

# 방진구 시스템을 장착한 구조물의 시험 및 해석을 통한 구조설계 Structural Design through Test and Analysis of Structure Equipped with Vibration Isolator System

송 아 영<sup>†</sup> · 임 성 환\* · 권 병 오\* · 한 대 희\* · 정 혜 진\*

Ah-Young Song<sup>†</sup>, Sung-Hwan Yim\*, Byung-Oh Kwon\*, Dae-Hee Han\* and Hye-Jin Jung\*

(Received July 19, 2021 ; Revised September 6, 2021 ; Accepted October 28, 2021)

**Key Words :** Displacement Interference(변위간섭), Structural Analysis(구조해석), Gimbal(짐벌), Reconnaissance Equipment(정찰장비), Isolator(방진구), Random Vibration(램덤진동), Transmissibility(전달률)

## ABSTRACT

The vibration characteristics of the mounting platforms of surveillance and reconnaissance equipment differ, and their operating conditions should be considered during their design. In addition, the attenuation characteristics of an applied vibration are important when a dust prevention system is equipped; therefore, structural integrity should be verified through analysis and testing. Vibration and shock tests were conducted to analyze the characteristics of an isolator, and the isolator was selected. Reinforcement was designed by finding the vulnerabilities of the equipment using data obtained from a pretest. A dynamic characteristic analysis of the system with the reinforced structure was carried out using measured data. The reinforcement design was completed by verifying the structural integrity of the system through a structural analysis.

### 기 호 설 명

- $d_{static}$  : 정적 편향(static deflection)
- $d_t$  : 전체 편향(total deflection)
- $d_{vib}$  : 진동에 의한 편향  
(deflection due to vibration)
- $F_n$  : 고유진동수(natural frequency)
- $g_i$  : 지정된 진동 가속도  
(specified vibration acceleration)
- $g_o$  : 가속도 응답(acceleration response)
- $K'$  : 동적 스프링률(dynamic spring rate)
- $S_i$  : 입력 램덤 진동(input random vibration)

- $T_R$  : 공진주파수 전달성  
(resonant transmissibility)
- $W$  : 중량(weight)
- $x_i$  : 진동 입력 모션  
(vibration input motion)
- $x_0$  : 진동 응답 모션  
(vibration response motion)

## 1. 서 론

감시정찰장비의 목적은 멀리 있는 타깃을 식별 및 관측하거나 타깃의 영상정보, 지형정보, 타깃과의 거리정보를 수집하는 등의 다양한 임무를 수행하는 것

<sup>†</sup> Corresponding Author ; Member, LIG Nex1, Researcher  
E-mail : ahyoung.song@lignex1.com  
\* LIG Nex1, Researcher

# A part of this paper was presented at the KSNVE 2020 Annual Autumn Conference  
‡ Recommended by Editor Nam Keun Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

이다. 특히, 영상정보를 획득하는 업무를 가지는 감시 장비는 임무 특성상 다양한 영상 센서들을 한정된 공간인 짐벌(gimbal) 안에 탑재하여 임무를 수행한다. 이런 감시정찰장비는 먼 거리에 있는 타깃을 지향하기 때문에 절대변위에 민감하며, 다중의 센서들의 시선오차를 줄이기 위해서 내부에 배치되는 영상장비들을 근접 설계하여 유사한 시야각(FOV: field of view)을 갖게 배치 설계를 한다. 이 때문에 진동에 민감한 장비라 할 수 있다. 또한, 임무 수행 환경에 따라서 Fig. 1과 같이 여러 플랫폼으로 나뉘어 장착되기 때문에 플랫폼 특성에 맞춰 구조 설계를 해야 한다. 이는 플랫폼에 따라 짐벌 내부로 인가되어 들어오는 진동/충격의 크기와 주파수 특성이 다를 수 있기 때문이다. 플랫폼에서 전달되는 진동이 짐벌 시스템을 통해서 내부 영상장비로 전달되기에 진동을 감쇠하기 위해 Fig. 2와 같이 내부짐벌에 방진구(isolator)를 장착하여 영상장치로 인가되는 진동을 최소화하는 구조 설계를 진행해야 한다.



