

고속 고기동 비행체용 짐벌 시스템의 질량불균형 및 진동 감소를 위한 동조질량감쇠기(TMD) 활용 연구

A study of Tuned Mass Damper (TMD) Application for Mass Imbalance and Vibration Reduction in Gimbal Systems for High-speed Maneuverable Vehicles

김준수^{1,#}, 이동균¹, 이종국¹, 조현준¹, 정지인²

Jun-Soo Kim^{1,#}, Dong-Kyun Lee¹, Jong-Kuk Lee¹, Hyeon-Jun Cho¹, and Ji-in Jung²

1 LIG 넥스원 기계연구소 (Mechanical Engineering R&D Lab, LIG Nex1 Co., Ltd.)

2 국방과학연구소(Agency for Defense Development)

Corresponding Author / E-mail: Junsoo.kim@lignex1.com, TEL: +82-31-8026-4465

ORCID: 0009-0005-7707-6139

KEYWORDS: Disturbance torque (외란 토크), Transmissibility (전달률), Finite element analysis (유한요소해석), Dual axis gimbal (2축 짐벌), Anti-vibration design (내진설계)

This study proposed a method for simultaneously reducing mass imbalance and vibration in gimbal systems utilizing a tuned mass damper (TMD) as a balancing weight. Finite element analysis (FEA) and experiments were used for testing the method. Mass imbalance in gimbal systems generally causes external disturbance torque. To reduce this, a balancing weight can be used. However, weight increase due to balancing weight causes resonance in the gimbal system, which generates bias error in the gyroscope sensor. This study demonstrated that both mass imbalance reduction and vibration reduction effects could be achieved by utilizing a TMD as a balancing weight. FEA results showed that the mass imbalance reduction effect of the gimbal was not affected by TMD. The magnitude of vibration response at the resonance point was reduced by about 98% with TMD. When a TMD was applied, the magnitude of the vibration response at the resonance point was reduced by 98% to the same level as that of the gimbal. Bias error of the gyroscope sensor was reduced by about 95% or more. These results show that a TMD is useful for effectively reducing mass imbalance and vibration in gimbal systems while improving gyroscope sensor performance.

Manuscript received: June 25, 2024 / Revised: September 24, 2024 / Accepted: October 2, 2024
This paper was presented at KSPE Spring Conference in 2024

1. 서론

짐벌은 외부 감지용 센서를 운용자가 의도하는 방향으로 지향하는 기계장치를 의미하며, 지상형 장비, 항공기, 무인기 등 다양한 플랫폼에서 사용된다.

짐벌은 플랫폼 성능향상에 따라 점점 가혹한 운용환경에 노출되고 있으며, 정밀하고 안정적인 구동 제어를 요구받고 있다.

기존 많은 연구에서 가혹한 운용환경 극복을 위해 기어 구동 방식의 짐벌을 사용해 왔다.

기어 구동 방식은 모터 출력을 증폭할 수 있다는 장점과 기어 백래시로 인한 공진, 응답 지연으로 구동 정밀도 성능이 떨어진다는 단점을 가지고 있다.

Baek 등은 기어 감속이 포함된 2축 짐벌의 백래시의 기여율 및 크기를 주파수응답특성으로 추정하는 방법에 대한 연구를 수행하였다[1].

백래시 추정을 통해 구동 정밀도 향상이 가능하지만 기어 구동 방식에 따른 한계점이 존재하기 때문에 이를 개선하기 위한 설계가 필요하다.

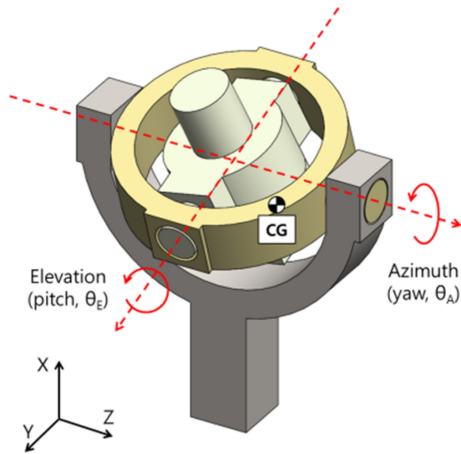


Fig. 1 Schematic diagram of dual axis direct drive gimbal system

백래시 문제 해결을 위해 Fig. 1과 같은 직구동 짐벌 설계가 고려되었다.

직구동 방식은 기어 구동 방식 대비 높은 구동 정밀도를 갖는 반면 낮은 출력으로 인해 외란 토크에 취약하다는 단점을 가진다.

Lim 등은 직구동 짐벌의 질량불균형을 측정하여 이를 제어 변수로 활용하는 보상제어기 설계 및 안정화 알고리즘 연구를 진행하였다[2-5].

Yeo 등은 질량불균형의 측정값 및 자이로 센서의 각속도 측정값을 보상제어에 활용하는 연구를 진행하였다[6-8].

가속도 외란이 작을 경우 보상제어 방식은 짐벌 정밀 제어에 효과적이다. 하지만 고속 고기동 플랫폼과 같이 가속도 외란이 큰 경우 질량불균형에 의한 외란이 증가하여 모터 토크 대부분을 외란 토크 제어에 할당해야 한다.

