

# 감시 정찰 카메라부를 포함한 짐발 구조 시스템의 진동 특성 해석<sup>§</sup>

이 상 은\* · 이 태 원\*\*†

\* LIG 넥스원 연구개발본부 전자광학센터, \*\* 금오공과대학교 기계공학부

## Vibration Characteristic Analysis of Gimbal Structure System with Observation Reconnaissance Camera Module

Sang Eun Lee\* and Tae Won Lee\*\*†

\* EO/IR R&D Lab., LIG NEX1 Co., Ltd.,

\*\* School of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology

(Received December 10, 2010 ; Revised January 28, 2011 ; Accepted January 29, 2011)

**Key Words** : Gimbal(짐발), Modal Analysis(모달해석), Harmonic Responses Analysis(조화응답해석), Transmissibility(전달률), Finite Element Analysis(유한요소해석)

**초록**: 감시 정찰용 짐발 구조 시스템은 베어링들과 다른 기계 요소들로 구성된 복잡한 기계 장치이다. 이 시스템은 크게 카메라부와 카메라부를 지지하는 안정화 짐발로 나눌 수 있다. 영상 정보 취득을 위한 비행 중 짐발 구조 시스템은 정찰기로부터 전달되는 광범위한 진동수를 갖는 심각한 가진을 받게 된다. 비록 정찰기로부터 전달되는 안정화 짐발의 기초 가진이 카메라부의 진동을 유발할지라도 카메라부는 정확하고 선명한 영상을 기록하여야만 한다. 그러므로 카메라부를 포함한 전체 짐발 구조 시스템의 고유진동수와 고유진동 모드를 분석하는 것이 중요하다. 이에 본 연구에서는 베어링들의 효과를 고려한 시스템의 진동 특성 해석을 유한요소법에 의해 수행하였다. 뿐만 아니라, 0 Hz ~ 500 Hz의 진동수 영역에서 조화응답해석을 통해 카메라부의 가속도 전달률을 계산하였다.

**Abstract**: A gimbal system in observation reconnaissance aircraft was fabricated by assembling many parts and bearings. This system consists of a camera module and a stabilization gimbal that supports the camera module. During the flight for recording images, the gimbal system experiences various accelerations with wide frequencies. Although base excitation of stabilization gimbal results in vibration of the camera module, the camera module must be able to capture the correct and clear image even while vibrating. Hence, it is important to know the natural frequencies and vibration modes of the gimbal system with the camera module. Considering bearings as spring elements, the vibration characteristic of the gimbal system was analyzed by finite element method. In addition, harmonic response analysis was performed to determine the correct transmissibility of acceleration for the camera module in the frequency range of 0-500 Hz.

### 1. 서 론

항공기에 탑재되어 감시정찰을 목적으로 사용되는 짐발 구조 시스템은 수 많은 부품으로 구성되어 있는데 크게 카메라 모듈과 안정화 구동장치로 나눌 수 있다. 카메라 모듈은 직접적으로 영상을 획득하는 부분으로 EO 광학계, IR 광학계 및 이를 제어하는 전자보드 등으로 구성된다. 안정화 구동장치는 고각

(Elevation)과 방위각(Azimuth)으로 회전운동을 하여, 카메라의 시선을 지향하거나 추적하는 목적으로 사용된다. 또한, 카메라 모듈을 안정적으로 지지하여 외부 가진에 대한 영향을 최소화하여 영상을 안정적으로 획득하는 중요한 역할을 한다. 짐발 구조 시스템이 안정적으로 운용되기 위해서는 외부 가진 범위 내에서 고유진동수가 존재하지 않는 것이 가장 바람직하나, 만일 구조상 불가피하게 존재하게 된다면 안정화 성능을 달성할 수 있는 제어대역으로 구조물의 진동특성을<sup>(1)</sup> 최적화시켜야 한다.

항공기 엔진 등 내부에서 발생하는 주기적인 진동과 공기 점성 및 마찰에 의한 공력, 관성력 그리고 항공기에서 오는 진동 등 다양한 외부 가진

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회(2010.