Fig. 1 Reconnaissance equipment mounted on various platforms

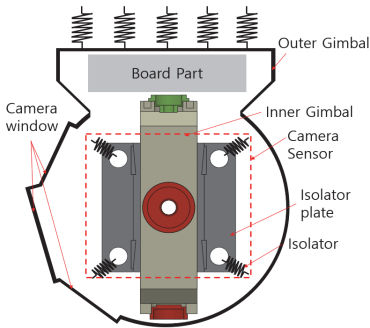


Fig. 2 Dustproof structure in the reconnaissance equipment

이 연구에서는 항공플랫폼에 탑재되는 감시장비의 이용하여 영상장치 내부로 전달되는 진동을 최소화하는 짐벌의 구조설계를 진행하였다. 기존의 감시장비 연구에서는 방진구의 특성을 수치해석을 통하여 선정, 짐벌의 해석과 시험을 진행하였기에 비행조건이 고려된 짐벌에서의 방진구 특성 계측과 짐벌 적용에 관한 연구가 미미하였다<sup>(1)</sup>.

이번 연구에서는 비행조건에서 방진구 특성을 계측하고 2축 짐벌에 구조특성 파악과 적합한 방진구를 선정하는데 목표하였다. 사진에 시험모듈의 동특성 해석을 진행하였으며, 이를 기반으로 시험모듈과 플랫폼 지그를 임의 제작하였다. 랜덤진동의 프로파일로는 항공기 운용 진동을 인가하였다. 진동은 플랫폼 지그를 통해서 시험모듈 내부짐벌로 전달된다. 가속도 센서를 이용하여 진동데이터를 계측하였다. 이때, 내부짐벌에 전달되는 진동을 감쇠해주는 방진구를 특성이 다른 비교 방진구들로 변경해가며 영상장치에 거동을 계측하였다. 계측데이터를 분석하여 장비에 적합한 방진구를 선정하였다. 그리고 구조적 개선점을 도출하여 재설계를 진행하였다. 구조변경 설계가 완료된 모델을 다시 검증하기위해서 시험에서 계측한 데이터를 이용하여, 시험계측거동과 해석거동을 비교하여 해석모델의 신뢰도를 확보하였다. 그리고 개선된 짐벌구조의 구조안정성을 평가하여 그 결과를 제시하였다<sup>(2)</sup>.

## 2. 시험모듈의 방진구 선정

### 2.1 시험모듈 구성 및 동특성 분석

시험모듈의 구성은 Fig. 3과 같이 구성된다. 좌우의 방진구 플레이트(isolate plate)가 내부짐벌(inner gimbal)과 연결되어 있으며, 내부짐벌 안에 카메라센서(camera sensor)가 두 포인트로 연결되어 있는 구조이다. 이때,

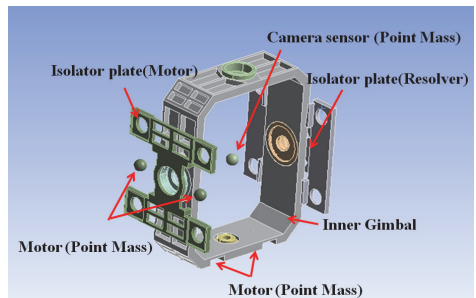


Fig. 3 Test model configuration

방진구 플레이트는 티타늄, 내부짐벌의 물성은 알루미늄을 사용하였다. 방진구 없이 시험모듈의 동특성을 분석하고자 하여 해석모델에는 방진구 특성을 반영하지 않고 진행하였다. 방진구 플레이트와 내부짐벌을 강체라 가정하였다. 모터와 카메라 더미는 포인트 질량으로 구현하여, 관성 값을 적용해 모드해석을 진행하였다. 모드해석의 결과는 Table 1과 같다. 1차 모드는 111.4 Hz, 2차 모드 148.1 Hz, 3차 모드 220.7 Hz의 결과가 나왔다. 이때 카메라 내부에 탑재되는 센서의 회피 주파수는 300 Hz 영역으로 모드해석에서는 해당 주파수 영역을 회피되었음을 판단하여 시험을 위해 해당 모듈을 기반으로 제작하였다<sup>(4)</sup>.

