

75톤급 터보펌프 추진제 혼합 방지 실의 성능 시험

전성민* · 곽현덕* · 박민주* · 김진한*

Inter Propellant Seal Performance test for 75 ton Class Turbopump

Seong Min Jeon* · Hyun Duck Kwak* · Min Joo Park* · Jinhan Kim*

ABSTRACT

A performance test of a 75 ton class turbopump inter propellant seal is conducted using water to evaluate leakage and endurance performance. Each fuel pump side part and oxidizer pump side part of a prototype inter propellant seal has been tested for verifying endurance performance during total accumulated test time 2,100 sec in water. The fuel pump side part with 1 stage carbon floating ring seal shows average leakage rate 13.7 gram/sec under average seal differential pressure 9.4 bar. On the other hand, the LOx pump side part with 2 stage carbon floating ring seal shows average leakage rate 7.3 gram/sec under average seal differential pressure 9.5 bar. After the endurance performance test, the inter propellant seal shows good physical condition. A cryogenic leakage performance test of the inter propellant seal will be performed using LN2 in the near future.

초 록

75톤급 터보펌프용 추진제 혼합 방지 실의 누설 성능 및 내구 성능을 평가하기 위한 수류환경 성능 시험을 수행하였다. 추진제 혼합 방지 실 시제품은 연료펌프 부와 산화제펌프 부 각각 누적 시험 시간 2,100초 동안 수류환경에서 내구 성능 시험이 이루어 졌다. 1단의 카본 플로팅 링 실로 구성된 연료펌프 부는 성능 시험 동안 평균 실 차압 9.4 bar에서 평균 누설 유량 13.7 gram/sec의 결과를 얻었다. 반면, 2단의 카본 플로팅 링 실로 구성된 산화제펌프 부는 성능 시험 동안 평균 실 차압 9.5 bar에서 평균 누설 유량 7.3 gram/sec의 결과를 얻었다. 내구 성능 시험 후, 추진제 혼합 방지 실은 양호한 상태를 보였다. 향후 액체 질소를 시험 매질로 하는 극저온 환경에서 추진제 혼합 방지 실 누설 성능 시험이 수행될 예정이다.

Key Words: Turbopump(터보펌프), Inter Propellant Seal(추진제 혼합 방지 실), Leakage Performance(누설 성능), Endurance Performance(내구 성능)

1. 서 론

복잡한 기능을 요구하는 위성체는 탑재 하중

이 크게 증가하게 되고, 이를 우주 환경으로 실어 나르기 위한 발사체는 무게 대 추력이 높은 터보펌프 가압 방식을 사용하게 된다. 터보펌프는 액체로켓엔진에 고압의 산화제와 연료를 공급하는 역할을 담당하는데, 지금까지 국내에서는 30톤급 저추력 액체로켓엔진에 적용 가능한 실

* 한국항공우주연구원 터보펌프팀
연락처, E-mail: smjeon@kari.re.kr

험용 터보펌프를 개발하여 국외 실매질 시험을 진행한 바 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[4-6]. 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 장착하여 산화제와 연료의 혼합을 방지하고 있다. 추진제 혼합 방지 실이 제 기능을 다하지 못해 터보펌프 운전 중 산화제와 연료가 혼합될 경우 예기치 않은 발화로 인하여 액체로켓엔진 시스템 전체의 실패로 직결될 수 있다.

산화제펌프 및 연료펌프에서 일정한 압력을 가지고 회전축을 따라 누설된 유체는 추진제 혼합 방지 실 내부에 축과 수~수십 마이크로미터의 간극을 가지도록 설치된 다수의 카본 플로팅 링 실(carbon floating ring seal)을 통과하면서 압력이 감소하게 된다. 추진제 혼합 방지 실의 기본 작동 원리는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 양쪽에서 유입된 산화제 및 연료를 카본 플로팅 링 실과 회전축 사이의 간극으로 통과시켜 압력을 감소시키면서 누설량을 제어하고 고압의 완충가스(buffer gas)에 의해서 섞이지 않고 각각의 배출구로 배출될 수 있도록 유도하는 것이다. 이때 완충가스의 압력은 근접한 배출구의 압력보다 높아야 하는 것이 기본적인 작동 조건이며, 완충가스로는 헬륨과 같은 비활성 기체를 사용한다.

