

감시정찰 전자광학장비용 스프링 안정화 장치 구조 설계 및 해석 연구

정윤주¹, 김수현¹, 남상현¹, 박인재¹, 박민균¹, 김태균¹, 양환석¹, 박승욱¹, 이승하^{1,†}¹LIGNEX1**The Structural Design and Analysis of Spring Stabilizer for Aircraft
Surveillance and Reconnaissance EO/IR Equipment**Yoonju Jung¹, Suhyeon Kim¹, Sanghyun Nam¹, Injae Park¹, Mingyun Park¹, Taekyun Kim¹,
Hwanseok Yang¹, Seungwook Park¹ and Seungha Lee^{1,†}¹LIGNEX1**Abstract**

In this research, the isolator and the inner gimbal inside of typical EO/IR equipment were replaced with a spring stabilizer. This Spring stabilizer system revealed an internal platform capable of external vibration damping and 6-DOF driving. This system was designed based on machined springs and spring modules of the spring stabilizer, structure, and other fixture. Through modal vibration analysis, suitable material for the spring was determined. Structural stability of the spring stabilization device was determined through random vibration analysis.

초 록

본 연구에서는 기존 항공기 탑재 EO/IR 장비 내부 짐벌과 방진구를 스프링으로 대체하여, 외부 진동 감쇠 효과와 6자유도 구동이 가능한 내부 플랫폼 시스템을 분석하였다. 제안한 스프링 안정화 장치는 기계제작 스프링과 스프링 모듈, 스프링 모듈-내부 플랫폼 간 연결을 위한 지지 구조물로 구성된다. 본 연구에서는 모드 해석을 통해 스프링의 재질을 선정하였으며, 랜덤 진동 해석을 통해 스프링 안정화 장치의 구조 건전성을 분석하였다.

Key Words : Structural Analysis(구조해석), Spring(스프링), Stabilizer System(안정화 시스템), Gimbal(짐벌), Random Vibration(랜덤 진동)

1. 서 론

4차 산업혁명 시대의 방위산업에서는 군 병력 감축과 미래 전장 환경에 대비하여 더욱 첨단화, 지능화된 임무 수행을 위한 무기체계 개발이 요구되고 있으며, 이를 위해 다양한 유/무인 항공기를 통한 감시정찰 장비의 개발의 중요성이 커지고 있다[1-3]. 특히 EO/IR(Electric Optic-Infrared) 영상 획득 장비는 감시정찰 분야를 위한 무인 항공기에 널리 활용되고 있는

임무 장비이다. EO/IR 영상 획득 장비는 주, 야간 영상 획득에 용이하지만 항공기 운용 환경에서 EO/IR 영상에 떨림이 발생할 수 있고, 항공기의 비행 속도 및 외란에 의해 표적 위치 정확도가 떨어질 수도 있는 위험이 존재한다. 특히 EO/IR 장비 내 광학 부품에 작용하는 미세한 진동은 광 경로 및 초점을 불안정하게 만들므로써 장비의 시선안정화(Line-of-Sight Stabilization)에 영향을 주게 된다[3]. 안정적인 영상 획득을 위해 일반적인 EO/IR 장비는 짐벌(Gimbal)내 배치 및 장착되어 있는데, 이때 짐벌은 외부 환경에서의 진동을 제어하여 EO/IR 장비의 영상을 안정된 환경에서 획득할 수 있도록 설계되어야 한다.

짐벌은 기동 환경에서 카메라의 구동과 진동을 감쇠

Received: Aug. 30, 2023 Revised: Oct. 16, 2023 Accepted: Oct. 26, 2023

† Corresponding Author

Tel: +82-31-26-9347, E-mail: seungha.lee@lignex1.com

©The Society for Aerospace System Engineering

하기 위해 Fig. 1(a)와 같이 외부 짐벌(Outer Gimbal), 내부 짐벌(Inner Gimbal)로 구성된다. 외부 짐벌은 방위각과 고각 구동부로 구성되며, 내부 짐벌은 외부의 진동을 차단하기 위한 방진구에 장착되어 시선을 안정화시키는 역할을 한다. 그리고 카메라 센서 조립체는 내부 짐벌에 장착된다[2]. 실제 항공기 외란이 카메라 센서 조립체로 인가될 때, 진동은 카메라의 시선을 흔들어 영상 흔들림이 발생하게 된다. 이러한 과정에서 짐벌 내에 있는 방진구와 내부 짐벌 모터 제어를 통해 항공기 외부로부터 오는 진동을 감쇠할 수 있다. 이를 통해 외란에서도 카메라 센서 조립체의 시선안정화를 이뤄내 높은 분해능의 영상 획득이 가능하다.

