

## 75톤급 터보펌프 기계평면 실의 작동 성능 시험

전성민<sup>†</sup> · 곽현덕 · 박민주 · 김진한

한국항공우주연구원 터보펌프팀

### Mechanical Face Seal Performance Test for 75ton Class Turbopump

Seong Min Jeon<sup>†</sup>, Hyun Duck Kwak, Min Joo Park and Jinhan Kim

*Turbopump Department, Korea Aerospace Research Institute*

(Received February 18, 2009; Revised April 20, 2009; Accepted May 1, 2009)

**Abstract** – A leakage performance test and an endurance performance test of a 75 ton class turbopump mechanical face seal are performed using water under high speed and high temperature environment. A prototype mechanical face seal is manufactured for the purpose of sealing of fuel between a fuel pump and turbine. By simulating operating condition experimentally, the leakage rate and seal carbon wear rate are obtained to evaluate the performance of the prototype mechanical face seal. The test results show the acceptable leakage performance and reasonable wear tendency as well.

**Keywords** – turbopump(터보펌프), mechanical face seal(기계평면 실), leakage(누설), wear(마모), performance test(성능 시험)

#### 1. 서 론

고성능의 위성이 필요함에 따라 발사체는 더 높은 탑재 하중을 필요로 하게 되고, 이를 위하여 발사체는 무게 대 추력이 높은 터보펌프 가압 방식을 사용하게 된다. 터보펌프는 액체로켓엔진에 산화제와 연료를 공급하는 역할을 담당하는데, 지금까지 국내에서는 30톤급 저추력 액체로켓엔진에 적용가능한 실험용 터보펌프를 개발하여 국외 실매질 시험을 진행해 오고 있다[1-3].

한편 자력 발사용 국산화 엔진은 실험용 저추력급 엔진보다 추력이 증가된 75톤급 고추력 엔진 개발을 필요로 하게 되어 관련된 핵심요소의 설계 및 시험이 진행 중에 있다[4]. 고추력급 터보펌프는 산화제펌프, 연료펌프와 터빈이 단축으로 동력을 전달하는 구조를 갖고 있어 작동유체 혼합을 방지하기 위한 별도의 기밀 요소가 필요하다. 이에 산화제펌프와 연료펌프 사이에는 추진제 혼합 방지 실(Inter-propellant seal)을 장착하

여 산화제와 연료의 혼합을 방지하고 있으며[5], 연료 펌프와 터빈 사이에는 기계평면 실(Mechanical face seal)을 장착하여 연료와 터빈 구동가스의 혼합을 예방하고 있다.

일반 산업용 펌프에 사용되는 기계평면 실과 달리 터보펌프에 적용되는 기계평면 실은 고속, 고온 및 높은 실 차압 조건에서 운용된다. 터보펌프 작동 중 기계평면 실의 파손은 액체로켓엔진 전체의 실패와 직결될 수 있기 때문에 실제 운용 환경을 모사한 성능 시험은 개발과정에서 필수적이다. 그러나 터보펌프용 기계평면 실의 성능 검증은 요구되는 실제 운용 환경을 맞추기 위하여 특수한 시험설비를 필요로 한다[6].

30톤급 저추력용 터보펌프에 장착되어 실매질 시험에 적용되고 있는 소형 기계평면 실은 국내에서 누설 성능과 환경 인증에 대한 수락시험을 통하여 개발에 대한 검증을 수행한 바 있다[7]. 75톤급 고추력 터보펌프는 현재 초기 개발단계로 원활한 개발의 진행을 위해 터보펌프 시스템 시험에 사용할 수 있는 기계평면 실 개발이 선행되어야 한다. 이에 본 논문에서는 75톤급

<sup>†</sup>주저자 · 책임저자 : smjeon@kari.re.kr

고추력 터보펌프에 사용되는 대형 기계평면 실의 시제품 제작 및 작동 성능시험에 대한 내용을 기술하였다.

### 2. 시제품 제작 및 검증 방법

#### 2-1. 시제품 제작

기계평면 실은 터보펌프의 연료 펌프와 터빈 사이에 장착되어 연료와 연소 가스의 혼합을 방지하는 역할을 담당한다. Fig. 1은 기계평면 실의 구조를 나타낸다. 개발되는 터보펌프에 따라 각각에 적용되는 형상은 변하나 실의 기본적인 구조는 동일하다.

