

COTS 진동절연기를 장착한 유도탄용 관성항법시스템의 동특성 분석

Dynamic Characteristic Analysis of an Inertial Navigation System for Guided Weapons Equipped with COTS Vibration Isolator

이호호^{1,#}, 박준혁¹, 길근석¹, 전종근¹, 권기혁², 문상찬², 권승복², 남성호³, 성창기³
Ho-Ho Lee^{1,#}, Jun-Hyuk Park¹, Geun-Suk Gil¹, Jong-Geun Jeon¹, Ki-Hyuk Kwon²,
Sang-Chan Moon², Seung-Bok Kwon², Seongho Nam³, and Chang-Ky Sung³

1 LIG넥스원 PGM기계융합연구소 (PGM Mechanical R&D Group, LIG Nex1)
2 LIG넥스원 PGM핵심기술연구소 (PGM Core Tech R&D Group, LIG Nex1)
3 국방과학연구소 미사일연구실 (Missile R&D, Agency for Defense Development)
Corresponding Author / E-mail: hoho.lee@lignex1.com, TEL: +82-31-8026-4687
ORCID: 0009-0005-5976-6216

KEYWORDS: Inertial navigation system (관성항법시스템), Resonance (공진), Transmissibility (전달률),
Vibration isolator (진동절연기), Damping (감쇠), Commercial off the shelf (상용품)

Inertial navigation technology originally designed for precise guidance of missiles is widely used in weapon systems. Guided missiles have become supersonic and high maneuverability with advancement of science and technology. Anti-vibration performance against high vibration and shock energy is accordingly required. Sensors of an Inertial Navigation System (INS) have a high sensitivity. Conversion coefficients for acceleration values and bias errors in signals must be minimized. A vibration isolator is generally applied to protect INS by attenuating the vibration and shock energy transmitted from dynamic disturbances. The stiffness and damping are changed using highly damped materials such as elastomers that must be protected from disturbances. A vibration isolator is widely used in various fields. However, it is important to understand characteristics of a vibration isolator composed of elastomer because it has nonlinearities such as hyper-elasticity and viscoelastic as well as damping characteristics. In this study, a COTS vibration isolator suitable for INS was selected through theoretical approach. Response characteristics of the system in a vibration and shock environment were analyzed through FEM analysis and vibration and shock test. In addition, through repeated excitation test, reproducibility and structural stability were confirmed when the vibration isolator was installed in the system.

Manuscript received: June 20, 2024 / Revised: July 30, 2024 / Accepted: August 5, 2024

NOMENCLATURE

f_n = Natural Frequency
 $f_{n,s}$ = Natural Frequency at Shock Condition
 f_d = Damping Frequency
 k' = Dynamic Spring Rate
 k_{eq} = Equivalent Stiffness
 T_R = Resonant Transmissibility
 T_S = Shock Transmissibility

w = Weight (lb)
 ζ = Damping Ratio
 S_i = Random Vibration Magnitude (G^2/Hz)
 $g_{i3\sigma}$ = Equivalent Input Acceleration (3σ)
 $g_{o3\sigma}$ = Equivalent Output Acceleration (3σ)
 X_i = Input Motion
 τ = Shock Pulse Length
 d_s = Shock Deflection
 G_o = Shock Response

1. 서론

유도탄의 정밀유도를 위해 시작된 관성항법 기술은 현재 거의 모든 무기체계에 탑재되어 널리 운용되고 있다. 이후 MEMS 기반 기술이 발전함에 따라 고정밀, 초소형화된 항법장치가 개발되고 있으며, 현재는 민수용으로도 그 응용 범위가 확장될 만큼 활용도가 증가하고 다양화되고 있다.

유도탄 항체 내에 탑재되어 운용되는 관성항법시스템(Inertial Navigation System, INS)은 탄의 위치, 가속도, 각속도 등의 자세 정보를 실시간으로 탐지하고, 그 신호를 유도조종장치(GCU)에 제공하는 역할을 한다.

유도탄은 목표점에 도달할 때까지 다양한 외부 진동, 충격환경에 노출되고, 엔진추진의 경우 주기적인 조화 가진이 지속적으로 유입되기 때문에 정확한 자세 제어와 조종을 위해서는 방진 설계가 필요하다.

또한 과학 기술의 발전으로 유도탄이 점차 고속화 됨에 따라 높은 추진력과 선회력이 요구되면서 시스템에 대한 방진 성능이 특히 중요해지고 있다.

관성항법시스템을 구성하는 MEMS 가속도계, 자이로 와 같은 센서들은 외란에 민감해서 입력값에 대한 환산 계수와 신호의 바이어스 오차를 최소화해야 한다.

이때 방진, 내충격 설계를 통해 센서들의 오작동을 방지하고, 시스템의 빠른 안정화를 기할 수 있다.

일반적으로 외부에서 전달되는 진동, 충격에너지를 탄성중합체(Elastomer)와 같은 감쇠가 큰 재료를 통해 강성과 감쇠 특성을 변화시키고, 시스템을 보호한다. 진동절연기는 가벼운 무게, 넓은 운용 온도, 우수한 감쇠 특성을 가지기 때문에 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다.

그러나 Lee 등은 절연기가 감쇠 특성뿐만 아니라, 초탄성(Hyper-elasticity), 점탄성(Viscoelastic)과 같은 비선형성이 함께 존재함을 기술하였다[1-3]. 또한 탄성중합체는 반복 시간과 주변 환경의 변화에 따라 분자 구조가 변화하고, 응력-변형을 곡선이 다른 거동을 보이는 Mullin's 효과가 존재함이 알려져 있기 때문에 그 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다[4].

절연기의 적용으로 시스템의 특정 주파수대역을 효과적으로 감쇠시킬 수 있지만, 짧은 시간 내에 큰 충격에너지가 인가될 경우에는 과도한 변위가 발생하므로 이에 대한 충분한 검토가 함께 필요하다.