보정추(Counter Mass)는 회전부 무게중심을 회전중심으로 조정하여 질량불균형을 줄이는 역할을 수행한다.

Kim 등은 짐벌에 보정추를 적용하여 질량불균형을 000 gf-mm 이하로 보정하였으며, 원심 가속도 시험을 수행하였다. 그 결과 질량불균형의 저감을 통한 외란 토크 감소효과를 확인하였다[9].

보정추의 중량은 정적 환경에서 외란 토크를 저감하나, 동적 환경에서 공진을 유발하여 자이로센서 오동작 및 짐벌 성능 저하를 야기할 수 있다.

Kim 등은 기계 구조물의 일부를 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper, TMD)로 활용하여 진동을 저감하는 연구를 진행하였다. TMD는 주 구조물의 진동 에너지를 흡수하는 부가 질량체로, 별도의 중량 증가 없이 진동을 저감할 수 있어 효과적이다[10-13].

본 연구는 짐벌 보정추를 TMD로 대체하여 자이로센서 오동작 문제를 해결하고자 하였다.

진동환경에서 질량불균형이 짐벌에 미치는 영향을 해석을 통해 분석하고, TMD형 보정추 설계를 통한 질량불균형 저감 및 공진 저감 효과를 해석과 실험으로 검증하여 고속 고기동 환경에 적합한 짐벌 보정추 설계 기준을 제시하고자 한다.

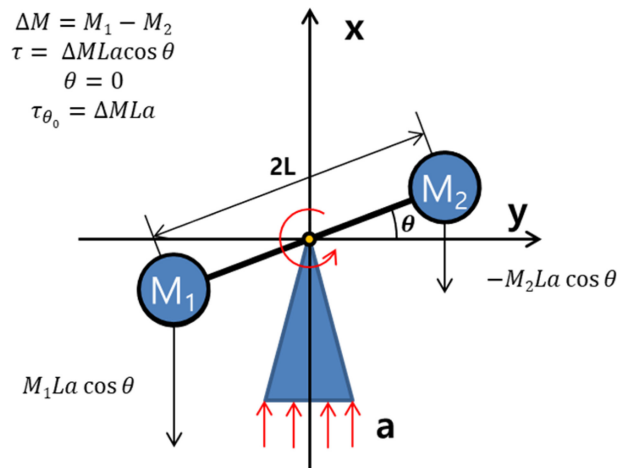


Fig. 2 Simple model of gimbal with two point mass

2. 강제 짐벌의 질량불균형 특성 분석

짐벌의 질량불균형과 외란이 짐벌에 미치는 영향을 분석하기 위해 Fig. 2의 모델을 구성하였다.

질점이 2개인 강제 짐벌의 질량불균형은 $\Delta M \times L$ 이다.

짐벌의 회전 각도가 0이고 정적가속도가 a 일 때 외란토크는 ΔMLa 이다.

짐벌의 초기각도와 초기각속도는 0이라 가정하고, 매우 작은 각도로 움직인다 가정하였다.

동적가속도가 $a \cos \omega t$ 가 일 때 짐벌의 지배방정식은 식(1)과 같으며, 감쇠 및 강성을 무시할 경우 식(2)와 같이 정리된다. 또한 각속도는 식(3)과 같다.

$$I\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K\theta = \Delta MLa \cos \omega_a t \tag{1}$$

$$I\ddot{\theta} = \Delta MLa \cos \omega t \tag{2}$$

$$\dot{\theta} = \frac{\Delta MLa}{I\omega} \sin \omega t \tag{3}$$

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \tau = \lim_{\omega \rightarrow 0} I\dot{\theta} = \Delta MLa \tag{4}$$

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \dot{\theta} = \frac{\Delta MLa}{I} t \tag{5}$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \dot{\theta} = 0 \tag{6}$$

외란 주파수 ω 가 0으로 수렴할 때 이를 준 정적 상태로 가정할 수 있다. 식(4)를 통해 정적가속도 환경과 동일한 외란토크가 짐벌에 작용함을 확인하였다.

식(3), 식(5) 및 식(6)을 통해 질량불균형 성분에 의한 각속도 외란은 ω 가 0으로 수렴할 때 가장 크고, 외란 주파수 ω 에 반비례하여 작아짐을 확인할 수 있다.

외란 토크 증가는 모터 소요토크 증가의 원인이며, 각속도 외란의 증가는 자이로센서 오동작을 유발한다. 따라서 질량불균형을 감소시킬 필요가 있다.