### 2.2 시험용 방진구 선정

방진구를 선정할 때는, 가장 우선시 되는 부분은 제어하고자 하는 주파수 영역을 회피하는 것이다. 이 연구의 제어주파수가 30 Hz영역에서 100 Hz영역에 있다고 가정한다면, 해당 주파수 영역을 1차적으로 회피한 방진구를 선정하고 탑재중량과 인터페이스 등을 고려하여 선정한다. 또한, 탑재중량 상태에서 방진구의 시스템주파수에서 최대 변위를 확인하여 해당 변위 값이 설계 허용범위인가를 검토하여야 한다. 이에 시험모듈 시험에 앞서 제조사에서 방진구 선정 시 제시하는 사용조건인 식(1)과 (2)를 통해 최대 변위 값을 검토하였다.

$$F_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{1}$$

$$K' = \frac{(F_n)^2 \cdot W}{9.8} \tag{2}$$

Dynamic spring rate를 계산하여 1차적으로 적용이 가능한 방진구를 제조사에서 제공하는 K'정보를 이용하여 선택할 수 있다<sup>(5)</sup>.

**Table 1** Test model modal analysis result

Mode	Frequency [Hz]	Mode	Frequency [Hz]	Mode	Frequency [Hz]
1	111.4	5	285.8	9	432.6
2	148.1	6	339.3	10	466.2
3	220.7	7	357.5	11	487.4
4	263.0	8	401.8	12	500.3

$$g_0 = 3 \sqrt{\frac{\pi}{2} S_i F_n T_R} \tag{3}$$

식 (3)에서 나오는  $T_R$ 의 계수는 방진구의 재질에 따른 탄성값이다.

$$x_0 = \frac{g_0}{0.051 \cdot F_n^2} \tag{4}$$

식 (4)를 통해서 vibration response motion의 값을 구하면 specified vibration acceleration의 값을 구할 수 있다.

$$g_i = \frac{g_0}{T_R} \tag{5}$$

$$x_i = \frac{g_i}{0.051 \cdot F_n^2} \tag{6}$$

식 (5)에 식 (6)를 대입하면  $d_{static}$  값이 계산된다. 예상되는 총 변위 값을 구하기 위해서는

$$d_{vib} = \frac{x_i}{2} T_R \tag{7}$$

$$d_t = d_{vib} + d_{static} \tag{8}$$

식 (7)를 구해서 식 (6)의 값과 더해주면 식 (8)의 값으로 방진구 공진영역에서 발생하는 총 변위 값을 예측할 수 있다<sup>(5)</sup>.

계산을 통해서 선정된 방진구는 2번, 8번, 14번(방진구 번호)로 2번, 14번의 경우 12 Hz ~ 13 Hz의 공진주파수를 이며, 8번은 21 Hz의 공진주파수를 갖는다. 세 개의 방진구는 제어주파수영역을 회피하였으며 예측 최대 변위량은 8 mm이내를 갖기에 세 가지 모두 시험에 적용이 가능할 것이라 판단하였다. 그리고 방진구 2번, 8번은 BTR<sup>®</sup> 재질, 14번 방진구는 BTR<sup>®</sup> II재질로 2번, 14번이 비슷한 공진주파수를 갖더라도 감쇠거동이 다를

**Table 2** Isolator performance characteristics

Isolator no.	Axial frequency [Hz]	Dynamic axial spring rate [lb/in]	Dynamic radial spring rate [lb/in]	Material
2	13	71	79	BTR <sup>®</sup>
8	21	173	192	BTR <sup>®</sup>
14	12	61	68	BTR <sup>®</sup> II

것이라 판단하여 선정하였다. Table 2는 제조사에서 제공하는 방진구 2번, 8번, 14번의 성능특성이다.

**2.3 진동충격 시험결과**

시험모듈은 내부짐벌의 진동시험을 위해서 Fig. 5와 같이 플랫폼과 동일하게 진동이 인가될 수 있도록 플랫폼 지그를 제작하였으며, 카메라센서부의 응답을 확인하기 위해서 관성과 CG를 고려하여 더미로 특성 구현을 하였다. 플랫폼 지그는 Fig. 2에서 외부짐벌 (outer gimbal)과 같은 역할이며, 인가될 운용 진동은 MIL-STD-810G의 진동규격으로 Fig. 4와 같이 각축당 60분씩 30% safety grms로 인가하였다<sup>(3)</sup>.