이 같은 진동절연기의 비선형적인 특성을 반복적인 시험과 분석을 통해 입증하고 적용하기에는 많은 비용, 일정이 소요되기 때문에, 최근 무기체계에서는 COTS (Commercial Off The Shelf) 부품이 많이 도입되어 적용되는 추세에 있다[5-7].

본 연구에서는 유도탄용 관성항법시스템에 적합한 COTS 진동절연기를 이론적인 접근법을 통해 선정하고 진동, 충격환경에서 발생하는 시스템의 응답 특성을 이론적 해석과 시험을 통해 분석하였다.

시험을 통한 검증은 가장 일반적인 Sine-sweep 시험과 실제 운용 환경인 불규칙 진동 시험을 통해 시스템의 공진점 탐색과 응답 특성을 비교, 분석하였다.

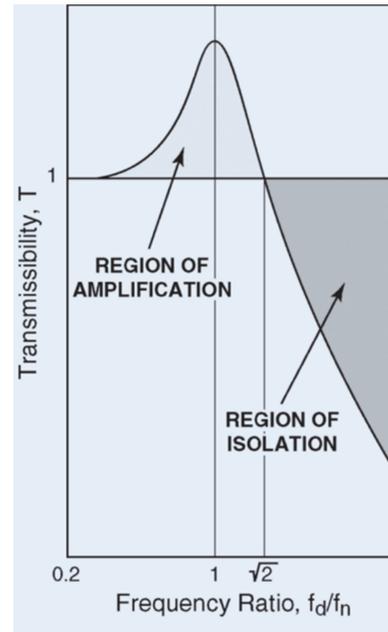


Fig. 1 Typical transmissibility curve of vibration isolator [9] (Adapted from Ref. 9 on the basis of OA)

또한 반복적인 시험을 통해 진동절연기를 시스템에 장착했을 때 발생할 수 있는 구조적 안정성과 응답의 재현성을 확인하였다.

2. 관성항법시스템의 COTS 진동절연기 선정

2.1 이론적 접근

먼저 유도탄의 운용 환경에 따라 시스템에 영향을 미치는 인자와 주파수대역을 파악하고, 이를 통해 시스템의 고유진동주파수(f_n)와 목표하는 감쇠주파수(f_d) 대역을 선정하는 것이 중요하다.

유도탄 항체 내에 관성항법시스템의 탑재 위치, 기계적 인터페이스, 무게와 같은 기본 변수들이 확정되면 시스템의 고유진동주파수, 감쇠주파수를 설정하게 된다. 일반적인 진동절연시스템은 Fig. 1과 같이 증폭과 감쇠영역이 함께 존재하는데, 이는 외부 환경 조건에 따라 변화할 수 있으나 이론적인 주파수비는 식(1)과 같이 $\sqrt{2}$ 배이다[8].

Fig. 1의 증폭 영역에서 반복적인 외란의 주파수와 유도탄의 고유진동수가 일치하게 되면 큰 변위가 발생하여 전기적 신호들이 왜곡되고, 물리적인 파손도 발생할 수 있기 때문에, 유도탄 자체의 고유진동수도 주요 설계 변수로 사전에 파악하여 고려해야 한다.

본 시스템의 목표 감쇠 대역은 110.0 Hz 이상으로 설정하였고, 식(1)을 통해 계산되는 이론적인 시스템의 고유진동수는 $1/\sqrt{2}$ 배인 약 80.0 Hz이다.

$$T_R = \sqrt{\frac{1 + \left[2\zeta\left(\frac{f}{f_n}\right)\right]^2}{\left[1 - \left(\frac{f}{f_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\zeta\left(\frac{f}{f_n}\right)\right]^2}} \quad (1)$$

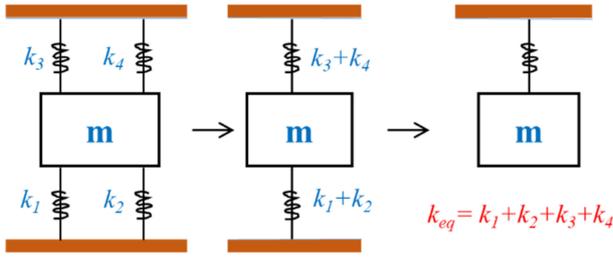


Fig. 2 Equivalent stiffness of INS

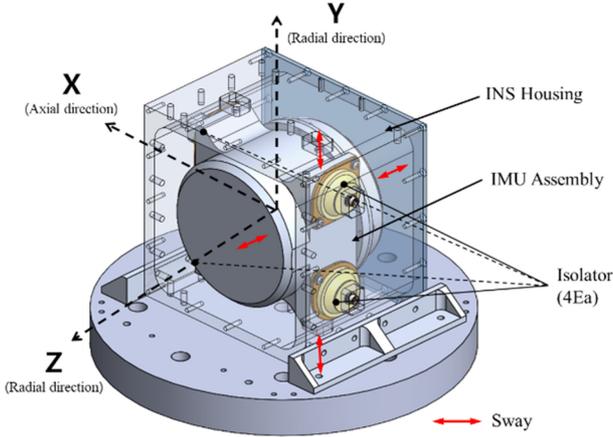


Fig. 3 Configuration of system

이 주파수는 일반적으로 저주파대역에 존재하는 대형 유도탄의 고유진동수를 회피할 수 있는 수준의 영역이다. 이론적인 계산에 앞서 본 시스템에 적합한 진동절연기 선정에 위해 감쇠가 없는 1계 시스템으로 가정하고, 식(2)와 같이 전체 동강성을 계산하였다.