본 논문에서는 75톤급 고추력 터보펌프에 사용되는 추진제 혼합 방지 실의 시제품을 제작하여 수주환경에서 누설 성능 및 내구 성능 시험을 수행한 내용을 기술하였다. 추진제 혼합 방지 실의 연료펌프 부와 산화제펌프 부 각각에 대하여 누적 시험 시간 2,100초에 대하여 성능 시험이 이루어 졌다.

좌측이 산화제펌프, 우측이 연료펌프로부터 누설

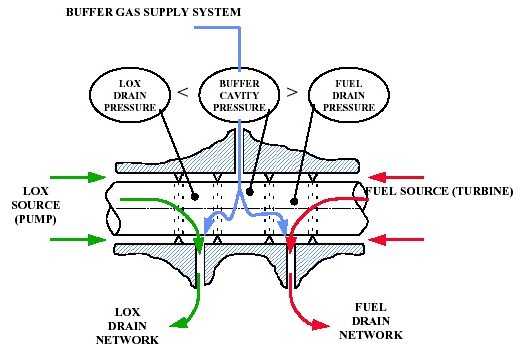


Fig. 1 Schematic drawing of inter propellant seal

2. 상세 설계 및 시제품 제작

2.1 상세 설계

추진제 혼합 방지 실은 터보펌프 내부에 삽입되는 형태로 조립되며, 3차원 형상은 Fig. 2와 같다.

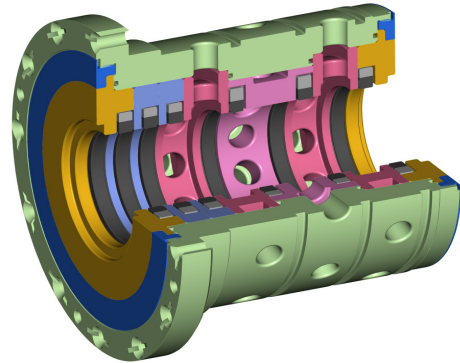


Fig. 2 3D view of inter propellant seal

되는 작동유체를 제어하는 역할을 담당한다. 추진제 혼합 방지 실 중앙에는 완충가스를 공급하도록 구성되어 있으며, 완충가스는 일정한 압력과 유량으로 추진제 혼합 방지 실로 유입되어 양단의 카본 플로팅 링 실과 회전축 사이의 간극을 통과한 후 누설된 산화제 및 연료와 혼합되어 배출구로 배출된다. 연료펌프 측으로부터

누설되는 연료는 1개의 카본 플로팅 링 실을 통과하면서 압력이 감소된 후 배출구로 배출되며, 산화제펌프 측으로부터 누설되는 산화제는 3개의 카본 플로팅 링 실을 통과하면서 압력이 감소되어 배출구로 배출된다. 산화제펌프 측에는 다수의 카본 플로팅 링 실을 사용하여 카본 플로팅 링 실 중 1개가 파손되어도 정상작동이 가능하도록 구성하였다.

2.2 시제품 제작

추진제 혼합 방지 실에 사용되는 소재는 대부분 스테인리스 강 계열을 사용하고 있으며, 회전축과 좁은 틈새를 유지하는 카본 플로팅 링 실은 직접적으로 회전축과 마찰될 수 있기 때문에 흑연 소재를 채택하고 있다. 흑연 소재는 초저온 환경에서 회전축 소재와 열수축율의 차이로 인하여 회전축과 카본 플로팅 링 실 사이의 설계 간극이 증가하게 되는데, 이를 극복하기 위해 흑연 소재 카본 플로팅 링 외곽에 회전축과 동일한 소재의 링을 열박음 조립하여 온도 환경에 따른 실 간극 보정을 유도하였다.