가속도 계측 포인트는 Fig. 5와 같다. ①로 표시되어 있는 부분은 플랫폼 지그를 통해서 바로 진동이 전달되어 들어오는 방진구플레이트로 이 부분을 통해서 진동은 방진구로 전달되고 진동이 감쇠되어 ②로 표

시되어 있는 내부짐벌로 전달된다. ③은 내부짐벌에 두 포인트로 체결되어있는 카메라더미이다. 이렇게 3포인트를 계측부분으로 선정했다. 진동시험은 감쇠특성이 다른 3가지 방진구를 변경하여 각 축별로 사인과 램딘진동을 수행하였다. 18번의 시험을 진행하였으며, 이중 가장 관심 영역인 Y축 데이터에 대해서 특성이 각기 다른 방진구가 내부의 카메라더미에 영향을 얼마나 미치는지 분석하였다. 먼저 Fig. 6 사인 그래프의 결과를 보면 2번과 14번 방진구의 1번째 공진점이 12 Hz ~ 13 Hz, 8번 방진구 21 Hz영역인 것을 확인할 수 있다. 또한 모드해석에서의 시험모듈의 1차, 2차 모드의 유사 주파수 영역에서 시험모듈의 전달률이 높음을 확인했다.

이후 진행한 램딘진동(비행진동) 시험 역시 방진구 특성이 Figs. 7~9 그래프를 통해서 확인이 가능하였다. 램딘진동에서 세 가지 방진구의 결과값을 보면 14번 방진구가 가장 전달률이 낮았고, 8번 방진구가 높은 값을 가지는 것을 확인하였다. 그리고 모드해석에서는 회피했다 판단했던 300 Hz영역에 특성이 있음을 확인했다. 램딘진동을 통해서 14번이 감쇠가 가장 많이 이뤄졌지만 나머지 2번과 8번의 방진구가 사용 불가능한 수준이 아니기에 충격시험을 추가 분석하였다. 충격시험은 MIL-STD-810G의 20 g, 11 msec의 규격으로 Fig. 10과 같다<sup>(3)</sup>. 충격시험의 계측 포인트는 진동시험과 동일하다. 시험은 3축에 대해서 플러스와 마이너스 방향으로 모두 진행하였다. 이때 플러스와 마이너스 방향에 큰 차이가 없었으며, 뒤틀림에 취약하다고 판단되는 Y축을 중심으로 데이터를 분석하였다. Figs. 11 ~ 13을 보면 한눈에도 충격에서

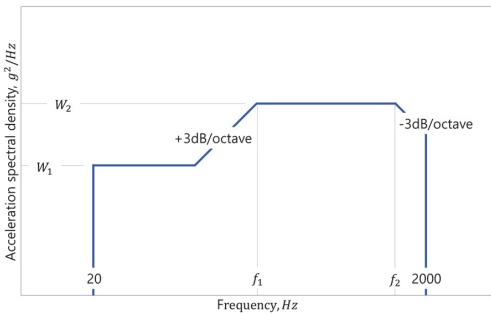


Fig. 4 Vibration testing input file; Mil-STD-810G profile

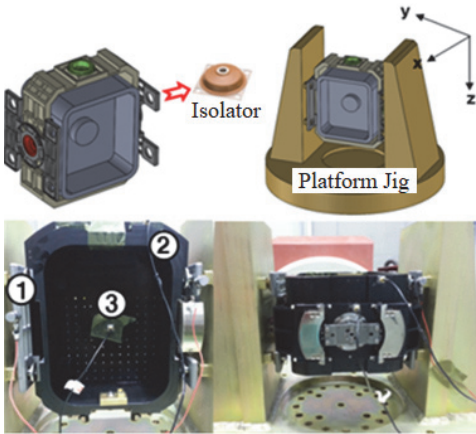


Fig. 5 Inner gimbal vibration test setting; ① isolator plate; ② inner gimbal; ③ dummy sensor

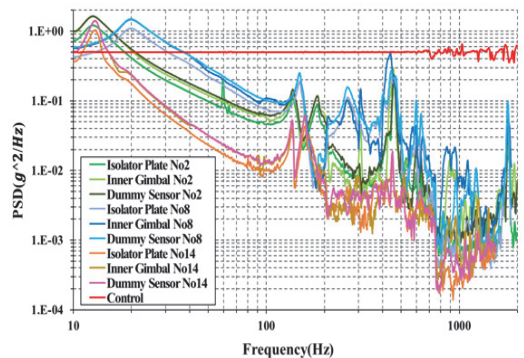


Fig. 6 Sine sweep data for Y axis

의 8번 방진구가 감쇠율이 크기에 짐벌에 8번 방진구를 최종 선정하였다<sup>(6)</sup>.

