서 기계평면 실의 정격 회전 속도, 차압 조건, 온도 조건 등을 실제 작동 조건과 유사하게 설정하여 카본의 마모량, 작동유체의 누설 량 등의 물리 량을 측정하는 시험으로 기계평면실의 기본적인 성능 검증을 위해 실시한다.

정적 누설 성능 시험 및 동적 누설 성능 시험을 통과하면 최종적으로 기계평면 실의 내구 성능 시험을 수행하게 되며, 터보펌프에 장착되어 운용될 때의 모든 환경 조건을 동일하게 모사한 상태에서 카본의 마모량 및 실의 파손 여부 등을 관찰하여 기계평면실의 내구 성능을 검증하게 된다. 내구 성능 시험을 통과한 기계평면실은 실제로 터보펌프에 장착하여 상사 시험,

실매질 시험을 수행하며 이를 통해 문제가 없을 경우 최종적으로 그 성능이 입증된다.

3. 성능 시험 및 결과

3-1. 누설 및 내구 성능 시험기 구성

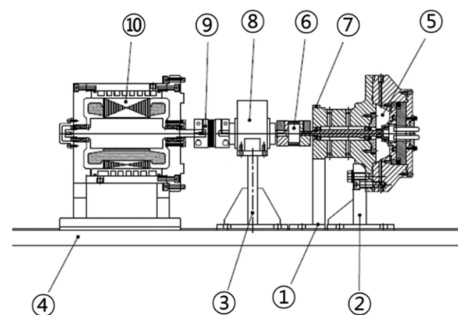
7톤급 터보펌프 기계평면실의 동적 누설 및 내구 성능 시험기의 단면도를 Fig. 4에 나타내었다.

시험기는 30 kW급 영구자석 동기모터로 구동되며 모터와 시험기 사이에는 토크 측정기가 설치되어 시험기에 걸리는 부하를 계측한다.

시험기는 회전축을 지지하기 위해 두 개의 베어링으로 고정되며 메이팅 링은 회전축 끝단에 결합되어 시험기 케이스에 장착된 벨로우즈 실 어셈블리의 카본실과 접촉한 상태로 회전하게 된다. 작동 유체는 실제 연료인 케로신(kerosene) 대신 물을 사용한다. 물은 케로신에 비해 윤활 특성이 좋지 않으므로, 성능 시험은 실매질 시험보다 더 열악한 환경 조건에서 시험이 되며 실의 내구 성능도 보수적으로 추정된다.

시험기의 기밀을 위해 회전 축과 시험기 케이싱 사이에는 접촉식 실(lip seal)을 사용하였고, 케이싱과 케이싱 사이에는 O링을 사용하여 기밀을 유지하였다.

Fig. 5에 시험 계통도를 나타내었다. 차압 조건을 모사하기 위해 고압의 질소 가스가 압력조정기(regulator)를 통해 공급되어 시험기 작동 유체의 압력을 제어한다. 물탱크로부터 공급되는 작동 유체는 연료 펌프 내부에 해당하는 시험기 내부를 거쳐 배수구로 배출되며



1	Base assembly 01	6	Coupling 01
2	Base assembly 02	7	Shaft housing holder
3	Base assembly 03	8	Torque meter
4	Base plate	9	Coupling 02
5	MFS test rig	10	Motor assembly

Fig. 4. Mechanical face seal test rig layout.

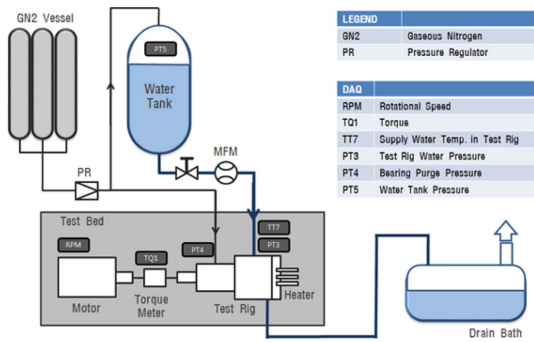


Fig. 5. Mechanical face seal test diagram.

기계평면실의 순환과 함께 시험기 내부 온도가 마찰 및 히터에 의해 급격하게 상승되지 않도록 조절해 주는 역할을 한다.

이때 시험기의 회전 속도, 회전축에 작용하는 토크, 베어링 퍼지압, 시험기 내부압, 물탱크 압력 및 시험기 내부 온도가 각각의 센서를 통해 계측되며, 시험기 내부의 적절한 온도 유지 여부 및 물 탱크의 잔류량 등을 계측하여 시험 시간을 결정하게 된다.