11. 3.-5., ICC 제주) 발표논문임

† Corresponding Author, twlee@kumoh.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

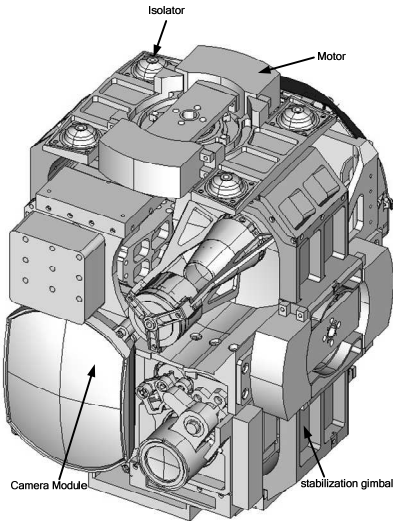


Fig. 1 Gimbal structure system

이 있다. 이러한 외부 가진들은 주변 상황에 따라 진폭 및 진동수가 다르다. 즉, 진폭이 일정한 값이 아니라 일정범위내의 진동수를 갖는 가진이다. 그러므로, 대부분의 경우 특별한 상황을 제외하고는 공진을 피할 수 없다. 짐발 구조물의 공진현상은 카메라의 목표물에 대한 위치 정확도 및 카메라의 시선안정화에 결정적인 방해 요인이 될 뿐만 아니라 심한 경우에는 구조물의 파손이 일어나게 된다. 이러한 이유로 안정적이고 정확한 목표물의 영상을 검출하도록 카메라를 포함한 짐발 구조물의 모달해석<sup>(2-3)</sup> 및 조화응답해석<sup>(4)</sup> 등을 통하여 짐발 구조 시스템에 작용하는 모든 진동수의 가진에 대한 짐발 구조물의 진동 특성을 분석하여야 한다. 이는 외부 가진의 크기에 대한 시스템의 응답 크기로 정의되는 전달률로 설명할 수 있다.

복잡한 구조물의 효율적인 동적 특성해석은 먼저 모달해석을 통하여 고유진동수 및 모드형상을 확인하는 것이 추천된다. 외부 가진의 진동수 범위 내에 고유진동수가 존재하지 않으면 시스템의 응답은 큰 문제를 일으키지 않으나 만약 시스템의 고유 진동수가 시스템의 제어대역 내에 존재한다면 조화응답해석이 반드시 요구된다. 실제로 짐발 구조 시스템은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 수 많은 전자부품, 광학렌즈 및 베어링 등 매우 복잡한 형상이므로 간단하게 진동해석을 하기는 불가능하여 본 연구에서는 상용 유한요소해석 코드인 ANSYS 12.0<sup>(5)</sup>을 사용하여 조화응답해석을 하였다.