기존 EO/IR 장비는 항공기의 진동, 가속도 등 다양한 외부환경에 노출된 상태에서 운용되어야 하기에, 내부 짐벌에 모터와 베어링(Bearing), 방진구(Isolator)가 함께 장착된다[4]. 카메라 센서 조립체는 내부 짐벌을 구성하는 구조물과 방진구, 모터, 베어링으로 인한 공간적 한계로 한정된 공간을 가지게 된다. 카메라 센서 조립체의 공간 확보는 표적 식별 가능 거리 증대와 관련이 있기 때문에, 고성능 광학계 설계를 위해서는 카메라 센서 조립체의 가용공간 확보가 중요하다.

EO/IR 장비 경량화를 위해 M. D. Lewis[5]는 방진구를 스프링으로 대체하여 짐벌이 적용되지 않는 6자유도 시스템을 구현하였다. 또한 Cho 등[6]은 외부로부터 들어오는 외란을 외부 짐벌 자체에서 직접적으로 감쇠하는 것이 아닌 간접적으로 FSM(Fast Steering Mirror)과 제어 등을 통해서 회피하는 방식을 사용해왔다. 또한 내부 짐벌 및 다양한 장치들이 직접적으로 연결되어 구속됨에 따라 회전이 어려운 문제점이 있다. 회전을 할 수 없다는 제약 사항은 제한된 시야각에서만 영상 획득을 진행하여야 하며, 만약 시야각 이상의 영상 획득을 위해서는 플랫폼 자체가 직접적으로 회전 기동하여야 한다. 이에 반해 6자유도 시스템은 외란을 직접적으로 감쇠시키며, 카메라 센서 조립체가 다른 구조물과 독립적으로 스프링을 통해 연결되어 회전을 하는데 있어 높은 자유도를 지닌다.

본 연구에서는 M. D. Lewis[5]가 제안한 6자유도의 안정화 시스템의 적용 가능성 판단과 무인 항공기 플랫폼에 탑재되는 영상 획득 탑재체의 경량화와 공간 확보를 목적으로 스프링 안정화 장치를 분석하였다. Fig. 1 (b)는 기존 EO/IR장비를 스프링 안정화 장치의 컨셉으로 나타낸 모식도이다. Fig. 1 (a)에 적용된 기존 내부 짐벌의 베어링과 모터를 6개의 LVCA(Linear Voice Coil Actuator)로 대체하였다. 따라서 Fig 1 (b)는 외부 짐벌의 역할을 하는 구조물과 방진구를 대체하는 스프링 모듈(Spring Module), 카메라 센서 조립체를 연결하는 안정화 장치로 이루어져 있다. 그리고 카메라 센서 조립체는 스프링 모듈 8개가 지지되는 구조로 설계하였다. 본 논문에서는 스프링 안정화 장치 구현을 위해 기계제작 스프링과 치구 등을 설계하였으며, 스프링에 대한 구조 건전성을 분석하기 위해 구조해석을 진행하였다. 스프링 설계에 대한 구조건전성을 확인하기 위해 카메라 센서 조립체는 더미로 설계하였다.