기계평면 실은 크게 터보펌프 케이싱에 고정되는 벨로스 실 어셈블리(seal assembly)와 회전축에 고정되는 메이팅 링(mating ring)으로 나누어지며, 벨로스 실 어셈블리는 하우징, 금속 벨로스, 홀더 및 카본으로 구성된다. 작동유체의 기밀은 메이팅 링과 카본 사

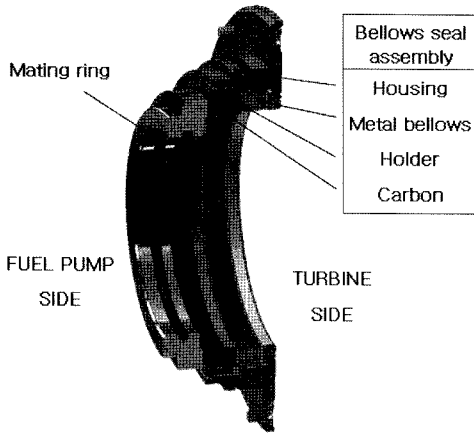


Fig. 1. Configuration of turbopump mechanical face seal.

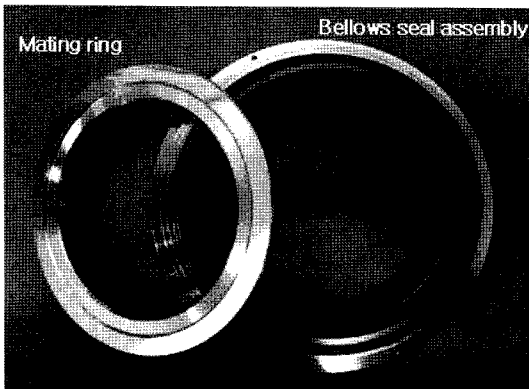


Fig. 2. Prototype of turbopump mechanical face seal.

이에 형성되는 실링 면에서 이루어지며, 이때 실링 면의 적절한 접촉압력을 유지하기 위해 금속 벨로스가 일정한 강성을 가지도록 설계되어 있다.

Fig. 2는 75톤급 터보펌프에 적용 가능하게끔 시제품으로 제작된 기계평면 실을 나타낸다. 터빈 구동 가스에 의한 고온 공기 환경에서도 운용이 가능하기 위하여 내열 합금 소재로 메이팅 링과 벨로스 실 어셈블리가 제작되었고, 카본 실은 흑연 소재로 제작되었다. 카본 실의 실링 면 내경은  $\phi 101.8\text{ mm}$ 이고, 외경은  $\phi 106.8\text{ mm}$ 로서 실링 면적은  $819.2\text{ mm}^2$ 이다. 카본 실 노즈(nose) 두께는 1.5 mm이다.

기계 평면 실의 작동조건은 터보펌프 운용조건에 의해 결정된다. 기계평면 실의 연료펌프 측은 상온의 연료가 일정한 압력을 유지하게 되고, 터빈 측은 고온의 연소가스가 연료펌프 측보다 상대적으로 낮은 압력을 유지하게 된다. 따라서 기계평면 실은 일정한 차압을 가지고 고온 환경에서 고속으로 작동하게 된다.

75톤급 고추력용 터보펌프 개발에서 내구성 요건은 1회 운전 210초, 총 10회의 반복운전이 가능하도록 설정되었기에 기계평면 실의 내구 성능 검증은 2,100초 이상을 목표로 하고 있다.