### 3. 취약부 구조보강 설계

램덤진동 시험에서 계측된 300 Hz영역의 주파수를 회피하기 위해서 구조보강 설계를 진행하였다. 시험

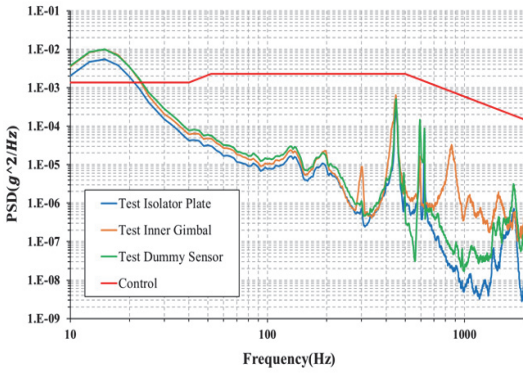


Fig. 7 Random vibration data for isolator no. 2(Y axis)

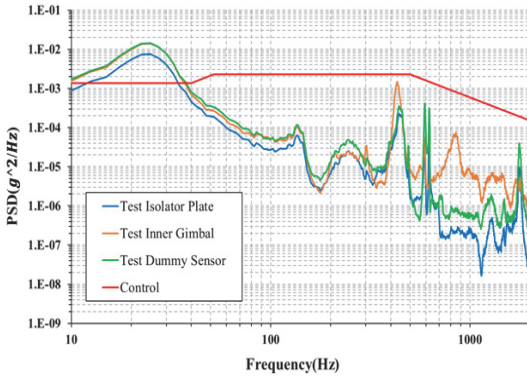


Fig. 8 Random vibration data for isolator no. 8(Y axis)

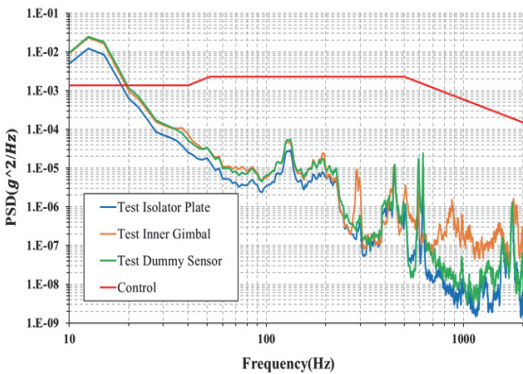


Fig. 9 Random vibration data for isolator no. 14(Y axis)

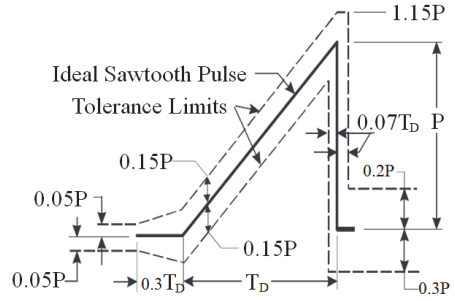


Fig. 10 Shock testing input file; Mil-STD-810G profile

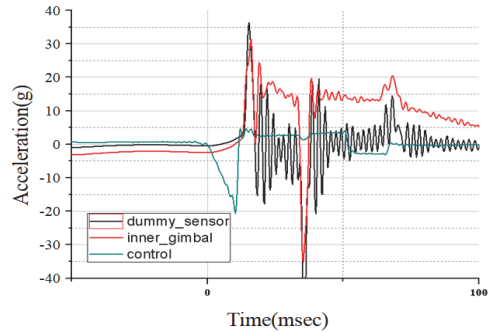


Fig. 11 Shock data for isolator no. 2(Y axis)