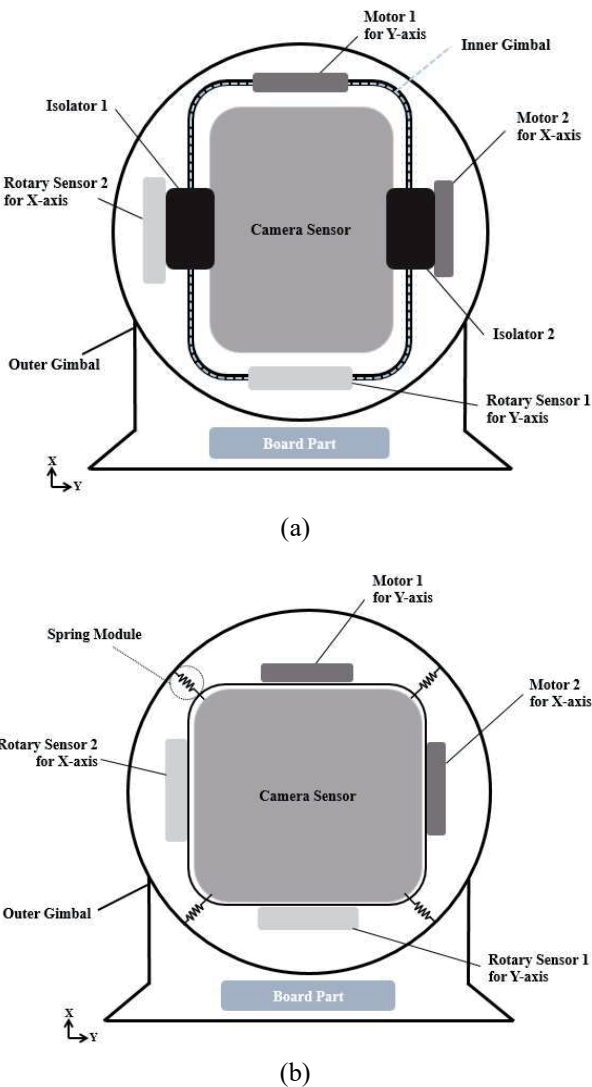


Fig. 1 Schematic Diagram of Gimbal Design ((a) Typical EO/IR Equipment, (b) Spring Module Stabilizer)

2. 본 문

2.1 스프링 모듈 설계

스프링 안정화 장치는 스프링 모듈과 LVCA를 사용하여 내부 플랫폼의 6자유도 시스템을 가능하게 하는

시스템으로, 통상적인 무인기용 EO/IR 장비의 개발 규격을 기준으로 추가적인 짐벌구조 없이 (1) ~ (4)의 설계 요구 조건을 만족해야 한다.

Resonant Frequency: The resonance frequency of the stabilizer should be 15 - 20 Hz. (1)

Stabilizer Structure: The spring module should be attached at the 8 corners of the camera dummy module. (2)

Stabilization Accuracy: The stabilization accuracy, which is the result of the aircraft vibration simulation test of the stabilizer, must be within 10 μ rad. (3)

Spring Specificity: The spring must deform within 1 mm maximum at 1.0 G. (4)

스프링의 축 방향과 횡 방향에 대한 스프링 강성 값은 Eq. 1 ~ 3을 통해 계산을 수행하였으며, 여기서 r_o 는 스프링 중실 반지름, r_i 는 스프링 중공 반지름, L 은 스프링 길이를 나타낸다. 그리고 E 는 재료의 탄성계수, I 는 관성모멘트, A 는 스프링의 원통면 넓이를 나타낸다.

Equation 4 ~ 6은 스프링의 축 방향(Axial), 횡 방향(Radial)의 스프링 상수를 계산하는 식으로, f_n 는 스프링 안정화 장치 시스템에서 목표하는 고유진동수를 나타낸다. 그리고 K_a 는 축 방향 스프링 상수, K_r 은 횡 방향 스프링 상수, K_{sys} 는 전체 시스템의 스프링 상수, K_{mod} 는 스프링 모듈의 스프링 상수를 나타낸다.

$$K_{a,cylinder} = \frac{\pi E(r_o^2 - r_i^2)}{L} \quad (1)$$

$$K_{r,cylinder} = \frac{3EI}{L^3} \quad (2)$$

$$\frac{K_a}{K_r} = \frac{AL^2}{3I} \quad (3)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{sys}}{m}} \quad (15 \leq f_n \leq 20) \quad (4)$$

$$K_a < 5K_r \quad (5)$$

$$K_{sys} = K_{a,mod} + K_{r,mod} \quad (6)$$

Table 1은 카메라 센서 조립체 무게가 고려된 스프링 개수 별 스프링 상수 결과를 나타낸다. 스프링 안정화 시스템은 제한된 공간 안에서 시스템이 요구하는 스프링 상수 값을 충족하며 스프링 모듈이 더미를 지지해야 한다. 제한된 공간으로 인해 지름과 길이가 정해진 스프링의 강성으로 카메라 센서 조립체의 무게가 고려된 더미와 자중을 고려하였을 때 하나의 모듈 당 3개 이상의 스프링이 병렬적으로 연결되어야 한다.

