

KSLV-I 킥모터 플렉시블 씬 수압 구동 시험

김병훈* · 권태훈** · 조인현***

The hydrostatic actuation test on flexible seal of KSLV-I Kick Motor

Byung Hun Kim* · Tae-hoon Kwon** · In-Hyun Cho*

ABSTRACT

The pitch and yaw axis controls of Kick Motor, KLSV-I second propulsion system, was provided by the flexible seal that consists of alternate laminate of natural rubber and composite reinforcements between forward and aft ring.

A hydrostatic actuating test has been conducted to evaluate a performance of the manufactured flexible seal before it is assembled at the nozzle. Through the tests, we have verified an actuation torque and axial displacement of the flexible seal according to pressure variation. The actuation torque and axial displacement of all flexible seal is shown below 60kgf-m/deg at without pressure and 6mm at MEOP respectively.

초 록

KSLV-I 2단에 적용된 킥모터는 피치, 요측 자세제어를 위해 고무와 보강제가 번갈아가며 적층된 플렉시블 씬을 사용하였다.

제작된 플렉시블 씬은 노즐에 조립되기 전에 플렉시블 씬의 성능을 확인하기 수압 구동 시험을 수행하였다. 수압 시험을 통해 플렉시블 씬의 제작 상태를 확인하였으며, 압력 변화에 따른 피치, 요측의 구동 토크 및 축 방향 밀립량을 확인하였다. 수압 시험결과 제작된 플렉시블 씬의 구동 토크는 60kgf-m/deg이하이며, 축 방향 밀립량은 최대 6mm이하를 보이고 있다.

Key Words: Kick Motor (킥모터), Flexible Seal (플렉시블 씬), actuation Torque (구동 토크), Axial Displacement (축 방향 변위)

1. 서 론

현재 많은 고체 모터에서는 추진제의 연소 중 고체 모터의 방향 전환을 위해 구동형 노즐을 사용하고 있다. 이러한 구동형 노즐에는 노즐의 회전을 위해 노즐 고정부와 운동부 사이에 플렉시블 씬, 테크롤 조인트, 소켓-볼과 같은 장치를

* 항공우주연구원 추진제어팀

** (주)한화 대전공장

연락처, E-mail: bkh@kari.re.kr

사용한다. 이중 플렉시블 씬은 1963년 미국에서 John T. Herbert에 의해 처음 개발되어 Space Shuttle Booster, Ariane 5 Booster, M-5와 같은 상업용 발사체 및 Peacekeeper, Trident I, Trident II과 같은 군사용 로켓에 폭넓게 사용되고 있다. 특히 현재까지 많은 비행 및 지상시험에서 플렉시블 씬에 의한 사고 사례가 거의 보고되고 있지 않은 매우 신뢰성이 높은 추력제어 시스템이다[1].

Fig. 1은 항공우주연구원에서 개발한 플렉시블 씬의 모습을 보여준다. 그림에서 오목한 부분은 고무가 적층된 부분으로 노즐 회전 시 노즐 회전 중심기준으로 전단 변형을 하여 실제 노즐이 회전할 수 있도록 한다.

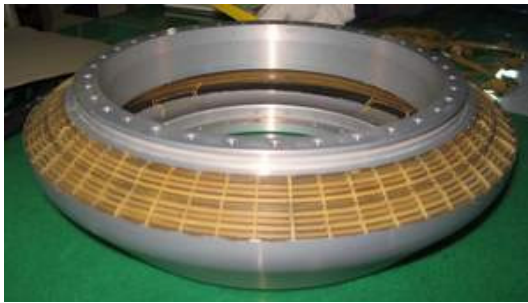


Fig. 1. Flexible Seal

플렉시블 씬이 구동 노즐에 사용될 때 크게 3가지 설계 요소를 고려하여야 한다[2].

첫 째는 플렉시블 씬의 구동 토크 (Actuation Torque)이다. 이것은 플렉시블 씬 개발에 있어서 가장 중요한 설계 요소로써 플렉시블 씬의 구동 토크가 클 경우 노즐 구동에 필요한 구동력이 크게 필요하고 이에 따라 구동 장치의 크기 및 무게가 증가하는 중요한 변수가 된다.

둘째는 연소 압력에 따른 노즐의 축 방향 밀립량이다. 연소실에서 추진제 연소에 의해 발생하는 높은 연소압력은 구동 노즐을 노즐 출구 방향으로 이동시킨다. 이러한 축 방향 변형의 대부분의 원인은 플렉시블 씬에 사용된 고무의 변형에 의한 결과이다. 만약 연소 압력에 의해 노즐의 축 방향 밀립량이 클 경우 노즐 회전에 필요한 구동 장치의 스트로크(Stroke)외에 불필요

한 여유 스트로크가 필요하게 된다. 이것 또한 구동 장치의 무게 증가 요인으로 작용한다. 또한 노즐 내부에서 고정부와 운동부 사이에 간섭이 발생할 가능성이 크다.