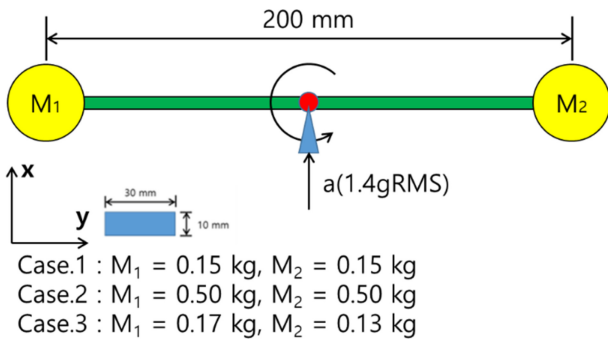


Fig. 3 Simplified model of gimbal for dynamic response analysis

Table 1 Effective mass and natural frequency of the model

	Natural frequency (Effective mass)	
	1 st	2 nd
Case.1	0(100%)	270(83%)
Case.2	0(100%)	154(93%)
Case.3	0(100%)	272(82%)

강체 모델 및 여러 가지 가정을 통해 분석한 결과와 달리 실제 짐벌은 다자유도로 구성되며, 실제 외란은 구동각도와 커플링 된 형태로 존재하여, 이론해 유도에 어려움을 갖는다. 따라서 이를 분석하기 위해 수치해석 및 실험 등을 수행하였다.

3. 유연체 짐벌의 질량불균형 및 공진 특성 분석

유연체 짐벌의 질량불균형 및 공진 영향을 분석하기 위해 Fig. 3과 같은 단순화 모델을 구성하였다.

짐벌의 폭과 높이가 각각 30, 10 mm이고 길이가 200 mm인 알루미늄 재질의 빔으로 구성되고, 양쪽 끝단에는 질량불균형 보정추가 달려있다.

짐벌의 특성을 비교분석하기 위해 보정추를 3가지로 구성하였다.

Case 1은 질량불균형 크기가 0 gf-mm이며, 질량불균형 저감용 보정추의 총 중량이 300 g인 짐벌이다.

Case 2는 질량불균형 크기가 0 gf-mm이며, 질량불균형 저감용 보정추의 총 중량이 1,000 g으로 Case 1 대비 큰 모델이다.

Case 3는 질량불균형의 크기가 4,000 gf-mm이며, 질량불균형 저감용 보정추의 총 중량이 300 g인 짐벌이다.

짐벌의 회전 모사를 위해 유연체 중심에 힌지 형태의 경계조건을 설정하였다.

진동 해석의 하중 조건은 10-2,000 Hz, 1.4 grms의 크기로 힌지에 x축 방향으로 작용한다.

각 해석 모델의 공진주파수 및 유효질량 해석 결과를 Table 1에 정리하였다.

짐벌의 1차 모드는 짐벌 회전중심에서 발생하며, 주파수는 0 Hz이다. (힌지 회전 모드)

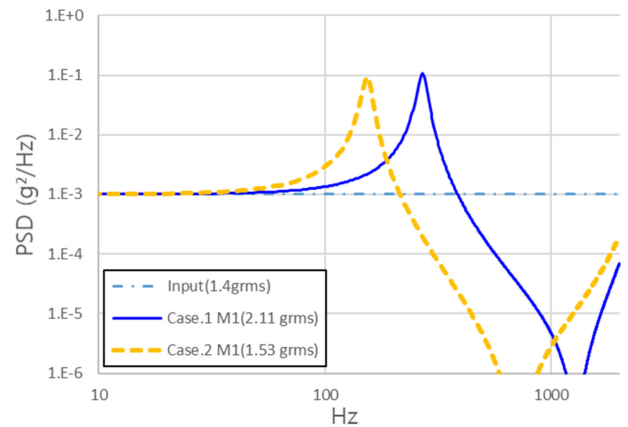


Fig. 4 Comparison results of dynamic response analysis at counterweight position

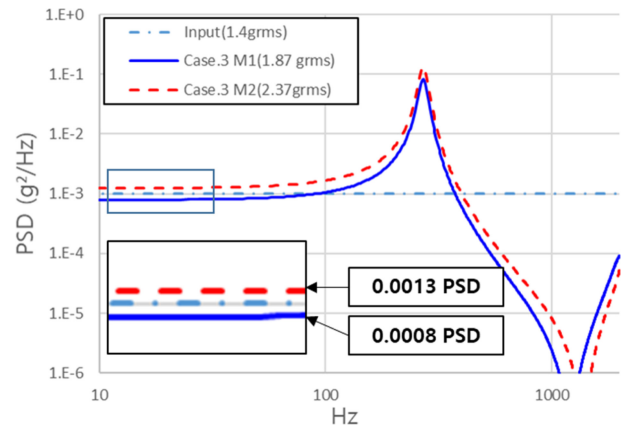


Fig. 5 Comparison results of dynamic response analysis at positions m1 and m2 in case 3

짐벌의 2차 모드는 각각 270, 154, 272 Hz에서 발생하였으며, 보정추 중량 차에 따른 유효질량 차이를 확인할 수 있다.

Fig. 4는 Case 1, 2의 M_1 위치에서 확인한 가속도 진동응답 해석 결과이다.

두 모델의 질량불균형은 0이다. 따라서 두 모델은 외란 토크에 의한 회전은 발생하지 않는다.

해석 결과 두 모델은 보정추 중량 차이에 따른 공진주파수 차이를 갖으며, 공진점에서 가속도 증폭률은 각각 106, 94 이다.

Fig. 5는 Case 3의 M_1 , M_2 위치에서 확인한 가속도 진동응답 해석 결과이다.

해석모델은 질량불균형이 4,000 gf × mm이다. 따라서 외란 토크에 의한 회전이 발생한다.

