

터보펌프용 기계컬 페이스 실의 수락시험

곽현덕* · 전성민** · 김진한***

Acceptance Test of a Mechanical Face Seal for Turbopumps

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

KeyWords : Turbopump(터보펌프), Mechanical face seal(기계컬 페이스 실), Leakage(누설), Wear(마모)

ABSTRACT

A mechanical face seal has been tested in Korea Aerospace Research Institute for turbopump applications. In this paper the acceptance test results of the mechanical face seal are described. By means of simulating a practical operating environment, the performance against leakage of mechanical face seal is monitored. In addition the carbon wear is measured to estimate the life of a mechanical face seal. The test results show the acceptable leakage performance and reasonable wear tendency as well. Lastly the repeated test had been carried out to guarantee the endurance performance of mechanical face seal based on the turbopump life.

1. 서론

터보펌프는 액체로켓엔진에 장착되어 엔진의 연소기에 고압의 연료 및 산화제를 공급하기 위한 목적으로 사용된다. 현재 한국항공우주연구원에서 개발 중인 터보펌프⁽¹⁾는 단단 원심형 산화제 펌프와 연료 펌프 및 단단 증동형 터빈으로 이루어져 있으며, 터빈의 구동력이 직접 산화제 펌프 및 연료 펌프로 전달되는 단축식의 구조를 취하고 있다. 따라서 단축으로 연결되어 있는 산화제 펌프와 연료 펌프, 연료 펌프와 터빈 사이에 작동유체 혼합을 방지하기 위한 별도의 실링장치가 필요하다. 이에 산화제 펌프와 연료 펌프 사이에는 Inter-propellant Sea l (IPS)을^{(2),(3)} 두어 산화제와 연료의 혼합을 방지하

고 있으며, 연료 펌프와 터빈 사이에는 기계컬 페이스 실 (mechanical face seal)을 이용하여 연료와 터빈 구동 가스의 혼합을 예방한다.

산업용 펌프에 사용되는 기계컬 페이스 실과는 달리 터보펌프의 기계컬 페이스 실은 높은 선속도 (70 m/s 이상), 극심한 열하중 ($\Delta T=300^\circ\text{C}$ 이상) 및 큰 차압조건 ($\Delta P=400\text{ kPa}$ 이상)에서 운용된다. 이에 일반적으로 기계컬 페이스 실 제작 후 이루어지는 치수검사 및 기밀시험 (leak test) 등으로 성능을 평가하기는 어렵다. 또한 운용 중 기계컬 페이스 실에 파손이 발생할 경우 액체로켓엔진 전체의 실패와 직결될 수 있기 때문에 실제 운용환경을 모사한 수락시험은 개발과정에서 필수적이다. 이에 한국항공우주연구원 터보펌프그룹에서는 터보펌프에 사용되는 기계컬 페이스 실의 실제 운용환경을 모사할 수 있도록 시험 설비 및 장치를 구축하였으며⁽⁴⁾, 이를 이용하여 30톤급 터보펌프에 사용되는 기계컬 페이스 실의 수락시험 (acceptance test)을 실

* 한국항공우주연구원 터보펌프팀

** 한국항공우주연구원 터보펌프팀

*** 한국항공우주연구원 터보펌프팀

책임저자 E-mail: hdkwak@kari.re.kr

시하였다. 수락시험은 성능시험 및 환경인증시험으로 나누어져 실시되었으며, 이에 본 논문에서는 시험결과를 소개하였다.

2. 기계컬 페이스 실의 수락시험

2.1. 기계컬 페이스 실의 구조 및 작동조건

Figure 1은 기계컬 페이스 실의 구조를 나타낸다. 실은 크게 터보펌프 케이징 (turbopump casing)에 고정되는 bellows seal assembly와 회전축에 고정되는 mating ring으로 나누어지며, bellows seal assembly는 하우징 (housing), 금속 벨로우즈 (metal bellows), 홀더 (holder) 및 카본 (carbon)으로 구성된다. 작동유체의 기밀은 mating ring과 카본 사이에 형성되는 실링 면 (sealing surface)에서 이루어지며, 이때 실링 면의 적절한 접촉압력을 유지하기 위해 금속 벨로우즈가 일정한 강성을 가지도록 설계되어 있다. Fig. 2는 실제 제작된