Fig. 3 Carbon floating ring seal

Figure 3은 제작이 완료된 카본 플로팅 링 실을 나타내고 있다. 회전축과 흑연 소재의 열수축율 차이를 보상하기 위해 흑연 링 외곽에 스테인리스 강 계열의 링이 열박음 되어있다. 열박음 공차는 카본 플로팅 링 실이 운용되는 상온부터

극저온까지의 범위 내에서 각 소재가 열수축에 따라 받는 응력을 계산하여 파단이 일어나지 않도록 결정하였다.

Figure 4는 제작이 완료된 추진제 혼합 방지 실의 시제품을 보여 주고 있다. 액체산소에 노출된 환경에서는 스테인리스 강 계열의 내부 구성품이 서로 마찰할 경우 발화가 일어날 수 있기 때문에 이를 방지하기 위해 모든 구성부품에 은도금(silver coated)을 적용하였으며, 각 구성부품 접촉면에서의 기밀효과를 극대화하기 위해 접촉 단면에 연마(lapping)를 실시하였다. 액체산소 및 케로진의 배출과 완충가스의 공급을 위해 케이징 원주면을 따라 다수의 구멍이 가공되어 있으며, 사진 정면에 나타난 부분이 산화제펌프 측에 장착되어 작동유체의 누설을 제어하게 된다.



Fig. 4 Inter propellant seal prototype

3. 수류환경 성능시험

3.1 시험기 구성

추진제 혼합 방지 실의 성능 시험을 위한 시험기 단면도를 Fig. 5에 나타내었다.

시험기는 두 개의 볼 베어링으로 지지되는 회전축에 추진제 혼합 방지 실이 장착됨으로써 실 시험 부위를 형성하게 되어 있다. 추진제 혼합 방지 실 시험기의 기밀을 위하여 회전축과 케이징 사이에는 접촉식 실(lip seal)을 설치하였고, 케이징과 케이징 사이의 플랜지(flange) 조립 부

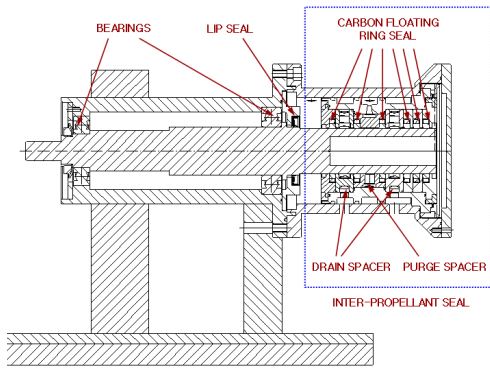


Fig. 5 Inter propellant seal test rig layout

위에는 오링(O-ring)을 설치하였다. 작동 성능을 검증하기 위한 시험으로서 시험 유체는 물을 사용하였다. 물의 윤활특성이 우수하지 못한 점을 감안할 때 물로 시험할 경우 더 열악한 환경 조건에서의 보수적인 시험 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

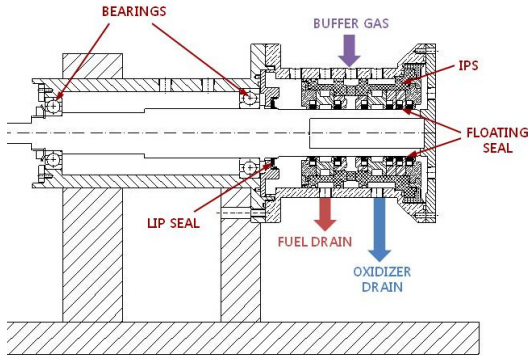


Fig. 6 Schematic drawing of performance test

Figure 6은 시험기에 장착된 완충가스 공급 라인과 연료와 산화제 누설 유량의 출구 라인 개념도를 나타내고 있다. 추진제 혼합 방지 실의 연료펌프 부를 시험할 경우 연료 누설유량 출구 라인 좌측에 위치한 빈 공간에 시험 유체를 채우고 가압 라인을 통하여 시험 압력으로 시험 유체를 가압한 후 연료 누설 유량의 출구 라인을 통하여 배출되는 시험 유체의 유량을 측정함으로써 누설량을 구하게 된다. 추진제 혼합 방지