마지막으로 고체모터 운용 중 고온 고압의 연소가스가 접촉계면을 통해 누설되지 않도록 접촉계면이 견고해야 한다.

이중 위의 2가지 설계 요소를 확인하기 위해 항우연에서는 제작된 플렉시블 씬을 이용하여 수압 구동 시험을 수행하였다. 이를 통해 제작된 플렉시블 씬의 구동 토크 및 축 방향 밀립량을 확인하였다.

2. 수압 구동 시험

2.1 수압 구동시험 장치

제작된 플렉시블 씬의 구동 토크 및 축 방향 밀립량을 확인하기 수압 구동 시험 장치를 설계/제작하였다. 시험 장치는 실제 구동 노즐 형상과 유사하게 만들었으며, 특히 노즐의 축과 구동 장치가 연결되는 연결 각은 실제 노즐과 동일하게 제작하였다. 구동 장치는 실제 비행용보다 긴 스트로크를 가질 수 있도록 제작하여 최대 구동 각이 $\pm 6^\circ$ 까지 시험이 가능하도록 설계하였다. 또한 노즐 구동 시 작용하는 반력을 측정하기 위해 로드셀을 설치하였다. 이 로드셀 및 노즐 끝단에 설치된 경사도계를 이용하여 제작된 플렉시블 씬의 구동 토크를 측정하였다.

축 방향 밀립량은 45° , 135° 방향에 비 접촉식 변위계를 설치하여 노즐의 밀립량을 측정하였다. 고체 모터 운용 중 발생하는 연소 압력을 모사하기 위해 소형 부스터 펌프를 사용하였다.

Fig. 2는 플렉시블 씬의 장착 및 시험을 위한 수압 구동 시험 장치를 보여준다.

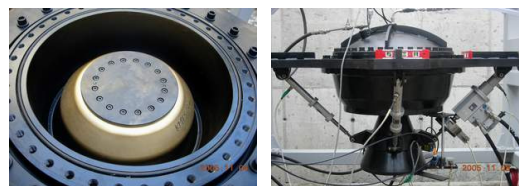


Fig. 2. Hydrostatic test Device

2.2 수압 구동 시험 조건

제작된 모든 플렉시블 씰은 쉘은 연소 시험 및 비행 시험을 수행하기 하기 전에 플렉시블 씰의 성능(구동 토크 및 축 방향 밀림량)을 확인하기 위해 수압 구동 시험을 수행하였다. 수압 구동 시험은 크게 기본 성능 확인을 위한 AT (Acceptance Teat)과 최대 성능을 확인하기 위한 QT (Qualification Test)으로 구성된다.

Table 1. Hydrostatic Test Condition (AT)

구동 각	구동 주파수 (Hz)	구동 방향(°)	압력 환경
±3°	0.05	Pitch, Yaw	0.00
±3°	0.05	Pitch, Yaw	500
±3°	0.05	Pitch, Yaw	1000
±3°	0.05	Pitch, Yaw	1152
±3°	0.05	Pitch, Yaw	0.00

3. 시험 결과

3.1 구동 토크

제작된 플렉시블 씰의 구동 토크를 측정하기 위해 구동 시험 중 구동 장치 피치, 요축의 작동기에 설치된 로드셀 및 노즐 끝단에 설치된 경사도계 데이터 그리고 노즐 형상 데이터를 이용하였다.

Fig. 3은 제작된 플렉시블 씰에 대하여 압력 변화에 따른 구동 토크 측정 결과를 보여준다. 압력이 없는 상태에서 제작된 플렉시블 씰의 구동 토크는 약 42 ~ 54kgf-m/deg 범위를 보이고 있으며, 모든 경우에서 플렉시블 씰의 설계 요구 조건을 만족하고 있다. 또한 구동 토크는 무 부하에서 가장 크며, 압력이 증가하면서 감소하는 특성을 보이고 있다. 이것은 플렉시블 씰의 일반적인 특성으로 플렉시블 씰에 사용된 고무가 압력을 받으면서 전단계수가 감소하고, 플렉시블 씰의 형상이 변화하기 때문이다. 만약 충분한 압력이 주어지면 스프링 토크 상수는 0으로 감소할 것이다[3].