절연기는 시스템의 물리적 공간과 조립성을 위해 4개를 적용하였고, Fig. 2와 같이 단순화 모델을 통해 동강성으로 치환하였다. 여기서 방진 성능은 전체 시스템이 아니라, Fig. 3과 같이 절연기가 부착되는 관성센서조립체(IMU)에 한정된다. $N_{Isolator}$ 는 절연기의 개수로, 개당 동강성은 식(3)과 같다.

$$k' = \frac{(f_n)^2 \cdot w}{9.8} (w = 4.85 \text{ lb}) \tag{2}$$

$$k'' = \frac{k'}{N_{Isolator}} (N_{Isolator} = 4 EA) \tag{3}$$

$$f_{n,axial} = 3.13 \sqrt{\frac{4 \times k_A}{w}} \tag{4}$$

$$f_{n,radial} = 3.13 \sqrt{\frac{4 \times k_R}{w}} \tag{5}$$

식(3)을 통해 계산된 값을 바탕으로 축, 반경 방향 방진 성능을 모두 만족하는 절연기 모델을 제조사에서 제공하는 자료를 통해 선정하였으며, 그 물성 정보는 Table 1와 같다[10]. 선정된 위 모델을 시스템에 탑재한 후 예상되는 축, 반경방향 고유진동수는 식(4)와 식(5)로 각각 계산되고, 그 값은 각각 86.1, 72.9 Hz이다.

Table 1 Properties of COTS vibration isolator (AM005-08)

Dynamic axial spring rate (k_A , lb/in)	854.0
Dynamic radial spring rate (k_R , lb/in)	657.0
Max. dynamic input at resonance (in)	0.036
Material	BTR I

이 과정에서 Table 1의 k_A, k_R 값을 이용한다.

$$g_{o3\sigma} = 3 \sqrt{\frac{\pi}{2} \cdot S_i f_n T_R} (S_i = 0.15 \text{ g}^2/\text{Hz}, T_R = 3.0) \tag{6}$$

$$g_{i3\sigma} = g_{o3\sigma} / T_R \tag{7}$$

$$X_{i3\sigma} = g_{i3\sigma} / 0.051 \cdot (f_n)^2 \tag{8}$$

$$V = \frac{A_o t_o}{2} (A_o = 20\text{g}, t_o = 0.011\text{s}) \tag{9}$$

$$\Delta d = \frac{V}{2\pi f_n} \tag{10}$$

시스템에 인가되는 진동에너지에 의해 발생하는 변위량을 추정하기 위해 식(6)과 식(7)을 이용하였고, 이 추정치로 식(8)과 같이 변위량을 도출할 수 있다.

또한 충격에 의한 변위량은 식(9)와 식(10)을 통해 예측하였다. 식(8)과 식(10)을 통해 진동, 충격조건하에서 예상 변위량을 0.5, 2.3 mm로 추정하였고, 이를 Fig. 3과 같이 시스템의 동적 구간으로 설정하였다. 예측한 변위에 의해 발생할 수 있는 물리적 간섭을 회피하기 위해 Y, Z 방향으로 하우징과 조립체의 간격을 마진 포함 5 mm로 정하고, 설계에 반영하였다.

2.2 모드해석

시스템의 동적 특성을 확인하기 위해 Fig. 4와 같이 유한요소 해석 모델을 구축하고, ANSYS 2020 R1으로 모드해석을 수행하였다.

해석에 앞서 시스템의 형상과 물리량을 실제 모델과 동일하게 생성하고, 모든 체결부는 빔 요소로 구성하였다. 진동절연기를 장착한 시스템 레벨에서의 응답 특성을 확인하기 위해 수행한 본 해석은 피장착물의 무게와 강성이 주요 변수이기 때문에 내부의 복잡한 형상은 집중질량으로 대체하여 단순화하였다.

Table 1과 같이 제조사에서 제공하는 강성계수를 설정하고, 거동이 축 방향으로만 작용한다고 가정하고 해석을 수행하였다. 단 방향 해석결과를 바탕으로 이론 계산의 타당성을 확인하였다.

해석 결과, 시스템의 1차 모드는 Fig. 5 및 Table 2와 같이 82.9 Hz에서 절연기 축방향의 병진운동으로 나타난다.

또한 이론계산을 통해 선정된 절연기 모델을 시스템에 탑재 후 예상되는 고유진동수는 앞서 식(4)로 계산한 바와 같고, 이는 모드해석의 1차 모드주파수와 유사하다.

2, 3차 모드는 조립체 자체의 변형 형상으로 1,900 Hz 대역에서 나타나며, 이는 강건한 구조적 특성을 보인다고 판단할 수 있다.

탄성중합체의 배열과 구성에 따라 정확한 감쇠비가 정해지나

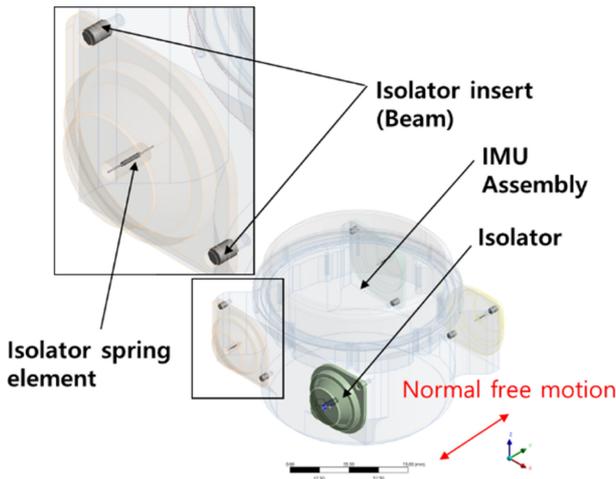


Fig. 4 Configuration of FEM model

이에 대한 정확한 정보를 제조사의 자료로 파악하지 못하기 때문에 전달률을 기준으로 감쇠비를 역으로 계산해 보았다. 제조사에서 제공하는 전달률 (T.R = 2.9)을 기준으로 식(2)에 대입하여 역으로 감쇠비(ζ)를 추정해 보면 약 0.18 정도로 산출된다.