#### 2-2. 검증 방법

터보펌프용 기계평면 실의 성능 검증을 위하여 수행되는 시험을 Fig. 3에 순차적으로 나타내었다. 기계평면 실은 제작사에서 각 가공공정별로 편평도 검사

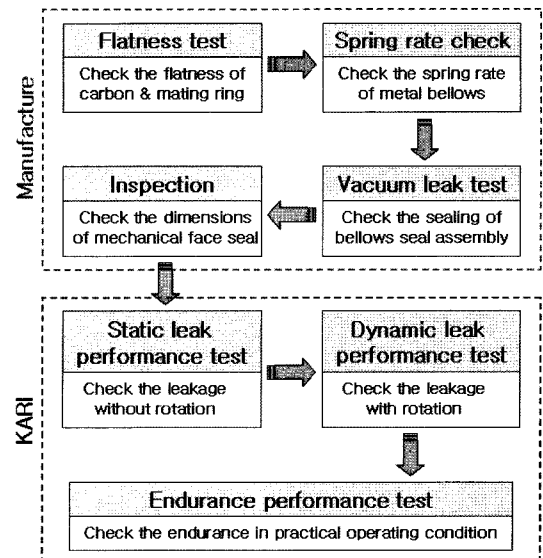


Fig. 3. Test flow of mechanical face seal.

(flatness check), 메탈 벨로스 강성 검사(spring rate check), 진공도 시험 및 치수검사 등을 실시하여 시제품에 대한 검증을 완료한다. 그러나 터보펌프에 적용되는 기계평면 실은 극심한 작동환경에서 운용되기 때문에 실제 운용 환경을 모사한 성능시험이 추가적으로 필요하다. 기계평면 실 시제품은 Fig. 3에 나타난 것과 같이 정적 누설 성능 시험, 동적 누설 성능 시험 및 내구 성능 시험을 통하여 검증을 받게 된다.

정적 누설 성능 시험은 기계평면 실이 터보펌프 장착상태에서 정상적인 기밀유지가 이루어지는지 확인하는 시험이며, 실제 장착상태를 모사하기 위하여 터보펌프 케이싱 내부 기계평면 실의 장착부위와 동일한 형상 및 가공공차를 가지는 시험 치구를 제작하여 실시한다. 동적 누설 성능 시험은 기계평면 실의 정격회전속도, 차압조건을 모사한 상태에서 카본의 마모량, 작동유체의 누설량을 측정하는 시험으로 기계평면 실의 기본적인 성능 검증을 위해 실시한다. 정적 누설 성능 시험 및 동적 누설 성능 시험을 통과한 기계평면 실은 최종적으로 내구 성능 시험을 거치게 되며 터보펌프에 장착되어 운용될 때의 모든 환경 조건을 동일하게 모사한 상태에서 카본의 마모량 및 실의 파손 여부 등을 관찰하여 기계평면 실의 내구 성능을 검증하게 된다.

### 3. 성능 시험

#### 3-1. 시험기 구성

기계평면 실의 동적 누설 성능 시험 및 내구 성능 시험을 위한 시험기의 단면도를 Fig. 4에 나타내었다. 시험기는 두 개의 볼 베어링으로 지지되는 회전축에 결합된 메이팅 링과 고정된 케이싱에 장착된 벨로스 실 어셈블리가 맞닿아 기계평면 실 시험 부위를 형성하게 되어 있다. 터빈측 고온 가스 온도 환경을 모사하기 위한 카트리지 히터(cartridge heater)가 벨로스 실 어셈블리 후방에 장착된다. 기계평면 실 시험기의 기밀을 위하여 회전축과 케이싱 사이에는 접촉식 실(lip seal)을 설치하였고, 케이싱과 케이싱 사이의 플랜지 조립 부위에는 O링을 설치하였다.

연료펌프 측의 작동 실매질 유체는 케로진(kerosene)이나 현재 시험 설비의 여건상 시험 유체로 물을 사용하였다. 그러나 물의 윤활특성이 케로진에 비하여 우수하지 못한 점을 감안할 때 물로 시험할 경우 더 열악한 환경 조건에서의 보수적인 시험 결과를 얻을 수

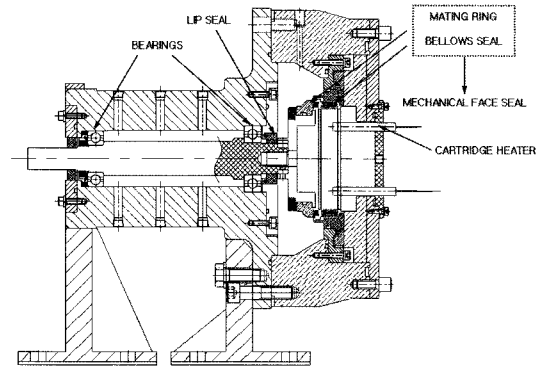


Fig. 4. Mechanical face seal test rig layout.

