

고체 모터 플렉시블 씰을 위한 고무 특성 시험

김병훈* · 권태훈** · 조인현*

The Rubber Characteristic Test for Solid Motor Flexible Seal

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

ABSTRACT

The most important properties in the rubber for a flexible seal are the shear modulus, shear stress, reproducibility of rubber properties from lot to lot and shear modulus variation as aging.

This study was conducted to confirm a rubber characteristic for the flexible seal. As a test result, the shear modulus is the range of 0.4310 ~ 0.4997MPa, and failure shear stress is above 2.5MPa. After 1 year, the shear modulus of rubber as aging increased about 11.8%.

초 록

플렉시블 씰에 사용되는 고무의 성능 중 가장 중요한 것은 플렉시블 씰의 구동 토크를 결정하는 전단 계수, 고무의 회전 각 크기를 좌우하는 전단 응력, 제작된 고무의 균일성, 그리고 고무 노화에 따른 전단 계수 변화이다.

본 연구에서 고체 모터 플렉시블 씰 제작에 사용된 고무 특성의 시험 결과를 정리하였다. 시험 결과 플렉시블 씰 제작에 사용된 고무의 전단 계수는 0.4310 ~ 0.4997MPa 범위를 가지며, 고무의 파단 전단 응력은 2.5MPa 이상을 보인다. 또한 상온 보관 상태에서 1년이 지난 고무의 전단 계수는 평균 약 11.8% 정도 증가하였다.

Key Words : Solid Motor(고체 모터), Flexible Seal(플렉시블 씰), Rubber(고무), 전단계수(Shear Modulus),

1. 서 론

플렉시블 씰(Flexible Seal)은 1963년 John T.

Herbert등에 의해 처음 개발되어 현재까지 많은 고체 모터에서 성공적으로 사용되고 있는 추력 제어 시스템의 핵심 구성품으로, 이를 적용한 추력 시스템은 액체분사 추력제어(LITVC) 시스템에 비해 추력 손실 및 무게가 비교적 작으며, 시스템이 간편하여 신뢰성이 매우 뛰어난 것으로 알려져 있다[1, 2].

* 한국항공우주연구원 추진제어팀
** (주)한화 대전공장
연락처, E-mail: bhk@kari.re.kr

노즐 구동을 위해 플렉시블 씬은 노즐의 고정부 (Fixed Part)와 운동부 (Moving Part) 사이에 위치하며, 금속으로 제작된 전, 후방 링 사이에 금속 또는 복합재로 제작된 씬 (Shim)과 고무를 번갈아가며 적층하여 제작한다.

Figure 1은 고체 모터 추력제어를 위해 사용된 플렉시블 씬의 모습을 보여준다. 그림에서 볼록한 부분은 씬을 나타내며, 씬과 씬 사이의 오목한 곳은 고무가 적층된 부분이다.

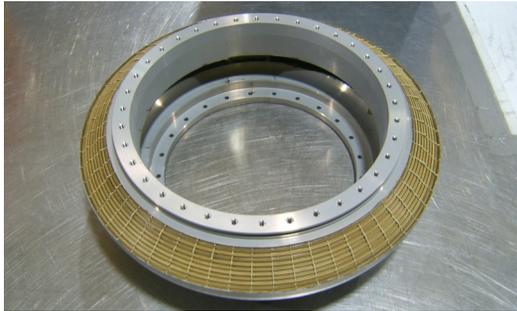


Fig. 1 Flexible Seal for Thrust Vector Control

이러한 플렉시블 씬은 연소 초기에 생성되는 급격한 압력 상승에 따른 축 방향 변형 및 노즐 구동을 위한 회전 변형에 따라 유연하게 움직여야 하며, 연소 중 가스의 누출을 방지할 수 있도록 견고한 특성을 만족할 수 있어야 한다. 따라서 플렉시블 씬에 사용되는 고무는 이러한 특성을 만족할 수 있도록 유연하면서도 견고해야 한다.

본 연구는 고체 모터 플렉시블 씬에 제작에 사용된 고무의 시험 결과를 정리하였다.

2. 본 론

2.1 고무 개발 요구 조건

플렉시블 씬에 적용되는 고무의 특성 중 가장 중요한 것은 노즐 구동에 필요한 구동 토크와 연관이 있는 고무의 전단 계수(Shear Modulus), 압력 및 구동에 의해 고무 층에 작용하는 전단 강도(Shear Stress), 그리고 제작된 고무가 일정 범위의 전단 계수와 전단 강도를 가질 수 있도록

하는 고무의 재현성 이다[3].