이를 도식화하여 시스템의 방진 성능 예상 곡선으로 나타낸 것이 Fig. 6이다. 전달률 1 이하의 감쇠 영역은 약 113.81 Hz로 초기 설계 목표치 110.0 Hz와 유사하게 나타난다. 일반적으로 진동절연기를 구성하는 탄성중합체의 재료 구성과 외부 조건에 따라 감쇠비가 조금씩 달라지지만, 일반적으로 많이 사용되는 Neoprene, Butyl과 같은 탄성중합체는 약 0.1-0.3의 감쇠비를 가지는 것으로 알려져 있다[11].

이론계산과 모드해석을 통해 본 시스템의 COTS 진동절연기 선정의 적합성을 1차 판단하였고, 진동, 충격시험을 통해 그 응답 특성을 최종 확인하였다.

3. 진동/충격시험

3.1 진동시험

앞선 과정들을 통해 설계, 제작된 시체를 Fig. 7과 같이 치구에 장착한 후, 바닥면에 입력, 시스템의 상단부에 출력 센서를 각각 부착하여 축, 반경 방향에서의 주파수응답 특성을 계측하였다. 일반적으로 Sine-sweep 진동은 특정 주파수를 인가시키면서 주파수 이동을 하는 반면, 불규칙 진동은 다대역의 주파수를 동시에 전달 하면서 공진 영역에서 해당 주파수만 정제된 것과 같이 전달되는 특징이 있다. 이러한 특성을 고려하여 공진점 탐색은 Sine-sweep 과 불규칙 진동 시험을 각각 수행하여 그 응답 특성을 비교, 분석 하였다.

3.1.1 Sine-sweep진동시험

탄성체인 진동절연기의 특성을 고려하여 가진력을 1, 3, 5 g으로 단계적으로 증가시키면서 응답 특성을 분석하였다. Sine-sweep은

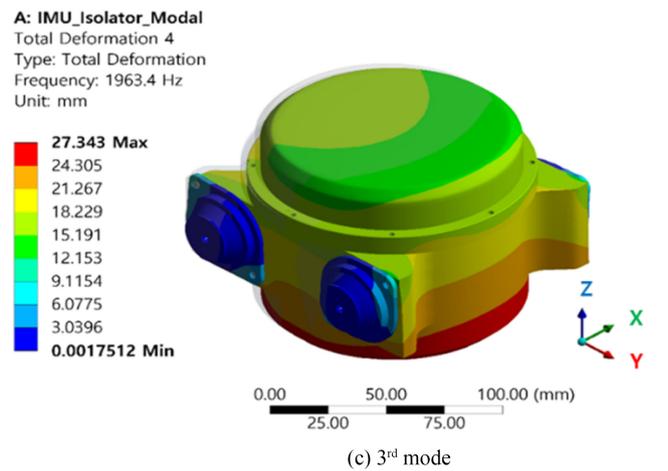
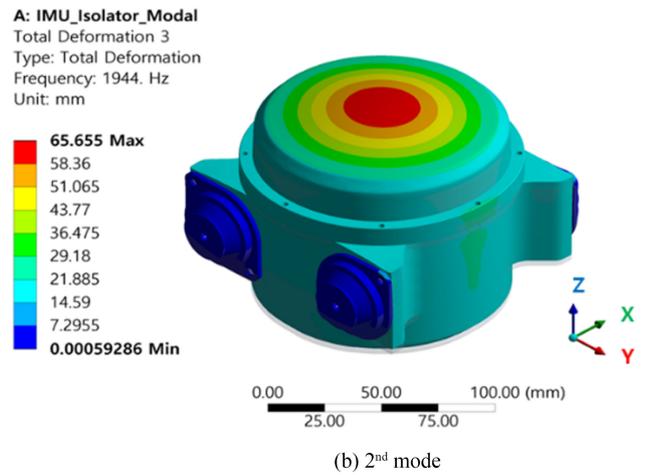
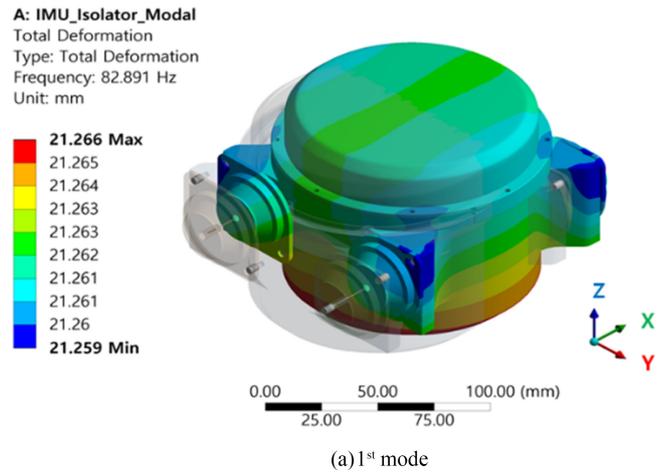