Case 3의 해석 결과 Case1, 2와 달리 M_1 , M_2 위치에서 가속도 응답 이격이 발생함을 확인할 수 있다.

하지만 선형 가속도의 차이를 분석하여 질량불균형에 의한 회전 외란 특성을 비교에는 근거가 부족하다.

따라서 선형 가속도 응답 결과로는 회전 응답 발생 여부를 판단할 수 없다.

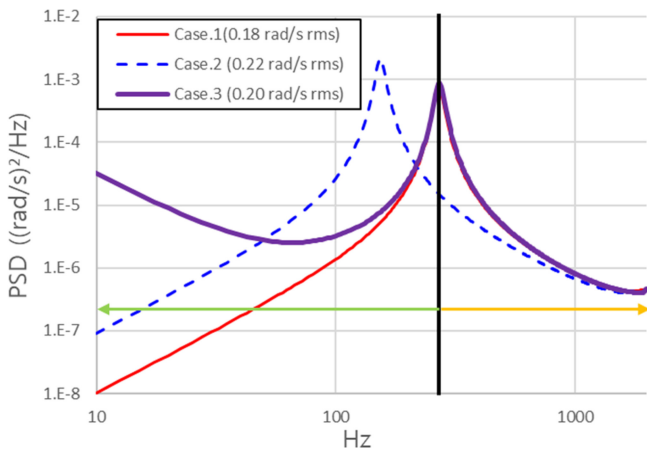


Fig. 6 Comparison results of angular velocity response analysis at counterweight position

실제 시험을 통한 계측도 선형 가속도 센서를 통해 진행하기 때문에 회전 여부를 확인하는 데 어려움이 있다. 따라서 좀 더 직관적인 비교를 위해 각속도 응답 결과를 비교하였다.

각 모델의 각속도 응답 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

질량불균형이 없는 Case 1, 2의 각속도 해석 결과 Case 2의 공진주파수에서 각속도 증폭량이 Case 1 대비 2.8배 더 크게 발생하였다.

앞서 강제 모델의 이론해를 통해 각속도 응답은 질량불균형에 비례하고, 주파수 ω 에 반비례함을 알 수 있다. 따라서 보정추 중량이 작고 공진주파수가 높을수록 각속도 증폭량은 낮아질 것을 유추할 수 있다.

두 모델의 해석 결과를 통해 보정추 중량 증가에 따른 공진주파수 감소가 짐벌 각속도 응답에 미치는 영향을 간접적으로 확인할 수 있다.

두 모델은 질량불균형에 의한 회전 토크가 발생하지 않는다. 따라서 공진주파수에서 발생한 각속도 증폭은 유연체 모드에 의해 국부적으로 발생한 것이다.

이러한 국부적인 각속도 응답은 자이로센서의 오작동을 유발할 수 있다.

Case 1, 3의 각속도 해석 비교 결과 질량불균형 유/무에 따른 0 Hz 각속도 응답 증폭을 확인할 수 있다.

2차 공진주파수에서는 동일한 수준의 각속도 응답 증폭이 발생한다.

각 모델의 해석을 통해 다음과 같은 특성을 확인할 수 있었다.

첫 번째 질량불균형에 의한 회전 토크는 0 Hz의 회전 공진의 형태로 작용한다.

두 번째 짐벌의 보정추는 0 Hz 회전 토크를 저감할 수 있으며, 보정추의 중량은 저주파 영역 각속도 응답에 영향을 미친다.

세 번째 보정추 중량이 작을수록 유연체 모드에 의한 각속도 응답이 감소되어 자이로센서 오차가 작아진다.

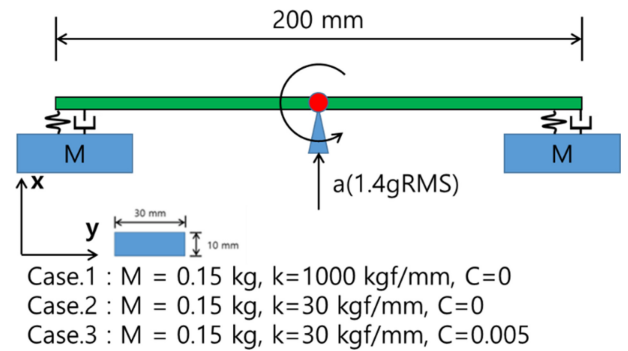


Fig. 7 Simplified model of gimbal with tuned mass damper counterweight for dynamic response analysis

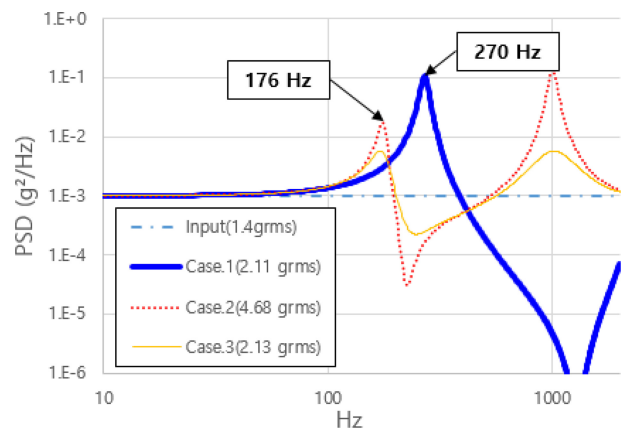


Fig. 8 Comparison results of dynamic response analysis at counterweight position

4. TMD 형 보정추의 진동감쇠 효과 검토

4절에서는 TMD의 설치 방식을 보정추에 적용하는 방안에 대한 연구를 진행하였다.

