

연소충격 격리용 완화부품 설계

한혁섭^{a,*} · 임대현^a · 김진용^a · 이영원^b · 박성한^b

Design of Compliant Joint for Pyro-shock Isolation

Houkseop Han^{a,*} · Daehyun Lim^a · Jinyong Kim^a · Young-won Lee^b · Sunghan Park^b^aDevelopment Team, Daejeon Plant, Hanwha Corporation, Korea^bAdvanced Propulsion Technology Center, Agency for Defense Development, Korea^{*}Corresponding author. E-mail: andrew.han@hanwha.com

ABSTRACT

The purpose of the pyro-shock compliant joint is to isolated vibration using the compliant material in order to prevent the shock generated by pyro propulsion at the electronics equipment. The performance of the pyro-shock compliant joint can be determined by measuring bending natural frequency and transmissibility. In this study, we established the design requirements based on bending natural frequency and transmissibility results of the reference model. We developed a compliant material with sufficient shock compliant properties and a pyro-shock compliant joint for the new rocket. This results can be used to develop a pyro-shock compliant joint for any rocket using the compliant material and performance measurement.

초 록

연소충격완화부품은 폴리우레탄과 같은 완화소재를 사용하여 진동을 격리함으로써 추진기관이나 화공품 연소로 발생한 충격에 의해 로켓의 전자장비가 작동하지 않는 것을 방지하기 위해 사용한다. 연소충격완화부품의 성능은 굽힘 고유진동수와 전달률을 측정하여 판단할 수 있다. 본 연구를 통해 동일한 추진기관의 해외 연구결과를 통한 기준 모델의 실험 결과를 바탕으로 굽힘 고유진동수와 전달률에 대한 설계요구조건을 수립하였으며, 충분한 충격완화특성을 가지는 완화소재를 개발하여 새로운 로켓에 적합한 연소충격완화부품을 개발하였다. 본 연구는 완화소재 및 성능 측정 방법을 이용하여 연소충격완화부품을 개발하기 위해 사용할 수 있다.

Key Words: Compliant Joint(완화부품), Pyro-shock(연소충격), Modal Testing(진동시험), Transmissibility(전달률)

Received 1 June 2015 / Revised 4 January 2016 / Accepted 11 January 2016

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2015년도 춘계학술대회(2015. 5. 28-29, 부산 해운대 그랜드호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

유도 로켓 발사 시 연소충격(Pyro-shock)에 의

해 관성항법장치 등의 전자장비가 영향을 받는 현상을 방지하기 위하여 연소충격완화부품(Pyro-shock compliant joint)을 개발하여 사용하고 있다. 연소충격완화부품은 관성항법장치와 추진기관을 폴리우레탄과 같은 완화소재를 사용하여 진동을 격리하는 것을 목적으로 한다.

본 연구는 로켓에 장착하여 연소충격을 완화하는 부품을 개발하기 위하여 수행하였다. 연소충격완화부품의 설계조건은 로켓마다 다르며, 로켓에서 회피해야 할 고유진동수와 완화소재의 진동흡수 능력을 기반으로 한다. 동일한 추진기관의 해외 연구결과를 바탕으로 연소충격완화부품의 고유진동수와 전달률(Transmissibility)을 측정하여 설계요구조건을 확립하였으며, 진동시험과 유한요소해석을 통해 완화소재와 연소충격완화부품을 개발하였다.

연소충격완화부품의 설계과정은 기준 모델의 진동시험을 통해 1차 굽힘 모드 고유진동수와 전달률의 범위를 확인하여 설계요구조건을 수립하였다. 연소충격완화부품의 성능을 만족하기 위한 완화소재의 개발을 위해 기준 모델과 동일한 형태의 연소충격완화부품을 제작하고, 동일한 진동시험(Modal testing)을 수행하였다. 설계요구조건을 만족할 때까지 완화소재의 조성을 변경하여 시험을 수행함으로써 소재개발을 수행하였다. 완료된 소재를 사용한 모델을 고유진동해석을 통해 완화소재의 기계적 물성을 결정하고, 이 기계적 물성을 이용하여 연소충격완화부품의 형상을 재설계하였다. 재설계한 모델의 진동시험을 통해 설계요구조건을 만족하는지 확인하였다.

