

액체 로켓 엔진 스태틱 실 개발

전성민^{1,†} · 윤석환¹ · 정태검²¹한국항공우주연구원 터보펌프팀²한국항공우주연구원 발사체엔진팀

Development of Static Seal for a Liquid Rocket Engine

Seong Min Jeon^{1,†}, Suk-Hwan Yoon¹ and Taegeum Chung²¹Korea Aerospace Research Institute Turbopump Team²Korea Aerospace Research Institute Rocket Engine Team

Abstract

Static seals are used to seal high temperature gas and cryogenic fluid under high pressure, at interfaces between liquid rocket engine components such as combustion chamber, turbopump, gas generator, valves, etc. As thermal expansion and contraction at assembly interfaces cause undesirable leakage under cryogenic and high temperature environments, static seals applied for sealing of joint interfaces without relative motion should be designed properly. The additional function of rotation at the sealing face is also required for static seals, when the spherical flange is used for improvement of assembly at misalignment interfaces. In this study, structural analysis and leak tightness test of simulating test rig for several important interfaces are performed, to verify structural integrity of static seals.

초 록

액체 로켓 엔진의 연소기, 터보펌프, 가스발생기, 밸브 등 주요 구성품 조립 부위에는 고압의 고온 가스와 극저온 유체의 기밀을 위해 스태틱 실이 사용된다. 스태틱 실은 조립 부위의 상대적 움직임이 없는 기밀 부위에 적용되는데, 극저온 및 고온 환경에서의 열팽창과 수축은 조립부에서 원치 않는 누설을 야기할 수 있기에 효과적인 스태틱 실 설계가 필수적이다. 조립성 개선을 위하여 비정렬 조립이 가능한 구면 플랜지가 체결부에 사용되는데, 구면 플랜지의 회전이 가능하도록 스태틱 실 역시 기능이 추가된다. 본 연구에서는 스태틱 실 적용 주요 부위의 모사 플랜지 시험기를 제작하여 구조 해석과 함께 기밀 시험을 수행하여 설계된 스태틱 실의 구조 건전성을 확인하였다.

Key Words : Liquid Rocket Engine(액체 로켓 엔진), Static Seal(스태틱 실), Spherical Flange(구면 플랜지), Leakage(누설), Cryogenic(극저온), High Temperature(고온), Structural Analysis(구조 해석)

1. 서 론

우주발사체용 액체 로켓 엔진은 연소기, 터보펌프, 고압배관, 가스발생기, 개폐밸브와 제어밸브 등 주요 구성품으로 이루어지는데, 각 구성품간 조립과 기밀을 위하여 체결류와 스태틱 실(static seal)이 필요하다

[1]. 엔진의 주요 구성품들은 극저온 유체가 흐르는 산화제 펌프 및 배관과 고온 가스가 흐르는 연소기, 가스발생기와 터빈 등으로 구성되어 있어 극심한 온도 편차가 있는 열적 환경에 놓이게 된다. 극저온과 고온의 열적 환경뿐만 아니라 유체와 기체의 압력 또한 고압으로 작동하기에 조립부 인터페이스에서 누설의 위험은 커지게 된다. 한편, 연소기와 터보펌프의 제작상 필연적으로 발생할 수 밖에 없는 용접에 의한 구조 변형은 조립 인터페이스에서 진위치를 보장할 수 없기에, 이와 같은 변형을 보상하고 조립의 용이성을 증대

Received: May 10, 2022 Revised: Jul. 04, 2022 Accepted: Jul. 05, 2022

† Corresponding Author

Tel: +82-42-860-2013, E-mail: smjeon@kari.re.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

시킴을 위하여 인터페이스에서 조립 각도 회전이 가능한 구면 플랜지가 적용된다[2]. 구면 플랜지 활용에 따른 인터페이스에서의 비정렬 조립 체결과 극심한 온도 환경은 스태틱 실 기밀 성능에 좋지 않은 영향을 주게 되므로 이에 대한 건전성 확인이 필요하다. 또한, 액체 로켓 엔진의 개발 시험은 비용을 줄이기 위해 1기의 엔진으로 지상 연소 시험을 10~15회 정도 수행하므로, 엔진 작동 환경과 시험이 없는 동안 스태틱에서의 준비 환경에 엔진이 번갈아 가면서 놓이게 된다. 이때 스태틱 실은 엔진 작동 중의 열팽창 또는 열수축 환경과 준비 중의 상온 환경을 반복적으로 겪게 되므로, 열적으로 반복적인 하중을 받는 극심한 환경에 놓이게 된다.