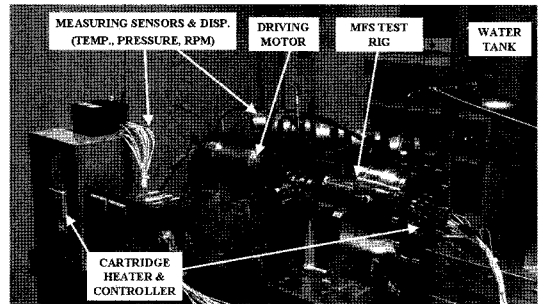


Fig. 5. Mechanical face seal test rig.

있을 것으로 판단된다.

시험실에 설치된 기계평면 실 시험기와 계측 센서들을 Fig. 5에 나타내었다. 시험 중에 시험기 내부 연료펌프 측에 해당하는 부분은 물 탱크와 연결되어 시험 유체(물)로 채워지며, 물탱크 상부를 기체 질소로 가압하여 기계평면 실의 차압 조건을 모사하게 된다.

시험기의 구동은 100 kW급 영구 자석 동기 모터로 이루어 졌다. 터빈측 고온 가스 온도 환경을 모사하기 위한 카트리지 히터는 100 W급 6개를 원형으로 배치하여 장착하였으며, 온도 제어는 별도의 제어기를 이용하였다. 시험기 및 부대 장치의 압력 및 온도는 압력 센서 및 열전대를 이용하여 측정하였다.

#### 3-2. 동적 누설 성능 시험

기계평면 실의 동적 누설 성능 시험은 일정한 회전속도와 실 차압에서 누설 특성을 파악하기 위한 시험이며, 일반적으로 다양한 회전속도 및 차압 조건에서 수행하는 것이 바람직하다. 그러나 앞서 기술한 바와 같이 본 논문의 목적은 터보펌프 개발시험에 기계평면 실 시제품을 적용하기 위한 성능 검증에 있기 때문에 우선적으로 터보펌프의 정격 회전 속도인 11,000 rpm

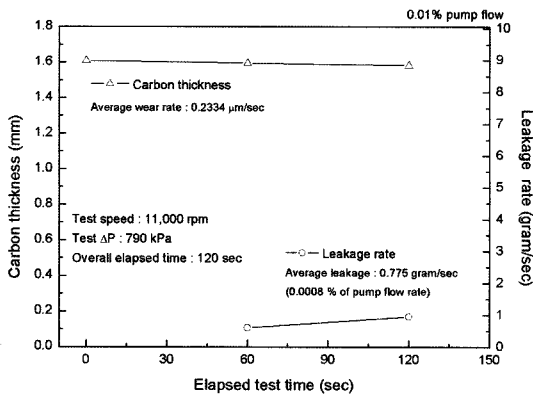


Fig. 6. Leakage performance test result.

에서 수행되었다. 다만 터보펌프 개발시험 과정에서 간혹 실 차압이 설계압력 이상으로 걸리는 경우가 있기 때문에 이를 모사하기 위해 기계평면 실 상류와 하류의 실 차압 조건은 실제 차압 조건 700 kPa 보다 가혹한 790 kPa로 설정하였다. 이때 실링 면에서의 접촉 압력은 약 215 kPa이고, PV(접촉 압력 P×평균 미끄럼 속도 V) 수치는 12,920 kPam/s이다.

1회 시험시간은 회전 속도가 시험기에 장착된 베어링의 한계 속도를 상회하는 관계로 시험 진행 중의 베어링 진동을 고려하여 60초로 설정하였다. 누설 성능 시험은 총 2회의 시험이 누적 시간 120초에 대하여 수행되었다.