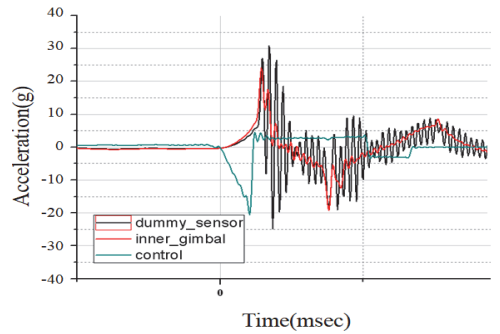


Fig. 12 Shock data for isolator no. 8(Y axis)

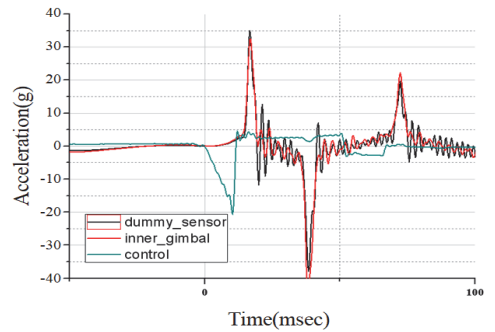


Fig. 13 Shock data for isolator no. 14(Y axis)

과 모드해석 결과의 차이가 발생한 것은 제작한 시험 모듈의 경우 베어링과 모터 등이 조립된 상태이며, 해석모델의 경우 베어링과 모터들이 조립되는 영역을 강제상태로 판단하여 완전 구속(fixed) 조건으로 해석하였다. 하지만 시험 시에 베어링과 모터가 조립되는 구동부 고정을 단순 블록으로 조립하여 고정하기 때문에 해석과 동일한 조건이라 판단되기 어렵다. 이 과정에서 차이가 발생한 것이라 판단하여 베어링의 강성 값을 반영하여 해석모델에 반영하였다. 구조보강은 진동이 가장 먼저 들어와서 내부집벌로 전달되는 방진구 플레이트부를 구조 보강하여 카메라라디미에서 계측되는 300 Hz영역을 보완하고자 한다. Fig. 14는 보강하기 전의 모습이며, Fig. 15와 같이 구조적으로 보강하였다. 해석에 사용한 절점의 수는 120 387개, 요소의 수는 62 145개이다. Mesh의 형상은 Fig. 16과 같다. 방진구가 조립되는 8포인트를 기준으로 스프링요소 COMBIN14를 이용하였고 진동은 8포인트를 통해서 전달되게 구성하였다<sup>(7)</sup>.

절점 보강 검증은 사인 0.5 g 진동해석을 통해서 강성이 얼마큼 보강되었는지 비교 분석하였다. 단폭으로 비교했을 때 모터 플레이트부는 기존대비 1.1배의 강성이 증가하였고, 리졸버 플레이트부는 기존대비 1.6배의 강성이 증가되었음을 해석을 통해서 확인하였으며, 결과값은 Table 3과 같다.

구조가 보강된 모듈을 검증을 위하여 진동시험 시 방진구 플레이트에서 계측된 데이터 Fig. 17을 활용하여 플랫폼 지그모델 없이 진동해석을 진행하였다. 경계조건은 사인해석과 동일하며, 8번 방진구에 대해서만 진행하였다. 기존과 동일하게 모터와 카메라 센서부는 포인트 질량으로 구성했다. 시험과 유사하게 구현하기 위해서 베어링의 강성 값을 적용하였다. 그리고 시험에서 계측한 방진구 데이터를 통해서 감쇠계수를 맞춰가며 해석을 진행하였다<sup>(8)</sup>.

결과 비교를 위해서 계측데이터와 해석데이터를 Fig. 18과 같이 도식하였다. 해석데이터는 점선으로 도식하였고, 시험데이터는 실선으로 도식하였다. 1차 방진구 주파수에서 시험데이터와 유사하게 반응하였다. 5차 영역까지는 비슷하게 유형을 그리는 것을 확인하였다. 또한 300 Hz영역에서 내부집벌의 데이터가 완만한 모습을 보이는 것을 확인하였다. 최대변형과 변위는 Fig. 19와 Table 4와 같다. Y축에 의한 최대변형은 내부집벌 부에서 발생했으며 값은 29.03 MPa이다. 최대변형은