Fig. 5 Mode shape on system

Table 2 Modal analysis results of system

	f_n (Hz)
1 st mode	82.9
2 nd mode	1,944.0
3 rd mode	1,944.4

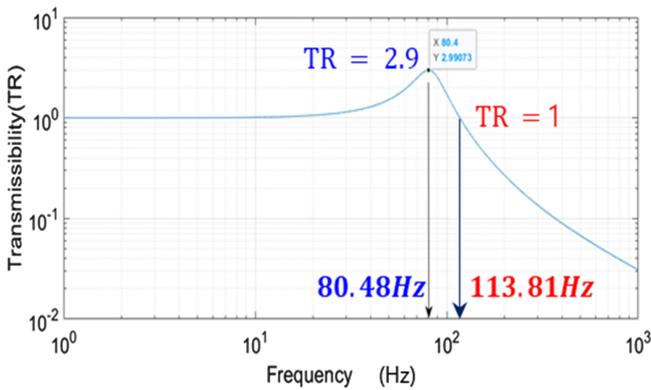


Fig. 6 Expected transmissibility curve of system

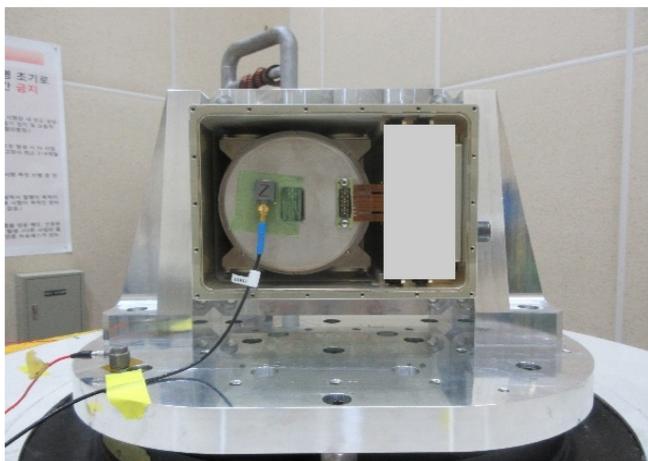


Fig. 7 Schematics of vibration and shock test

Logarithmic Type으로 1-1,000 Hz 대역에서 2 Oct/min 로 설정하여 가진하였다. 가진력이 증가함에 따라 Figs. 8(a), 8(b)와 같이 시스템의 f_n 이 점차 저주파대역으로 이동하는 경향을 보인다.

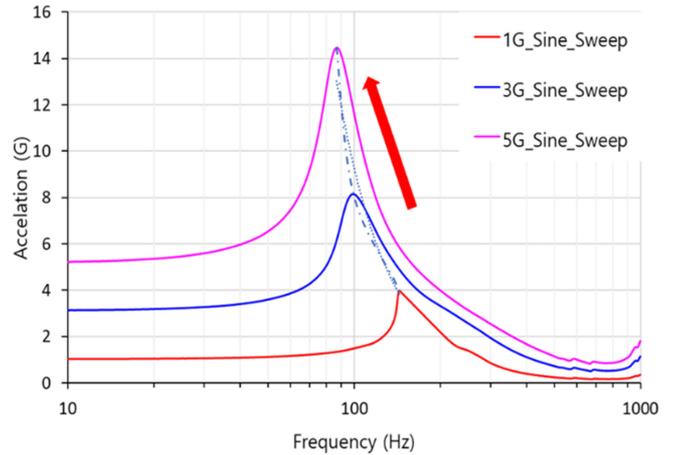
이는 지속적인 진동에너지를 전달로 탄성체의 강성이 감소하는 것으로 전형적인 초탄성, 점탄성의 특성을 보이는 것이다. 이와 같이 탄성체가 변형되면 분자 구조가 재배열되면서 강성이 낮아지고, 특성이 변화하는 비선형적인 특성을 보이게 되는데, 이를 Fig. 8이 잘 나타낸다.

가진력이 증가할수록 f_n 이 수렴하는 경향을 보이고, Figs. 8(a)와 8(b)에서 모두 전달률이 3.0 정도를 나타내는데 이는 제조사에서 제공한 수치와 크게 다르지 않다.

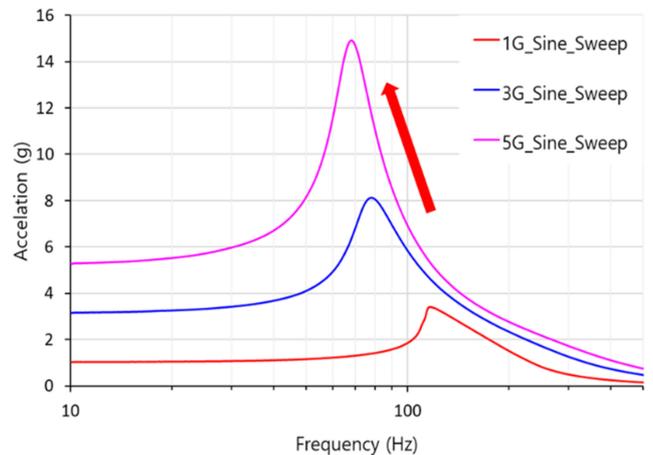
전달률 1.0이하의 f_d 는 f_n 의 약 1.7배 지점에서 나타나는데, 이는 저주파대역부터 순차적으로 공진 탐색을 하면서 탄성체의 거동이 타 주파수대역에도 영향을 주는 것이다.

일반적으로 Sine-sweep 가진을 통한 공진점 탐색은 선형적인 방법론으로 실제 다양한 환경에 노출된 시스템의 조건과 차이가 발생한다.

반복적인 시험 후 진동절연기의 물리적 변형이나 파손 등의 구조적 문제가 없음을 육안으로 확인하였고, 1 g를 인가하여 응답 특성의 재현성을 확인하였다.



(a) Axial direction



(b) Radial direction

Fig. 8 Results of sine sweep vibration test

3.1.2 불규칙 진동(Random Vibration) 시험

실제 외란이 시스템에 인가되었을 때 발생하는 응답 특성을 확인하기 위해 Fig. 9와 같이 유도탄이 운용 시 노출되는 환경을 모사한 불규칙 진동 시험을 수행하였다. 세부 시험은 MIL-STD-810G의 규격과 절차를 따라 진행하였다[12].

본 시험은 Sine-sweep과 동일하게 시스템의 축별 응답특성을 확인하기 위한 시험으로 X, Z 방향에 대해서만 기술하였다. 절연기 반경방향의 강성 계수와 기타 특성은 동일하기 때문에 Y, Z축 시험 결과는 유사하다.