또한 Eq. 5 ~ 7의 계산된 스프링 강성의 비와 Eq. 8 ~ 10 스프링 상수의 결과 값을 바탕으로 설계될 스프링 모듈의 면적에서는 모듈 당 4개 이하의 스프링을 병렬적으로 연결하는 것 가능했으나, 스프링 모듈을 장치에 장착할 때의 조립의 용이성과 양산이 아닌 Proto-type 스프링의 제작성, 경제성을 고려하여 하나의 모듈 당 3개의 스프링을 사용한 스프링 안정화 장치를 제안하였다.

Fig. 2는 센서 조립체에 부착되는 스프링 모듈의 형상이다. 설계된 3개의 스프링을 배치하여 조립하면 구조물-스프링 모듈-센서 조립체 연결 시 스프링의 방향성을 고려하지 않고 장착이 가능한 장점을 지닌다. 이뿐만 아니라 장착 시 외력에 의한 스프링의 변형을 최소화할 수 있는 이점이 있다.

Table 1 Single Spring Constant according to the Number of Springs in the Module

Number of Springs	$K_{a,spring}$ (N/mm)		$K_{r,spring}$ (N/mm)		$K_{a,spring} + K_{r,spring}$ (N/mm)	
	min	max	min	max	min	max
1	37.04	65.74	0.71	1.26	37.75	67.00
2	18.52	32.87	0.36	0.63	18.88	33.50
3	12.34	21.91	0.24	0.42	12.58	22.33
4	9.26	16.43	0.18	0.32	9.44	16.75



Fig. 2 Spring Module Configuration

2.2 스프링 안정화 장치 유한요소모델

스프링에 대한 구조 건전성을 파악하기 위해 상용 프로그램 ANSYS MECHANICAL 2022 R2를 사용하여 구조해석을 수행하였다.

Figure 3는 스프링 안정화 장치의 FEM(Finite Elements Model) 형상을 나타낸다. FEM은 Solid Element로 구성되며, 센서 조립체의 구성품인 더미(Dummy)와 IMU(Inertial Measurement Unit)는 Single

Point Mass를 이용하여 각각의 무게중심점에 배치하였다. 격자는 총 9,905,219 Nodes와 6,516,914 Elements로 구성하였으며, 이에 대한 결과를 Table 2에 정리하였다. 해석 모델의 구속 조건으로는 스프링 구조물 체결 부에 6 자유도 구속(Fixed) 조건을 부여하였다. 구조해석 모델링은 Force Balancing Check를 통해 각 축에 대해 스프링 안정화 장치에 따른 Force 응답이 동일하게 도출됨으로부터 유한요소모델의 유효성을 검증하였다.

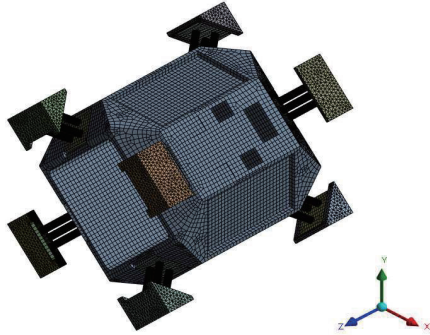


Fig. 3 FEM of Spring Stabilizer

Table 2 FEM model Summary

Total Nodes	9,905,219
Solid Elements (Tet10 / Hex20 / Pyr13)	6,516,914 (5,788,323 / 250,250 / 478,341)
Single point masses	2

2.3 스프링 안정화 장치 모드 해석

설계된 스프링 안정화 장치의 구조설계 요구조건은 진동 환경에서 1차 고유진동수가 15 Hz ~ 20 Hz 이내 이고, 각 축에 진동 하중 적용 시 스프링 안정화 장치의 구조 건전성이 확보되어야 한다.

Table 3는 해석에 사용한 스프링의 4가지 물성 조건을 나타낸다. 스프링의 재질들은 민수, 방산분야에서 많이 사용되는 재질로 선정하였으며 각 재질에 따라 모드, 랜덤 진동 해석을 수행하였다.

Table 3 Material Properties of Springs

Material	Modulus of Elasticity (GPa)	Poisson's Ratio	Density (kg/m ³)
Al6061-T6	68.3	0.33	2710
Ti-6Al-4V	113.8	0.342	4430
SUS304	193	0.31	7750
C17200	125	0.3	8250

Table 4는 스프링 재질에 따른 스프링 안정화 장치의 고유진동수 결과를 나타낸다. 알루미늄(Al6061-T6) 기반의 스프링과 스테인리스(SUS304) 기반 스프링에 대한 모드 해석 결과, 1차 고유진동수가 각각 13.7 Hz, 22.4 Hz로 요구조건을 만족하지 못하였다. 하지만 티타늄(Ti-6Al-4V), 베릴륨 쿠퍼(C17200)의 두 재질의 1차 고유진동수가 각각 16.9 Hz, 18.0 Hz로 요구조건을 만족함을 확인하였다.