## 2. 해석모델

감시정찰용 짐발 구조 시스템은 Fig. 2와 같이

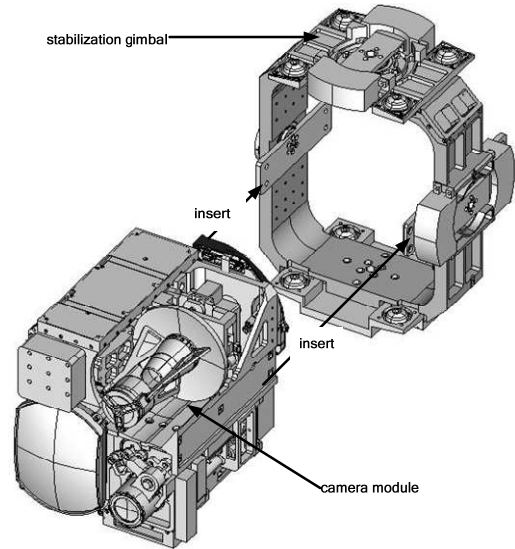


Fig. 2 Assembly structure of camera module and stabilization

카메라 모듈과 이를 지지하여 안정화시키는 안정화 구동장치로 분리된다. 카메라 모듈과 안정화 구동장치는 양쪽 카메라 고정 커넥트에 조립이 되며, 안정화 구동장치는 Fig. 2에서 보듯이 아이솔레이터가 외부 구조물과 상하 대칭으로 8개 위치에서 항공기에 고정된다. 카메라 모듈은 매우 복잡한 형상이나 시스템을 제어하기 위하여 무게중심을 짐발 구조물의 중심에 맞추도록 제작된다. 그러므로 카메라 모듈부분은 대칭인 질량으로 처리할 수 있다. 결과적으로 동적 해석을 위해 Fig. 1의 복잡한 짐발 구조 시스템은 Fig. 2의 안정화 구동장치만 유한요소모델링을 하면 되고 카메라 모듈부분을 질점 질량으로 정의할 수 있다. 또한, 짐발 구동을 위해 장착되는 모터는 1축당 2개가 쌍으로 사용되며 모터 역시 집중질량으로 처리할 수 있다. 본 연구에서 카메라모듈의 무게는 12kg이고 모터의 무게는 개당 0.51kg이다.

짐발 구조 시스템의 정확한 동적 특성 해석을 위하여 항공기에 장착되는 부분인 아이솔레이터까지 고려하여야 한다. 그러나 설계 단계에서 카메라 부분의 안정적 거동을 보장하는 아이솔레이터의 선정이 불가능하고 외부 가진이 전달되는 부분이므로 동적 특성에 큰 차이가 보이지 않을 거라는 가정하에 아이솔레이터는 제외하였다. 또한, 본 연구는 짐발 구조물 자체의 진동특성 분석을 위한 해석이므로 모달해석과 조화응답해석을 수행 시에 이 부분은 강성 결합된 것으로 가정하였다.

한편, 현 시스템에서는 카메라 모듈의 시선지향 및 영상추적을 위해 각 접촉 볼 베어링(Angular

Contact Ball Bearing)을 한 축당 2 쌍씩 사용하여 좌우 상하에 조립되어 2 자유도 회전운동을 한다. 각 접촉 볼 베어링은 고속성, 정밀성 및 축 방향과 반경 방향의 하중을 지지할 수 있는 장점으로 인해 복합 하중을 받는 경우 주로 사용되는 베어링이다. 각 접촉 볼 베어링은 운용 시 축 방향의 예압, 반경방향의 하중, 회전 속도 등의 영향을 받아 그 진동특성이 변화한다는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 각 접촉 볼 베어링의 사용 시 축 방향의 예압을 인가하여 축의 정밀도를 높이고, 베어링의 강성을 증가시키며 회전체의 미끄럼의 억제 및 정확한 위치 제어가 가능하게 된다. 이러한 이유에서 짐발 구조 시스템에서는 각 접촉 볼 베어링을 주로 사용한다.

구동 축에 사용된 각 접촉 볼 베어링은 Timken Company 에서 제작된 S2128 각 접촉 볼 베어링을 사용하였으며, 외부에서 오는 하중을 고려하여 245.2N ~333.5N 예압을 인가하였다. 예압 인가는 Fig. 3 에서와 같이 DB<sup>(6)</sup> (Back to Back)방식을 사용하였으며 각 접촉 볼 베어링의 요구된 예압을 인가하여 개발 예정인 짐발 구조 시스템에 설치된 각 접촉 베어링의 축 방향 강성과 반경 방향 강성은 Table 1 과 같고 그 값들은 제작사에서 제공하였다.

각 접촉 볼 베어링을 고려한 유한요소 모델링<sup>(7)</sup>은 매우 어렵다. 그러나 요구된 예압으로 얻어진 축 방향 강성과 반경 방향 강성을 알고 있으므로 다음의 4 가지 경우를 고려하여 ANSYS 에서 제공되는 스프링 댐퍼 요소를 사용하여 경계조건을 부여하였다. 이 때 거시적인 짐발 구조 시스템의 해석을 위해 베어링 부분은 다음과 같이 가정하였다.