불규칙 진동은 Sine-sweep 진동과는 달리 여러 주파수 대역을 한번에 전달하여 그 응답특성을 확인할 수 있고, 이로 인해 감쇠 영역에서 주파수 지연 현상이 발생하지 않았다.

Fig. 10과 Table 3은 불규칙 진동 인가 시 응답 특성을 나타낸다. 축 방향에서는 Fig. 10(a)와 같이 112.5 Hz에서 공진점이 발생하고, 약 1.5배인 167.5 Hz 이상 대역에서 감쇠가 시작된다. Fig. 10(b)의 반경방향의 결과는 약 102.5 Hz에서 공진점이 발생하고, 동일하게 약 1.4배인 142.5 Hz 이상 대역부터 감쇠가 시작된다.

축, 반경 방향 모두 전달률 1.0이하의 f_d 는 f_n 의 약 1.4-1.5 배인

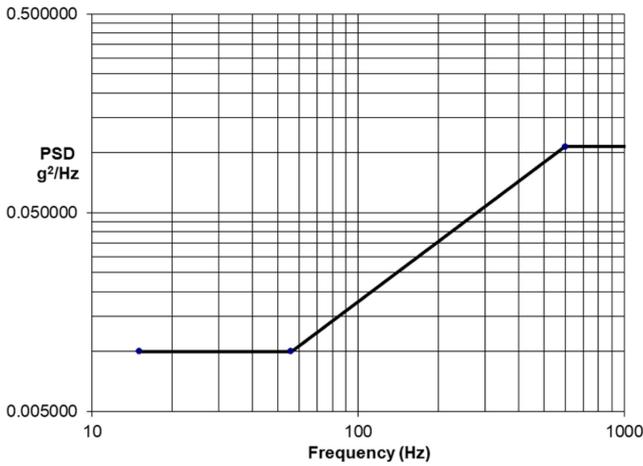
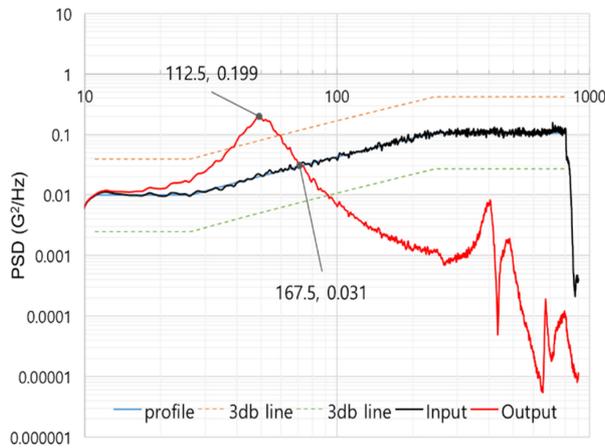
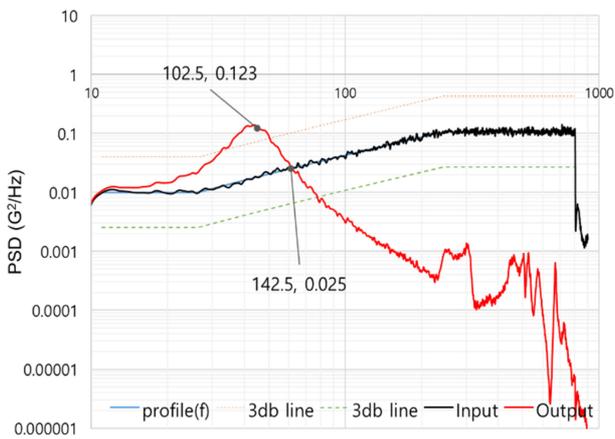


Fig. 9 Profile of random vibration



(a) Axial direction



(b) Radial direction

Fig. 10 Results of random vibration test

지점에서 나타나는데, 이는 식(1)의 이론 적 주파수비인 $\sqrt{2}$ 배와 유사하다.

Figs. 10(a)와 10(b)에서 측정된 입, 출력값을 에너지로 환산해 보면 각각 13.49, 3.2 G_{rms} 로 전체 주파수 대역에서 진동에너지의 약 76%가 감소되어 소산되었다. 이처럼 외부로부터 유입되는 진동에너지가

Table 3 Comparison of response characteristics for axis

	f_n (Hz)	f_d (Hz, T.R≤1)
Axial	112.5	167.5
Radial	102.5	142.5

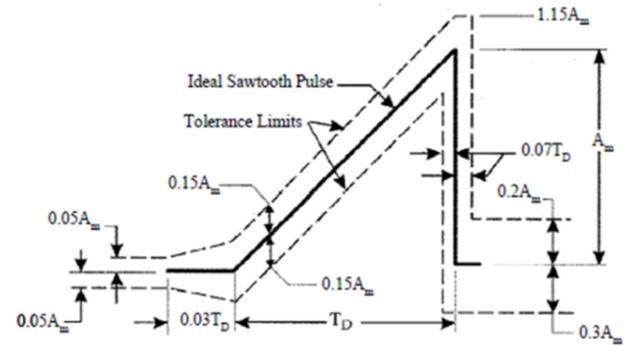


Fig. 11 Profile of shock test

감쇠되면서 시스템을 구성하는 가속도센서, 자이로와 같은 민감도가 높은 센서들이 외란으로부터 효과적으로 보호되는 것이다.

3.2 충격시험

절연기의 적용으로 특정 주파수대역을 효과적으로 감쇠시켜 시스템을 보호할 수 있지만, 짧은 시간내에 큰 충격에너지가 인가될 경우, 과도한 변위가 발생할 수 있다[13]. 이에 대한 영향성을 확인하기 위해 충격 시험을 수행하였다.