엔진의 주요 구성품 중 하나인 터보펌프의 금속 실 체결부에 대한 구조 설계 및 해석은 엔진의 스태틱 실 개발 이전에 선행되어 연구가 수행되었다[3,4]. 2차원 및 3차원 유한요소 접촉 해석을 통하여 충분히 큰 실 표면 접촉 압력을 확보할 수 있도록 체결부의 구조적 건전성 및 체결력 크기와 체결 요소 간격의 적절성을 검토하였다. 초기 체결 상태 뿐만 아니라 운전 중 발생한 내부 작동 유체의 압력 하중 상태에서도 해석을 수행하여 운전 상태에서의 체결 유지 및 누설 방지를 달성할 수 있도록 설계가 이루어 졌다.

본 연구에서는 스태틱 실 적용 주요 부위의 모사 플랜지 시험기를 제작하여 구조 해석과 함께 극저온 및 고온 환경에서의 기밀 시험을 수행하여 설계된 스태틱 실의 구조 건전성을 확인하였다.

2. 스태틱 실 및 조립부 설계

액체 로켓 엔진에서 스태틱 실은 체결 부품간 상대적 움직임이 없는 정적 조립 부위에 기밀을 목적으로 사용되며, 메탈 플랫 실(metal flat seal)과 코니컬 실(conical seal) 및 고무 오링(O-ring) 등이 기밀이 필요한 매질과 온도 환경 조건을 고려하여 사용된다.

액체 로켓 엔진에 활용되는 스태틱 실의 대표적인 형상은 Fig. 1과 같다. 플랜지와 실의 단면 형상으로서 (a) 플랫 타입은 단면이 사각인 형상이고 실이 접촉되는 양 플랜지에 그루브(groove)를 가공하여 조립시 연질의 실이 변형되면서 밀착되어 기밀 부위를 형성한

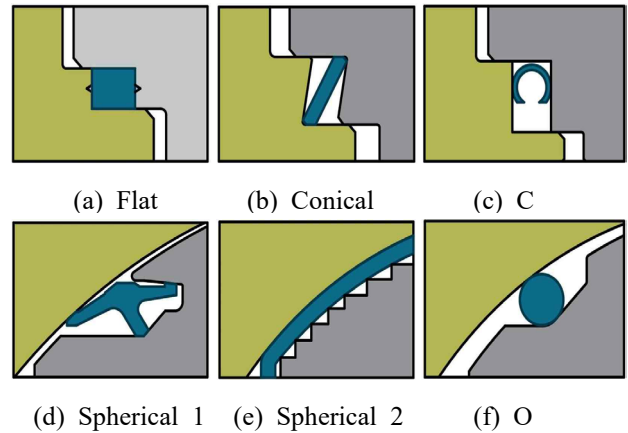


Fig. 1 Static Seal Configuration

다. (b) 코니컬 타입은 썸기 형상으로서 플랜지 상, 하면에 실이 접촉함으로써 기밀면을 제공하고, (c) C 타입은 알파벳 C 형상으로서 플랜지 앞, 뒤 면에 실이 접촉함으로써 기밀면을 제공한다. (d)와 (e)는 구면(spherical) 플랜지에 적용되는 금속 소재의 실로서 내경이 큰 대구경 조립부에는 (d) 타입의 실이 적용되고, 내경이 작은 소구경 조립부에는 (e) 타입의 실이 적용된다. 구면 플랜지는 조립부에서 플랜지 회전에 의해 비정렬 조립이 가능하게 하기 위해, 용접 변형이 극심하여 플랜지 조립이 어려운 부위에 조립 용이성을 제공한다. (f) O 타입은 일반적인 고무 O 링(ring) 형상을 나타내는데, 구면 플랜지와 조합하여 사용함으로써 조립성 개선을 확보할 수 있다.