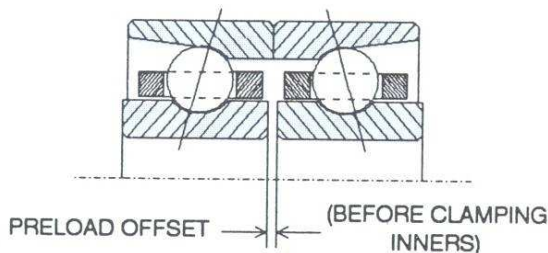
- 1) 베어링은 외부 구조물에 의해서 완전히 고정되어 있다.
- 2) 베어링의 자체의 변형은 무시하였다.
- 3) 베어링의 마찰은 무시하였다.
- 4) 베어링의 내부 감쇠를 무시하였다.

베어링을 고려한 짐발 구조 시스템의 유한요소 모델링을 Fig. 4 에 도시하였다. 사용된 유한요소 상용 코드 ANSYS 에서 제공되는 8 절점 3D-Structure Solid 요소를 사용하였으며, 집중질량 요소는 MASS21 요소를 각 접촉 볼 베어링 요소는 COMBIN14 요소를 사용하였다. Fig. 4 의 모델링에서 전체 유한요소 수는 20991 개이고 절점의 수는 29475 개이다. 또한, 카메라 고정 커넥터와 카메라 모듈은 서로 결합되어 같이 움직이므로 카메라에 해당하는 질점 질량과 이 부분이 동일한 변위를 갖는다고 가정하였고 모터 역시 질점 질량으로 단순화하였고 모터가 조립되는 부분도 동일한 변위를 갖는다고 가정하였다.

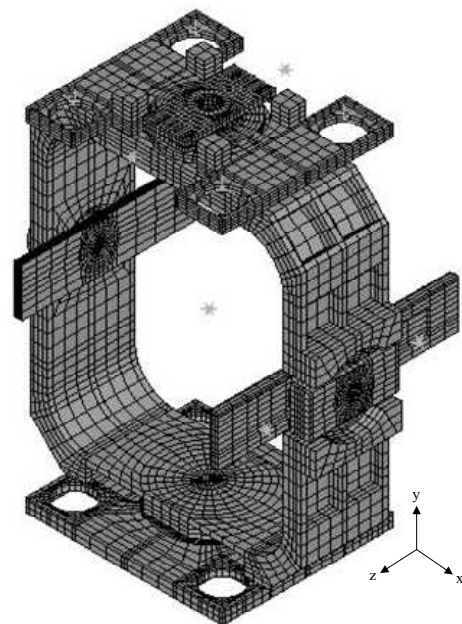
감시정찰용 짐발 구조 시스템은 비행 중에 발생할 수 있는 열 변형 및 외력에 의한 변형도 견딜 수 있도록 구조적 강성을 가져야 할 뿐 아니라 항공기의 전체 하중에 부담을 주지 않을 정도로 무게가 가벼워야 한다. 이를 위해서 본 연구 대상인 짐발 구조 시스템은 대부분 알루미늄 6061 로 제작되었으며 외부와 고정되는 부분과 베어링 축 및 하우징 등은 강성과 열변형 때문에 스테인리스 스틸 STS303 과 티타늄 6Al-4V EL1 을 사용하였다.

**Table 1** Stiffness of each direction for angular contact ball bearing

P/N	Axial Stiffness	Radial Stiffness
S2128	11000 kN/m	33000 kN/m



**Fig. 3** Schematic drawing of angular contact ball bearing



**Fig. 4** Finite element model for Gimbal structure system

Table 2 Material properties

Material	Aluminum 6061	Stainless Steel STS 303	Titanium 6Al-4V EL1
Young's Modulus	68.9 GPa	193 GPa	116 GPa
Poisson's rate	0.33	0.25	0.34
Density	2700 kg/m <sup>3</sup>	8000 kg/m <sup>3</sup>	4500 kg/m <sup>3</sup>

유한요소해석에 필요한 이들 재료의 물성치는 Table 2에 기술하였다.