TMD는 진동을 줄이고자 하는 주 시스템에 상대적으로 작은 질량-스프링계의 부 시스템을 적용하는 방식이며, 두 시스템 간의 공진주파수를 조정하여, 위상 차이에 의한 진동감소 효과를 큰 시스템에 부여한다.

짐벌과 보정추 사이에 스프링과 감쇠기를 설치하여, 보정추를 TMD의 부 시스템으로 활용하였다.

분석에 사용된 해석 모델을 Fig. 7에 나타내었다.

보정추 고정 방식에 따라 짐벌을 3가지 Case로 분석하였다.

Case1은 보정추를 체결류로 고정한 모델이다.

Case2는 보정추를 스프링으로 고정한 모델이다.

Case3은 보정추를 방진구로 고정한 모델이다.

Fig. 8은 분석 모델의 가속도 진동응답 해석 결과다.

TMD형 보정추의 가속도 해석 결과 짐벌의 2차 공진주파수는 270에서 176 Hz로 낮아졌으며, 증폭량은 Case 1 대비 각각 84, 95 % 저감 되었다.

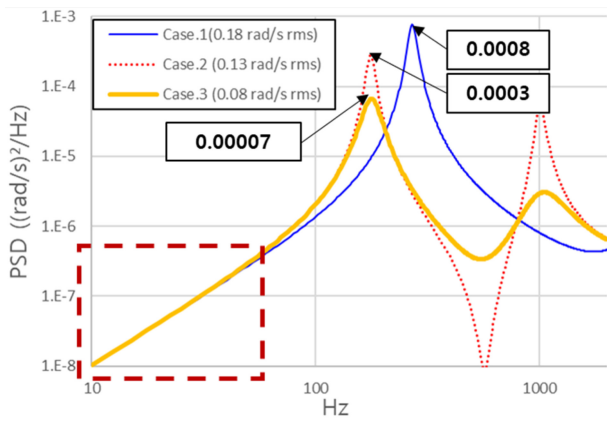


Fig. 9 Comparison results of angular velocity response analysis at counterweight position

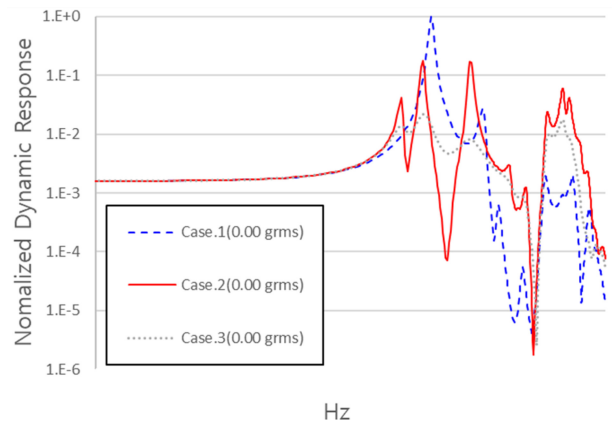


Fig. 10 Comparison results of dynamic response analysis of 2-axis gimbal with complex shape at gyroscope position

Fig. 9은 분석 모델의 각속도 응답 해석 결과다.

TMD형 보정추 적용 모델의 각속도 해석 결과 질량불균형에 의한 0 Hz 회전 외란은 발생하지 않는다. (갈색 점선부)

TMD형 보정추의 적용결과 짐벌의 2차 공진주파수에서 각속도 응답은 Case 1 대비 각각 64, 91% 저감 하였다.

본 절을 통해 TMD 보정추에 대한 다음과 같은 결과를 얻었다. 첫 번째 TMD형 보정추는 기존 보정추 설계 방식과 동일한 회전 외란 저감효과를 갖는다.

두 번째 TMD 형 보정추 적용 시 보정추 중량에 따른 국부적인 공진 및 그 증폭률을 저감할 수 있다.

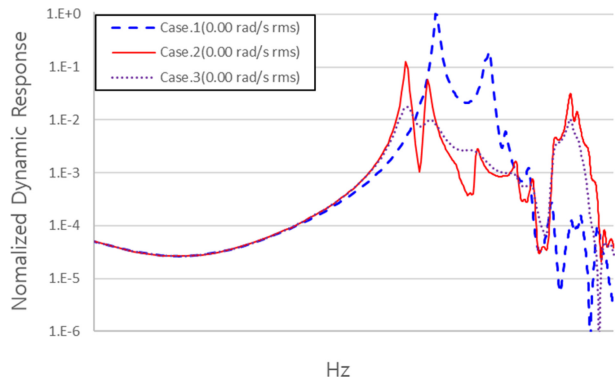


Fig. 11 Comparison results of angular velocity response analysis of 2-axis gimbal with complex shape at gyroscope position

5. 2축 짐벌 모델의 TMD형 보정추 적용효과 검토

본 절에서는 10.0 kg 이하 급 실제 2축 짐벌에 대한 구조해석을 수행하였다. 기존 짐벌의 보정추는 구동부 전체 중량 중 20% 이하이며, 체결류로 고정되어있다.