스태틱 실의 소재는 고온 및 극저온의 극심한 온도 환경과 내화학성이 요구되는 기밀부에는 구리 합금, 알루미늄 합금, 내열 합금 및 스테인레스 강(stainless steel)과 같은 금속 소재를 사용하고, 상온 유체 기밀부에는 고무 소재를 사용한다. 메탈 플랫 실에 주로 사용되는 구리 소재는 높은 열팽창 계수로 인하여 고온 환경에서 실 캐비티(seal cavity)를 가득 채움으로써 높은 실 면압을 제공하여 좋은 기밀 특성을 나타낸다. 코니컬 실은 러시아 규격의 실로서 스테인레스 강 소재로 제작되는데 코니컬 형상에서 오는 높은 탄성 계수의 장점이 열팽창과 수축에 따른 실 캐비티 틈새 보상을 가능하게 한다. 내열 합금 소재로 제작되는 C형상의 실은 여러 제작사에서 상용품으로 제공하고 있는데, 실 표면에 연질의 은 코팅을 함으로써 실 조립면의 불완전한 평면을 보상하고 C형상에서 오는 높은

탄성 계수와 내압 조건에 따른 실 접촉 압력 증가의 장점으로 인해 온도 변화에 따른 실 캐비티 틈새 보상을 가능하게 한다. 구면 플랜지에서도 매질과 온도 환경에 의해 금속 소재의 실과 고무 소재의 O링이 선택적으로 사용된다. 구면 플랜지에 적용된 금속 소재 실의 경우 Fig. 1의 (d) 타입과 같이 높은 탄성력에 의한 실 밀착 면압과 다수의 기밀 접촉면을 확보하기 위하여 복잡한 형상으로 설계/제작하기도 하고, 복잡한 형상 적용이 불가한 소구경의 조립 부위에서는 (e) 타입과 같이 계단 형상의 다수의 기밀 접촉면과 구리와 같은 연질 소재의 실을 적용함으로써 기밀 성능을 확보하기도 한다.

실의 체결력은 조립시 실 접촉 면압이 충분히 확보 되도록 캐비티 내에서 실을 밀착시키는 밀착 하중과 기밀을 요하는 매질의 내부 압력 하중에 의해 Eq. 1과 같이 결정된다.

$$F_{tight} = F_{seal} + F_{pressure} \quad (1)$$

여기서 F_{tight} 는 전체 체결력을 나타내고, F_{seal} 은 실의 형상과 소재에 의해 결정되는 밀착 하중을 나타내며, $F_{pressure}$ 는 기밀이 요구되는 압력과 실의 형상에 의해 결정되는 내압 하중을 나타낸다. 볼트 1개당 체결 축력은 실 전체 체결력을 볼트 개수로 나눔으로써 얻을 수 있다. 구해진 볼트 체결 축력으로부터 볼트 체결 토크를 Eq. 2와 같이 구할 수 있다.

$$M_{tight} = M_{thread} + M_{face} \quad (2)$$

여기서 M_{tight} 는 볼트 전체 체결 토크를 나타내고, M_{thread} 는 볼트 축력과 나사산의 형상 및 마찰 계수에 의해 결정되는 나사산 마찰 토크를 나타내며, M_{face} 는 나사산 이외에 접촉되는 면적에 부과되는 축력과 마찰 계수에 의해 결정되는 접촉면 마찰 토크를 나타낸다. 앞에서 얻어진 볼트 1개당 부가되는 체결 축력과 토크로부터 볼트의 등가 응력을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_{eqv} = \sqrt{\sigma_{tens}^2 + 3\tau^2} \quad (3)$$

