

저주파 방진시스템의 스프링 댐퍼 설치 각도 최적화

Optimization of Spring Damper Installation Angle in Low-frequency Vibration-isolation System

장 일 광* · 이 용 우** · 조 재 명*** · 홍 성 부*** · 장 용 훈†
Ilkwang Jang*, Yongwoo Lee**, Jae Myung Cho***, Sungboo Hong*** and Yong Hoon Jang†

(Received September 26, 2023 ; Revised December 27, 2023 ; Accepted December 28, 2023)

Key Words : Electro-optical Targeting System(전자광학 추적시스템), Vibration-isolation System(방진시스템), Finite Element Analysis Model(유한요소 해석 모델), Installation Angle(설치각도)

ABSTRACT

The rapidly expanding use of electro-optical tracking systems (EOTSs) in various industries has led to an emphasis on improving their precision and stability. This study investigated an approach to optimize the installation angle of the spring-damper anti-vibration system of an EOTS, particularly in military applications. The spring-damper system was numerically simulated using a finite element analysis model, considering the constraints of a confined installation space. The potential of this system to counteract low-frequency vibrations, which is a limitation of traditional rubber-based systems, was explored. The optimal installation angle was determined by ensuring a uniform distribution of natural frequencies on all three axes (x, y, z) of vibration. The results indicated an optimal installation angle of 56.95°, which provided a balanced damping performance across all axes. The study concluded that this angle resulted in the most effective performance of the EOTS spring-damper anti-vibration system. These findings will contribute to the enhancement of EOTS stability and precision, thus potentially improving military operations.

1. 서 론

전자광학 추적시스템(EOTS)은 그 기술적 발전과 함께 다양한 산업 분야에서의 활용이 확대되고 있다. 특히 차량, 항공우주, 선박 등의 영역에서 이러한 시스템의 중요성은 더욱 강조되고 있다^(1,2). 이 중에서도

군사적 측면에서의 EOTS 활용은 그 중요성이 강조되며, 많은 연구와 개발이 진행되고 있다⁽³⁾. EOTS의 핵심 기능은 정확한 정보를 획득하여 정밀 탐지 및 표적 추적을 수행하는 것이다. 이는 적의 위치 파악, 정밀 표적 추적 및 공격 등 다양한 군사 작전에서 필수적으로 요구되는 능력이다. EOTS의 정밀한 작동을 위해서는 시스템의 안정성이 매우 중요하다⁽⁴⁾. 그러

† Corresponding Author ; Member, Yonsei University, Department of Mechanical Engineering, Professor
E-mail : jyh@yonsei.ac.kr

* Yonsei University, Department of Mechanical Engineering, Research Professor

** Shinhan University, Department of Mechanical & Automotive Engineering, Assistant Professor

*** Hanwha Systems, Researcher

‡ Recommended by Editor Gunwoo Noh
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

나 EOTS는 외부 환경의 여러 요인, 특히 진동에 민감하게 반응한다. 이러한 진동이 시스템에 미치는 영향, 특히 시선 떨림은 성능 저하의 주요 원인이 될 수 있다⁵⁾. 따라서 EOTS의 안정적인 작동을 위해 방진 시스템의 중요성은 매우 크며, 이에 따라 방진 시스템의 동적 특성을 정확하게 분석하고, 적용되는 시스템의 운용 특성을 고려한 시스템의 최적화가 필요하다.

전통적으로 방진 시스템에는 금속 스프링과 방진 고무 등이 주로 사용되어 왔다. 방진 고무는 공간적 제약이 적고 고주파 진동에 대한 차단 효과가 뛰어나다. 이 때문에 기존의 방진 시스템에서는 고무를 이용한 방진 장치를 적용하는 경우가 많았다. 이러한 기존 연구에는 광학장비용 엘라스토머 방진구의 정특성 및 동특성 분석, 항공 정찰용 카메라 고무 방진 시스템의 진동특성 연구 등이 있었다⁶⁾. 그러나 기존의 고무 방진구를 활용한 방진계의 경우 10 Hz 수준의 저주파 방진계를 구성함에 있어서 정적 강성 혹은 충격 강성에서의 구조적 한계가 있었다. 이에 따라 이러한 저주파 진동에 대한 효과적인 대응이 필요하게 되었다. 또한 방진 고무는 환경적 요인(열, 오존, 기름 등)에 의해 기능이 저하될 수 있다⁷⁾. 특히 열에 노출될 경우 사용 가능 온도의 한계가 있으며, 고무 형상과 노출 시간에 따라 기능이 변할 수 있다. 그리고 고무의 정적 변형은 처짐 현상(영구 변형, creep)으로 이어져 간섭 및 스프링 특성의 변화를 유발할 수 있다. 동적 변형은 고무에 균열을 일으키는 주요 원인으로 작용한다. 이러한 고무재질 방진시스템의 단점을 극복하고자, 이 연구에서는 금속 스프링-댐퍼 방진 시스템의 도입을 제안한다.