2. 연소충격완화부품 진동시험

2.1 연소충격완화부품의 구성

연소충격완화부품은 Fig. 1과 같은 형상을 가지며, Fig. 2와 같이 전, 후방 로켓 외피를 체결하기 위한 헤드(Bulkhead, ①), 헤드와 볼트 링의 마찰력을 감소시키는 슬라이더(Slider, ②), 충격을 흡수하는 완화소재(Compliant material, ③), 볼트 링(Bolt ring, ④), 완화부품을 고정하는

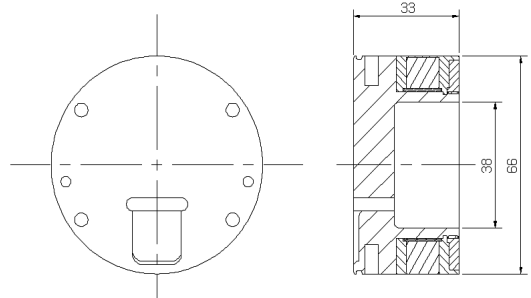


Fig. 1 Compliant joint.

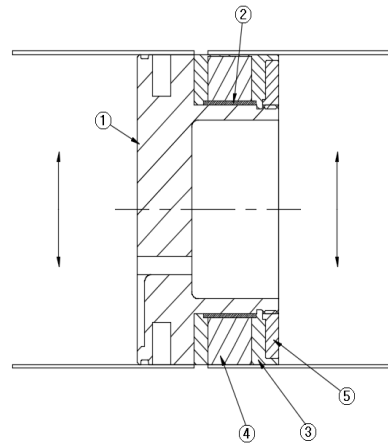


Fig. 2 Compliant joint component.

스토퍼(Stopper, ⑤)로 구성된다. 연소충격완화부품의 내부 형상은 전, 후방 외피를 연결하는 헤드와 볼트 링 간에 완화소재를 사용하여 연소충격이 전달하지 않도록 하였다. 완화소재는 폴리우레탄과 같은 감쇠(Damping) 성능을 가진 소재를 사용한다. Fig. 2의 화살표 방향으로의 굽힘운동을 최소화하기 위해 헤드와 볼트 링 사이에는 슬라이더를 장착하고 마찰계수가 작은 테플론(Teflon) 소재를 사용하였다.

2.2 진동시험

일반적으로 로켓은 선두부에 유도장치, 선미부에 추진기관을 설치한다. 실제 로켓을 기준으로 유도장치와 추진기관 사이에 진동을 격리할 수 있도록 연소충격완화부품을 설치하여 모드시험을 수행하였다[1].

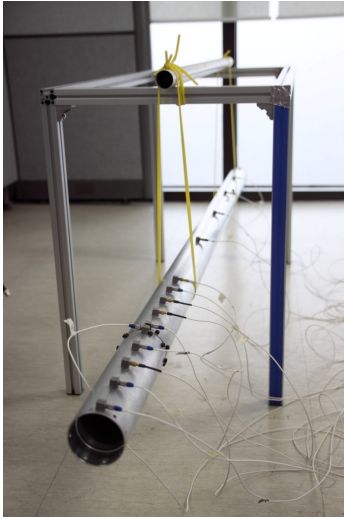


Fig. 3 Test configuration.

연소충격완화부품의 진동시험은 1차 굽힘 모드를 측정하였다. 충격 해머(Impulse hammer)를 이용하여 연소관에 가진하고 가속도계를 이용하여 구조응답을 획득하였다. 가속도 데이터는 진동시험 분석을 통해 고유진동수를 확인하였으며, 측정된 1차 굽힘 모드 고유진동수는 68 ~ 75 Hz가 되어야 한다. 이 기준은 연소충격에 의한 고유진동수를 회피하기 위하여 설정된 진동수이다.

측정시스템은 LMS 시험계측시스템과 LMS Test.Lab(Impact Test/Polymax & Spectral test), H/W는 SCM05 Frontend, Hammer는 PCB 0.2432 mv/N를 사용하였다. 시험체는 Fig. 3과 같이 사각 프레임을 설치하고 시험체를 고무 밴드를 이용하여 자유진동(Free vibration) 조건을 구현하였다. 가진은 Fig. 4와 같이 시험체 끝단을 충격 해머를 사용하여 가진하였다.