터빈의 고온 가스 공급 환경을 모사하기 위해 400W급 카트리지 히터(cartridge heater) 4개가 시험기

의 우측 케이싱에 장착되어 시험기 내부를 가열하게 된다. 가열 온도는 히터 제어기를 통해 제어된다.

Fig. 6은 실제 시험이 진행되고 있는 시험기의 모습을 보여주고 있다.

3-2. 동적 누설 성능 시험 및 내구 성능 시험

7톤급 터보펌프 기계평면실의 동적 누설 및 내구 성능 시험은 Table 1과 같이 실제 구동 조건과 유사한 회전 속도와 작동 시간 및 차압 조건에서 실의 누설량과 마모량을 추정하기 위해 수행된다.

7톤급 터보펌프의 경우 정격 회전 속도는 27,000 rpm이므로 본 시험에서도 동일한 회전 속도로 시험을 하는 것이 타당하나 시험기에 장착된 베어링의 한계 속도 및 모터의 안정성을 고려하여 약 24,000 rpm으로 시험을 수행하였다. 터빈 축 고온 가스 모사 온도는 약 670K로 시험 시간은 시험기 내부 온도 상승과 카본 마모량을 고려하여 시험 초기에는 1회 시험 시간을 60초로 설정하여 계측하였고, 카본 마모량의 변화가 적어지는 시점에서부터는 시험 시간을 120초로 늘려 계측하였다. 시험기 내부의 차압 조건은 실제 터보펌프 기계평면실 전, 후방에 작용하는 차압 6 ~ 8기압의 평균값인 7기압을 기준압으로 설정하여 시험을 수행하였다.

이 때 기계평면실 접촉면에서의 접촉압(P_k)은 약 230 kPa이며 아래의 식과 같이 계산된다.

$$P_k = [B - K] \cdot P_0 + P_s \tag{1}$$

식 (1)의 B (balance ratio)는 복원력 작용 면적과 실 접촉 면적의 비로서 실 형상에 따라 그 값이 달라지나, 일반적으로 0.65에서 0.9 사이의 값을 가지며 본 논문에서 사용된 기계평면실의 경우 0.7을 사용하였다[9].

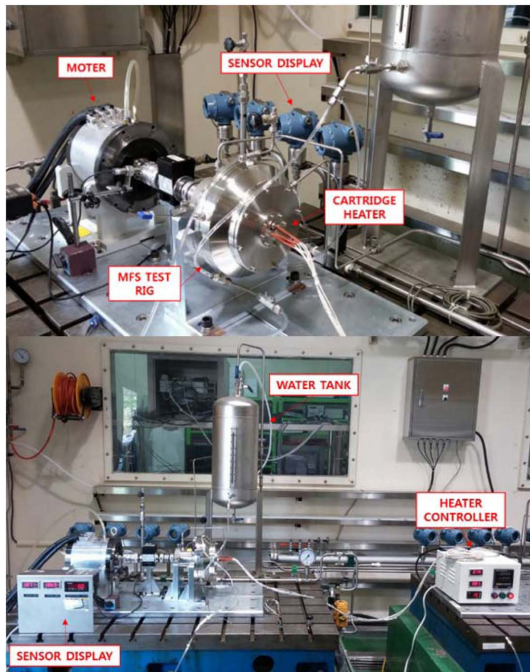


Fig. 6. Mechanical face seal test rig.

Table 1. MFS operating condition

	Nominal condition	Experimental condition
Rotating speed(RPM)	27000	24000
Real operating time(sec)	500	60~120
Overall service life time(sec)	5000	5500
Fuel pump pressure(MPa)	0.8~1.0	0.7
Fuel pump Temperature(K)	300	300
Turbine pressure(MPa)	0.2	0.1
Turbine Temperature(K)	700~900	670

K (pressure gradient factor)는 비압축성 유체의 경우 0.5를 적용한다. P_0 와 P_s 는 각각 실에 가해지는 외부 압력과 벨로우즈에 의한 복원압을 의미한다.

실 접촉면에서의 평균 미끄럼 속도는 약 45.8 m/s이며 $P_s V$ (접촉압×평균 미끄럼 속도) 수치는 10,532 kPa·m/s 이다.

시험에서의 누설 량은 시험기의 사전 점검을 위해 정격 회전수의 50%에 해당하는 12,000 rpm의 회전수로 수행된 예비 시험에서는 아주 적은 양이 검출되었으나 이후 정격 회전수로 가동한 본 시험에서는 누설이 관측되지 않았다. 이는 예비 시험에서 카본 실이 메이팅 링의 표면 상태에 잘 맞게끔 적절히 마모가 되어 누설이 발생할 수 있는 접촉면 사이의 틈들이 사라졌기에 추가 누설이 발생하지 않는 것으로 판단된다.