금속 스프링 방진 시스템은 환경적 요인에 대한 저항력이 우수하며, 특히 저주파 진동에 대한 차단 능력이 방진 고무보다 더 우수하다는 장점을 가지고 있다. 이는 EOTS가 특히 적용되는 군사적 목적에 매우 적합하다. 그러나 스프링의 경우, 감쇠 특성이 부족하며, 설치 공간에 대한 제약이 더 크다는 단점이 있다. 이러한 문제는 스프링과 댐퍼의 조합을 통해 극복할 수 있다. 스프링-댐퍼 시스템은 스프링만을 사용하는 것보다 훨씬 우수한 감쇠 특성을 가지며, 댐퍼의 적절한 설치 각도 등에 대한 시스템의 최적화는 전체적인 성능 향상에 중요하게 작용한다⁸⁻¹⁰⁾. 그러나, 제작 후의 시험을 통한 스프링-댐퍼 설치 형상 최적화는 상당한 비용과 시간을 필요로 한다. 이는 제작 과정

의 효율성과 비용 문제를 야기하며, 이를 해결하기 위한 방안이 요구된다.

이에 이 연구는 제작 전 단계에서 EOTS의 스프링-댐퍼 방진 시스템을 수치해석 모델로 모사하고, 이를 통해 제한된 설치 공간 내에서 스프링-댐퍼의 설치 각도를 최적화하는 방안을 제시한다.

2. 본 론

2.1 EOTS 스프링-댐퍼 방진 시스템

이 연구에서 대상으로 하는 EOTS 스프링-댐퍼 방진 시스템은 복합적인 구조로 되어 있다. 이 시스템은 Fig. 1과 같이 외부 방진판, 내부 방진판, 그리고 이 두 판을 연결하는 복수의 스프링-댐퍼로 구성된 방진부로 이루어져 있다. 이 외부 방진판과 내부 방진판 사이에는 외부 충격을 방지하는 역할을 하는 고무 완충기(스너버)가 장착되어 있다. 내부 방진판은 중앙 허브의 구멍을 통해 전자광학모듈과 체결할 수 있는 구조를 가지고 있다. 이 연구에서는 전자광학모듈 대신 페이로드를 설치하여 시스템을 모사하였다. 방진부는 교차 구조로 설계된 스프링-댐퍼 세트를 활용하며, 이 댐퍼는 폐쇄된 유압으로 구성된 실린더 형태이다. 댐퍼의 실린더는 베이스 링에 직접 고정되어 있으며, 가동로드에 고정되어 있다. 외부 방진판의 외각에는 유압 댐퍼를 외부 격리판에 연결하는데 사용되는 연결 구멍이 위치해 있다. 이 구멍들은 균등한 간격으로 배치되어 있으며, 총 6개의 그룹을 형성하고 있다. 스프링과 댐퍼가 포함된 방진부는 제한된 설치 공간 내부에 조립되어야 하며, 이에 따라 스프링과 댐퍼의 설치 각도는 40°에서 70° 사이로 제한된다. 여기서 설치 각도는 방진판과 수평인 평면과 스

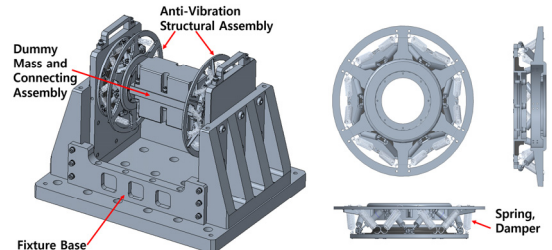


Fig. 1 EOTS anti-vibration system

프링 혹은 댐퍼가 이루는 각도를 의미한다. 이 설치 각도는 방진 시스템의 성능에 큰 영향을 미치며, 이 각도를 최적화하는 것이 이 연구의 주요 목표 중 하나이다.