세부 시험은 MIL-STD-810G를 기준으로 Fig. 11과 같이 20 g, 11 msec를 Saw-type 형태로 충격을 인가하여 응답 특성을 확인하였다. 진동시험과 동일한 구성으로 축, 반경 방향에 대해서 정방향(+) 시험을 수행하였다.

Fig. 12와 같이 본 시스템은 인가되는 충격에너지에 대해 1.1에 가까운 전달률로 빠른 시간내에 회복되었으며, 구조적 결함이나 간섭 등 특이사항은 발생하지 않았다.

또한 충격시험을 통해 측정된 전달률을 바탕으로 식(11)과 같이 $f_{n,s}$ 를 추정하고, 식(12)를 통해 변위량을 산출해 보았다.

제조사에서는 다양한 분석을 통해 진동절연기의 외란의 형태에 따른 강성간의 관계를 식(13)과 식(14)와 같이 정의하고 기술하고 있다.

$$T_s = 3.1 \cdot (f_{n,s}) \cdot (\tau) \tag{11}$$

$$d_s = G_0 / 0.102 \cdot (f_n)^2 \tag{12}$$

$$K_{Dynamic\ vib.} > K_{Shock.} > K_{Static\ vib.} \tag{13}$$

$$K_{Shock.} \cong 1.4 K_{Static\ vib.} \tag{14}$$

동적 환경인 불규칙 진동과 충격시험을 통해 강성의 변화에도 외란을 효과적으로 감쇠하고 시스템의 안정성을 유지하는 것을 확인하였다.

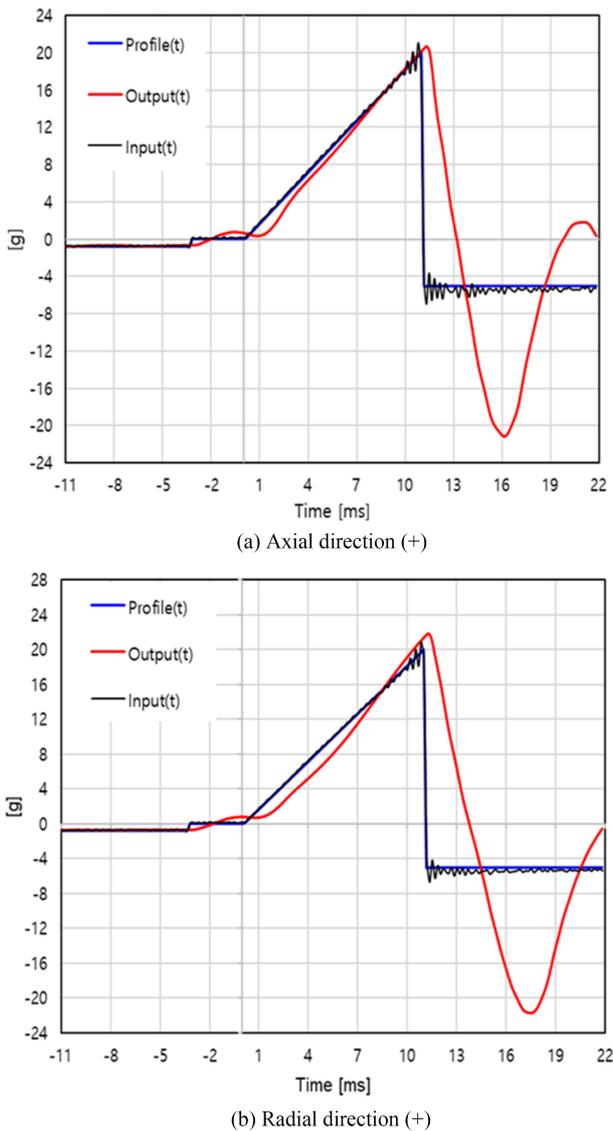


Fig. 12 Results of shock test

4. 결론

본 연구에서는 유도탄에 장착되는 관성항법시스템에 적합한 COTS 진동절연기를 이론계산과 모드해석을 통해 선정하고, 그 타당성과 특성을 진동, 충격시험을 통해 검증하였다.

이론적으로 계산된 결과치를 통해 진동절연기 선정 이외에 진동, 충격에 의해 발생하는 변위값을 추정하고 이를 설계에 적용하여 시스템을 제작하였다.

Sine-sweep 진동시험을 통해 가진력에 따른 절연기의 비선형성을 확인하였다. 또한 가진력의 크기와 시험의 반복도에 따라 탄성중합체로 구성되어 있는 절연기의 동강성이 감소해 시스템의 고유진동수가 저주파대역으로 이동하는 것을 확인하였다.

이것은 탄성체의 초탄성, 점탄성의 전형적인 비선형 특성을 보여주는 것이다.

또한 유도탄의 운용 환경을 모사한 불규칙 진동 시험과 충격시험을 통해 실제 조건에서의 응답 특성에 대해서도 분석하였다. 불

규칙 진동을 인가하여 공진점 탐색 시, Sine-sweep 시험에서 나타났던 주파수 지연 현상이 사라졌고, 이는 시험 방법론적 차이와 탄성체의 특성때문에 발생한 것이다.

Sine-sweep 진동은 특정 주파수를 인가하면서 주파수 탐색을 하고, 불규칙 진동은 여러 주파수대역을 한번에 전달하여 그 특성을 찾는 것으로 공진영역에서 필터를 적용한 것과 같은 효과를 주는 것이다.

진동시험으로 선정한 절연기 탄성체의 전달률과 감쇠비가 각각 3.0, 0.18 정도임을 확인하였고, 이는 제조사에서 제공하는 수치와 큰 차이가 없음을 확인하였다.

절연기를 적용함으로써 동강성의 변화가 발생하여 새로운 증폭 영역이 발생하고, 반대로 에너지를 소산 시킬 수 있는 감쇠 영역도 함께 존재함을 알 수 있다.