따라서 플렉시블 씬에 사용되는 고무의 개발에서 고무의 전단 계수 및 전단 응력, 그리고 이러한 물성치의 변화를 확인하는 매우 중요하다.

Table 1은 고체 모터에 사용되는 플렉시블 씬의 제원 및 고무의 개발 요구 조건을 보여준다.

Table 1 The Characteristic and Rubber Requirement of Flexible Seal

Pivot Radius	186mm
Thickness of shim	2.0mm
Thickness of rubber	1.8mm
Number of shims	9
Number of rubbers	10
Spring Torque Rate	60kgf-m/deg
Material	Natural Rubber
Shear Modulus	$\leq 0.58\text{MPa}$
Shear Stress	$\geq 1.25\text{MPa}$

2.2 고무 시험 평가

플렉시블 씬에 사용되는 고무의 성능 평가를 수행하였다. 고무의 성능 평가를 하기위해 고무의 전단 계수 및 전단 강도를 확인하기 위한 QLS 시험 (Quadruple Lap Shear), 그리고 고무의 노화에 따른 전단 계수 변화를 확인하기 위한 노화 시험(Aging)을 수행하였다. 또한 제작된 고무의 물성 변화를 확인하기 위해 플렉시블 씬의 제작 시 마다 고무의 전단 계수 변화를 확인하였다.

2.2.1 QLS 시험

플렉시블 씬은 연소실에서 발생하는 연소압력 및 노즐 회전에 의한 구동으로 인해 고무 층에 주로 전단력이 작용하는 것으로 알려져 있다. 또한 고무의 전단 계수는 플렉시블 씬의 구동 토크와 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 플렉시블 씬 제작에 사용된 고무의 전단 계수 및 전단력을 확인하는 필수적인 요소이다.

플렉시블 씰의 제작에 사용된 고무의 전단 계수 및 전단력 확인하기 위해 QLS 시험을 제작하여 시험을 수행하였다.

Figure 2는 QLS 시험을 위해 제작된 시편의 시험 모습을 보여준다. QLS 시험을 위해 시편은 플렉시블 씰 제작 시 마다 총 10개를 제작하였다. 이중 5개의 시편을 이용하여 고무의 전단 계수 및 전단력을 확인하기 위한 시험을 수행하였으며, 나머지 5개의 시편은 추후 노화 시험 통해 전단 계수 변화를 확인하기 위해 보관하였다.

시험을 위해 크로스헤드 속도는 25.4mm/min로 스트로크 제어 방식을 사용하였다. QLS를 사용한 시험에서 전단 계수는 인장 시 선형 구간이 비교적 잘 유지되는 전단 변형 100% 지점을 기준으로 선정하였다. Fig. 3은 QLS 시험 결과를 보여준다. 시험 결과 전단 계수는 평균 약 0.46MPa, 최대 약 0.4997MPa을 보였다. 또한 시험에 사용된 고무의 파단 전단 응력은 모든 경우에서 2.5MPa 이상을 보인다.

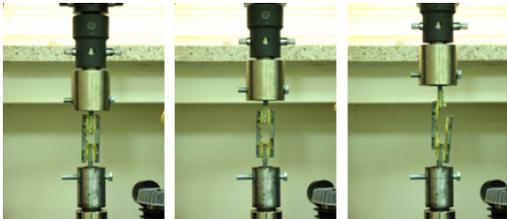


Fig. 2 QLS Specimen Test View

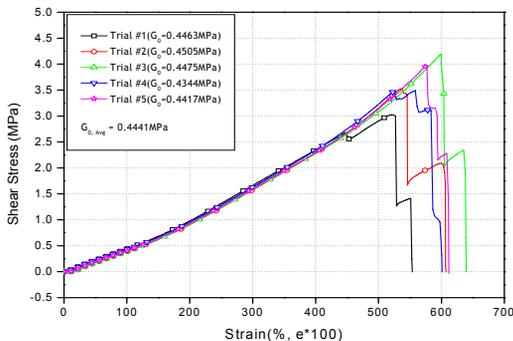


Fig. 3 Result of QLS Test

2.2.2 노화 시험

고무로 제작된 성형품은 일반적으로 대기 중에서 장시간 보관할 경우 대기 중의 산소, 오존 등에 의해 고무의 특성이 변하는 것으로 알려져 있다.

따라서 씰과 씰 사이에 고무를 적층하여 제작되는 플렉시블 씰의 경우에도 장기 보관에 따른 고무의 전단 계수 변화를 확인하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다.

SP 8114에 의하면 온도 및 습도가 각각 300K, 50% 조건에서 천연 고무로 제작된 플렉시블 씰의 노화 특성을 시험한 결과 구동 토크가 3년 반 동안 매년 6%정도 증가한다고 보고하였다. 이러한 구동 토크의 증가는 고무 노화에 따른 전단 계수의 증가를 의미한다[3].