재료의 물성치 및 구속 조건을 고려한 Fig. 4의 유한요소 모델링을 적용하면 짐발 구조 시스템의 조화응답해석을 통하여 전달률을 계산할 수 있으며 이에 관한 유한요소 지배방정식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$[m]\ddot{\vec{u}}(t) + [c]\dot{\vec{u}} + [k]\vec{u} = \vec{F}(t) \quad (1)$$

위 식에서  $[m]$ 은 질량행렬,  $[c]$ 는 감쇠행렬,  $[k]$ 는 강성행렬이다. 그리고  $\vec{F}(t)$ 는 외부 가진력 벡터,  $\vec{u}(t)$ 는 유한요소 절점에서 각 방향의 변위 벡터들이다.

식 (1)의 외부 가진력이 개발 대상인 짐발구조 시스템 경우 기초 가속도 가진에 해당하고 설계요구조건이 0 Hz ~ 500 Hz의 진동수 영역에서 카메라 모듈부의 전달률이 3 이하 이어야만 한다. 이를 검증하기 위하여 일정진폭을 갖고 다양한 진동수의 sine-sweep의 기초 가속도 가진에 대한 조화응답 해석이 요구된다. 그러나 불행히도 ANSYS에서는 조화응답해석을 수행할 때 항공기와 결합되는 베이스 부분에 기초 가진 가속도를 주는 기능이 없기 때문에 이를 해결할 다른 기법이 필요하다.

잘 알려진 내용이지만 먼저 변위와 가속도의 상관관계를 살펴보기로 하자. 진동수의 함수로서 한 점에서의 조화 운동은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$u(\omega t) = A \sin(\omega t) \quad (2)$$

여기서  $u$ 는 변위,  $A$ 는 진폭,  $\omega$ 는 가진 진동수, 그리고  $t$ 는 시간이다. 식 (2)로부터 가속도와 변위는 아래의 상관관계를 갖는다

$$\ddot{u} = -\omega^2 u \quad (3)$$

$$|\ddot{u}| = |\omega^2 u| \quad (4)$$

식 (3)과 (4)의 관계를 이용하면 가속도가 기초 가진인 경우도 ANSYS로 조화응답해석이 가능하며 제안된 방법은 크게 Large-Mass Method와 Direct-Displacement method<sup>(8)</sup> 두 가지다. 전자는 큰 질량을 가진점에 생성하고 생성된 질량에 하중을 가하는 방법이다. 이 방법에서 질량의 크기를 정하는데 어려움이 있어, 일반적으로 후자를 주로 사용한다. Direct-Displacement method는 기초 가진 대신 기초 변위를 입력하고 해석결과에 실제 가속도 값을 곱해주는 방법이다.

본 연구대상인 짐발 구조 시스템은 외부에 고정되는 8 개소를 통하여 가진이 전달된다. 그러므로, 이 부분들에 x, y, z축의 각각의 방향에 대해서 단위변위를 입력하여 가진 범위 0 Hz ~ 500 Hz의 진동수에 대하여 1 Hz 씩 증가하면서 500 회 조화응답해석을 수행한 후 다음과 같은 과정<sup>(8)</sup>을 거쳐 전달률을 계산하였다.

- 1) 변위, 변형률, 응력 등 결과들을 보기 위하여 입력 가속도를 가진 진동수의 제곱으로 나누어 단위 변위로 해석한 결과와 곱한다.
- 2) 가속도 응답 결과들을 보기 위하여 단위 변위로 해석한 결과와 입력 가속도를 곱한다.
- 3) 가속도 응답을 전달률로 바꿔 주기 위하여 응답 가속도를 입력 가속도로 나눈다.