Table 4 Comparison of Structural Analysis Result using Modal by Each Spring Material

Material	Frequency (Hz)					
	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	6 th
Al6061-T6	13.65	13.65	16.78	45.51	45.59	49.08
Ti-6Al-4V	16.94	16.94	20.83	54.38	56.36	60.77
SUS304	22.43	22.43	27.58	49.49	49.57	51.45
C17200	18.04	18.04	22.19	47.16	47.24	50.04

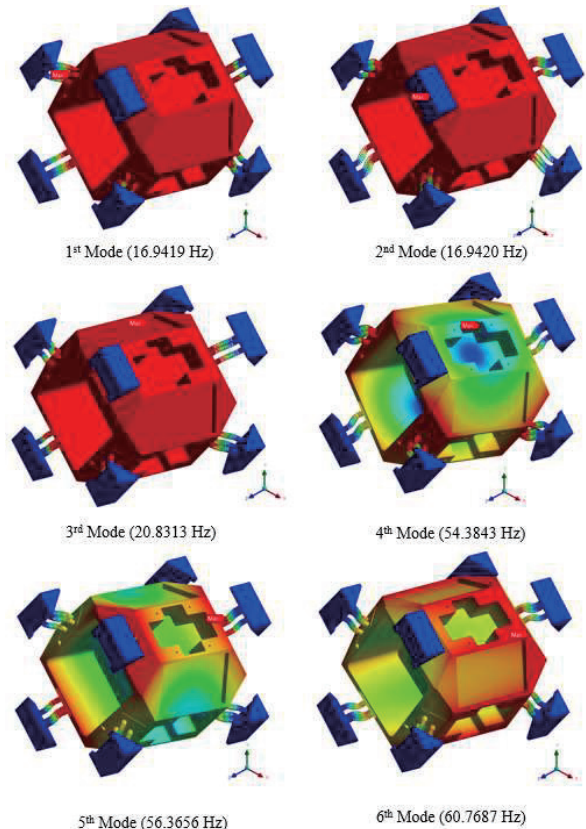


Fig. 4 Modal Analysis Results of the Titanium Based Spring Module

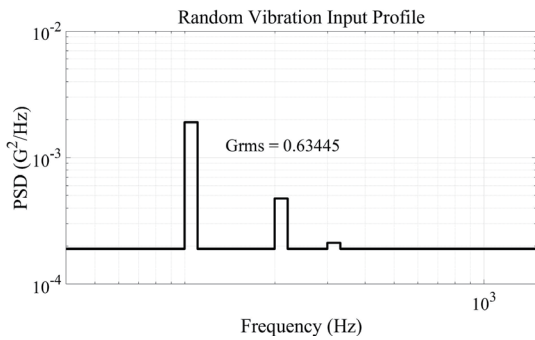
Figure 4는 티타늄 재질의 스프링을 적용한 스프링 안정화 장치의 모드 해석 결과이다. 모드 해석은 대표적으로 티타늄에 대해서만 정리하였으며, 다른 재질 적

용 시에도 동일 모드 형상을 나타냄을 확인하였다. 모드 해석 결과로부터 1차 고유진동수와 2차 고유진동수가 동일함에 따라 설계 스프링은 횡 방향에 따른 응답 차이가 없음을 알 수 있다.

2.4 스프링 안정화 장치 랜덤 해석

모드 해석 이후 스프링 안정화 장치의 구조 건전성 검토를 위해 랜덤 해석을 수행하였으며, Fig. 5는 랜덤 진동 해석에 사용한 진동 프로파일을 나타낸다. 본 진동 프로파일은 일반적인 고정익기의 진동 특성을 계측하여 생성한 것으로 본 스프링 안정화 장치 적용에 타당한 진동규격이다.

스프링 구조물에 발생하는 최대 응력으로부터 안전 여유(MoS, Margin of Safety)를 Eq. 7을 이용하여 계산하였다. 여기서, σ_{allow} 은 재료의 허용 응력, σ_{max} 는 구조해석으로부터 계산된 최대 응력, 그리고 $S.F$ 는 계수를 나타내며 항복 응력에 대해서는 1.25, 극한 응력에 대해서는 1.5의 값을 적용하였다[7].