실의 산화제펌프 부를 시험할 경우는 연료펌프 부를 시험할 경우와 동일한 방식으로 산화제 누설유량 출구 라인 우측에 위치한 빈 공간에 시험 유체를 채우고 가압한 후 산화제 누설 유량의 출구 라인을 통하여 배출되는 시험 유체의 유량을 측정하게 된다. 시험 유체의 가압은 기체 질소를 사용하여 이루어졌다.

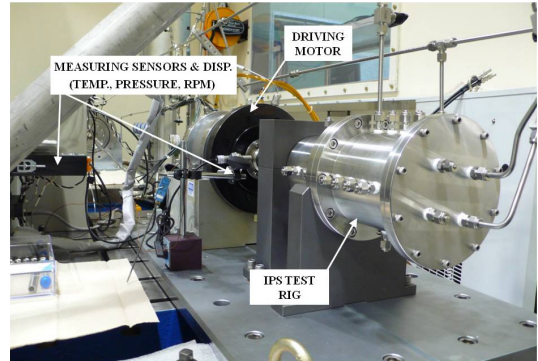


Fig. 7 Inter propellant seal test rig

시험실에 설치된 추진제 혼합 방지 실 시험기와 계측 센서들을 Fig. 7에 나타내었다. 시험 중에 시험기 내부 연료펌프 유로 부분 및 산화제 펌프 유로 부분에 해당하는 부분은 물 탱크 (water tank)와 연결되어 시험유체(물)로 채워지며, 물탱크 상부를 기체 질소로 가압하여 추진제 혼합 방지 실의 차압 조건을 모사하게 된다. 시험기의 구동은 100 kW급 영구 자석 동기 모터 (permanent magnet synchronous motor)로 이루어졌다. 시험기 및 부대 장치의 압력 및 온도는 압력 센서 및 열전대를 이용하여 측정하였다.

3.2 성능 시험

추진제 혼합 방지 실의 내구 성능 시험은 설계 요구 조건의 회전 속도와 실 차압에서 시제품의 내구 성능을 검증하기 위한 시험으로서 터보펌프 정격 회전 속도인 11,000 rpm에서 수행되었다. 내구 성능 시험은 1회 시험 시간을 60 초로 하여 총 35회의 누설 성능 시험을 수류환경 터보펌프 작동 모사 조건에서 수행함으로써 총 누적시간 2,100 초에 대하여 수행되었다. 총

누적 시험시간 2,100 초는 터보펌프 설계 요구조건인 1회 운전시간 210 초와 개발동안 제작품 1기에 예정된 총 10회의 시험을 고려하여 결정되었다. 1회 시험 시간인 60 초는 회전 속도가 시험기에 장착된 베어링의 한계 속도를 상회하는 관계로 시험 진행 중의 베어링 진동을 고려하여 60초로 설정하였다.

추진제 혼합 방지 실의 연료펌프 측은 배출구까지 카본 플로팅 링 실이 1개 장착된 부위로서 카본 플로팅 링 실이 3개 장착된 산화제펌프 측보다 누설량이 많을 것으로 예측되어 우선적으로 시험이 수행되었다. 추진제 혼합 방지 실 상류와 하류의 실 차압은 900 kPa 이상으로 설정하여 실제보다 가혹한 조건을 부여하였다. 추진제 혼합 방지 실의 누설 유량은 시험 준비 시간 및 시험 시간과 시험 종료 시간동안 배출 탱크에 누적된 총 누설량을 시험 준비 시간과 시험 종료 시간동안에 저장된 누설량으로 감하여 구하였다. 시험 시간은 정격 회전 속도를 유지하고 정격 실 차압을 유지하기 위하여 가압이 이루어지는 실제 시험이 진행되는 시간을 의미한다. 시험 준비 시간과 시험 종료 시간동안의 누설량은 본 시험 전 사전 시험을 통하여 측정하여 계산한 평균 누설량을 적용하여 구하였다.