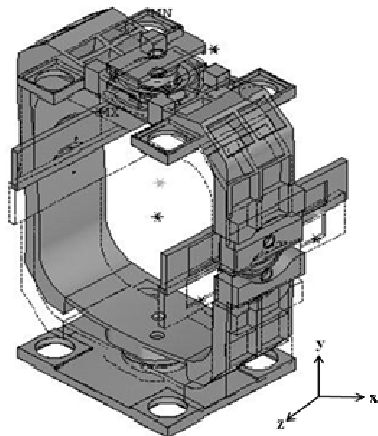
위와 같은 방법을 통하여 짐발 구조시스템의 기초 가속도 가진에 대한 조화응답 해석을 수행하였다. 한편 감쇠 부분의 경우 현 시스템은 특별한 감쇠 장치가 존재하지 않아 단지 재료의 감쇠 특성만을 고려하였고 이 경우 금속 구조물에서 경험적으로 사용하는 2.0%를 감쇠비를 선정하였다.

### 3. 해석 및 결과

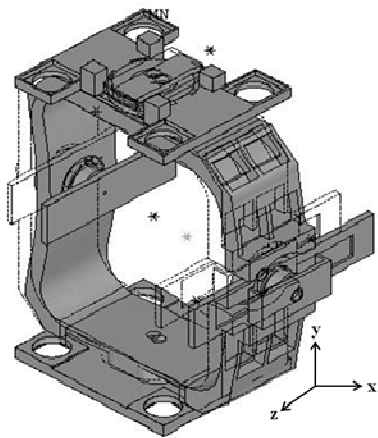
기초 가진하에서 조화 응답해석은 ANSYS로부터 직접 구할 수 있으나 현재의 연구와 같이 복잡한 구조물의 경우 방대한 계산시간이 소요된다. 또한 우리의 관심은 최대 전달률이므로 공진이 발생하는 고유 진동수 근처에서 집중적으로 유한요소해석을 하는 것이 효율적이다. 이러한 특성을 이용하여 먼저 모달해석을 통하여 고유진동수를 구하고 고유진동수 부근에서 전달률 계산을 주안점을

**Table 3** Natural frequencies for Gimbal structure system

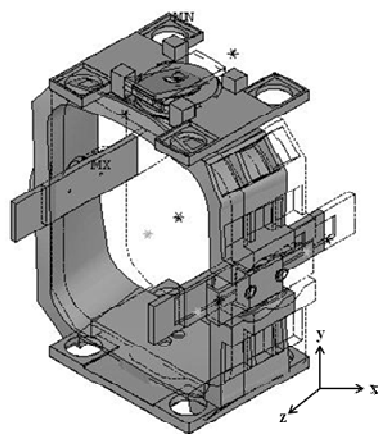
No.	Natural Frequency
1	141.25 Hz
2	146.22 Hz
3	179.58 Hz



(a) 1<sup>st</sup> mode ( $f = 141.25\text{Hz}$ )



(b) 2<sup>nd</sup> mode ( $f = 146.22\text{Hz}$ )

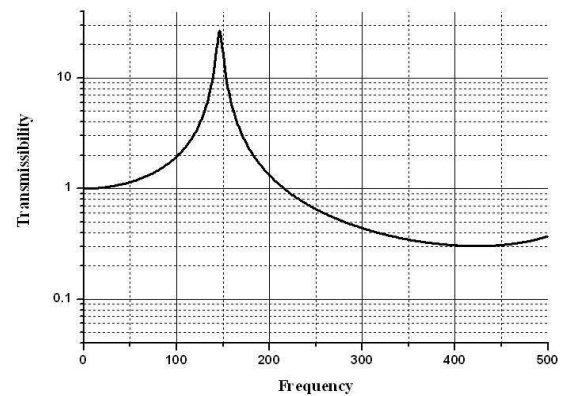


(c) 3<sup>rd</sup> mode ( $f = 179.58\text{Hz}$ )

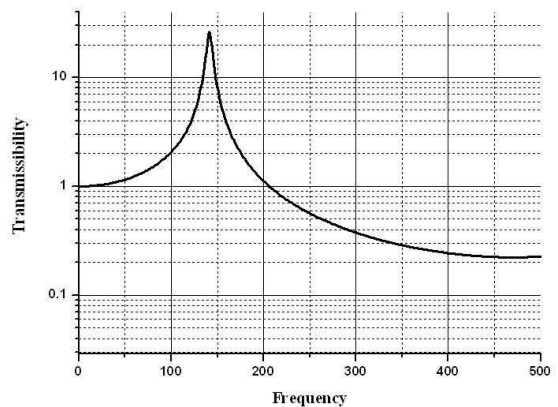
**Fig. 5** Mode shapes for each natural frequency