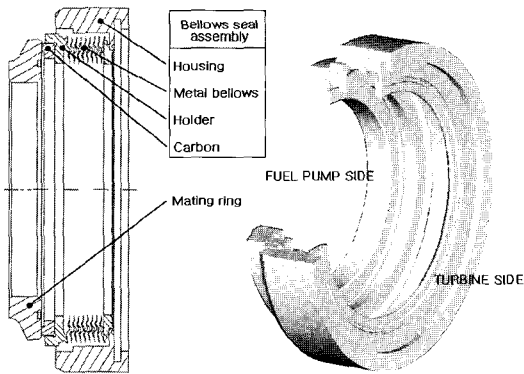


Fig. 1 Structural arrangement of mechanical face seal

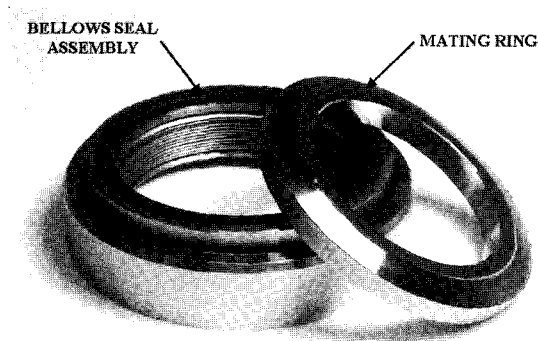


Fig. 2 Mechanical face seal for turbopump

Table 1 Operating condition of mechanical face seal

Fuel pump side	
Media	Kerosene
Pressure	400 ~ 800 kPa
Temperature	25 °C
Turbine side	
Media	Combustion gas
Pressure	400 kPa
Temperature	300 °C
Rotational rate : 20000 RPM	
Duration time for single operation : 120 sec	
Overall service life time : 1200 sec	

터보펌프용 기계컬 페이스 실의 사진을 나타낸다.

기계컬 페이스 실의 작동조건은 터보펌프 운용조건에 의해 결정되며, Table 1에 정리되어 있다. 연료 펌프 측의 작동매질은 상온의 케로진 (kerosene)이며, 400 ~ 800 kPa의 압력을 유지한다. 터빈 측의 작동매질은 고온의 연소가스이며, 400 kPa의 압력을 가진다. 따라서 기계컬 페이스 실은 최대 400 kPa 정도의 차압 및 300 °C 정도의 온도 차이를 가지는 조건에서 작동하게 된다. 한편 터보펌프의 정격회전속도는 20000 RPM 이며, 이를 기계컬 페이스 실의 실링 면 (sealing surface)에서의 선속도로 환산하면 약 70 m/s가 된다. 마지막으로 현재 개발 중인 터보펌프의 규격에 의하면 1회 운전 120초, 총 10회의 반복운전이 가능해야 한다. 기계컬 페이스 실 역시 1회 시험시간 120초, 반복 10회의 내구성능이 보장되어야 하므로 이와 동등한 조건으로 수락시험이 진행되었다.

2.2. 기계컬 페이스 실의 수락시험 방법

Figure 3은 터보펌프에 사용되는 기계컬 페이스 실의 인증을 위해 실시되는 시험을 순차적으로 정리한 것이다. 일반적으로 기계컬 페이스 실의 제작사에서는 각 가공공정별로 편평도 검사 (flatness check), 메탈 벨로우즈의 강성 검사 (spring rate check), 진공도 시험 (vacuum leak test) 및 치수 검사 (inspection) 등을 실시하여 이에 합격한 제품을 납품한다. 그러나 터보펌프에 사용되는 기계컬 페이스 실은 극심한 작동조건에서 운용되며, 파손이 발생할 경우 터보펌프뿐만 아니라 액체로켓엔진 전체의 실패로 직결될 가능성이 있기 때

