

# 터보펌프용 Inter-Propellant Seal의 개발 현황

곽현덕<sup>1</sup>(한국항공우주연구원 터보펌프개발그룹)  
전성민<sup>2</sup>(한국항공우주연구원 터보펌프개발그룹)  
김진한<sup>3</sup>(한국항공우주연구원 터보펌프개발그룹)

## Current Development Status of Inter-Propellant Seal for a Turbopump

<sup>1</sup>Hyun D. Kwak(Turbopump Dept., KARI) [hdkwak@kari.re.kr](mailto:hdkwak@kari.re.kr)

<sup>2</sup>Seong-Min Jeon(Turbopump Dept., KARI) [smjeon@kari.re.kr](mailto:smjeon@kari.re.kr)

<sup>3</sup>Jinhan Kim(Turbopump Dept., KARI) [jhkim@kari.re.kr](mailto:jhkim@kari.re.kr)

### ABSTRACT

To avoid an unexpected explosion occurring from a mixture of LOx and fuel, Inter-Propellant Seal (IPS) is used in a Turbopump. This paper presents a brief theoretical backgrounds of IPS and also reports preliminary test results. Tests were performed up to 1.5 MPa and 20,000 rpm and leakage performance of IPS was evaluated. As a result it was verified that leakage flow rate of IPS satisfied its design requirement.

**Keywords :** Turbopump, Inter-Propellant Seal

### 1. 서론

터보펌프는 액체로켓용 엔진 시스템에서 요구되는 산화제와 연료의 유량과 압력을 공급하기 위한 산화제 펌프와 연료펌프 및 이들 펌프를 구동하기 위한 터빈으로 구성된다. 일부의 터보펌프는 사용되는 연료와 산화제의 최적 회전수를 위하여 산화제 펌프와 연료 펌프가 별도의 터빈으로 구동되거나 기어박스로 연결되어 2개 이상의 축을 가지는 구조를 취하고 있으나, 구조적 단순화와 중소형 터보펌프에서의 효율적 이득이 미미함을 고려하여 현재 한국항공우주연구원에서 개발 중인 터보펌프는<sup>[1]</sup> 단일 축 선상에 산화제 펌프(LOx Pump)와 연료 펌프(Fuel Pump)를 배치하는 구조를 취하고 있다.

일반적으로 터보펌프는 엔진에서 요구하는 공급 유량 및 압력을 맞추기 위해 고속으로 운전되며 작동 유체의 특성 상 극저온 환경(-196°C)에서 운용되게 된다. 이러한 조건에서 안정적으로 터보

펌프가 운용되도록 하기 위해서는 여러 가지 핵심 기술이 필요하며, 특히 작동유체의 실링(sealing) 기술은 높은 신뢰도를 유지하기 위해 필수적이다. 터보펌프에서 실(seal)이 하는 역할은 크게 작동 유체의 누설 제어 및 산화제와 연료의 혼합방지로 나눌 수 있다. 이 중에서 작동 유체의 누설 제어는 전체 터보펌프 효율에 큰 영향을 미치는 요소로 플로팅 링 실(floating ring seal)의 이론해석<sup>[2]</sup> 및 실 매질 환경에서의 시험<sup>[3]</sup> 등을 통해 활발한 연구가 이루어지고 있다. 이와 더불어 산화제와 연료의 혼합은 예기치 않은 점화를 일으켜 엔진에 치명적인 파손을 야기할 수 있기 때문에 이를 방지하기 위한 실이 필요하다. 일반적으로 단일 축 터보펌프에서는 산화제 펌프 및 연료 펌프 사이에 Inter-Propellant Seal (IPS) 을 사용하여 혼합을 방지하고 있다. 이에 본 논문에서는 터보펌프용 IPS의 기본적인 작동 원리에 대하여 살펴보고, 개발 현황 및 향후 개발 방향에 대해서 논하고자 한다.