동적 누설 성능 시험에서 180초 간격(60 sec × 3회)으로 2회 측정한 카본의 누적 마모량은 설계 두께 대비 약 5.5%, 평균 마모율은 0.0153%/sec로 나타났다. 카본의 마모량은 시험실의 석정반에서 실험 전, 후의 기계평면실의 바다 면에서 카본 접촉면까지의 높이를 높이 게이지(height gauge)로 측정하여 그 차이로 계산된다.

마모율은 일반적으로 접촉압, 미끄럼 속도, 가동 시간과 비례한다. 7톤급 터보펌프의 작동 예상 시간은 500초이며 내구 성능 수락 조건인 누적 시험 시간은 정격 작동 시간의 10배인 5,000초로 정하였다. 하지만 실제 시험은 정격 회전 속도인 27,000 rpm의 89% 수준인 24,000 rpm으로 시험되었으므로 동일한 마모 조건을 구현하기 위해 누적 시험 시간을 기존 시험 대비 약 10% 증가시킨 5,500초로 설정한 후 시험을 수행하였다.

내구 성능 시험은 누설 성능 시험과 동일한 환경 조

건에서 수행되었으며, Fig. 7에 누적 시험 시간 5,500 초에 대한 기계평면실의 카본 마모량과 시험기 내부의 차압을 나타내었다. 시험 시간과 내부 차압 및 카본 두께는 각각 정격 운용 시간 500초, 정격 기준압 7 bar, 평균 카본 두께 1 mm로 무차원화 하였다.

시험이 진행되는 동안 시험기 내부 차압 변화에 의해 카본 마모율이 영향을 받지 않도록 시험기 내부 차압을 정격 기준압으로 설정하였으며, 실제 측정한 차압의 평균과 변동폭은 Fig. 7과 같이 기준압 대비 최대 2%, 7% 이내로 안정하게 유지되었다.

내구 성능 시험에서 측정한 카본 마모량은 마모율 변화가 큰 초기 5회의 경우 시험 시간 180초 마다 한번씩 시험기에서 기계평면실을 분해하여 측정하였으며, 이후에는 약 600초마다 한번씩 마모량 변화를 측정하였다.

카본 마모량은 시험 초기 2회 측정 기간 동안 가장 크며, 그 이후에는 측정 오차에 의한 변동은 존재하지만 평균적으로 유사한 기울기를 가지며 일정하게 마모되는 것을 Fig. 7에서 확인할 수 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 기계평면실 제작 공차, 조립 오차 등의 영향으로 초기 장착 시에는 벨로우즈 실 어셈블리에 부착된 카본의 접촉면과 메이팅 링의 접촉면이 고르게 밀착되지 않아 시험 초기에 마모가 크기 때문이며 시험 시간이 증가함에 따라 카본 접촉면이 메이팅 링 표면에 적합하게 마모가 되어 자리를 잡아가는 것으로 판단된다.

누적 시험 시간 5,500초 동안 측정한 카본 마모량은 설계 두께 대비 약 10.5%로 평균 마모율은 0.00191%/sec 이며, 이를 정격 시험 조건, 정격 작동 시간으로 환산하면 카본 마모량은 설계 두께 대비 10.7%, 평균 카본 마모율은 0.00215%/sec로 계산된다.

7톤급 터보펌프 기계평면실의 수명은 잔존 카본 높이가 초기 카본 높이의 50%에 해당할 때까지의 작동 시간으로 정의되며, 이에 따라 예상되는 수명은 약 25,000초로 7톤급 터보펌프의 가동 시간의 약 50배에 해당한다.

누적 시험 시간 5,500초의 내구 성능 시험을 완료한 후 시험기를 분해하였을 때 육안으로 관찰된 기계평면실에서의 파손이나 문제점은 발생하지 않았으므로 누설 성능 및 내구 성능 검증 시험이 성공적으로 이루어졌다고 평가된다.

Fig. 8은 한국항공우주연구원 우주센터 내 터보펌프 실매질 시험 설비에서 수행한 7톤급 터보펌프의 성능 검증 시험을 나타낸다[10].

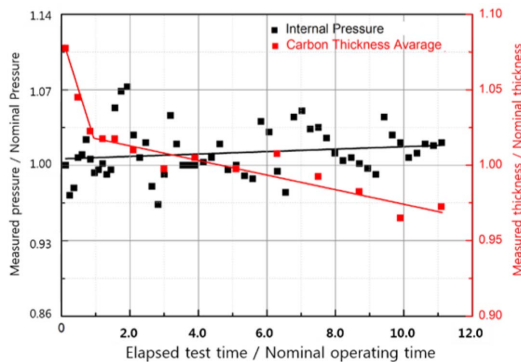


Fig. 7. Endurance performance test result.