시험방법은 1 ~ 256 Hz의 범위에서 한 포인트 당 5회씩 가진하여 고유진동수 및 모드형상을 계산하기 위한 응답함수(Response function)를 측정하였다. 측정센서는 저주파 진동 측정용을 사용하였고, 굽힘 모드를 분석하기 위하여 Fig. 3과 같이 총 15개의 센서를 사용하였다. 포인트 1 ~ 10은 부품 전후 각 5개 지점에 센서를 장착하였으며, 전체 모드를 계산하기 위해 포

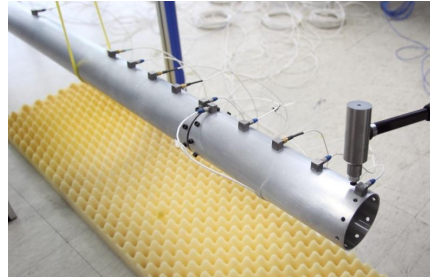


Fig. 4 Excitation point.

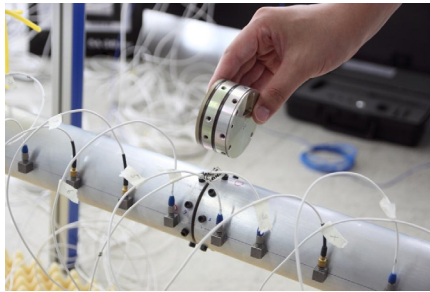


Fig. 5 Compliant joint position.

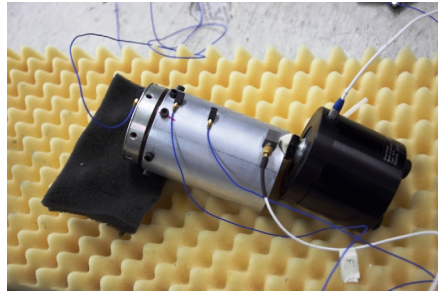


Fig. 6 Transmissibility test.

인트 11 ~ 15는 발사관 후미까지 연장하여 센서를 부착하였다. Fig. 5와 같이 연소충격완화부품은 시험체에 볼트를 이용하여 고정하였다.

2.3 전달률 시험

연소충격의 완화를 정량적으로 확인하기 위하여 전달률을 측정하였다. Fig. 6과 같이 부드러운 폼(Form) 위에 가진기와 연소충격완화부품을 설치하였다. 전달률을 측정하기 위해 압전 가진기(Piezoelectric shaker)를 연소관에 접촉하도록 설치하여 2 ~ 15 kHz로 랜덤(Random)으로 가

진하고, 가속도계를 이용하여 측정한 후 후처리를 통해 분석하였다. 경계조건은 자유진동 조건으로 설정하였다. 전달률 시험에서는 3개의 센서를 부착하여 진동의 전달특성을 분석하였다. 측정된 전달률 설계조건은 10 kHz에서 -20 dB 이하이어야 한다[2].

3. 기준 모델 진동시험 측정결과

3.1 기준 모델 굽힘 모드 측정결과

연소충격완화부품 기준 모델의 성능을 확인하기 위하여 굽힘 모드에서의 1차 고유진동수를 측정하였다. 본 시험은 진동시험 판정기준과 시험방법을 확인하기 위한 것이다.

본 굽힘 모드 측정시험은 총 2회 수행하였으며, Table 1과 같이 1차 시험에서 73.3 Hz, 2차 시험에서 73.25 Hz가 측정되었으며, 설계요구조건을 만족하였다.

3.2 기준 모델 전달률 측정결과

기준 모델은 연소충격완화부품에 의해 전방 연소관(Front case)과 후방 연소관(Rear case)이 격리되어 있다. 기준 모델의 전달률 측정 결과 Fig. 7과 같이 가진 위치는 5 ~ 10 kHz 대역에서 10 ~ 40 dB가 측정되었으며, 연소충격완화부품에 의해 진동이 저감되면 0 ~ -30 dB가 측정되었다. 10 kHz에서는 -24 dB가 측정되었으며 -20 dB 이하의 기준을 만족하는 것을 확인하였다.