## 2. Inter-Propellant Seal (IPS)의

### 구조 및 작동원리

Fig. 1 은 터보펌프의 개략도를 나타내고 있다. 앞서 기술한 바와 같이 산화제 펌프와 연료 펌프 및 터빈이 동일 축 선상에 위치하고 있으며 산화제 펌프 후단과 연료 펌프 전단 사이에 산화제와 연료의 혼합을 방지하기 위한 IPS가 설치되어 있다. 축 방향으로 유입된 산화제는 캐비테이션(cavitation)을 방지하기 위한 인듀서(inducer)를 통과한 후 임펠러(impeller)를 통해 압력이 상승되어 반경 방향으로 토출된다. 이 때 산화제의 일부는 임펠러 후면을 통해 역류하게 되며 배어링을 냉각시킨 후 2차유로(by-pass)를 통해 산화제 펌프 입구로 돌아가게 된다. 그러나 이 중 일부는 축을 따라 연료 펌프 쪽으로 누설되는데, 이는 IPS에 의해 제한되어 별도의 드레인(drain)으로 배출된다. 한편 연료는 반경 방향으로 유입되어 인듀서와 임펠러를 거친 후 반경 방향으로 토출되며, 유입되는 연료의 일부는 별도의 유로를 통해 배어링을 냉각하게 된다. 산화제 펌프와 마찬가지로 배어링을 냉각한 연료의 대부분은 다시 연료 펌프 입구로 회수되나 이 중 일부는 축을 따라 산화제 펌프 쪽으로 누설되는데, 이 역시 IPS에 의해 제한되어 별도의 드레인으로 배출되게 된다.

산화제 펌프 및 연료 펌프에서 일정한 압력을 가지고 축을 따라 누설된 유체는 IPS 내부에 축과 수-수십 마이크로미터의 간극을 가지도록 설치된 다수의 테프론 링(Teflon ring)을 통과하면서 압력이 감소하게 된다. 테프론 링은 원형의 실 허브

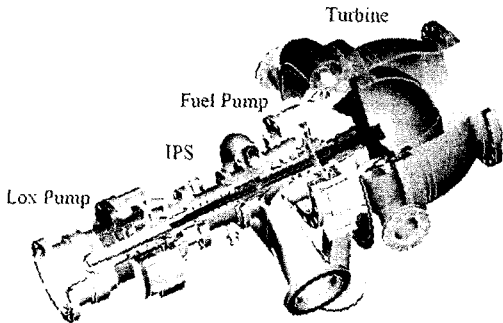


Fig. 1 Layout of Turbopump

(seal hub)에 삽입되어 IPS 케이싱(casing)에 장착되며, 각 허브와 허브사이에는 웨이브 스프링(wave spring)이 삽입되어 테프론 링을 축 방향으로 허브 면에 밀착시키게 된다. IPS의 기본 작동원리는 Fig. 2 에 나타난 바와 같이 양쪽에서 유입된 산화제 및 연료가 고압의 완충가스(buffer gas)에 의해서 섞이지 않고 각각의 드레인으로 배출될 수 있도록 유도하는 것이다. 이때 완충가스의 압력은 근접한 드레인의 압력보다 높아야 하는 것이 기본적인 작동 조건이며, 완충가스로는 헬륨 등과 같은 비활성 기체를 사용한다. 한편 Fig. 3 는 IPS의 구조를 나타내고 있다. 중앙의 헬륨 공급 라인을 중심으로 산화제 및 연료 펌프 쪽으로 각각 3개의 테프론 링(총 6개) 및 2 개의 드레인(총 4개)이 설치되어 있다.