감쇠형 TMD 적용효과를 확인하기 위해 3가지 Case로 비교 분석을 수행하였다.

- Case 1 보정추 당 4개의 체결류 고정된 모델.
- Case 2 보정추 당 4개의 스프링으로 고정된 모델.
- Case 3 보정추 당 4개의 초탄성 물질로 고정된 모델.

초탄성 물질의 물성치는 실제 제작 업체를 통해 제공받았다. 감쇠 계수를 제거한 스프링 상수는 Case2에 적용하였다.

Figs. 10 및 11은 무차원화 된 짐벌의 가속도 및 각속도 해석 결과다. 해석 결과의 주파수 및 응답의 크기는 제품 보안상의 이유로 블라인드 처리하였다.

Fig. 10의 가속도 해석 결과 각 모델의 자이로센서 위치에서 발생하는 최대 가속도 응답 증폭률이 Case 1 대비 82, 98% 감소되었다.

Case 1은 보정추에 의한 공진 주파수와 각 구성품의 국부적인 공진 주파수의 간격이 작다. 따라서 각 구성품은 상호 공진하여 큰 진동 응답이 발생한다.

Case 2, 3의 경우 보정추에 의한 공진 주파수와 구성품의 국부적인 공진 주파수의 간격이 이격 되어 상대적으로 진폭이 낮아지는 효과를 보였다.

Fig. 11의 각속도 해석 결과 자이로센서 위치에 작용하는 최대 각속도 응답 증폭률은 Case 1 대비 각 모델이 88, 98% 감소하였다.

초탄성물질은 방진 설계를 위해 산업에서 자주 활용된다. 하지만 짐벌 고정부에 이를 적용할 경우 진동에 의한 대 변형이 발생하여 설계 적용을 지양해 왔다.

본 연구에서는 이를 국부적으로 보정추에 적용함으로써 짐벌의 정밀도 및 질량불균형 성능은 유지하고, 진동 외란 및 각속도 외란을 저감할 수 있었다.

6. TMD형 보정추 적용효과 실험 및 검증

본 절에서는 감쇠형 TMD 보정추의 진동저감효과를 실험을 통해 검증하였다.

실제 짐벌의 실험을 Fig. 12와 같이 구성하여 진행하였다.

짐벌은 비행체에 조립되어 있으며, 짐벌에는 외부 구성품이

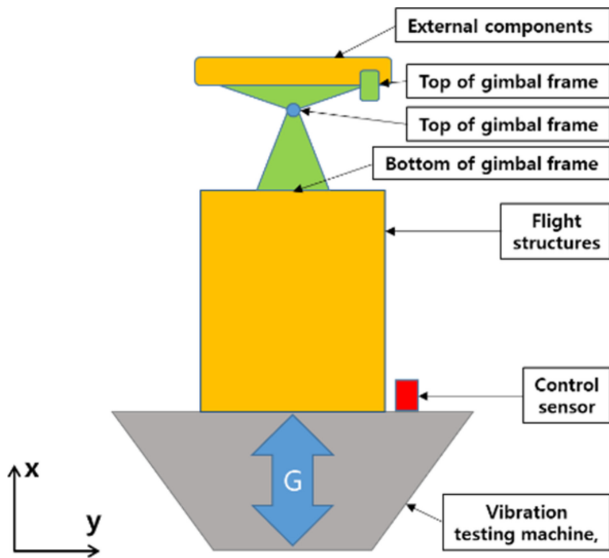


Fig. 12 Random vibration test setting of the gimbal

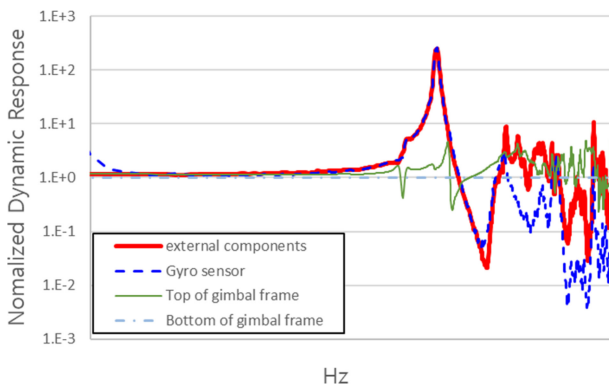


Fig. 13 Random vibration test results of gimbal: Output amplification compared to input without TMD (Case.1)

조립되어 있다. 또한 자이로센서는 외부 구성품과 짐벌의 경계에 설치되어 있다.

짐벌의 진동응답 측정을 위해 4개의 가속도 센서가 적용되었다. 설치 위치는 짐벌 프레임 설치부, 짐벌 구동축 설치부, 자이로센서 설치부, 외부 구성품이다.