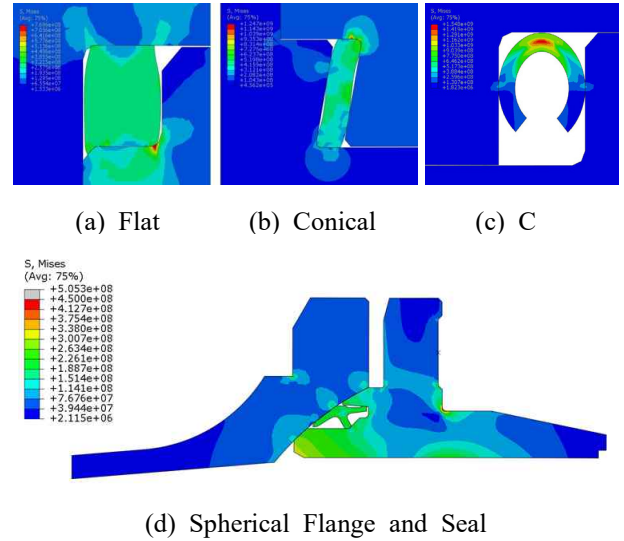


Fig. 2 Von Mises Equivalent Stress of Static Seal

여기서 σ_{eqv} 는 볼트 등가 응력을 나타내고, σ_{tens} 는 볼트 체결 축력과 형상에 의해 결정되는 인장 응력을 나타내며, τ 는 볼트 체결 토크와 형상에 의해 결정되는 전단 응력을 나타낸다. Eq. 3에서 얻어진 볼트의 등가 응력을 소재 항복 강도와 비교함으로써 안전 여유가 충분히 확보되는지 또는 볼트를 체결하기에 적절한 토크인지 확인이 필요하다.

적절한 체결 토크의 선정과 이에 따른 볼트의 구조 강도 안전 여유를 확인한 후에 유한요소해석을 통하여 플랜지 및 스태틱 실의 구조 응력 상태를 검토하였다. 구조 해석은 온도, 압력 작동 조건과 볼트의 체결력을 고려하여 수행하였고, 스태틱 실의 접촉 면압 및 플랜지 부위의 응력을 검토하여 설계된 인터페이스 형상의 구조 건전성을 검증하였다. Fig. 2에 플랫폼 형상, 코니컬 형상, C 형상의 스태틱 실과 구면 플랜지에 적용되는 스태틱 실에 대한 Von Mises 등가 응력 분포를 나타내었다. 스태틱 실에 대한 접촉 구조 해석은 2차원 축대칭 단면 형상에 대해 소재의 탄소성을 고려한 비선형 모델과 쿨롱(Coulomb) 마찰 모델을 적용하여 수행하였다. 체결 후 체결력에 의하여 스태틱 실은 높은 응력을 보이며 소성 변형을 통하여 실 캐비티를 채우게 된다. 이후 내부 압력 하중에 의하여 체결된 플랜지의 밀착면과 실 캐비티가 벌어지려는 힘을 받게 되고, 구조 응력은 조금 감소하게 된다. 플랫폼 형상의 스태틱 실은 코니컬 형상의 스태틱 실에 비해 접촉 부위

가 넓어 최대 응력의 크기는 낮게 나타난다. C 형상의 스테틱 실은 체결에 의해 중간 부분에서 굽힘 변형이 쉽게 발생함으로써 매우 높은 응력이 나타난다. 스테틱 실의 기밀 성능을 해석적으로 판단하기 위해서는 구조 해석 결과를 바탕으로 스테틱 실의 접촉 압력 분석이 필요하다. 미국 ASME 또는 영국 BS의 압력 용기 규격에서는 기밀을 달성하기 위한 최소 접촉 압력을 제시하고 있는데[5,6], 해석 결과가 참고문헌에서 제시하고 있는 요구 조건인 스테인레스 강 소재 코니컬 실의 196.5 MPa 접촉 압력과 구리 소재 플랫 실의 400 MPa 접촉 압력을 만족하는 것으로 나타났다. 구면 플랜지는 적용되는 스테틱 실과 함께 플랜지의 구조 응력 및 변형 검토가 필요하다. 비정렬 조립을 위해서는 구면 플랜지 인터페이스 조립면에서 회전이 가능해야 하기에, 플랜지 간 틈새가 밀착되지 않고 떨어져 있을 수 밖에 없다. 스테틱 실의 접촉 압력을 높이기 위하여 과도한 체결력을 인가할 경우 플랜지가 변형이 되어 설계상 의도 되었던 접촉면에서의 회전 기능이 제한될 수 있기에 구조 해석 결과를 토대로 적절한 체결력 선정이 필요하다.