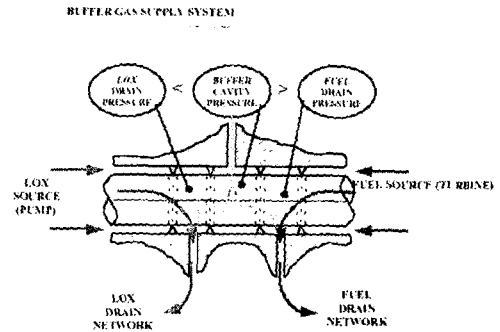


Fig. 2 Operating scheme of IPS

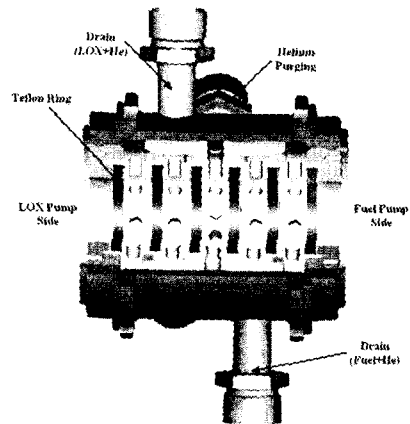


Fig. 3 Structural arrangement of IPS

### 3. IPS의 실매질 시험

#### 3.1 시험 장치의 구성

Fig. 4는 IPS의 실매질 시험에 사용된 시험 장치의 단면도를 나타내고 있으며, 시험 장치는 크게 시험 파트(test part)와 설비 파트(technology part)로 나뉘어 진다. 시험 파트는 실제 터보펌프 산화제 펌프의 실링 유닛(sealing unit)을 동일하게 모사할 수 있도록 제작되었으며, 이는 플로팅 링 실(floating ring seal), 207 베어링, 임펠러 실(impeller seal) 및 IPS(Inter-Propellant Seal)로 구성된다. 앞서 기술한 바와 같이 베어링을 냉각시킨 산화제의 일부는 축 방향을 따라 누설되며 이는 IPS로 제어되도록 구성되어 있다. 한편, 본 시험에서는 완중가스 공급 라인 및 연료 펌프 측 테프론 링을 제외한 산화제 펌프 측 IPS만이 제작되어 사용되었다. 시험에 사용된 IPS 주요 구성품의 상세 사양은 Table 1에 정리 되어있다.

시험은 플로팅 링 실의 실매질 시험<sup>13)</sup>과 동시에 이루어졌으며, IPS의 성능은 특정한 회전속도 및 입구압력 조건에서 액체산소(산화제)의 누설 유량을 측정함으로써 파악되었다. 아울러 시험 후에 분해를 통한 각 구성요소의 육안검사를 실시하여 정상작동 여부를 판단하였다. 한편 IPS를 통해 누설되는 산소는 테프론 링을 통과하면서 압력이 급격히 강하하여 2상 유동(2 phase flow)의 형태를 가지며, 일반적인 터빈 유량계로는 누설 유량의 정상적인 측정이 어렵게 된다. 이에 본 시험에서는 누설된 산소를 열교환기를 이용하여 기화시킨 후 오리피스 유량계를 사용하여 질량유량을 측정하였다.