또한 특정 주파수대역을 효과적으로 감쇠시킬 수 있지만, 탄성체의 특성상 짧은 순간에 큰 충격에너지가 인가되면 과도한 변위가 발생하기 때문에 이를 충격시험을 통해 검증하였다.

본 시스템의 충격에 의한 전달률은 1.1 이하 수준으로 우수한 완충 성능을 가지고 있는 것으로 판단하였고, 반복적인 시험을 통해 절연기의 물리적 변화와 응답의 재현성을 확인하였다.

COTS 진동절연기의 다양한 선택지를 통해 시스템의 동강성을 변화시킬 수 있고, 이를 통해 특정 대역 이상에서 감쇠를 통해 이득을 취할 수 있다. 하지만 이와 상충하는 증폭 영역이 항상 존재함을 인지하고 시스템과의 영향성을 검토해야 한다.

또한 탄성체의 특성상 노출되는 온, 습도와 같은 환경조건에 따라 강성이 변화하여 응답 특성이 달라질 수 있음을 유념해야 한다.

본 연구에서는 다양한 진동, 충격 환경조건하에서 절연기의 방진 성능과 시스템의 안정성에 대해 분석하였다. 이와 더불어 버펫 진동과 같은 특수 환경에서의 특성 변화에 대해서도 추가적인 연구를 계속 진행할 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2024년 정부의 재원으로 수행된 연구 결과임.

REFERENCES

1. Cho, J.-M., Bae, J.-I., Kim, I.-M., Lee, H. S., (2018), Dynamic response of isolator mounted optical bench for aircraft POD, Proceedings of the Korean Society Aeronautical and Space Sciences Fall Conference, 712-713.
2. Lee, H. H., Park, J. H., Jeon, J. G., (2023), Analysis on vibration isolator characteristics of inertial navigation system for guided weapons, Proceedings of the Institute of Positioning, Navigation, and Timing Autumn Conference, 155-158.
3. Jang, S. Y., Park, J. C., Hwang, S. H., Kim, E., (2012), Analysis of dynamic behavior of floating slab track using a nonlinear viscoelastic spring model, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 22(11), 1078-1088.

4. Kim, Y. U., (2016), Development of isolators of an attitude heading reference system for an aerial cam gimbal system, M.Sc. Thesis, Hanyang University.
5. Kim, M. D., Kim, C. J., Kim, D. H., (2019), A study of characteristics of vibration and shock for the mounting equipment of the military wheel vehicle, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 36(8), 713-719.
6. Song, A.-Y., Yim, S.-H., Kwon, B.-O., Han, D.-H., Jung, H.-J., (2021), Structural design through test and analysis of structure equipped with vibration isolator system, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 31(6), 589-596.
7. Kim, K. B., Kim, S. H., Jeon, J. I., Jung, E. B., (2018), Selection of vibration isolation mounts and vibration analysis considering transportation condition for applying COTS to military equipment, Proceedings of the Korean Society Precision Engineering Autumn Conference, 619-620.
8. Inman, D. J., (2013), Engineering vibration, 4th edition, Pearson Education.
9. Hutchinson, Isolators selection, <https://hutchinsonai.com/wp-content/uploads/2020/01/IsolatorsSelection.pdf>
10. Lord Corp., Aerospace & Defense Isolator Catalog, https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/noise-vibration--harshness-division/aerospace---defense/Product-Catalogs/Product-Catalog---Aerospace--Defense-Isolator-Catalog_PC6116.pdf
11. Masterson, P. A., (2005), The basics of vibration isolation using elastomeric materials, Aearo Company. https://vibrationdata.com/tutorials_alt/vib_iso.pdf
12. Department of Defense U.S.A, (2019), Environmental engineering considerations and laboratory tests, (Repoort No. MIL-STD-810G), <https://www.atec.army.mil/publications/Mil-Std-810G/Mil-Std-810G.pdf>
13. Kim, K.-S., (2021), Shock displacement analysis and test of the elastomer isolator for electro-optical tracking system, Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Conference, 1944-1947.



Jun-Hyuk Park

Research Engineer in mechanical R&D Lab., LIG Nex1 Co., Ltd. His research interest is vibration, shock and system design of missile.

E-mail: junhyuk.park@lignex1.com



Geun-Suk Gil

Chief Research Engineer in mechanical R&D Lab., LIG Nex1 Co., Ltd. His research interest is vibration, shock and system design of missile.

E-mail: geunsuk.gil2@lignex1.com



Jong-Geun Jeon

Chief Research Engineer in mechanical R&D Lab., LIG Nex1 Co., Ltd. His research interest is system design of missile and a structure design.

E-mail: jeon.jg70@lignex1.com



Ki-Hyuk Kwon

Chief Research Engineer in PGM Core Tech R&D Lab., LIG Nex1 Co., Ltd. His research interest is INS, ECU, mini-missile.

E-mail: khkwon80@lignex1.com



Sang-Chan Moon

Chief Research Engineer in NAV/GNSS Anti-Jamming R&D Lab., LIG Nex1 Co., Ltd. His research interest is MEMS IMU & INS Design.

E-mail: sangchan.moon@lignex1.com



Ho-Ho Lee

Senior Research Engineer in mechanical R&D Lab., LIG Nex1 Co., Ltd. His research interest is vibration, shock and system design of missile.

E-mail: hoho.lee@lignex1.com



Seung-Bok Kwon

Chief Research Engineer in NAV/GNSS Anti-Jamming R&D Lab., LIG Nex1 Co., Ltd. His research interest is INS design based on PGM.

E-mail: seungbokkwon@lignex1.com



Seongho Nam

Senior Research Engineer in Agency for Defense Development (ADD). His research interest is INS design.

E-mail: shnam@add.re.kr



Chang-Ky Sung

Principal research Engineer in Agency for Defense Development(ADD). His research interest is INS design and integrated navigation algorithm.

E-mail: einstein@add.re.kr