3. 개발 시험 및 검증

구조 해석을 통하여 설계의 적절성이 확인되면, 모사 플랜지 시험기를 제작하여 내압 및 기밀 시험을 수행하였다. 압력과 온도는 실제 엔진 운용 환경을 모사하였고, 구면 플랜지의 경우 정렬 및 비정렬 조립 조건에서 시험을 수행하여 설계 형상을 최종적으로 검증하였다.

Table 1에 개발 시험 조건을 나타내었다. 압력 조건의 경우 엔진 최대 작동 압력의 1.5배에서 각 부위의 해당 압력을 반영하여 결정하였다. 극저온부는 액체 질소에 시험기를 장입하고 기체 헬륨으로 시험기 내부를 가압함으로써 온도 환경과 압력 조건을 모사하였다. 상온부는 내압 강도 확인을 위해 물을 사용하였으며, 고온부는 열처리로를 사용하여 고온 환경을 반영하고 기체 헬륨을 사용하여 가압하였다. 강도 시험에서는 파손 발생과 변형 여부를 검토하여 설계된 스테틱 실의 체결부 구조 건전성을 확인하였다. 정렬, 비정렬 요구 조건은 플랜지 부위를 인위적으로 최대 2.5°

까지 회전하여 조립하고 시험함으로써 측정될 불일치를 허용할 수 있는지 검증이 이루어 졌다.

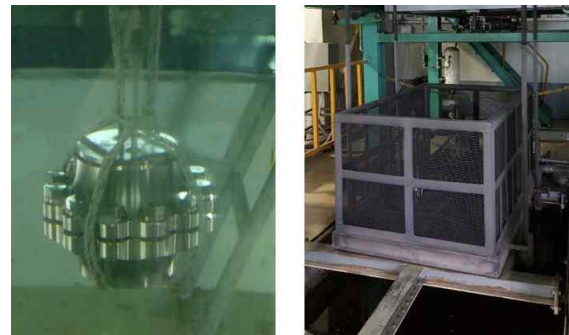
극저온부는 산화제 펌프로부터 승압된 고압의 액체 산소가 흐르는 산화제 고압배관 부위에 해당하고, 상온부는 연료 펌프로부터 승압된 고압의 케로신(Kerosene)이 흐르는 연료 고압배관 부위에 해당한다. 고압배관은 터보펌프로부터 연소기로 고압, 고유량의 액체 산소와 케로신을 운반하는 역할을 담당하는데, 연소기와 터보펌프에서 나타나는 용접 변형에 의한 인터페이스 진위치 변경을 수용하기 위해서는 구면 플랜

Table 1 Development Test Specification

항목	규격
압력 조건	139/148 bar (극저온부), 178/187 bar (상온부), 90 bar (고온부)
온도 조건	-196 °C (극저온부), 25 °C (상온부), 630 °C (고온부)
정렬/비정렬	0° / 2.5° (조립)
기밀 성능	헬륨 가스 1×10^{-4} cc/sec



(a) Off Axis Assembly (b) Static Seal
Fig. 3 Prototype of Spherical Flange



(a) Test in Water Tank (b) Heating Furnace
Fig. 4 Strength and Leak Tightness Test



Fig. 5 Cryogenic Test



(a) Flange Tester (b) Static Seal
Fig. 6 Visual Inspection after Test

지 적용이 필요하다. 한편, 터보펌프는 터빈의 동력으로 회전하게 되는데, 터빈을 구동하기 위한 고온, 고압의 가스가 가스발생기로부터 공급된다. 개발 시험 규격에서 고온부는 터빈과 가스발생기 인터페이스 조립부에 해당한다.