No.	Frequency (Hz)	Power Spectral Density (G²/Hz)	G _{rms}
1	105 ± 5%	19.04 × 10 ⁻⁴	0.6345
2	210 ± 5%	4.7591 × 10 ⁻⁴	
3	315 ± 5%	2.1152 × 10 ⁻⁴	
Etc.	15~2000	1.9037 × 10 ⁻⁴	

Fig. 5 Specification of Random Vibration Input Data Profile

Table 5는 상기 응력으로부터 Eq. 11을 이용한 MoS 계산 결과를 나타낸다.

$$MoS = \frac{\sigma_{allow}}{S.F \times \sigma_{max}} - 1 > 0 \quad (7)$$

티타늄과 베릴륨 쿠퍼 재질 적용 시 각 축에 대한 MoS가 모두 0.7 이상임을 확인할 수 있었으며, 두 재질의 경우 주어진 랜덤 하중에 대한 스프링 안정화 장치의 구조 건전성이 확보됨을 확인하였다. 특히 티타늄 재질에서 가장 높은 안전 여유 값을 가진 것을 알 수 있었다.

Table 6 Random Vibration Results; Max. Deformation

Material	Max. Deformation (mm)		
	X Dir.	Y Dir.	Z Dir.
Al6061-T6	0.281	0.281	0.904
Ti-6Al-4V	0.905	0.905	0.669
SUS304	0.608	0.608	0.442
C17200	0.833	0.833	0.610

추가적으로 랜덤 하중에 대한 스프링의 변위 해석을 수행하였다. Table 6는 랜덤 하중에 대한 스프링의 변위 해석 결과이며, 해석 결과 모든 재질의 변위가 요구 조건인 1 mm 이내를 만족하였다. 위의 결과들을 바탕으로 스프링 안정화 시스템의 스프링에서는 티타늄과 베릴륨 쿠퍼의 재질이 적합하다는 점을 알 수 있었다. 티타늄은 베릴륨 쿠퍼에 비해 밀도 대비 높은 탄성 계수로 인한 강성과 중량적 이점의 소재적 특성을 가지고 있다. 또한 절삭 가공에 있어 범용적으로 많이 사용되며 기계 가공 스프링 부분에서 제작성과 경제성이 더 좋기 때문에 티타늄을 스프링 안정화 장치의 최종 스프링 재질로 선정하였다. 해석 결과를 바탕으로 안전 여유의 마진이 좀 더 있는 티타늄 소재의 스프링을 사용하여 스프링 안정화 장치의 시스템에서의 구조 건전성의 확보를 기대한다.

Table 5 Comparison of Structural Analysis Result using Random Vibration by each Spring Material

Material	Yie. Stress (MPa)	Ult. Stress (MPa)	Max Stress (MPa)			Safety Factor		Margin of Safety(MoS)					
			X Dir.	Y Dir.	Z Dir.	Yie.	Ult.	X Dir.		Y Dir.		Z Dir.	
								Yie.	Ult.	Yie.	Ult.	Yie.	Ult.
Al6061-T6	276	310	64.14	64.16	226.53	1.25	1.5	2.44	2.22	2.44	2.22	-0.03	-0.09
Ti-6Al-4V	880	950	465.61	465.59	368.34			1.13	0.92	1.13	0.92	1.63	1.36
SUS304	207	586	376.20	376.29	300.63			-0.56	0.04	-0.56	0.04	-0.45	0.30
C17200	724	896	333.19	333.28	268.29			0.74	0.79	0.74	0.79	1.16	1.23

3. 결 론

기존 EO/IR 장비는 짐벌 구조를 통해 외란 제어로 시선을 안정화 시키는 구조였다. 본 연구에서는 내부 짐벌과 방진구를 스프링으로 대체하는 6 자유도 시스템의 선형연구를 바탕으로 직접적인 진동 감쇠 효과와 내부 플랫폼의 회전에 대한 높은 자유도를 지닌 스프링 안정화 장치를 설계하였다.

제안한 스프링 안정화 장치는 기존 EO/IR장비의 구성 부품을 기계제작 스프링을 포함한 스프링 모듈과 그 외 안정화 장치 치구 등의 제작을 수행하고 해석을 통해 해당 시스템에 대한 분석을 진행하였다.