4. 완화소재 개발

4.1 개발 모델 완화 소재 개발

완화소재의 개발은 조성을 변경하여 Shore A 경도를 측정하여 기준 모델과 동일한 30의 경도를 가지는 총 4개의 시험 모델을 제작하였으며, 진동시험과 전달률 시험을 통해 설계요구조건을 만족하는지 확인하였다. 시험 결과 Table 2와 같이 개발 모델의 1차 굽힘 모드 고유진동수가

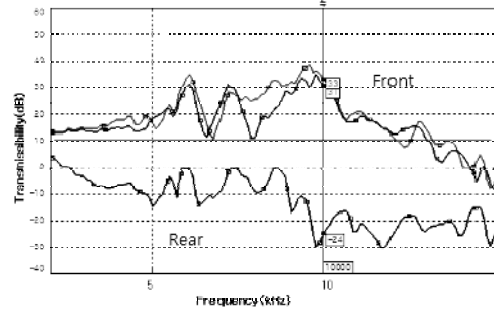


Fig. 7 Transmissibility of reference model.

Table 1. Modal test results of reference model.

Measurement point	1st Bending mode
1~10	73.30 Hz
1~15	73.25 Hz

Table 2. Testing results of design model.

Item	Natural frequency (Hz)	Transmissibility (dB)
Reference	73.3	-24
#1	96.9	+8
#2	84.0	unmeasured
#3	73.3	-27.3
#4	69.8	-30.5

Table 3. Material property of design model.

Material Property	#4
Hardness (Shore A)	30
Tensile Strength (MPa)	3.6
Elongation at break (%)	767
100% Modulus (MPa)	0.53
200% Modulus (MPa)	0.92
300% Modulus (MPa)	1.34
Density (g/cc)	1.06

68 ~ 75 Hz의 범위를 만족하였고, 10 kHz에서 -20 dB 이하의 전달률이 측정되었다.

고유진동수 범위를 만족하고 전달률이 가장 낮은 것을 완화소재로 선택하였으며, 기계적 물성은 Table 3과 같다.

5. 연소충격완화부품 유한요소해석

연소충격완화부품의 유한요소해석을 이용하여 고유진동해석을 수행하였다. 개발 모델의 고유진동해석을 통해 시험 결과와 동일한 완화소재의 기계적 물성을 확보하고, 새로운 개발 모델에 적용하기 위한 것이다.

연소충격완화부품 및 연소관을 모사한 시험용 파이프에 대한 3D 모델링을 수행하였다. Fig. 8의 1 ~ 5번은 연소충격완화부품, 6번 후방 외피, 7번은 전방 외피이다. 각 부품에 대한 기계적 물성은 Table 4와 같이 적용하였다.

완화소재는 폴리우레탄으로 일반적인 탄성계수는 재료의 경도에 따라 40 ~ 900 MPa을 가지고 있다. Table 5와 같이 각각의 탄성계수에 따라 고유진동해석을 수행하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 기준모델의 1차, 2차 굽힘 모드 형상을 나타낸 것이다.

고유진동해석을 수행한 결과 Table. 6과 같이 탄성계수가 450 MPa인 경우 가장 유사한 결과가 나타났다. 감쇠계수는 시험을 통해 7.9%를 적용하였다. 1, 2차 굽힘 모드를 나타내는 모드에서 고유진동수는 시험에 비해 1 ~ 2% 작게 나타났다.

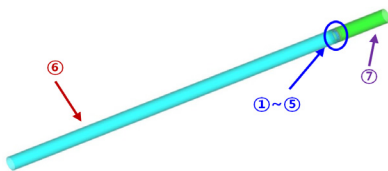


Fig. 8 Analysis model of compliant joint.

Table 4. Material property of compliant joint.

Part	Elastic modulus	Poisson's ratio	Density
	MPa		ton/mm ³
Stopper stainless steel	190,000	0.29	7.7E-9
Slider teflon	40,000	0.3	2.2E-9
Complaint material polyurethane	250~550	0.4	1.1E-9
Bulk head & Bolt ring AL6061	69,000	0.33	2.7E-9

Table 5. Natural frequency for each elastic modulus.

E(MPa)	1st Natural frequency (Hz)	2nd Natural Frequency (Hz)
Test	74.8	143.9
250	59.3	134.5
350	68.1	137.9
450	74.8	141.4
500	77.6	143.2
550	80.0	145.1



Fig. 9 1st Bending mode shape of ref. model.