Figure 3은 개발 시험을 위해 제작된 구면 플랜지 시제품과 스태틱 실을 보여 주고 있는데, 구면 플랜지 시제품은 그림과 같이 조립 중심 축에 대하여 플랜지를 회전시킴으로써 비정렬 상태 체결이 가능하다.

Figure 4의 좌측 그림은 수조에서 모사 플랜지 시험기에 기체 헬륨을 가압하여 기포가 발생하는지 여부를 확인하는 상온 기밀 시험을 나타낸다. 수조에서의 상온 기밀 시험에 앞서 물을 매질로 강도 시험을 수행하여 해당 압력에서 모사 플랜지 시험기가 견딜수 있는지에 대한 구조 건전성을 선형하여 확인하였다. 물을 이용한 강도 시험과 수조에서의 기포 확인 기밀 시험을 수행한 후에는 대기에서 최종적으로 헬륨 디텍터를 이용하여 헬륨 누설 요구 조건인 1×10^{-4} cc/sec를 만족하는지 여부를 검증하였다. Fig. 4의 우측 그림은 고온 환경을 반영하기 위하여 모사 플랜지 시험기를 열

처리 로에 설치한 상태를 보여 준다. 고온 환경을 반영한 시험은 온도 변화에 따른 반복적인 열팽창과 열수축의 영향을 살펴보기 위한 목적으로서, 고온의 열처리 로와 상온의 대기 환경에 모사 플랜지 시험기가 반복적으로 놓이게 함으로써 고온-상온의 열주기 환경을 모사하였다. 반복되는 열주기 환경에서 기밀 시험을 수행하여 설계된 스태틱 실 및 체결부가 변화하는 열환경에서도 기밀 성능이 잘 유지되는지 확인하였다.

Figure 5는 극저온 환경시험 과정을 보여 주고 있다. 극저온 시험은 액체 질소 수조 내에서 헬륨 가스로 시험기 내부를 가압한 후 열적 평형 상태에 도달하면, 그 이후부터 시험기 내부 압력을 관찰하여 누설에 따른 감압 여부를 확인함으로써 기밀 성능을 확인하였다. 또한, 극저온 상태에서 시험기를 대기로 끌어 올려 헬륨 디텍터로 누설량을 측정함으로써 기밀 성능에 대한 정량적 검증도 이루어 졌다. 극저온 기밀 시험 동안 극저온 수조에서의 헬륨 가스 감압은 나타나지 않았고, 대기에서의 헬륨 누설량도 누설 요구 조건 이하로 계측되어 극저온 기밀 성능을 만족함을 확인하였다.

시험 종료 후에는 Fig. 6와 같이 모사 플랜지 시험기를 분해하여 이상 여부를 육안으로 확인하고 중요부위의 치수를 측정함으로써 하드웨어에 손상이 없음을 확인하였다. Table 2에 스태틱 실의 시험 조건과 결과를 정리하여 나타내었다. 구조 해석은 극저온과 고온에서의 스태틱 실 접촉 압력을 확인하기 위하여 산화제 고압 배관과 터빈 고온 배관에 적용된 3종의 스태틱 실에 대해 해석을 수행하였다.