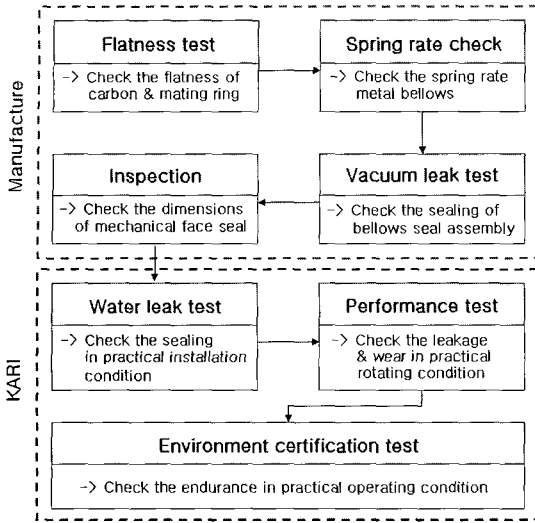


Fig. 3 Test flow of mechanical face seal

문에 실제 운용환경을 모사한 수락시험을 거치게 된다. 이에 본 논문에서는 터보펌프용 기계컬 페이스 실 수락시험을 실시하였다. 수락시험은 Fig. 3에 나타난 것과 같이 수류누설시험 (water leak test), 성능시험 (performance test) 및 환경인증시험 (environment certification test)으로 구성된다. 수류누설시험은 기계컬 페이스 실이 실제 터보펌프에 장착된 상태에서 정상적인 기밀 유지가 이루어지는지 확인하는 시험이며, 실제 장착상태를 모사하기 위하여 터보펌프 케이징 내부 기계컬 페이스 실의 장착부위와 동일한 형상 및 가공공차를 가지는 별도의 치구를 제작하여 실시한다. 성능시험은 기계컬 페이스 실의 정격회전속도, 차압조건을 모사한 상태에서 카본의 마모량, 작동유체의 누설량을 측정하는 시험으로 기계컬 페이스 실의 기본적인 성능검증을 위해 실시한다. 수류누설시험 및 성능시험을 통과한 기계컬 페이스 실은 최종적으로 환경인증시험을 거치게 되며 이 때는 터보펌프에 장착되어 운용될 때의 모든 환경 조건을 동일하게 모사한 상태에서 카본의 마모량 및 실의 파손 여부 등을 관찰하여 기계컬 페이스 실의 내구성을 검증하게 된다.

2.3. 시험 장치의 구성

Figure 4는 기계컬 페이스 실의 성능시험 및 환경인증시험을 위한 시험 장치의 단면도를 나타낸다. 시험 장치는 두 개의 볼 베어링으로 지지되는 회전축에 결합

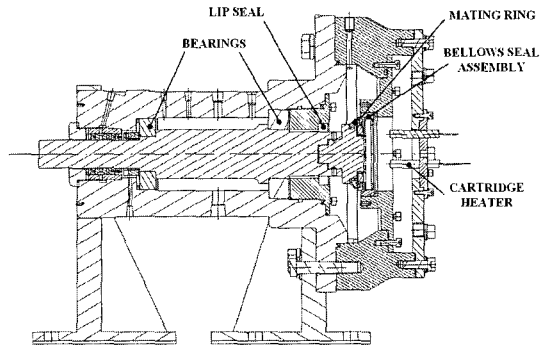


Fig. 4 Cross-sectional view of mechanical face seal test rig

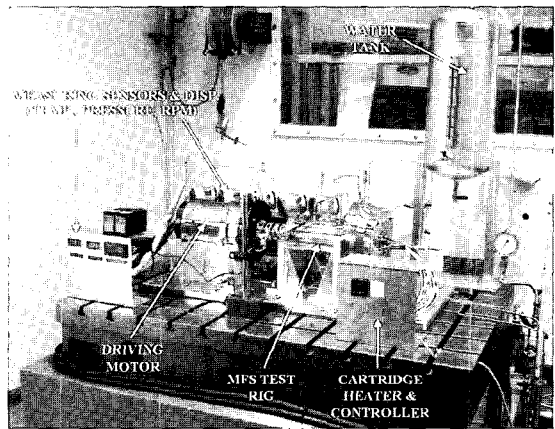


Fig. 5 Overview of mechanical face seal test facility

된 mating ring과 고정된 케이징에 장착된 bellows seal assembly가 맞닿아 기계컬 페이스 실을 형성하는 구조를 취하고 있다. 터빈의 고온가스를 모사하기 위한 카트리지 히터 (cartridge heater)가 bellows seal assembly 후방에 장착된다. 시험유체가 볼 베어링 장착부로 유입되는 것을 방지하기 위해 접촉식 실 (lip seal)을 설치하였으며, 접촉식 실의 기밀성능은 정격회전속도로 운전하는 상태에서 차압조건을 모사하여 검증하였다. 한편 연료 펌프 부분에 해당하는 실매질 유체는 케로진 (kerosene)이나 현재 시험설비의 여건상 시험유체로 물을 사용하였다. 그러나 물의 윤활특성이 케로진에 비해 우수하지 못한 것을 감안할 때 물로 시험할 경우 더 열악한 환경조건에서의 보수적인 시험결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