**Table 4** Maximum transmissibility of Gimbal structure system for each direction

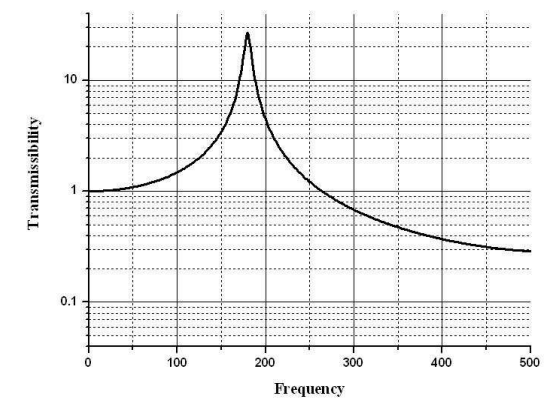
Direction	Transmissibility
X	26.8
Y	26.3
Z	26.6



(a) Transmissibility of x direction (Maximum transmissibility of 26.8)



(b) Transmissibility of y direction (Maximum transmissibility of 26.3)



(c) Transmissibility of z direction (Maximum transmissibility of 26.6)

**Fig. 6** Transmissibility of Gimbal structural system for a frequency range 0 Hz ~ 500Hz

두는 방법으로 조화응답해석을 수행하였다.

### 3.1 모달해석 및 결과

유한요소해석 상용코드 ANSYS 로부터 Block Lanczos<sup>(9)</sup> 방법을 적용하여 고유 진동수와 고유 모드를 계산하였다. 계산된 고유 진동수는 Table 3 에 기술하였으며, 모드 형상은 Fig. 5 와 같다. 물론 수 많은 고유진동수가 존재하나 기초 가진 진동수의 범위가 0 Hz ~ 500 Hz 이므로 이 범위 안에 있는 고유진동수와 모드만 기술하였다. Table 3 과 Fig. 5 를 보면 1 차 모드는 x 방향, 2 차 모드는 y 방향, 3 차 모드는 z 방향의 진동모드임을 알 수 있다.

### 3.2 조화응답해석 및 결과

항공기에 장착된 짐발 구조 시스템에 발생하는 가진력은 가속도로 인하여 발생되고 가속도의 크기에 따라 영상 정밀도가 좌우된다. 이러한 이유로 질점 질량인 카메라 모듈부의 가속도 전달률을 알아야만 하며, 이를 위해서는 반드시 조화응답해석이 필요하다. 본 연구 대상인 짐발 구조 시스템은 기초 가속도 가진을 받으므로 2 장에서 기술한 Direct-Displacement method 를 적용하여 전달률을 계산하였다.

해석으로 얻어진 각각의 방향에 대한 전달률은 Fig. 6 에 도시하였다. 감쇠의 영향으로 약간의 오차는 있으나 x 방향의 최대 전달률은 1 차 고유진동수에서, y 방향의 최대 전달률은 2 차 고유진동수에서 나타났다. 또한 3 차 고유진동수에서 z 방향 최대 전달률이 계산되었다. 정량적으로 나타낸 각 방향에 대한 최대 전달률 값은 Table 4 에 기술하였다. 결과적으로 Fig. 6 와 Table 4 로부터 1 차, 2 차, 3 차 고유 진동수 140 Hz ~ 180 Hz 에서 x, y, z 방향의 최대 전달률은 약 26 임을 알 수 있다.