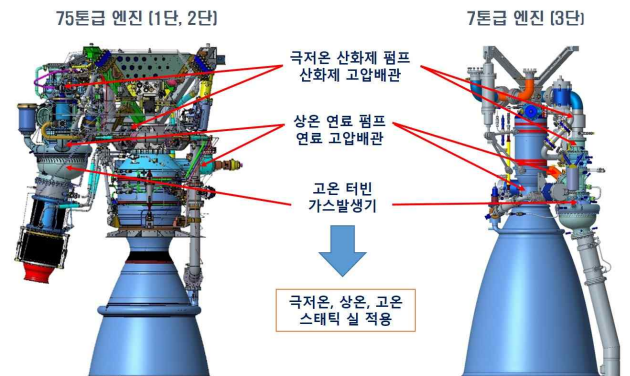



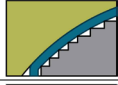



Fig. 7 Static Seal of Liquid Rocket Engines

Table 2 Static seal test condition and result

		스태틱 실 형태	스태틱 실 소재	온도 환경	압력 환경	누설 기준	누설 결과 ¹⁾	치수 변화량 ²⁾
75톤급 엔진	산화제 고압 배관		스테인레 스 강	-196 °C	139 bar	1×10 ⁻⁴ cc/sec	1×10 ⁻⁴ cc/sec 이하	설계 공차 이내
	연료 고압 배관		고무	25 °C	178 bar			
	터빈 고온 배관		구리	630 °C	90 bar			
7톤급 엔진	산화제 고압 배관		구리	-196 °C	148 bar	1×10 ⁻⁴ cc/sec	1×10 ⁻⁴ cc/sec 이하	설계 공차 이내
	연료 고압 배관		고무	25 °C	187 bar			

¹⁾ 헬륨 디텍터를 1×10⁻⁴ cc/sec로 설정할 경우 설정 수치 이하에서는 모든 계측값이 0으로 나타남.

²⁾ 스태틱 실 안착면, 플랜지 조립면 등 스태틱 실 접촉 압력에 영향을 주는 설계 치수들에 대해 시험 전, 후 치수 검사가 이루어졌고, 모든 측정 부위에서 치수 변화량들이 설계 공차 이내로 확인됨.

모사 플랜지 시험기를 통하여 단품 수준에서 개발하고 검증된 스태틱 실은 Fig. 7과 같이 한국형발사체 액체 로켓 엔진 조립체에 장착되어 지상 연소 시험에 적용되었다. 한국형발사체 75톤급 엔진은 총 200회 누적 시험시간 19,712초와 7톤급 엔진은 총 96회 누적 시험시간 18,143초 동안 지상에서 연소 성능 시험이 이루어졌고, 연소 시험 동안 카메라로 촬영된 영상이나 주요 부위에서 측정된 압력 계측 등을 통해 스태틱 실에서 누설이 없음을 확인하였다.

4. 결 론

우주발사체용 액체 로켓 엔진에 적용되는 스태틱 실의 개발 내용에 대하여 기술하였다. 극저온, 상온 및 고온 작동 환경에서 고압의 액체 및 기체의 기밀 성능을 보장하기 위하여, 형상 설계, 구조 해석과 함께 모사 시험기 강도 기밀 시험을 통하여 최종 설계 형상을 검증하였다.

압력, 온도, 비정렬 조립 및 열주기 환경 등 실제 엔진 운용 환경에서 발생하는 조건들을 모사하여 검증 시험을 수행하였고, 소성 변형과 누설 없이 요구 조건을 만족함을 확인하였다. 개발된 스태틱 실은 액체 로

켓 엔진에 조립되어 지상 연소 시험을 통하여 엔진 작동 조건에서 최종적으로 검증이 이루어졌다.

References

- [1] S. M. Jeon, T. Chung, S. H. Yoon, and E. H. Jeong, "Development Status of Static Seal for KSLVII LRE," *Proc. of 2017 SASE Spring Conference*, Jeju, Korea, pp. 606-607, April 2017.
- [2] S. M. Jeon, T. Chung, S. H. Yoon, and E. H. Jeong, "Development of Spherical Flange for KSLVII LRE High Pressure Pipe," *Proc. of 2017 KSPE Fall Conference*, Kangwon, Korea, pp. 1053-1054, December 2016.
- [3] S. H. Yoon, S. M. Jeon, and J. Kim, "Analysis of Joints Using Metal Seals in Liquid Rocket Engine Turbopump," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 17, No. 6, pp. 105-112, 2013.
- [4] S. H. Yoon, S. M. Jeon, and J. Kim, "Design of Joints Using Metal Seals in Turbopump," *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 8, No. 1, pp.

24-29, 2014.

- [5] British Standard, *Unfired Pressure Vessels - Part 3 : Design*, BS EN 13445-3:2002, pp. 597-633, 2004.
- [6] K. R. Rao, *Companion Guide to the ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Volume 2, Second Edition : Criteria and Commentary on Select Aspects of the Boiler & Pressure Vessel and Piping Codes*, ASME, Chapter 40, pp. 8-9, 2006.