QLS 시험을 이용한 노화 시험은 앞에서 언급한 시험 방법과 동일한 조건에서 수행하였으며, 시편은 상온에서 보관하였다.

Figure 4는 고무 노화에 따른 전단 계수 변화를 보여준다. 시험 결과 고무의 노화에 따른 전단 계수는 모든 경우에서 증가하는 것을 보여준다. 1년이 지난 후 고무의 전단 계수 증가는 평균 약 11.9% 정도이다. 그러나 이러한 증가는 급격히 감소하여 2년이 지난 후 고무의 전단 계수 증가율은 약 4.3% 정도이다.

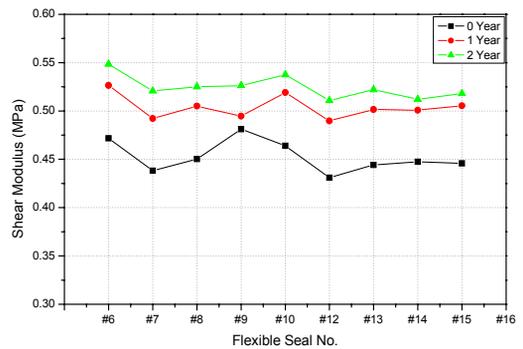


Fig. 4 Shear Modulus Variation as aging of Rubber

2.2.3 고무의 재현성

일반적으로 고무는 여러 첨가물이 포함된 혼합물로 되어 있기 때문에 고무의 제작 시 마다

물성 값들이 금속 제품에 비해 많은 편차를 보인다. 만약 이러한 편차가 심할 경우 제작된 플렉시블 씰이 성능 조건을 만족시키지 못할 수도 있다. 따라서 플렉시블 씰에 사용되는 고무에 대해 로트와 로트별(Lot to Lot) 물성 값의 차이를 확인하는 것은 매우 중요하다.

이를 위해 플렉시블 씰 제작 시 마다 제작된 QLS 시편을 이용하여 전단 계수 변화를 확인하였다. Fig. 5는 로트 별 전단 계수의 변화를 보여준다. 그림에서 보는 것처럼 로트 별 최대 차이는 로트 1과 로트 4에서 나타났으며, 최대 편차는 약 10.2% 정도이다. 또한 동일한 로트에서 최대 편차는 로트 3에서 나타났으며, 최대 편차는 약 4.97% 정도이다.

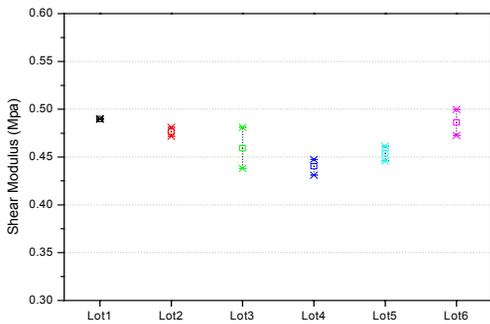


Fig. 5 Shear modulus Variation as Lot to Lot of Rubber

3. 결 론

플렉시블 씰 제작에 사용된 고무의 특성 평가를 수행하였다. 고무의 전단 계수 및 전단 강도를 확인하기 위한 QLS 시험 (Quadruple Lap Shear), 고무의 노화 특성을 확인하기 위한 노화

시험(Aging)을 수행하였다. 또한 고무의 재현성을 확인하기 위해 플렉시블 씰의 제작 시 전단 계수의 변화 정도를 확인하였다.

1. 지금까지 플렉시블 씰 제작에 사용된 고무의 전단 계수는 평균 약 0.46Mpa, 파단 전단 강도는 약 2.5Mpa로 고무의 설계 요구조건을 모두 만족하였다.

2. 고무 노화에 따른 전단 계수의 증가를 확인하였으며, 1년이 지난 후 고무의 전단 계수는 약 11.8% 증가하였다. 그러나 이러한 증가는 2년이 지난 후 급격 후 감소하는 경향을 보인다.

3. 고무의 재현성을 확인하기 위해 지금까지 제작된 QLS 시편의 전단 계수 변화를 분석하였다. 로트별 전단 계수의 최대 편차는 약 10.2%이며, 동일 로트에서 최대 편차는 약 4.97% 정도이다.

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 and Arie Peretz "Development of a High-Performance Flexible Joint for Thrust Vector Control" AIAA Paper 95-3017
3. NASA, "Solid Rocket Thrust Vector Control", SP-8114