## 4. 결 론

현 연구 모델인 짐발 구조 시스템은 2 자유도 회전 운동을 하면서 목표물을 정확하게 지향하고, 추적하여 선명한 영상을 획득하는 시스템이다. 이를 위해서는 구조적인 강도뿐만 아니라 외부 가진에 대해서도 구조진동의 안정화가 이루어져야 한다. 그러므로 본 연구는 항공기 운항 시 발생할 수 있는 설계 조건인 0 Hz ~ 500 Hz 의 기초 가속도 가진 범위 내에서 짐발 구조 시스템의 진동특성을 분석하기 위하여 상용 코드인 ANSYS 를 사용하여 조화응답해석을 수행하였다. 물론 베어링부도 포함하였고 구조물의 감쇠비도 2%로 설정하여 정확

한 분석을 수행하였다. 해석 결과 현 짐발 구조 시스템은 고유 진동수가 가진 범위 내에 존재하므로 설계 변경을 통하여 진동특성을 최적화시켜야 한다. 1 차 고유진동수를 500Hz 이상으로 설계하는 것이 이상적인 설계이나 구조상 그렇게 설계하는 것은 불가능하다.

현 시스템에 요구하는 선명한 영상정보의 취득을 위하여 카메라부의 진동을 제거하여 안정화시키는 능동제어가 필요하다. 그런데 능동제어는 대부분 저 진동수에서 적당한 크기의 진폭을 가진 경우만 가능하다. 개발회사의 기술 여건상 설정된 설계요구 조건은 최대 전달률이 존재하는 고유진동수는 30Hz 미만이어야 하고 크기도 3 이하이다. 뿐만 아니라, 추가적으로 x, y, z 의 각 방향 관점에서 2 차 고유진동수에 해당하는 부분도 최소한 200 Hz 이상이며 전달률도 1 미만임을 요구하고 있다. 그러나 현 짐발 구조 시스템은 해석결과 각 방향에 대한 전달률이 약 26 정도로 매우 크고 x, y, z 각 방향의 고유 진동수도 140 Hz ~ 180 Hz 로 능동 제어로 안정화시키기에는 매우 어려운 영역에 있다. 그러므로 설계 요구 조건을 충족하기 위하여 반드시 방진구조를 현 짐발 구조 시스템에 추가 하여야 한다.

## 후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다.

## 참고문헌

- (1) Lee, J. W., Cho, S. S. and Kim, D. O., 2010, "Dynamic Characteristics on the CRDM of SMART Reactor," *Journal of the KSME(A)*, Vol. 34, No. 8, pp. 1105~1111.
- (2) Cahti, M. R. and Mukehrjee, S., 1997, "Modal Analysis of a Cracked Beam," *Journal of Sound & Vibration*, Vol. 207, No. 2, pp. 240-279.
- (3) Oliveto, G., Santini, A. and Tripodi, E., 1997, "Complex Modal Analysis of a Flexural Vibrating Beam with Viscous End Conditions," *Journal of Sound & Vibration*, Vol. 200, No. 3, pp. 327~345.
- (4) Ji, Y. K. and Lee, Y. S., 2002, "Random Vibration and Harmonic Response Analyses of Upper Guide Structure Assembly to Flow Induced Loads," *Journal of the Computational Structural engineering institute of Korea*, Vol. 15, No. 1, pp. 59~68.
- (5) ANSYS, 2009, "Users's Manual for Revision 12.0," ANSYS Inc.

- (6) Timken, "Timken Super Precision Thin-Section Ball Bearing for Aerospace & Instrument Application," *Timken Company Subsidiary*.
- (7) K. Debray., F. Bogard. and Y. Q. Gue., 2004, "Numerical Vibration Analysis on Defect Detection in Revolving Machines Using Two Bearing Models," *Archive of Applied Machanics*, Vol. 74 No. 1/2, pp 45~58.
- (8) Haberman, D., 2000, "Sine-Sweep Test Simulation in ANSYS Using the Large-Mass and Direct-Displacement Methods," *Collaborative Solutions, Inc.*
- (9) Guennouni A. El., Jbilou K. and Sadok H., 2004, "The Block Lanczos Method for Linear Systems with Multiple Right-Hand Sides," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 51, pp. 243~256.