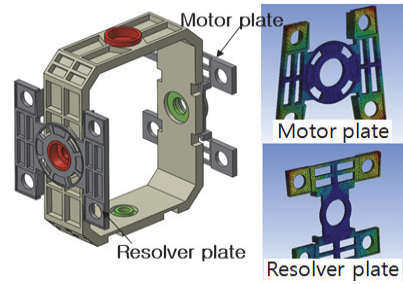


Fig. 14 Structural analysis of isolator plate structures before reinforcement

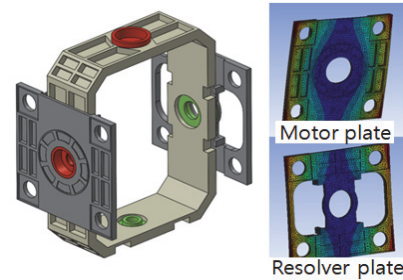


Fig. 15 Structural analysis of isolator plate structures after reinforcement

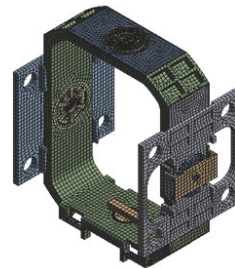


Fig. 16 Finite element model

Table 3 Structural analysis results for before and after isolator plate reinforcement

Sine sweep	Before		After	
	Motor plate	Resolver plate	Motor plate	Resolver plate
Deformation [mm]	8.56e-06	2.51e-05	1.20e-05	1.46e-05
Stress [MPa]	0.026	0.023	0.024	0.014
Frquency [Hz]	111.4	148.1	129.4	143.3

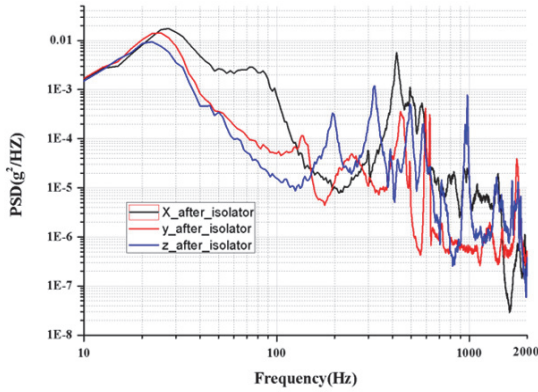


Fig. 17 Convert vibration data measured in the isolator of the test module to an analysis input profile

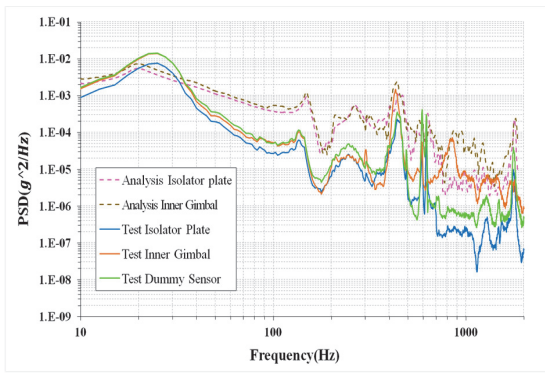


Fig. 18 Comparative analysis data of interpretation and test(isolator no.8, Y axis)

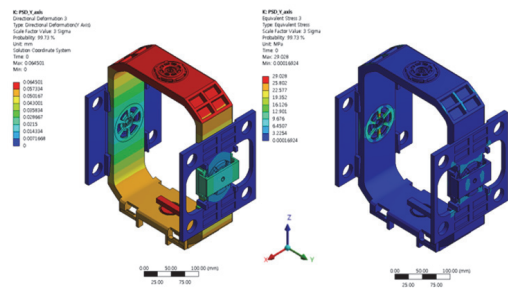


Fig. 19 Analysis result using convert random vibration data; max deformation, max stress

방진구 플레이트와 짐벌이 연결되는 베어링 조립체 부분으로 0.065 mm이다. 이는 알루미늄(6061-T6)으로 이뤄진 내부짐벌의 허용응력은 241 MPa로 운용에 큰

Table 4 Analysis result using convert random vibration data; max deformation, max stress

Axis	Deformation [mm]	Stress [MPa]
X	0.027	26.42
Y	0.065	29.03
Z	0.027	10.66

영향을 미치는 값은 아니기에 보강이 적절하게 이루어졌다 판단하였다.