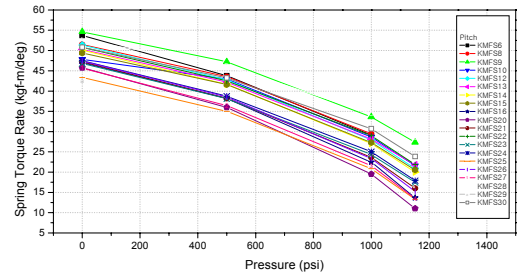


Fig. 3. Spring Torque Rate Variation

Fig. 4는 플렉시블 씰의 최대 구동 각을 확인하기 위한 수압 시험 결과를 보여준다. 제작된 플렉시블 씰은 압력 1152psi, 구동 각 ±5°에서도 구동 선도에 특별한 이상 현상이 나타나지 않았다. 또한 수압 시험 후 촬영한 X-Ray 검사에서 접착 계면의 손상은 발견되지 않았다. Fig. 4에서 보는 것과 같이 구동 각이 증가하면서 나타나는 비 선형성은 고무가 인장 시 나타내는 비 선형 특성에 의한 결과이다. 그 동안의 시험 결과를 보면 이러한 비 선형성은 구동 각 및 압력이 증가할수록 크게 나타나고 있다.

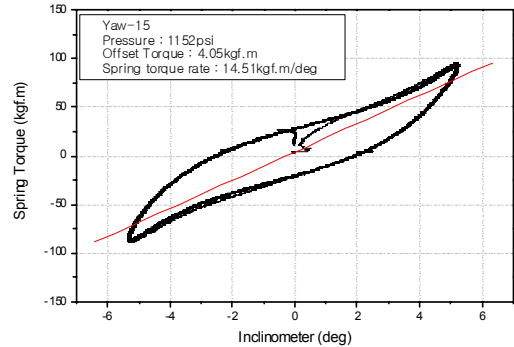


Fig. 4. Non-Linear Characteristic of Flexible Seal

3.2 축 방향 밀림량

플렉시블 씰은 고무와 복합재를 번갈아 가며 적층하여 만들었기 때문에 압력이 증가하면서 노즐이 축 방향으로 밀리게 된다. 이러한 밀림량은 노즐의 내부 간섭 및 구동 장치 스트로크 설계에 매우 중요하다.

수압 시험을 통해 압력에 따른 플렉시블 씰의

출 방향 밀립량을 측정하였다. 축 방향 밀립량은 45°, 135° 방향에 설치된 비 접촉식 변위계를 사용하였다. Fig. 5는 압력 0psi에서 1500psi까지 압력 변화에 따른 플렉시블 쉘의 축 방향 밀립량 변화를 보여준다. 압력이 증가하면서 축 방향 밀립량은 거의 선형적으로 증가하고 있다. 구동 노즐의 MEOP (1152psi)에서 밀립량은 약 5.5mm 정도를 보이고 있으며, 압력 1500psi에서는 밀립량이 7.85mm까지 증가하였다. 압력 1500psi에서 시험 후 X-Ray 검사에서 플렉시블 쉘의 손상을 확인할 수 없었다.

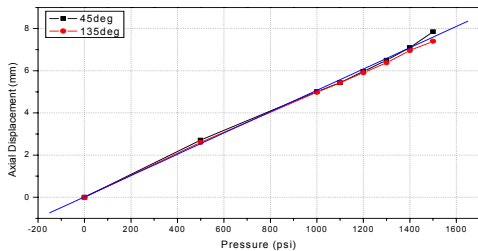


Fig. 5. Axial Displacement Variation

3.3 누수 현상

플렉시블 쉘은 Fig. 1과 같이 구동 노즐의 고정부와 운동부 사이에 위치한다. 따라서 노즐 구동 및 고체 모터 연소 중 연소 가스의 누출 (Leak)을 방지할 수 있어야 한다. 이러한 누출 현상은 대부분은 고무와 보강재, 고무와 전, 후 방 링 사이의 접착 계면 손상에 의해 나타난다. 이러한 접착 계면의 손상은 수압 구동 시험 전후 X-Ray 검사를 통해 확인할 수 있지만, 수압 구동 시험을 통해서도 확인 가능하다.

Fig. 6은 수압 구동 시험 중 접착 계면 손상에 의해 물이 누설되는 것을 보여준다. 시험 후 절개 분석을 통해 이러한 누설 현상은 접착 계면의 손상에 의한 결과임을 확인하였다.



Fig. 6. Leak through adhesive Interface Failure

4. 결 론

수압 구동 시험을 통해 제작된 플렉시블 쉘의 성능 평가를 수행하였다. 수압 구동 시험 결과 제작된 플렉시블 쉘의 구동 토크는 무 부하에서 약 42 ~ 54kgf-m/deg 정도를 보이고 있다. 또한 MEOP에서 플렉시블 쉘의 축 방향 밀립량은 약 5.5mm 정도이다.

수압 구동 시험 통해 제작된 플렉시블 쉘의 성능을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Leonard H. Caveny, Robert L. Geisler, Russell A. Ellis and Thomas L. Moore, "Solid Rocket Enabling Technologies and Milestones in the United States" Journal of Propulsion and Power, Vol. 19, No. 6, 2003.
2. Shimon Shani, Shlomo Putter, Arie Peretz, "Development of a High-Performance Flexible Joint for Thrust Vector Control", AIAA-1995-3017.
3. "Solid Rocket Thrust Vector Control", NASA SP-8114.