Fig. 6은 누설 성능 시험에서 측정된 카본 마모량과 누설 유량을 나타내고 있다. 누설 유량의 측정은 다음과 같이 이루어졌다: 1) 시험 전 물이 채워진 시험용 물탱크의 무게를 측정한다. 2) 시험 후 물이 남아있는 시험용 물탱크의 무게를 측정한다. 3) 측정된 시험 전, 후의 물탱크의 무게 차이를 시험 시간으로 나누어 누설 유량을 계산한다. 또한 카본의 마모량은 석정반에서 높이 게이지(height gauge)를 이용하여 기계평면 실 바다 면부터 카본 실링 면까지의 높이를 시험 전, 후에 측정하여 구하였다.

2회에 걸친 누설 성능 시험에서 나타난 물탱크 측정 무게를 Table 1에 나타내었다. 평균 누설 유량은 0.775 gram/sec로서 연료펌프 설계 유량 대비 0.0008%로 나타났다. 연료펌프 설계 유량은 정격 회전속도인 11,000 rpm에서 케로진 실매질에 대하여 얻어지는 유량을 상사 매질인 수류 조건에서 환산하여 구한 유량이다. 기계평면 실의 누설 유량이 연료펌프 설계 유량에 비하여 무시할 만큼 작게 나타나 만족할만한 누설

Table 1. Water tank weights during the tests

Water tank weights	Test number	
	1	2
Test time (sec)	60	60
Weight before test (gram)	5412	5692
Weight after test (gram)	5376	5635

성능을 보여주고 있음을 확인할 수 있다. 누설 성능 시험 동안 카본의 높이 치수를 각 시험 전, 후에 측정하여 Fig. 6에 같이 나타내었다. 누설 성능 시험에서 카본 평균 마모량은 0.2334  $\mu\text{m}/\text{sec}$ 로 나타났다.

### 3-3. 내구 성능 시험

기계평면 실의 내구 성능 시험은 터보펌프의 회전 속도, 실 차압 및 고온 공기 환경을 모사한 상태에서 시제품이 일정 시간 이상 정상적으로 작동하는지 여부를 검증하는 시험으로 이를 통과하여야 터보펌프 개발 시험에 시제품을 사용할 수 있다. 이에 따라 터보펌프 요구 수명인 2,100초 이상의 누적 시험 시간을 목표로 수행되었으며, 회전 속도는 11,000 rpm, 실 전, 후방 차압은 770 kPa, 터빈 측 고온 가스 모사 온도는 610 K로 설정하였다.

누설 성능 시험과 달리 내구 성능 시험에서는 기계평면 실의 터빈 측 공기 온도가 고온으로 상승하기 때문에 연료펌프 측 물 온도 역시 고온으로 상승하게 된다. 따라서 터보펌프 실제 제품과 동일하게 기계평면 실의 연료펌프 측에 물을 순환시킬 수 있는 배출배관을 설치하여 실 내부 공간에 정체된 물을 배출하고 새로운 물을 공급함으로써 물 온도를 감소시켜 시험이 가능하도록 하였다. 시험 유체가 순환하는 시험 환경에서 기계평면 실의 누설량을 측정하는 것은 어렵기에, 내구 성능 시험에서는 카본의 마모량만을 매 시험마다 기계평면 실을 분해하여 측정하였다.

Fig. 7에 총 누적 시험 시간 2,460초 동안 수행된 기계평면 실의 카본 마모량을 누적 시간에 대하여 나타내었다. 내구 성능 시험 동안 일정한 기울기로 카본의 마모가 계속 발생하는 것을 알 수 있으며, 총 누적 시험 시간을 기준으로 한 카본의 평균 마모량은 0.1705  $\mu\text{m}/\text{sec}$ 로 누설 성능시험의 0.2334  $\mu\text{m}/\text{sec}$ 보다 27% 정도 감소하였다. 누설 성능 시험은 내구 성능 시험에 앞서 수행된 시험으로서 초기 장착상태에서 제작 공차 등의 영향으로 메이팅 링과 벨로스 실 어셈블리의 실링 면이 고르게 밀착되지 않아 누설 성능 시험

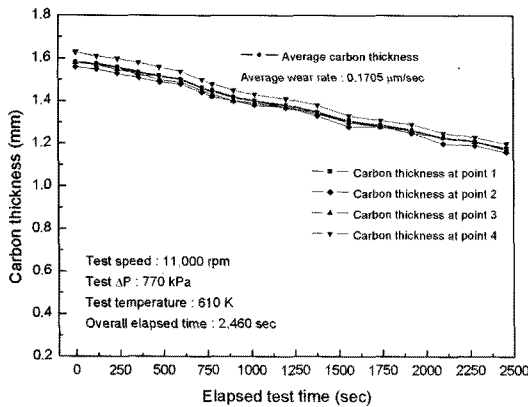


Fig. 7. Endurance performance test result.