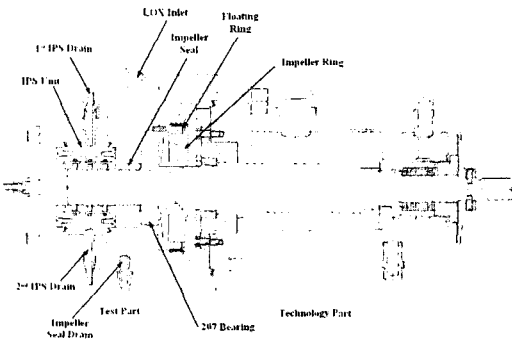


Fig. 4 Cross-sectional view of seal test rig

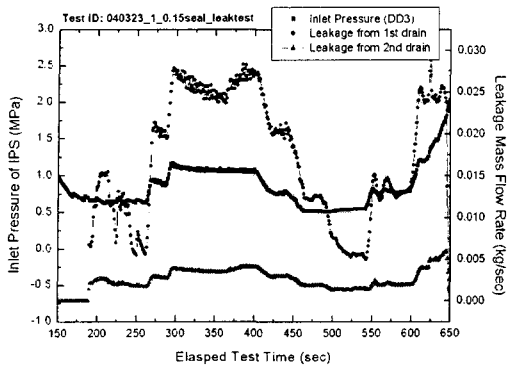
Table 1 Specifications of IPS

Materials	
Casing & inner parts	3xx series Stainless Steel
Shaft	6xx series Stainless Steel
Teflon ring	F4K20
Dimensions (Teflon ring)	
Clearance to Radius (c/R) ratio	0.0006 ~ 0.002
Length to Diameter (L/D) ratio	0.115
Requirements	
Max. inlet pressure	10 bar
Max. leakage flow	40 g/sec (w/o buffer gas)
Rotational speed	20,000 rpm

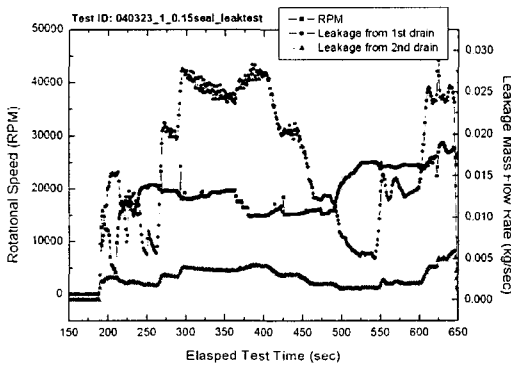
#### 3.2 시험 결과

Fig. 5 및 Fig. 6 은 실매질 시험으로 측정된 IPS의 누설 유량을 IPS의 입구압력 및 회전속도와 같이 도시하고 있다. 여기서 'DD3'는 임펠러 실 입구의 압력, '1st drain' 및 '2nd drain'은 각각 첫 번째 및 두 번째 테프론 링을 통과한 후 설치된 드레인으로 배출되는 액체 산소의 누설 유량을 나타낸다. 주지하는 바와 같이 산화제 펌프에서 임펠러 후단을 통해 역류되어 베어링을 냉각시키는 액체 산소는 대부분 2차 유로를 통해 펌프 입구로 돌아가게 되며, 일부는 축을 따라 누설되어 IPS로 들어 오게 된다. IPS를 통해 누설된 산소는 재사용되지 않고 버려지게 되므로, IPS를 통과하는 산소의 유량은 순수한 펌프의 손실이 된다. 따라서 IPS를 통한 누설 유량이 전체 산화제 펌프 유량에 비해 크게 되면 펌프의 효율을 저하시키는 요인이 될 수 있다. 그러나 측정 결과에 나타난 바와 같이 IPS를 통과하는 산소의 질량 유량은 최대 30 g/s 미만으로 이는 산화제 펌프 유량의 0.045 % 정도로 산화제 펌프 효율에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다.

일반적으로 IPS를 통한 누설 유량에 영향을 미치는 인자는 IPS 입구 압력 및 회전 속도를 들 수 있다. 즉, 입구 압력이 높아지면 누설 유량이 증가하고, 낮아지면 감소하게 된다. IPS 입구에는 임펠러 실이 설치되어있는데, 임펠러 실은 축과 함께 회전하면서 IPS 입구 압력을 강하시켜 누설 유량을 감소시키는 역할을 한다. 또한 회전 속도가 클수록 테프론 링과 축 사이 간극에서 유체의 접선



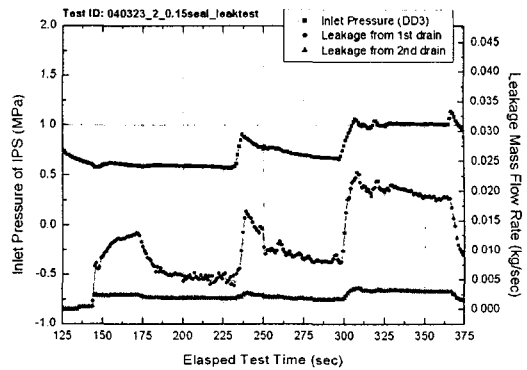
(a)