Fig. 10 2nd bending mode shape of ref. model.

Table 6. Difference between test and FEA results.

	Test (Hz)	FEA (Hz)	Error (%)
1st Mode	74.84	74.79	-1.00
2nd Mode	143.86	141.40	-1.51

6. 연소충격완화부품 개발

연소충격완화부품 개발 모델은 시험 결과와 고유진동해석을 통해 검증된 기계적 물성을 사용하여 수차례의 고유진동해석을 통해 설계하였다. 전방 외피와 연결하는 헤드, 볼트 링은 개별 파트로 설계하지 않고 후방 외피와 연결할 수 있도록 외피 형태로 설계하였다. Fig. 11과 같이 충격 흡수율을 증가시키기 위해 원통 형태의 연결부를 6개 적용하였다. 헤드와 후방 연결부는 서로 간섭이 발생하지 않도록 테플론 소재의 슬라이더를 설치하였다. 슬라이더가 이탈하지 않도록 스톱퍼를 설치하였다.

진동시험과 전달률 시험을 총 2회 수행하였다. 시험결과는 Table 7과 같다. 1차 굽힘 고유진동

수는 1차 시험에서 71.25 Hz, 2차 시험에서는 70.88 Hz로 측정되었으며 설계요구조건을 만족하였다. Fig. 12와 같이 전달률은 1차 시험에서는 10 kHz에서 -27.34 dB, 2차 시험에서는 -29.60 Hz로 측정되었으며, 설계요구조건을 만족하였다.

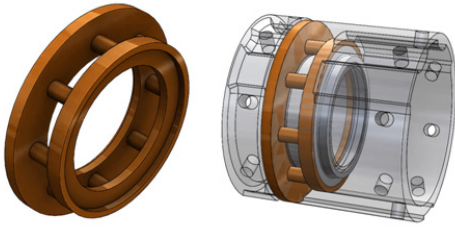


Fig. 11 Compliant joint design model.

Table 7. Modal testing results.

Item	Natural Frequency (Hz)	Transmissibility (dB)
Reference	68 ~ 75	<-20
1st Test	71.25	-27.34
2nd Test	70.88	-29.60

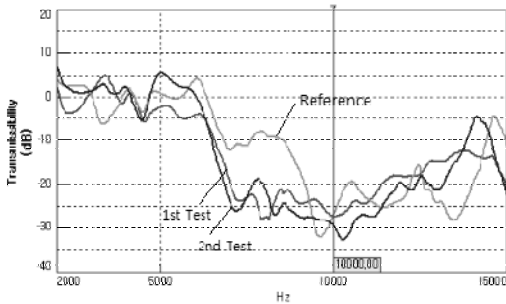


Fig. 12 Transmissibility of design model.

7. 결 론

연소충격완화부품을 개발하기 위하여 기준 모델의 1차 굽힘 모드 고유진동수와 전달률의 범위를 확인하여 설계요구조건을 수립하였다. 연소충격완화부품 1차 굽힘 모드의 고유진동수는 68 ~ 75 Hz의 범위를 가지도록 하였으며, 전달률은 10 kHz에서는 -20 dB 이하가 나타나도록 설계요구조건을 설정하였다.

연소충격완화부품의 성능을 만족하기 위한 완화소재의 개발을 위해 기준 모델과 동일한 형태의 연소충격완화부품을 제작하여 진동시험을 수행한 결과 2개의 모델이 설계조건을 만족하였으며, 고유진동해석을 통해 완화소재의 탄성계수가 450 MPa인 경우의 고유진동수가 동일하게 나타났다. 이 기계적 물성을 이용하여 연소충격완화부품의 형상을 재설계하였으며, 진동시험을 통해 설계요구조건을 만족하는 연소충격완화부품을 개발하였다.

본 연구는 완화소재 및 성능 측정 방법을 이용하여 유도 로켓에 적합한 연소충격완화부품을 개발하기 위해 사용할 수 있다.

References

1. Ewins, D.J., *Modal Testing, Theory, Practice, and Application*, 2nd ed., Research Studies Pre, Letchworth, Hertfordshire, England, 2000.
2. Inman, D.J., *Engineering Vibration*, 4th ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., U.S.A., 2013.