약 17 kg 센서 조립체의 8개 지점에서 스프링 모듈을 장착할 시 구조적 안정성을 확보하기 위해 스프링을 병렬적으로 연결해야 했으며, 계산 결과 지점 당 3개의 스프링이 연결돼야 함을 알 수 있었다. 또한, 스프링 제작 시 가공성과 재질을 고려하여 대칭 구조물을 적용하여 조립 용이성을 향상시켰다.

스프링 안정화 장치의 모드 해석을 통해 설계된 형상의 고유진동수와 스프링 형상에 적합한 재질을 선별하였다. 결과적으로 티타늄과 베릴륨 쿠퍼 스프링은 각 16.9 Hz, 18.0 Hz로, 요구조건인 15 Hz ~ 20 Hz의 고유진동수를 만족하였다. 해석 결과를 통해 1차 고유진동수와 2차 고유진동수가 동일함에 따라 대칭 구조로 설계된 스프링은 횡 방향에 따른 응답 차이가 없는 점을 확인하였다.

랜덤 진동 해석을 통해 스프링 안정화 장치의 구조 건전성을 확인하였으며, 스프링의 재질을 선정하였다. 해석 결과 값과 구조체의 최대 응력, 안전 계수를 활용하여 MoS를 계산했을 때 티타늄과 베릴륨 쿠퍼 재질의 스프링을 이용한 스프링 안정화 장치의 MoS 값이 각 축에 대해 모두 0.7 이상임을 확인하였다. 또한, 두 재질 모두 랜덤 진동에 대한 스프링 변위 요구조건인 1 mm 이내를 만족함을 확인했다. 티타늄 재질은 베릴륨 쿠퍼 재질을 적용했을 때 보다 더 높은 안전 여유 값을 가졌다. 티타늄 기반의 스프링 적용 시 스프링 안정화 장치의 구조 건전성이 보다 확보됨에 따라 스프링 안정화 장치의 스프링의 재질을 티타늄으로 선정할 수 있었다.

본 연구에서는 기계적 관점에서 스프링을 이용한 안정화 장치의 설계 및 해석을 통해 구조 건전성을 분석하였다. 현 설계 결과가 16.9 Hz로 요구조건인 공진주파수가 15 Hz ~ 20 Hz 로서 기존 EO/IR 장비를 스프링 이용 안정화 장치로 대체 가능하며, 다양한 환경의 항공기 플랫폼용 전자광학 장비로 사용이 가능할 것으로 판단된다. 하지만 해당 시스템을 실제로 구성했을 때, 공진주파수가 15 Hz ~ 20 Hz임에 따른 40 Hz Band

Width 내에서 제어 시스템의 원활한 여부와 구조건전성의 확인이 필요하다. 따라서 본 시스템 설계에 제어 시스템을 통합하여 실 시험을 통해 동적 특성에 대한 추가 검증이 필요하다. 또한, 항공기의 이착륙 시 발생되는 충격 하중에 대한 구조 건전성 여부 등 실용화에 대한 추가적인 부분도 검토되어야 할 필요성이 있다.

References

- [1] D. K. Shin, J. Y. Kim, J. K. Kim and C. H. Kwon, "A Study on the Development of a Ground Control System for Surveillance and Reconnaissance in Concealed and Covered Areas using Drone", *KSAS 2020 Fall Conference*, 867-868, Nov. 2020
- [2] J. W. Ahn, S. W. Noh and T. H. Kim, "An Empirical Study on the Prediction of Future New Defense Technologies in Artificial Intelligence", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 21(9), 458-465, 2020
- [3] H. T. Kang, "Direction of Operation of ROKA RPA for Future Warfare", *The Quarterly Journal of Defense Policy Studies*, 123, 7-33, 2019
- [4] A. Y. Song, S. H. Yim, B. O. Kwon, D. H. Han and H. J. Jung, "Structural Design through Test and Analysis of Structure Equipped with Vibration Isolator System", *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.*, 31(6), 589~596, 2021
- [5] M. D. Lewis, "Platform Stabilization System.", U.S. Patent No. 9,348,197, 24, May 2016
- [6] H. K. Cho, J. H. Rhee and J. H. Lee, "Three-axis Spring Element Modeling of Ball Bearing Applied to EO/IR Camera and Structural Response Analysis of EO/IR Camera", *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, 39(12), 1160-1165, 2011
- [7] G. E. Muller and C. J. Schmid, "Factor of Safety-USAF Design Practice" *Air force Flight Dynamics Lab Wright Paterson AFB*, 1978