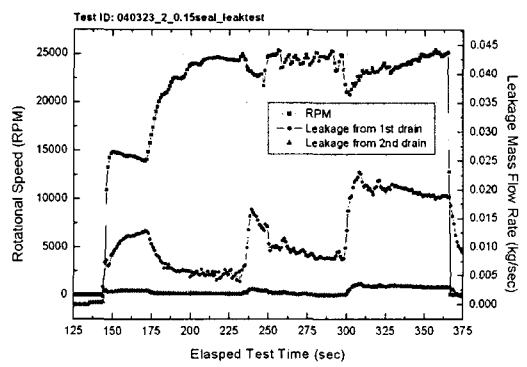
(b)

Fig. 5 1st test results of IPS (a) leakage vs. inlet pressure (b) leakage vs. rpm

방향 유동 속도가 증가하게 되는데, 이는 유체의 축 방향 유동을 방해하여 누설 유량을 감소시키는 역할을 한다. 결론적으로 IPS를 통한 누설 유량에 영향을 미치는 인자로는 입구 압력 및 회전 속도를 들 수 있으며 입구 압력이 낮아질수록, 회전 속도가 높아질수록 누설 유량은 감소하게 된다. 한편 Fig. 5(a) 및 Fig. 6(a) 에서 나타난 바와 같이 액체 산소의 누설 유량은 IPS의 입구압력이 증가하면 증가하고, 입구압력이 감소하면 감소하는 경향을 보이고 있으며, 이는 앞서 기술한 바와 일치하는 결과이다. Fig. 5(b) 에서 350초 부근에 갑자기 누설 유량이 증가하는 것은 회전 속도가 줄어 임펠러 실에서의 압력강하 및 테프론 링과 축 사이 간극에서의 접선 방향 유동 속도가 감소하여 일어나는 현상이며, 500초 부근에서 누설 유량이 감소하는 현상은 회전 속도가 증가하여 나타난 현상으로 앞선 예측과 잘 일치하는 결과를 보이고 있다.



(a)



(b)

Fig. 6 2nd test results of IPS (a) leakage vs. inlet pressure (b) leakage vs. rpm

마찬가지로 Fig. 6(b) 에 175초 부근에서 누설 유량이 감소하는 이유도 회전 속도가 증가하기 때문이다.

### 3.3 시험 후 분해 결과

IPS 내부의 테프론 링은 회전하는 축과 접촉하기 때문에 마모가 일어나게 된다. 따라서 지속적으로 시험이 진행되면, 테프론 링의 마모로 인해 축과 테프론 링 사이의 간극이 넓어지게 되며 이는 누설 유량의 증가를 가져오게 된다. Fig. 7 은 시험 후 분해한 첫 번째 테프론 링의 사진이다. 테프론 링의 구분은 액체 산소 측 IPS 입구부터 완충가스 공급부분까지 차례로 첫 번째, 두 번째, 세 번째로 하였다. 사진에 나타난 바와 같이 심각한 마모는 발견되지 않았으며, 치수검사에서도 큰 변화는 없었다. Fig. 8 은 세 번째 테프론 링의 시험 후

분해 사진이다. 사진에서 보이는 바와 같이 링 옆면에 심한 마모가 일어났음을 알 수 있으며, 이는 테프론 링이 축과 함께 회전하면서 발생한 현상으로 사료된다. 구조적으로 테프론 링은 웨이프 스프링에 의해 실 허브와 밀착되며 이 스프링 힘에 의해 회전을 방지하는데, 스프링 힘이 적었던 것으로 판단된다. 한편, 첫 번째 테프론 링에서 이와 같은 마모가 발견되지 않았는데, 이는 스프링 힘과 더불어 IPS 입구 액체 산소의 압력이 테프론 링을 실 허브에 더욱 강하게 밀착시켜 회전이 일어나지 않았던 것으로 생각된다. 한편, Fig. 9 는 세 번째 테프론 링과 조립되었던 실 허브의 시험 후 사진으로, 테프론 링에서 마모된 불순물이 있는 것을 볼 수 있다.