#### 4. 결론

내부짐벌에 장착될 방진구를 선정하기 위해서 내부짐벌의 동특성을 분석하고, 방진구 제어주파수와 최대 변위에 맞게 시험에 적용할 방진구를 선정하였다. 내부짐벌 구조상 허용되는 최대 변형 범위는 8.0 mm로 최종 선정된 8번 방진구의 경우 21 Hz에서 5.1 mm의 변위를 갖는다. 진동충격 시험을 위해서 시험모듈을 제작하였으며, 플랫폼 진동과 유사하게 진동을 인가하기 위하여 플랫폼 지그를 제작하였다. 가속도 센서를 이용하여 세 가지의 방진구별로 진동, 충격 시험 시 내부짐벌에 전달되는 PSD값을 계측하였다. 계측을 통해서 진동보다 충격시험에서 방진구 8번이 약 2배 정도의 진동감쇠를 해주는 것을 확인하였다. 또한, 랜덤진동을 통해서는 모드해석에서 식별하지 못한 시스템의 300 Hz영역 특성이 있는 것을 확인했다. 시스템 주파수 특성을 바꾸기 위해서 방진구 플레이트의 보강설계를 진행하였으며, 시험에서 계측데이터를 활용하여 방진구의 감쇠계수를 도출하였다. 해석과 시험간의 데이터 비교분석을 통해서 해석모델의 신뢰도를 확보하였으며, 이를 바탕으로 보강설계를 진행하였다. 보강이 이루어진 것을 해석 결과로 확인하였다.

이 연구를 통해서 기존 연구에서 데이터화 되어 있지 않던 비행조건에서의 방진구 거동에 대해서 결과값을 계측하여 데이터화 하였다. 이는 유사 환경인 다른 구조물의 방진구 특성을 반영할 때 효과적인 데이터를 제공할 것이라 생각한다. 추가적으로 이 연구의 높은 신뢰도 확보를 위해서는 구조가 보강된 상태에서의 진동, 충격시험을 추가 검증하는 시험을 진행하여야 한다. 보강된 구조에서의 시험모듈을 이용하여

최대 전달률과 회피주파수 탐색 등의 추가적인 보완 시험이 진행되어야하며, 향후 계획으로 연구를 계속 진행할 예정이다.

## References

(1) Lee, S. E., Lee, T. W. and Kang, Y. G., 2014, Shock Analysis of Gimbal Structure System Including Rubber Vibration Isolator in a Observation Reconnaissance Aircraf, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 2, pp. 73~80.

(2) Kwon, K. B., Jung, J. H. and Han, J. S., 2018, Abnormal Condition Analysis and Validation of RK4 Multi Axis Rotor Systems Using Finite Element Analysis, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 28, No. 2, pp. 204~213.

(3) U.S. Department of Defense, Department of Defense Test Method Standard, Revision 2019, MIL-STD-810G.

(4) Inman, D. J., 2009, Engineering Vibration, 3rd Edition, Pearson, New Jersey.

(5) Aerospace & Defense Isolator Catalog : Vibration & Shock Theory, pp. 6~53.

(6) Song, A. Y., Kwon. B. O., Han, D. H., Jung, H.

S. and Jung, H. J., 2020, Analytically Confirm Displacement Interference in the Barrel of the Reconnaissance Equipment under Vibration, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 30, No. 3, pp. 143~148.

(7) Lee, S. E. and Lee, T. W., 2016, Dynamic Analysis of Gimbal Structure System Including Nonlinear Elastic Rubber Vibration Isolator With Shock Acceleration, Transactions of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, A, Vol. 40, No. 4, pp. 415~422.

(8) Shin, D. J., Ahn, S. H., Lee, J. H., Ryu, G. H. and Kwon, M. S., 2019, Analysis of Transport Dynamic Property for Lowbed Trailer and Vibration Specification Establishment of Large Radar, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No 5, pp. 632~638.



**Ah-Young Song** is a research engineer at Mechanical Engineering R&D Lab, LIG Nex1. She received a Master's degree in Dept. of Mechanical Engineering from Sungkyunkwan University in 2013.