Figure 5는 기계컬 페이스 실 시험을 위하여 설치된 시험설비를 나타낸다. 시험 중에 시험 장치 (test rig)

Table 2 Procedure of performance test

No.	Event	Note
1	Measure the carbon thickness	Check initial carbon thickness before test
2	Assemble the test seal	
3	Measure the weight of water chamber	To check the leakage during test
4	Drive motor	Up to test rpm
5	Pressurize	Up to test ΔP
6	Perform the test	
7	Stop motor	
8	De-pressurize	
9	Measure the weight of water chamber	Check the leakage during test
10	Disassemble the test seal	
11	Measure the carbon thickness	Check the wear of carbon
12	Inspect	Check the seal failure

Table 3 Procedure of environment certification test

No.	Event	Note
1	Measure the carbon thickness	Check initial carbon thickness before test
2	Assemble the test seal	
3	Run the cartridge heater	Up to test temperature
4	Drive motor	Up to test rpm
5	Pressurize	Up to test ΔP
6	Perform the test	
7	Stop motor	
8	De-pressurize	
9	Stop the cartridge heater	
10	Disassemble the test seal	
11	Measure the carbon thickness	Check the wear of carbon
12	Inspect	Check the seal failure

내부 연료 펌프 측에 해당하는 부분은 물탱크와 연결되어 시험유체 (물)로 채워지며, 물탱크 (water chamber) 상부를 기체질소로 가압하여 미케니컬 페이스 실의 차압조건을 모사하게 된다. 시험 장치의 구동은 100 kW 급 영구자석동기모터 (permanent magnet synchronous motor)로 이루어졌다. 터빈 고온가스 모사를 위한 카트리지 히터는 100 W 급 6 개를 원형으로 배치하여 장착되

었으며, 온도제어는 별도의 PID 제어기를 이용하였다. 한편 시험 장치 및 부대 장치 각 부분의 압력 및 온도는 압력센서 및 열전대를 이용하여 측정되었다.

2.4. 시험 절차

본 논문에서는 수락시험에 해당하는 수류누설시험, 성능시험, 환경인증시험 중 성능시험 및 환경인증시험의 결과를 기술하였다. 앞서 언급한 바와 같이 성능시험은 미케니컬 페이스 실의 작동조건 중 정격회전속도와 차압조건을 모사한 상태에서 누설량 및 카본의 마모량을 측정하는 시험이며, Table 2와 같은 절차에 의해 실시되었다. Table 2의 5번 항목까지 수행하여 원하는 회전속도와 차압조건을 모사하게 되면, 미리 설정된 시험 시간만큼 모사상태를 유지하게 된다. 통상적으로 1회 시험시간은 120 초에서 300 초 사이에서 설정되었다. 이와 같은 방법으로 미케니컬 페이스 실의 요구수명인 1200 초 이상 반복시험이 실시되었으며, 매 시험마다 누설량 및 카본의 마모량을 측정하였다.

미케니컬 페이스 실의 성능시험 후에 최종 수락시험인 환경인증시험을 실시하였으며, 시험 절차는 Table 3에 기술되어있다. 성능시험과는 달리 누설량을 측정하지 않기 때문에 물탱크의 무게를 측정하지 않으며, 카트리지 히터를 구동하여 실 후방부의 고온 환경을 모사하였다. 성능시험과 마찬가지로 1회 시험시간은 120 초에서 300 초 사이에서 설정되었으며, 반복시험을 통해 매 시험마다 카본의 마모량, 실의 파손 여부 등을 검사하여 내구성능을 검증하였다.

3. 시험 결과

3.1. 성능시험 결과

Figure 6은 성능시험결과의 일부를 나타내고 있다. 회전속도에 따른 카본 마모량의 차이를 파악하기 위해 정격회전속도 (20000 RPM)보다 작은 9911 RPM에서 시험을 실시하였다. 기본적인 1회 시험시간은 240 초이나, 시험 시의 회전속도가 시험 장치에 사용된 베어링의 한계속도를 상회하는 관계로 시험 진행 중의 베어링 진동을 관찰하여 시험시간을 적절히 가감하였다. 한편 차압조건은 실제보다 가혹한 820 kPa로 설정하였으며, 총 누적시험시간은 1690 초이다.