Figure 8은 수류환경 내구 성능 시험에서 측정된 추진제 혼합 방지 실의 연료펌프 부(1단 실) 누설 유량을 나타내고 있다. 총 35회의 수류환경 내구 성능 시험 동안 연료펌프 부의 실 차압은 9.25~9.5 bar의 범위내에 설정되었으며, 평균적으로 9.36 bar의 실 차압을 나타냈다. 실 차압에 따른 추진제 혼합 방지 실 연료펌프 부의 누설 유량은 11.77~15.85 gram/sec 범위내의 수치를 가지며, 평균적으로 13.71 gram/sec의 실 누설 유량을 나타냈다.

평균 누설 유량 13.71 gram/sec은 연료펌프 설계 유량 대비 0.014 %로서, 추진제 혼합 방지 실의 누설 유량이 연료펌프 설계 유량에 비하여 무시할 만큼 작게 나타나 만족할만한 누설 성능을 보여주고 있음을 확인할 수 있다. 연료펌프 설계 유량은 정격 회전속도인 11,000 rpm에서

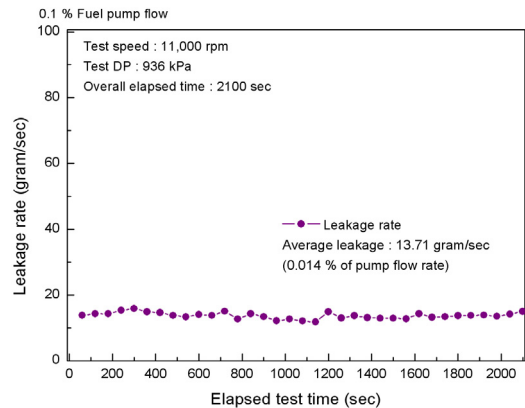


Fig. 8 Endurance performance test of inter propellant seal fuel pump side

제로진 실매질에 대하여 얻어지는 유량을 상사 매질인 수류 조건에서 환산하여 구한 유량이다. 추진제 혼합 방지 실의 연료펌프 부 내구 성능 시험 후 시험기를 분해하여 시제품에 대한 육안 검사를 수행한 결과 아무런 파손이 발생하지 않았음을 확인하였다. 2,100 초의 수류환경 내구 성능 시험 동안 추진제 혼합 방지 실의 연료펌프 부는 원활하게 작동됨을 확인하였다.

추진제 혼합 방지 실의 산화제펌프 부 또한 수류환경에서 누적 시간 2,100 초 동안 내구 성능 시험이 수행되었다. 산화제펌프 측은 당초 3개의 카본 플로팅 링 실이 장착되는 것으로 설계 되었으나 터보펌프 시스템의 설계 변경에 따라 2개의 카본 플로팅 링 실만 장착하는 것으로 수정되었다. 따라서 추진제 혼합 방지 실 시험기에는 2개의 카본 플로팅 링 실만 장착하고 시험을 수행하였다.

Figure 9는 수류환경 내구 성능 시험에서 측정된 추진제 혼합 방지 실의 산화제펌프 부(2단 실) 누설 유량을 나타내고 있다. 총 35회의 수류환경 내구 성능 시험 동안 산화제펌프 부의 실 차압은 9.42~9.58 bar의 범위내에 설정되었으며, 평균적으로 9.49 bar의 실 차압을 나타냈다. 실 차압에 따른 추진제 혼합 방지 실 산화제펌프 부의 누설 유량은 6.22~8.58 gram/sec 범위내의 수치를 가지며, 평균적으로 7.34 gram/sec의 실

누설 유량을 나타냈다. 추진제 혼합 방지 실의 산화제펌프 부는 연료펌프 부의 1단 실에 비해 실이 하나 더 많은 2단 실이 장착되는 부위로, 평균 누설 유량은 연료펌프 부와 비교하여 유사한 실 차압에서 절반정도로 감소함을 알 수 있다.