2.2 유한요소 해석 모델

제작 전 단계에서 방진 시스템의 최적화를 하기 위해 이 연구에서는 유한요소 해석 모델을 개발하고 해석을 통한 설계 최적화를 수행하였다. 방진 시스템 개발을 위한 최적 설계안은 방진 시스템의 동특성(랜덤성능진동, 충격)을 기준으로 도출되어야 한다. 따라서 초기 설계안을 적용하여 우선 동특성 해석모델을 개발하여야 한다. 방진 시스템 설계안의 유한요소 모델은 20 kg의 페이로드를 가지며 페이로드 양쪽 방진부에 총 12개의 스프링과 댐퍼 세트가 구성되었다. 유한요소 해석을 위한 메시 모델은 Fig. 2와 같이 1 145 304개의 요소로 구성되었으며, 3차원 솔리드 구성요소로는 C3D4(사면체) 요소를, 1차원 연결 구성요소에는 CONN3D2(트러스) 요소를 사용하였다. 해석에 사용된 재료는 SUS304이며, 이의 물성은 밀도 8 g/cm³, 탄성 계수 210 GPa, 그리고 Poisson’s ratio 0.29를 갖는다. 또한, 스프링 계수는 7.2 N/mm, 댐핑 상수는 0.7 Ns/m를 사용하였다.

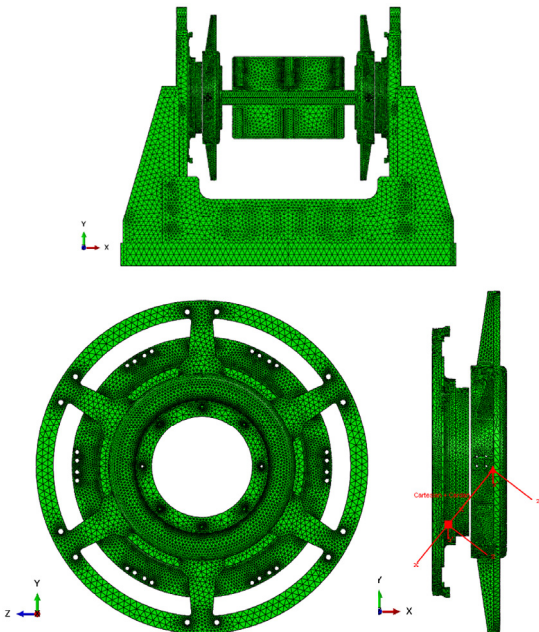


Fig. 2 Finite element model for anti-vibration system

이 연구에서는 초기 설계안의 랜덤성능진동 해석과 충격 해석을 수행하였다. 두 해석은 각각 MIL-STD-810G method for aircraft military applications의 M514.7, M516.8 규격을⁽¹¹⁾ 따라 진행하였다. M514.7은 Table 1에 제시하였다. M516.8은 톱니파 충격으로, 최대 가속도는 20 g, 지속시간은 11 ms이며 x, y, z축 모든 방향의 충격 요구 성능을 만족해야 하는 것으로 규정하고 있다. 여기서 랜덤성능진동 해석은 규격 중 외부 랜덤 가진 입력을 성능 기준으로 하였으며, 충격해석은 각 축 별 18회 반복 중 1회 충격에 대하여 수행하였다.

2.3 기존 시험 결과와의 비교를 통한 해석 모델 검증

유한요소 해석은 해석 모델의 타당성 검증이 중요하다. 일반적으로 유한요소 해석의 타당성은 시험 결과와 해석 결과의 상관관계를 통해 확보할 수 있다. 그러나 이 연구는 시작품 제작 전 단계에서 유한요소 해석을 수행하므로, 현 단계에서 시험 결과와의 상관관계를 검증할 수 없다. 이에 따라 이 해석 방법론의 검증은 초기 설계안과 구조가 유사한 기존 시작품의 동특성 시험 결과를 기준으로 확인하였다. 이 연구에서 제안한 설계안은 기존 시작품과 크기가 다르며 이에 따른 공간적 제약으로 인해 스프링/댐퍼 연결 플레이트의 스포크 개수가 달라진다. 이로 인해 스프링/댐퍼의 개수와 설치 각도 또한 차이가 있다. 따라서 기존 시작품의 동특성과 비교하기 위해 Fig. 3과 같이 기존 시작품과 동일한 형상 구조를 가진 등가 모델을 구성하여 해석 방법론을 검증하였다.