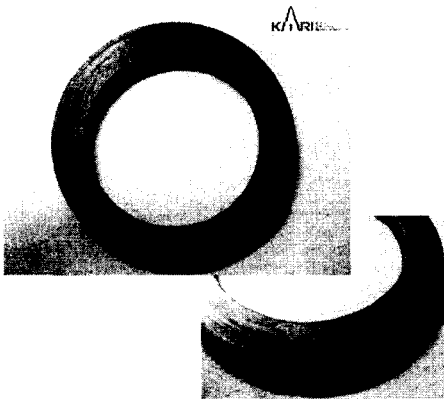


Fig. 7 1st stage Teflon ring after test

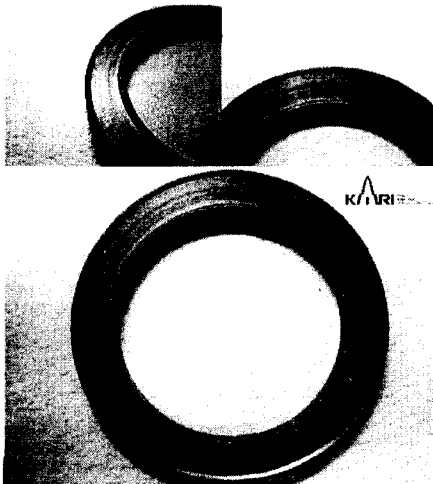


Fig. 8 3rd stage Teflon ring after test

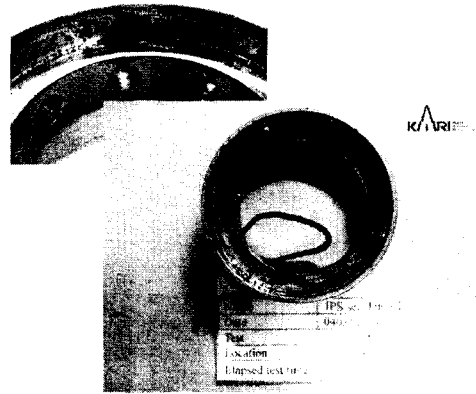


Fig. 9 3rd stage seal hub after test

#### 4. 결론

앞서 기술한 바와 같이 현재까지 한국항공우주연구원에서는 IPS의 실매질(액체산소) 환경시험을 수행하여 설계요구조건에 부합하는 결과를 얻었다. 그러나 보다 높은 신뢰도를 유지하는 IPS를 개발하기 위해서는 해결해야 할 여러 기술적인 난제가 있다. 특히 극저온 환경에 노출될 경우 각 구성요소의 재질에 따른 열변형량이 달라 문제를 일으킬 수 있으며, 이는 IPS 구성 요소 중 테프론 링과 축 사이 간극을 변하게 하는 가장 큰 요인이 된다. 따라서 극저온 상태에서도 테프론 링과 축 사이의 일정한 설계 간극을 유지하는 기술을 개발하는 것이 향후 주요한 연구 과제로 남아있다.

#### 후기

본 연구는 과학기술부에서 시행한 특정연구개발사업인 '소형위성발사체(KSLV-1)개발사업' 연구결과와 일부임을 밝히며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 김진한, 이은석, 홍순삼, 최창호, 전성민, 정은환, "액체로켓엔진용 터보펌프 개발현황", 제5회 우주발사체기술 심포지움, KAIST, pp. 38-51, 2004.
2. T. W. Ha, Y. B. Lee and C. H. Kim, "Leakage and Rotordynamic Analysis of a High Pressure Floating Ring Seal in the Turbo Pump Unit of a

Liquid Rocket Engine", Tribology International,  
Vol. 35, pp. 153-161, 2002.

3. 박현덕, 전성민, 김진한, "국산화 터보펌프용  
플로팅 링 실의 누설특성 및 소재검증", 한국  
군사과학기술학회 종합학술대회 논문집(II),  
pp. 583-585, 2004.