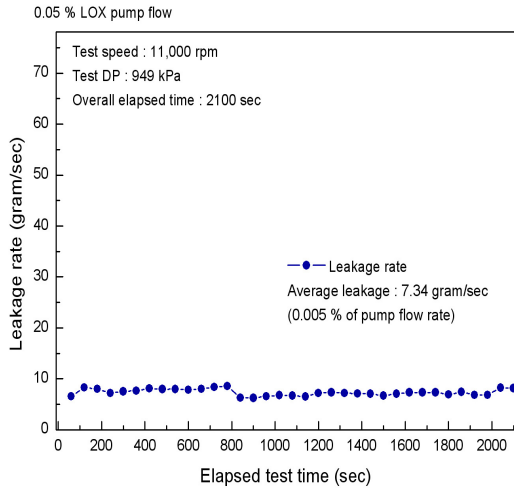


Fig. 9 Endurance performance test of inter propellant seal Lox pump side

평균 누설 유량 7.34 gram/sec은 산화제펌프 설계 유량 대비 0.005 %로서, 추진제 혼합 방지 실의 누설 유량이 산화제펌프 설계 유량에 비하여 무시할 만큼 작게 나타나 만족할만한 누설 성능을 보여주고 있음을 확인할 수 있다. 산화제펌프 설계 유량은 정격 회전속도인 11,000 rpm에서 액체 산소 실매질에 대하여 얻어지는 유량을 상사 매질인 수류 조건에서 환산하여 구한 유량이다. 추진제 혼합 방지 실의 산화제펌프 부 내구 성능 시험 후 시험기를 분해하여 시제품에 대한 육안 검사를 수행한 결과 아무런 파손이 발생하지 않았음을 확인하였다. 2,100 초의 수류 환경 내구 성능 시험 동안 추진제 혼합 방지 실의 산화제펌프 부는 원활하게 작동됨을 확인하였다. 추진제 혼합 방지 실의 수류환경 내구 성능 시험에 대한 결과를 표로 정리하면 다음과 같다.

Table 1 Endurance performance test of inter propellant seal

	누적 시간 (sec)	평균 차압 (bar)	평균 누설량 (gram/s)	시험후 시제품 상태
연료펌프부 (1단)	2,100	9.36	13.71	양호
산화제펌프부 (2단)	2,100	9.49	7.34	양호

추진제 혼합 방지 실의 산화제펌프 부 2단 카본 플로팅 링 실에 대해서는 추가로 실 차압 변화에 따른 누설 성능 시험을 수행하여 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 정격 회전속도인 11,000 rpm에서 실 차압 2 bar, 4.2 bar, 7.3 bar, 9 bar 부근의 네 조건에 대하여 각각 2회의 성능 시험을 통하여 누설량을 측정하였다.

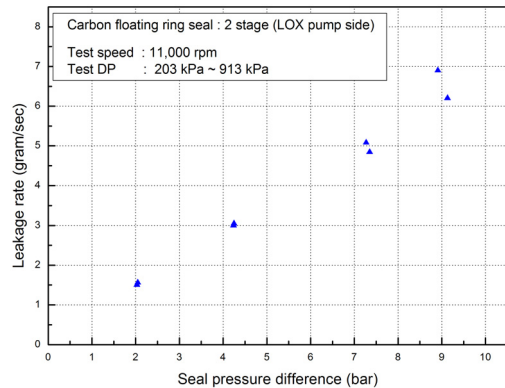


Fig. 10 Leakage performance test of inter propellant seal Lox pump side

저압의 실 차압 시험 조건에서는 누설량이 시험에 따라 편차 없이 일정하게 나타났으나, 고압의 실 차압 시험 조건에서는 누설량이 시험에 따라 다소 편차를 나타냈다. 카본 플로팅 링 실은 성능 시험 동안 회전축에서 부상하여 회전축과의 간극을 형성함으로써 누설량을 제어하게 되는데, 고압의 실 차압 조건에서는 카본 플로팅 링 실의 반경방향 고정 위치가 매 시험마다 일정하지 않고 회전축대비 실의 편심 정도가 다소