기존 시작품은 시스템의 물리적 방진을 위한 3축

Table 1 Random vibration signals in PSD (MIL-STD-810G, M514.7)

Frequency [Hz]	PSD [g ² /Hz]
10	0.0013
100	0.0013
150	0.0039
500	0.0039
600	0.0104
750	0.0104
900	0.0039
2000	0.0039

제동 장치로, 다수의 스프링과 댐퍼를 공간적으로 배열하여 외부 충격을 방지한다. 초기 설계안과 유사하게 외부 방진판과 내부 방진판, 그리고 이 두 판을 연결하는 아이슬레이터 조립부로 구성되며, 내부 방진판에는 고무 완충기가 설치되어 있다. 아이슬레이터 조립부는 28개의 스프링-댐퍼 세트로 구성된다. 내부 방진판은 29.2 cm의 직경을 가지며, 중앙 허브를 통해 격리 대상물과 체결할 수 있다. 또한, 외부 방진판의 외각에는 3개씩 구성된 연결 구멍이 약 50°의 간격으로 7개의 그룹을 형성한다. 이 구멍들은 댐퍼와 스프링을 외부 격리판에 연결하는 역할을 한다. 스프링은 70 N/cm의 스프링 상수와 1.3 cm의 직경을 가지며, 댐퍼 사이에서 90°의 각도로 설치된다.

이 방진 시스템 해석에서는 모델의 정합성을 높이기 위해 스프링/댐퍼의 길이 방향 외의 자유도에 대해서도 스프링 상수를 부여하였다. 길이 방향 스프링 상수는 7 N/mm, 길이 방향 외 축방향 스프링 상수는 길이 방향 스프링 상수의 10%, 3방향의 비틀림 스프링 상수는 5%로 부여하였다. 이러한 스프링 상수의 반영을 통해 동특성은 고유진동수 12.41 Hz와 전달률 7.68 dB로 확인되었으며, 이는 기존 시작품의 동특성 시험 결과인 고유진동수 12.5 Hz, 전달률 약 7 dB과 유사한 수준으로 이 해석 방법론의 타당성을 확인하였다.

2.4 랜덤성능진동해석 및 충격해석 결과

방진 시스템의 동특성 해석 이전에 정적 처짐량 해석과 모드 해석을 수행하였다. 초기 방진 시스템에서 페이로드 자중에 의한 정적 최대 처짐량은 스프링 계수 7.2 N/mm 조건 하에서 3.334 mm로 계산되었다. 모드 해석 결과는 Table 2와 같다. 모드 해석을 통해 나타난 모드 형상은 첫 번째 ~ 세 번째 모드에서는 각 축 방향 병진 거동을, 네 번째 ~ 여섯 번째 모드에서는 각 축 기준 회전 거동인 것을 확인하였다. 모델의 형상이 Y축과 Z축 방향으로 기하학적 돌출을 이루므로 Y축, Z축 방향 공진주파수는 거의 동일하게 나타났다.

랜덤성능진동해석 및 충격해석을 위해 가해진 외부 가진은 앞서 설명한 MIL-STD-810G 규격을⁽⁵⁾ 따른다. 주어진 랜덤가진 하에서 나타나는 주파수 응답 함수는 Fig. 4와 같다. X축 가진에 따른 X방향 응답을 X-X, Y축 가진에 따른 Y방향 응답을 Y-Y, Z축 가진에 따른 Z방향 응답을 Z-Z로 표기하였다. 가진

에 대한 최대 주파수의 위치는 각각 9.5058 Hz(X-X), 6.6914 Hz(Y-Y), 6.6954 Hz(Z-Z)로 각각 해당 축 방향 병진 거동이 나타나는 모드 고유주파수와 일치하였다. 또한 각 주파수에서 나타나는 최대 가속도(ASD)