Fig. 8. 7-ton class turbopump real-propellant test.

산화제 및 연료 펌프에 액체 산소와 케로신이 공급되는 상태에서 수행된 실매질 시험은 정격 작동 시간 동안 회전수, 펌프 수두, 펌프 유량 비 등의 성능을 모두 만족하였고, 시험 후 이루어진 분해 검사에서도 기계평면실에 특별한 문제점이 발견되지 않았다. 이로써 7톤급 터보펌프 기계평면실은 액체 산소, 케로신 상태의 실매질 시험 환경에서도 정상적으로 작동하는 것이 확인되었다.

4. 결 론

7톤급 터보펌프에 장착되는 기계평면실의 성능 검증 시험을 위해 터보펌프 회전 속도, 차압, 온도 조건 등의 작동 환경 조건을 모사할 수 있는 상사 시험기가 구축되었으며 이를 통해 기계평면실의 누설 및 내구 성능 시험이 수행되었다.

동적 누설 성능 시험은 정격 회전수의 89% 수준인 24,000 rpm에서 180초 간격으로 2회 수행되었고, 계측된 카본의 평균 마모율은 0.0153%/sec 이며 예비 시험 이후 본 시험에서의 작동 유체 누설은 관측되지 않았다.

내구 성능 시험은 누설 성능 시험과 동일한 조건에서 총 5,500초에 대해 수행되었으며, 카본의 평균 마모율은 0.00191%/sec 이며, 이를 정격 회전 속도 및 작동 시간으로 환산한 평균 마모율은 0.00215%/sec로 추정된다. 이를 바탕으로 계산된 기계평면실의 수명은 정격 작동 시간의 50배인 25,000초로 예측되었다.

이상의 결과를 통해 누설 및 내구 성능이 검증된 기계평면실은 7톤급 터보펌프에 실제 장착되어 우주센터

실매질 시험 설비에서 수행된 터보펌프 성능 검증 시험을 통해 최종적으로 성능에 문제가 없음이 확인되었다.

References

- [1] Kim, J., Lee, E. S., Choi, C. H., and Jeon, S. M., "Current Status of Turbopump Development in Korea Aerospace Research Institute", IAC-04-S.P.17, International Astronautical Congress 2004, Vancouver, Canada, October 2004.
- [2] Kim, J., Hong, S. S., Jeong, E. H., Choi, C. H., and Jeon, S. M., "Development of a Turbopump for a 30 Ton Class Engine", AIAA Paper 2007-5516, 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Cincinnati, OH, July 2007.
- [3] Hong, S. S., Kim, J. S., Kim, D. J., Kim, J., "Performance Test of Turbopump Assembly for 75ton Liquid Rocket Engine Using Model Fluid", Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 15, No. 2, pp. 56-61, 2011.
- [4] Kwak, H. D., Kim, D. J., Kim, J. S., Kim, J., Noh, J. G., Park, P.G., Bae, J. H., Shin, J. H., Yoon, S. H., Lee, H. G., Jeon, S. M., Jeong, E. H., Choi, C. H., Hong, S. S., Kim, S. L., Kim, S. H., Han, Y. M., "Performance Test of a 7 tonf Liquid Rocket Engine Turbopump", Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 19, No. 2, pp. 65-72, 2015.
- [5] Kwak, H. D., Jeon, S. M., Kim, J. H., "Development of Inter-Propellant Seal for High Thrust Turbopumps", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 24, No. 6, pp. 349-354, 2008.
- [6] Kwak, H. D., Jeon, S. M., Kim, J. H., "Performance Test of Inter-Propellant Seal", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 26, No. 6, pp. 322-328, 2010.
- [7] Kwak, H. D., Jeon, S. M., Kim, J., "Acceptance Test of a Mechanical Face Seal for Turbopumps", *KFMA Journal of Fluid Machinery*, Vol. 10, No. 1, pp. 20-25, 2007.
- [8] Jeon, S. M., Kwak, H. D., Park, M. J., Kim, J. H., "Mechanical Face Seal Performance Test for 75ton Class Turbopump", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 25, No. 3, pp. 187-191, 2009.
- [9] Bharat Bhushan, *Modern Tribology Handbook*, Vol. 2, Chap. 30, pp. 1134-1136, CRC Press LLC., London, UK, 2001 (ISBN 0-8493-6).
- [10] Kim, J. S., Han, Y. M., Ko, Y. S., "Construction and Validation Test of Turbopump Real-propellant Test Facility", Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 19, No. 4, pp. 85-93, 2015.