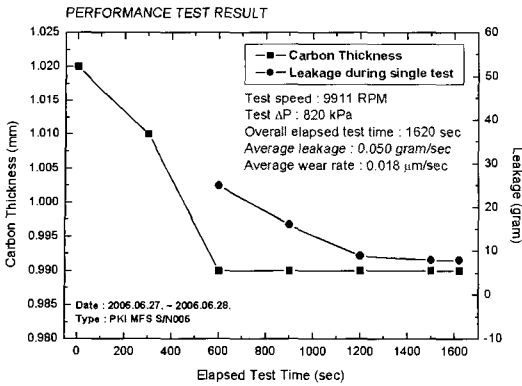


Fig. 6 Performance test result at 9911 RPM with $\Delta P=820$ kPa

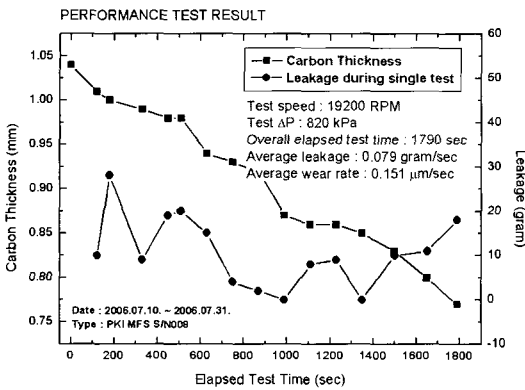


Fig. 7 Performance test result at 19200 RPM with $\Delta P=820$ kPa

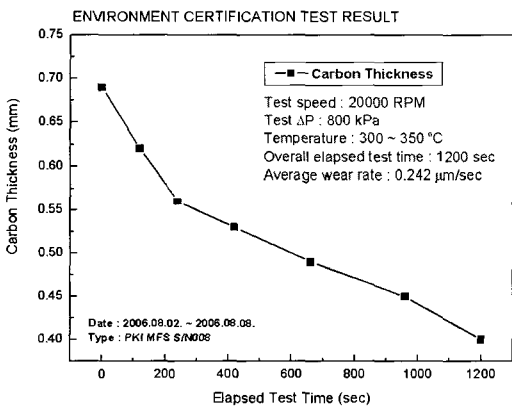


Fig. 8 Environment certification test result at 20000 RPM with $\Delta P=820$ kPa & $\Delta T=300\sim 350$ °C

시험시간 경과에 따른 카본의 두께를 살펴보면 초기 600 초 이전까지는 감소하나 이후부터는 두께가 더 이상

감소하지 않는 것을 알 수 있다. 이는 카본의 마모가 시험초기 일정부분 발생하였으나 특정 시점 이후부터는 발생하지 않는 것을 의미한다. 이는 시험초기 장착상태에서는 제작공차 등의 영향으로 mating ring과 bellows seal assembly의 실링 면이 고르게 밀착되지 않았으나, 시험이 진행됨에 따라 카본이 마모되어 실링 면이 자연스럽게 밀착되어 나타나는 현상으로 추측되며, 누설량의 추이 역시 이를 뒷받침하고 있다. 실제로 누설량 역시 시험초기에는 다소 큰 값을 가지나 특정 시점이 지난 후부터 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보이고 있다. 한편 시험결과 누적 누설량을 터보펌프 1회 작동시간인 120초 기준으로 환산하면 6gram 정도로 이는 펌프 전체 유량과 비교할 때 무시할 수 있을 만큼 작은 값이다.

Figure 7은 차압조건 820 kPa에서 성능시험을 실시한 결과를 도시하고 있으며, 총 누적시험시간은 1800초이다. 시험 당시 구동모터 제어 파라미터의 문제로 정격 회전속도 20000 RPM보다 작은 19200 RPM에서 시험이 이루어졌다. 그러나 시험속도가 정격회전속도의 96%에 상응하기 때문에 이로 인한 시험결과와의 차이는 크지 않을 것으로 예상된다. 한편 이후 진행된 환경인증시험에서는 정격회전속도로 시험이 실시되었다. 시험결과 앞선 9911 RPM에서의 성능시험과는 달리 카본의 마모가 일정한 기울기로 발생하며, 누적시험시간 경과와는 관계없이 지속적으로 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 터보펌프 정격회전속도 영역에서는 미케니컬 페이스 실의 수명이 카본의 마모량에 의해 결정된다는 것을 의미한다. 이 때 총 누적시험시간 기준으로 한 카본의 평균 마모량은 0.151 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 이다. 이 때 누설량은 일정한 경향을 나타내고 있지 않다. 1회 시험시 누설량은 최소 2 gram에서 최대 28 gram의 분포를 보이고 있으며, 이 역시 펌프 전체 유량과 비교할 때 무시할 수 있을 만큼 작은 값이다. 한편, 1800초의 성능시험 동안 금속 벨로우즈의 손상, 카본의 균열 등과 같은 미케니컬 페이스 실의 파손은 발생하지 않았다.