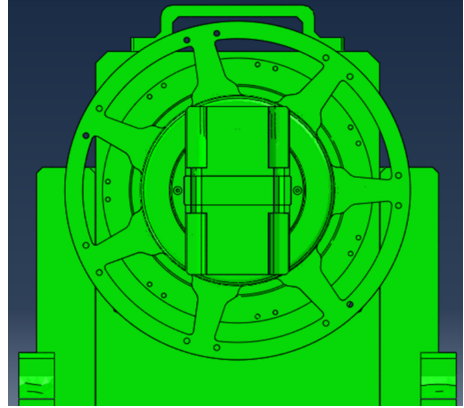


Fig. 3 Proto-equivalency analysis model

Table 2 1 th ~ 6 th mode shapes from the initial design

Mode	Frequency [Hz]	Mode shape
Mode 1	6.6914	Y-axis translational motion
Mode 2	6.6954	Z-axis translational motion
Mode 3	9.5058	X-axis translational motion
Mode 4	15.6750	Rotation about the Z-axis
Mode 5	16.4640	Rotation about the Y-axis
Mode 6	19.5058	Rotation about the X-axis

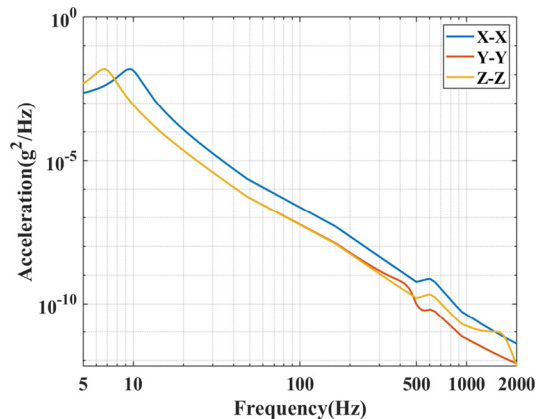


Fig. 4 Results of random vibration analysis

및 전달률은 각 축 방향 모두 동일하게 0.0157 g²/Hz, 3.4801로 확인되었다.

충격 해석의 결과는 Fig. 5와 같다. 이 해석에서는 설계 최적화를 위한 상대 비교만을 수행하게 되므로 충격의 반복 없이 1회 충격을 가하여 해석을 수행하였다. 20 g의 충격에 대한 최대 가속도는 X-X, Y-Y, Z-Z 각각 12.1305 g, 10.4995 g, 10.4995 g로 나타났다. 또한 각 방향별 최대 충격 변위는 4.7696 mm (X-X), 6.2118 mm(Y-Y), 6.2118 mm(Z-Z)임을 확인하였다. 해석 대상인 초기 설계안의 스프링/댐퍼 시스템은 Y, Z방향으로 동일한 구조를 가지고 있으므로 각 방향의 충격 가속도 및 변위가 동일하게 나타난다.

2.5 설치 각도 최적화

이 연구에서는 군사용 EOTS 방진 시스템의 설치 각도 최적화를 통해 x, y, z축 간의 공진주파수를 균등하게 조절하는 방법을 제시한다. 기존 연구들은 각 축의 공진주파수를 다르게 설정하는 데 중점을 두었는데, 이는 한 축의 공진주파수를 낮추는 것이 다른 축의 공진주파수를 상대적으로 높이는 결과를 초래하였다. 하나의 축 방향에서 공진주파수가 충분히 낮아 안정적인 성능을 보이더라도, 다른 축에서는 높은 공진주파수가 나타나면 EOTS의 전반적인 안정성이 크게 저하될 수 있다. 군사용 EOTS 방진 시스템은 모든 축에 대해 다양한 진동 환경에 노출되므로, 세 축에 대한 방진 성능이 동일한 수준을 유지해서 모두 저주파 영역의 방진성능을 안정적으로 확보해야 한다. 공진주파수의 범위는 스프링의 강성을 조절함으

로써 어느 정도 제어할 수 있다. 그러나 축 방향에 대한 공진주파수의 차이는 스프링의 강성 조절만으로는 해결하기 어렵다. 이러한 문제는 스프링과 댐퍼의 설치 각도를 최적화하여, 세 축 간의 공진주파수를 균등하게 설계함으로써 해결할 수 있다. 이 연구에서는 Table 3과 같이 설치 각도 약 40°에서 70° 사이에서 8 케이스를 선정하고 각 케이스 별 유한요소 모델을 구성하였다. 각 케이스 별 고유진동수는 Table 3과 Fig. 6으로 표현하였다.