차이가 나타나서 누설량에 영향을 주는 것으로 판단된다. 상기의 실 차압 시험 범위는 터보펌프 작동 조건에 따른 추진제 혼합 방지 실 산화제 펌프 부의 전 운전영역을 모두 포함하고 있어 향후 터보펌프 조립체 시험시 추진제 혼합 방지 실의 누설량 예측에 활용될 수 있다. 추진제 혼합 방지 실의 산화제펌프 부는 실제 운용 조건에서 극저온 환경에 놓이게 되므로 극저온 환경에서 누설 성능 특성에 대한 이해가 필요하다. 향후에 액체 질소를 이용한 추진제 혼합 방지 실의 극저온 누설 성능 시험을 수행할 예정이다.

4. 결 론

추진제 혼합 방지 실은 연료펌프 부와 산화제 펌프 부 각각 누설 시험 시간 2,100초 동안 수류 환경에서 내구 성능 시험이 이루어 졌다. 1단의 카본 플로팅 링 실로 구성된 연료펌프 부는 내구 성능 시험 동안 평균 실 차압 9.36 bar에서 평균 누설 유량 13.71 gram/sec의 결과를 얻었으며 시험 후 시제품 상태는 양호하였다. 반면, 2단의 카본 플로팅 링 실로 구성된 산화제펌프 부는 내구 성능 시험 동안 평균 실 차압 9.49 bar에서 평균 누설 유량 7.34 gram/sec의 결과를 얻었으며 시험 후 시제품은 연료펌프 부와 마찬가지로 양호한 상태를 보였다.

추진제 혼합 방지 실의 산화제펌프 부 2단 카본 플로팅 링 실에 대해서는 추가로 실 차압 변화에 따른 누설 성능 시험을 수행하여 터보펌프 작동 조건 변화에 따른 누설량 예측을 위한 성능 곡선을 얻었다.

향후에 액체 질소를 시험 매질로 사용하는 추진제 혼합 방지 실의 산화제펌프 부에 대한 극

저온 누설 성능 시험이 예정되어 있다. 또한 터보펌프 시스템 변경에 따라 설계 변경된 추진제 혼합 방지 실 수정 모델에 대한 시제품 제작과 시험 평가도 이루어질 예정이다.

참 고 문 헌

1. Kim, J., Hong, S. S., Jeong, E. H., Choi, C. H., Jeon, S. M., "Development of a Turbopump for a 30 Ton Class Engine," Proceedings of the 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Cincinnati, OH, 2007, AIAA 2007-5516
2. Jeon, S. M., Kwak, H. D., Yoon, S. H., Kim, J., "Rotordynamic Analysis of a Turbopump with the Casing Structural Flexibility," Journal of Propulsion and Power, Vol. 24, No. 3, May-June, 2008, pp. 433-436
3. 홍순삼, 김대진, 김진선, 김진한 "30톤급 액체로켓엔진용 터보펌프 실매질시험," 한국추진공학회지, 제13권 3호, 2009, pp.20-26
4. 전성민, 곽현덕, 윤석환, 김진한 "고추력 액체 로켓 엔진용 터보펌프의 회전체 동역학 해석," 한국항공우주학회지, 제36권 7호, 2008, pp.688-694
5. 곽현덕, 전성민, 김진한 "고추력 터보펌프용 추진제 혼합 방지 실 개발," 한국유희학회지, 제24권 6호, 2008, pp.349-354
6. 전성민, 곽현덕, 박민주, 김진한 "75톤급 터보펌프 기계평면 실의 작동 성능 시험," 한국유희학회지, 제25권 3호, 2009, pp.187-191