동안 카본의 마모량이 크게 나타난 것으로 판단된다. 이후 시험이 진행됨에 따라 카본이 마모되어 실링 면이 자연스럽게 자리를 잡아 밀착됨으로써 카본 마모량이 감소하는 것으로 생각된다. 측정된 평균 마모량을 이용하여 터보펌프 설계 요구 수명인 2,100초 동안의 카본 마모량으로 환산하면 0.36 mm의 마모량을 얻을 수 있다.

내구 성능 시험 완료 후 기계평면 실에서 특별한 파손은 나타나지 않았으며, 이는 터보펌프 실제 작동 조건에서 본 시제품의 내구 성능이 성공적으로 검증되었음을 나타낸다.

#### 4. 결 론

75톤급 터보펌프용 기계평면 실의 성능 시험이 초기 시제품에 대한 누설 성능 및 내구 성능 검증을 위하여 수행되었다. 터보펌프의 정격 회전속도 및 작동 실 차압과 작동 고온 환경을 모사하는 기계평면 실 성능 시험기를 구축하여 터보펌프 실제 작동 환경을 모사하는 시험이 가능하도록 하였다.

동적 누설 성능 시험은 터보펌프의 정격 회전속도 및 작동 실 차압을 모사하여 총 2회에 걸쳐 수행되었다. 평균 누설량은 0.775 gram/sec로서 터보펌프 설계 유량 대비 0.0008%의 누설 유량 결과를 얻어 만족할 만한 누설 성능을 보여주고 있음을 확인하였다.

내구 성능 시험은 터빈 측 고온부 환경을 모사하여 터보펌프 실제 운용조건에 가깝도록 시험 환경을 설정한 후 반복 시험을 통하여 이루어졌다. 누적시간으로 총 2,460초에 대하여 환경시험이 수행되었고, 평균 마모 감소량은 0.1705  $\mu\text{m}/\text{sec}$ 로서 2,100초의 터보펌프 요구 수명 내에서 만족할 만한 내구 성능을 보여주고 있음을 확인하였다.

이상의 결과로 제작된 기계평면 실 시제품은 터보펌프의 운용조건에서 안정적인 성능을 가지는 것으로 판단되며, 향후 터보펌프 개발시험에 적용 가능한 것으로 판단된다. 한편 이와는 별도로 탈설계점에서 기계평면 실의 특성을 파악하기 위해 추가적인 시험이 계획되어 있으며, 이를 통해 터보펌프 비형 모델에 사용할 수 있는 기계평면 실의 개발을 완료할 예정이다.

#### 참고문헌

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. Jeon, S. M., Kwak, H. D., Yoon, S. H., and Kim, J., "Rotordynamic Analysis of a Turbopump with the Casing Structural Flexibility," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 24, No. 3, pp. 433-436, 2008.
4. 전성민, 곽현덕, 윤석환, 김진한, "고추력 액체 로켓 엔진용 터보펌프의 회전체 동역학 해석," 한국항공우주학회지, Vol. 36, No. 7, pp. 688-694, 2008.
5. 곽현덕, 전성민, 김진한, "고추력 터보펌프용 추진제 혼합 방지 실 개발," 한국윤활학회지, Vol. 24, No. 6, pp. 349-354, 2008.
6. 곽현덕, 전성민, 김진한, "터보펌프용 극저온 베어링/실 성능시험설비," 2005년도 유체기계 연구개발 발표회, pp. 341-347, 2005.
7. 곽현덕, 전성민, 김진한, "터보펌프용 미케니컬 페이스 실의 수탁시험," 유체기계저널, Vol. 10, No. 1, pp. 20-25, 2007.