Table 3과 Fig. 6을 살펴보면, 설치 각도에 따라 각 축 방향의 공진주파수가 변화하는 것을 확인할 수 있다. 앞서 설명한 바와 같이 모든 축에 대한 공진주파수가 가능한 한 균등하게 분포하도록 하는 것이 이

Table 3 Natural frequency depending on installation angle

Installation angle	Mode 1 [Hz]	Mode 2 [Hz]	Mode 3 [Hz]
40.87	5.8781	5.8791	10.53
46.44	6.2684	6.2695	10.068
49.65	6.6914	6.6954	9.5058
53.15	7.1432	7.1481	8.8231
56.95	7.6159	7.6192	7.9937
61	6.9925	8.0937	8.0965
65.2	5.8024	8.5516	8.5539
69.35	4.4158	8.9577	8.9584

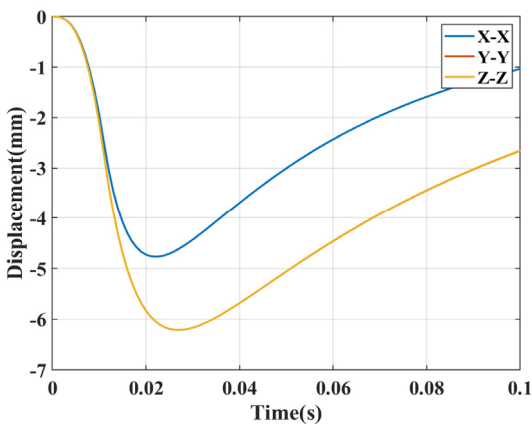


Fig. 5 Results of impact analysis

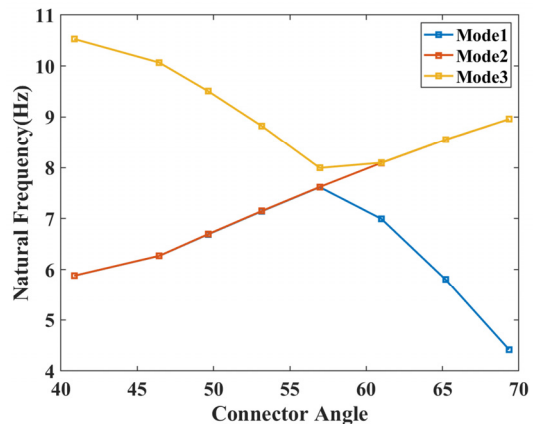


Fig. 6 Natural frequency (Mode 1 ~ 3) depending on installation angle

연구의 목적이다. 설치 각도가 40.87°에서 69.35°로 변할 때, Mode 1의 공진주파수는 56.95°까지 증가하다가 그 이상의 설치 각도에서는 감소한다. Mode 2의 공진주파수는 설치 각도가 증가할수록 증가한다. 반면에, Mode 3의 공진주파수는 설치 각도가 증가할수록 감소하다 56.95°에서 최소값을 가진 후 다시 증가한다. 따라서 설치 각도가 56.95°일 때 모든 축 방향의 공진주파수가 가장 균등하게 분포하고 있다. Mode 1과 Mode 2의 공진주파수는 각각 7.6159 Hz와 7.6192 Hz로, Mode 3의 공진주파수인 7.9937 Hz와 가장 유사하다. 이는 EOTS의 방진 성능이 모든 축방향에서 균형잡혀 있음을 의미하며, 따라서 설치 각도 56.95°가 가장 이상적인 설치 각도로 판단된다.