Figs. 13부터 15는 짐벌 진동실험의 가속도 센서 측정 결과이다. 해당 실험은 비행체 단위에서 진행되었다. 따라서 짐벌 구조물에 의한 공진과 비행체 하부 구조물에 의한 공진을 명확히 구분하기 어려운 점이 있다.

본 연구에서는 짐벌 구조물에 의한 공진을 분석하기 위해 짐벌 조립부(Bottom of Gimbal Frame) 대비 각 위치에서 가속도 증폭량을 비교하였다.

제시된 그래프의 증폭량은 무차원 값이며, 제품의 주파수는 보안상 블라인드 처리하였다.

Fig. 13은 일반적인 2축 짐벌의 가속도 응답 증폭률이다. 짐벌의 주요 공진은 1차 모드에서 발생하며(0 Hz 회전 모드 무시), 짐벌 입력량 대비 자이로센서 위치에서 발생하는 증폭률은 440이다.

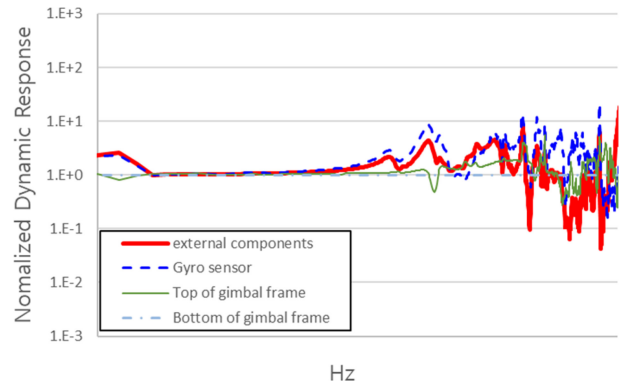


Fig. 14 Random vibration test results of gimbal: Output amplification compared to input with TMD (Case.2)

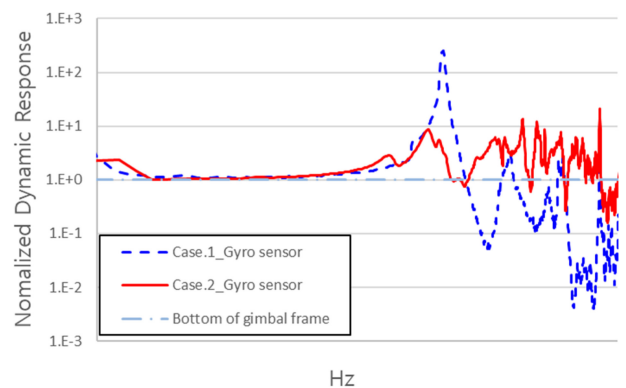


Fig. 15 Comparison of random vibration test results with and without TMD at gimbal gyro sensor position

Fig. 14는 TMD가 설치된 2축 짐벌의 가속도 응답 증폭률이다. 짐벌의 1차 모드에서 발생한 짐벌 입력량 대비 자이로센서 위치에서 발생하는 증폭률은 7.9이다.

Fig. 15는 TMD 유무에 따른 자이로센서 증폭률 비교 결과이다. 감쇠형 TMD 보정추 적용 시 자이로센서에서 발생하는 가속도 진동응답 증폭률은 98% 감소하였다. 이러한 진동응답 감소효과는 자이로센서 운용결과에서도 확인할 수 있다.

짐벌에 설치된 자이로센서에는 바이어스 에러가 발생할 수 있다. 자이로센서의 바이어스 에러는 기구/전기적인 노이즈 성분에 의해 발생할 수 있으며, 짐벌 1차 공진의 각속도 성분에 영향을 받는다.

감쇠형 TMD를 설치한 짐벌의 진동실험 결과 자이로센서 바이어스 에러가 95% 이상 감소됨을 확인하였다.

7. 결론

본 논문에서는 짐벌 질량불균형에 의한 정적 가속도 토크 저감의 용도로 적용되는 보정추를 감쇠형 TMD로 대체하는 방법을 제시하였다.

감쇠형 TMD 보정추 적용 결과 짐벌 구동부 및 외부 구성품에

작용하는 공진에 의한 진동 응답이 저감됨을 구조해석 및 실험으로 검증하였다.

감쇠형 TMD에 의한 진동 저감이 자이로센서의 바이어스 에러를 효과적으로 감소시킴을 실험을 통해 검증하였다.

제안된 방법은 기존 보정추를 통한 질량불균형 조정방법과 비교하여 다음과 같은 장점을 갖는다.

첫 번째 기존 보정추 적용 방식은 질량불균형을 조정하는 데 효과적이지만 보정추 적용에 따른 중량 증가로 공진에 의한 진동 응답을 증가시켰다. 제안된 방법은 기존 방식과 동일한 수준의 질량 불균형 조정 효과를 가지며, 또한 진동 응답 저감 효과를 갖는다.

두 번째 기존 보정추의 설계 적용 시 공진에 의한 진동 응답을 줄이기 위해 보정추 중량을 줄일 필요가 있었다. 따라서 짐벌 및 외부 구성품은 소형/경량화 설계가 요구되어 더욱 복잡하고 비경제적인 형태로 발전하였다. 제안된 방법은 보정추의 중량을 유지한 상태로도 진동 응답을 줄일 수 있다는 점에서 이점을 갖는다.