3.2. 환경인증시험 결과

성능시험을 완료한 후, 동일한 미케니컬 페이스 실을 사용하여 환경인증시험을 실시하였으며, Fig. 8에 누적시험시간에 따른 카본의 마모량을 도시하였다. 환경인증시험시 실 후방부 온도는 300~350 °C를 유지하였다. 이때 실 전후방부 차압은 800 kPa을 적용하였으며, 총 누적시험시간은 1200초, 회전속도는 20000 RPM이다.

성능시험과 마찬가지로 매 시험마다 미케니컬 페이스 실을 시험 장치에서 분해하여 카본의 마모량 및 실의 파손 여부를 검사하였다. 환경인증시험에서도 일정한 기율기로 카본의 마모가 계속 발생하는 것을 알 수 있으며, 총 누적시험시간을 기준으로 한 카본의 평균 마모량은 0.242 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 으로 성능시험 시의 0.151 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 보다 60% 정도 증가하였다. 회전속도나 차압조건이 성능시험과 거의 동일한 것을 감안하면, 카본의 마모량 증가는 실 후방부 온도의 영향으로 사료된다. 측정된 평균 마모량을 사용하여 요구수명 1200 초 동안의 카본의 마모량으로 환산하면 0.29 mm 이다. 이는 제작 시의 카본 두께인 1.00 mm 와 비교할 때 적절한 수준으로 판단된다. 마지막으로 환경인증시험 완료 후 특별한 파손은 발생하지 않았으며, 이는 본 논문의 대상이 되는 미케니컬 페이스 실의 내구성능이 실제 작동조건에서 성공적으로 검증되었음을 의미한다.

4. 결론

본 논문에서는 터보펌프용 미케니컬 페이스 실의 수락시험을 실시하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 터보펌프에 사용되는 미케니컬 페이스 실의 성능 시험을 실시하였다. 시험결과 회전속도가 저속 (9911 RPM)일 때 카본의 마모는 초기에 일정량 발생하나 누적시험시간 경과에 따라 더 이상 발생하지 않는 경향을 보이는 반면, 고속 (19200 RPM)에서는 일정한 기율기로 지속적으로 발생하는 경향을 보였다. 이는 실링 면에서의 선속도가 미케니컬 페이스 실의 수명에 중요한 영향을 미치는 인자임을 의미하며, 향후 선속도와 카본의 마모량의 상관관계에 대한 연구가 이루어질 예정이다.
- 2) 터보펌프에 사용되는 미케니컬 페이스 실의 환경인증시험을 실시하였다. 내구성능을 검증하기 위해 미케니컬 페이스 실의 실제 운용환경을 모사한

반복시험을 실시하였으며, 실 후방부 고온 환경으로 인해 카본의 마모량이 성능시험보다 60% 가량 증가하는 것을 파악하였다. 환경인증시험 1200 초 동안 특별한 파손은 발생하지 않았으며, 이에 성공적으로 터보펌프용 미케니컬 페이스 실의 내구 성능을 검증하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부에서 시행한 특정연구개발사업인 '소형위성발사체(KSLV-I)개발사업' 연구결과와 일부이며, 도움을 주신 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

- (1) Kim, J., Lee, E. S., Choi, C. H. and Jeon, S. M., 2004, "Current Status of Turbopump Development in Korea Aerospace Research Institute," IAC-04-S.P.17, International Astronautical Congress, Vancouver, Canada.
- (2) 박현덕, 전성민, 김진한, 2004, "터보펌프용 Inter-propellant seal의 개발현황," 한국윤활학회 추계 학술대회, pp. 195~200.
- (3) Kwak, H. D., Jeon, S. M. and Kim, J., 2006, "Development of Inter-propellant Seal for the Turbopump," 3rd Asia International Conference on Tribology, ASIATRIB 2006, Kanazawa, Japan.
- (4) 박현덕, 전성민, 김진한, 2005, "터보펌프용 극저온 베어링/실 성능시험설비," 2005년도 유체기계 연구개발 발표회, pp. 341~347.