3. 결 론

이 연구는 군사용 EOTS의 스프링-댐퍼 방진 시스템에 대한 설치 각도의 최적화를 주요 목표로 하였다. EOTS는 x, y, z축에 대해 다양한 진동 환경에 노출되므로, 세 축에 대한 방진 성능이 동일한 수준을 유지해야 한다는 필요성이 있다. 공진주파수의 범위는 스프링의 강성을 조절함으로써 제어할 수 있으나, 축 방향에 대한 공진주파수의 차이는 스프링의 강성 조절만으로는 해결하기 어렵다. 이 문제는 스프링과 댐퍼의 설치 각도를 최적화하여, 세 축 간의 공진주파수를 균등하게 설계함으로써 해결할 수 있다. 이 연구에서는 설치 각도 약 40°에서 70° 사이에서 8 케이스를 선정하고 각 케이스 별 유한요소 모델을 구성하였다. 결과적으로, 설치 각도가 56.95°일 때 모든 축 방향의 공진주파수가 가장 균등하게 분포하였다. 모든 축에 대한 공진주파수가 균등하게 분포함으로써 EOTS의 방진 성능이 모든 축방향에서 균형잡혀 있음을 확인하였다. 따라서 설치 각도 56.95°가 가장 이상적인 설치 각도로 판단되었다. 이 연구를 통해 제시된 최적의 설치 각도는 EOTS의 방진 성능을 향상시키는 중요한 인자로 작용할 것이다. 이 연구는 초기 설계 단계에서의 성능 예측과 최적화에 초점을 맞추었으나, 추후 연구에서는 제작 후의 실험 결과와의 비교를 통해 이 모델의 예측 성능을 더욱 검증하고 개선할 필요가 있다. 이를 위해 설계안을 기반으로 한 시작품을 제작 중에 있으며, 제작이 완료된 후 해석과 동일한 규격 실험을 수행할 예정이다. 이를 통

해 더욱 정확한 설계 가이드라인을 제공하고, 방진 시스템의 성능을 효과적으로 개선하는 방향으로의 연구가 이어질 것으로 기대된다.

후 기

이 연구는 2022년도 한화시스템(주)의 재원을 지원받아 수행된 연구임.

References

- (1) Zhou, X. and Li, X., 2021, Trajectory Tracking Control for Electro-optical Tracking System Using Eso Based Fractional-order Sliding Mode Control, IEEE Access, Vol. 9, pp. 45891~45902.
- (2) Ren, W., Luo, Y., He, Q. N., Zhou, X., Deng, C. et al., 2018, Stabilization Control of Electro-optical Tracking System with Fiber-optic Gyroscope Based on Modified Smith Predictor Control Scheme, IEEE Sensors Journal, Vol. 18, No. 19, pp. 8172~8178.
- (3) Xu, C., Huang, D. and Liu, J., 2019, Target Location of Unmanned Aerial Vehicles Based on the Electro-optical Stabilization and Tracking Platform, Measurement, Vol. 147, 106848.
- (4) Song, A.-Y., Yim, S.-H., Kwon, B.-O., Han, D.-H. and 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, Vol. 31, No. 6, pp. 589~596.
- (5) Zhang, B., Nie, K., Chen, X. and Mao, Y., 2022, Development of Sliding Mode Controller Based on Internal Model Controller for Higher Precision Electro-optical Tracking System, Actuators, Vol. 11, No. 1, p. 16.
- (6) An, B. and Jeon, Y., 2023, Dynamic Analysis of EOTS Equipped with Vibration-proof Assembly, Journal of the Korea Academia-industrial Cooperation Society, Vol. 24, No. 11, pp. 726~732.
- (7) Wright, D., 2006, Failure of Plastics and Rubber Products: Causes, Effects and Case Studies Involving Degradation, Revised Edition, Rapra Technology Limited, Shrewsbury, United Kingdom.
- (8) Tritchew, S., Alas, R. and Lewis, M. D., 1999, Stabilized Platform System for Camera, United State Patent 5 897 223.

(9) Myers, J. R., Graves, R. W., Go, G. and Higgins, T. E., 2008, Three-axis Offset Damping System, United State Patent 7 320 389.

(10) Lewis, M. D., 2017, Platform Stabilization System, United State Patent 9 765 925.

(11) U.S. Department of Defense, 2014, Department of Defense Test Method Standard: Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, MIL-STD-810G w/Change 1.



Ilkwang Jang received the Ph.D. degree in Mechanical Engineering from Yonsei University. He is currently a Research Professor in the Department of Mechanical Engineering, Yonsei University. His research interests include structural vibrations,

and deep learning.



Yong Hoon Jang earned his Ph.D. in 1999 from the University of Michigan. He is presently serving as a full professor in the School of Mechanical Engineering at Yonsei University. His research focuses on structural vibrations, incorporating

the mechanisms of friction.