세 번째 자이로센서 바이어스 에러는 자이로센서 내/외부적인 요소에 영향을 받는다.

기존 방식에서는 보정추 중량에 의한 국부적인 공진응답을 완화하기 위해 최적 설계를 통해 보정추의 중량을 줄이는 설계가 적용되었다. 하지만 이러한 감량은 전체 짐벌 중량 대비 2% 수준에 불과하다.

따라서 보정추 중량 감량을 통한 자이로센서 바이어스 에러 감소가 불가능했다.

그 결과 이를 줄이기 위한 방안으로 고가의 자이로센서 적용이 불가피했다. 제안된 방법을 통해 짐벌의 설계 시 좀 더 경제적인 형태의 자이로센서의 선정 및 적용이 가능하다는 점에 이점을 갖는다.

본 연구를 통해 짐벌 공진에 의한 진동 응답을 근본적으로 줄일 수 있었다. 따라서 다양한 환경에 대해 보다 경제적이고 효과적인 짐벌 설계가 가능할 것이라고 판단된다.

본 연구에서는 감쇠형 보정추를 질점이 1개인 1자유도로 설계하였으며, 이를 해석 및 실험으로 검증하였다.

추후 연구를 통해 질점이 2개 이상인 다자유도 감쇠형 보정추를 연구하고, 공진주파수를 의도적으로 조정하는 방안에 대한 연구가 진행될 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2023년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(UC200013CD).

REFERENCES

1. Baek, J.-H., Hong, S.-M., Kwak, Y.-K., Kim, S.-H., (2002), Backlash estimation of a seeker gimbal with two-stage gear

reducers, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, 26(10), 2130-2141.

2. Lim, J.-K., Choi, Y.-J., Lyou, J., Seok, H.-D., Kim, B.-U., Kang, M.-S., (2005), Adaptive disturbance compensation control for heavy load target aiming system to improve stabilization performances, Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 15(11), 1303-1310.

3. Yeo, S., Park, T., Kang, M., (2017), Feedforward compensation of mass unbalance torque for 2-DOF gimbal system, Proceedings of the KSPE Autumn Conference, 369-370.

4. Kang, M. S., Kim, J. J., Park, T. G., (2012), Stabilization control of OTM(On-The-Move) satellite antenna, Proceedings of the KSME Spring Autumn Conference, 83-34.

5. Kang, M.-S., Cho, Y.-W., (2010), Stabilization control of line of sight of OTM(On-The-Move) antenna, The Korean Institute of Electrical Engineers, 59(11), 2073-2082.

6. Yeo, S. M., Kang, M. S., (2018), A simultaneous experimental disturbances identification of gyro stabilized 2-Axes gimbal system for disturbance feedforward compensation control, Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, 21(4), 508-519.

7. Mu, Q., Liu, G., Zhong, M., Chu, Z., (2012), Imbalance torque compensation for three-axis inertially stabilized platform using acceleration feedforward, Proceedings of the 8th IEEE International Symposium on Instrumentation and Control Technology (ISICT) Proceedings, 157-160.

8. Mao, W., Liu, G., Li, J., Liu, J., (2016), An identification method for the unbalance parameters of a rotor-bearing system, Shock and Vibration, 2016(1), 8284625.

9. Kim, J. S., Lee, D.-K., Lee, S.-I., Cho, H.-J., Yoon, M.-Y., (2022), Theoretic and experimental analysis to the disturbance torque maintaining the angle of gimbal during the centrifugal acceleration test, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 39(10), 759-766.

10. Kathe, E., (2001), Gun barrel vibration absorber, US6167794B1.

11. Kwag, D.-G., Bae, J.-S., Hwang, J.-H., Kim, H.-S., (2011), A study on the vibration damping of a barrel using vibration absorber, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 21(5), 408-415.

12. Kwag, D.-G., Bae, J.-S., Hwang, J.-H., Kim, H.-S., (2011), An experimental study on the vibration absorber for vibration attenuation of cantilever beam structure, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 21(11), 991-996.

13. Kim, J. S., Park, S. W., Kang, S. W., Cho, J. H., (2017), Vibration absorber design and finite element analysis model building and experimental ion to prepare the anti-vibration design for the flight structure, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 34(5), 331-336.

**Jun-Soo Kim**

Research Engineer in LIG Nex1 Co., Ltd. His research interest is mechanical engineering.
E-mail: junsoo.kim@lignex1.com

**Dong-Kyun Lee**

Research Engineer in LIG Nex1 Co., Ltd. His research interest is mechanical engineering.
E-mail: dongkyun.lee@lignex1

**Jong-Kuk Lee**

Research Engineer in LIG Nex1 Co., Ltd. His research interest is linear system design.
E-mail: aqualjk@lignex1.com

**Hyeon-Jun Cho**

Research Engineer in LIG Nex1 Co., Ltd. His research interest is mechanical engineering.
E-mail: hyeonjun.cho@lignex1.com

**Ji-in Jung**

Research Engineer in Agency for Defense Development. His research interest is mechanical engineering.
E-mail: jiinjung@add.re.kr