

## 技術論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2011.39.12.1160>

## EO/IR 카메라에 적용된 볼 베어링의 3축 스프링 요소 모델 및

## EO/IR 카메라의 구조 응답해석

조희근\*, 이주훈\*\*, 이준호\*\*\*

Three-axis Spring Element Modeling of Ball Bearing Applied to  
EO/IR Camera and Structural Response Analysis of EO/IR Camera

Hee Keun Cho\*, Juhun Rhee\*\* and Jun-Ho Lee\*\*\*

## ABSTRACT

This study is focused on the structural dynamic responses, i.e., vibration analysis results of the high-accuracy observation multi-axial camera, which is installed and operated for the UAV (Unmanned Aerial Vehicle) and helicopter *etc*. And, the authors newly suggest a modeling technology of the ball bearing applied to the camera by using three-axis spring elements. The vibration analysis results well agreed to the random vibration test results. Also, the vibration responses characteristics of the multi-axial camera through the time history analysis of the random vibration were analyzed and evaluated.

The above results can be applied to the FE-modeling of the ball bearings used for the space cameras.

## 초 록

본 연구는 무인항공기 및 헬리콥터 등에 장착되어 운용되는 고정밀 관측 다축·구동 EO/IR 카메라의 진동해석에 관한 것이며, 카메라에 적용된 볼 베어링을 모델링 하는데 있어서 3축 스프링요소를 적용하는 방법을 제시하였고, 이것에 의한 유한요소모델의 진동 응답 결과를 얻었다. 볼 베어링을 3축 스프링 요소로 모델링한 진동해석결과는 시험결과와 비교 되었으며, 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한, 랜덤진동 시간이력해석을 통하여 다축·구동 EO/IR 카메라의 진동 응답 특성을 해석하고 분석하였다.

이의 연구결과는 우주용 카메라들에 사용되는 볼 베어링의 유한요소모델링 기법에 응용 될 수 있다.

**Key Words** : EO/IR Camera (EO/IR 카메라), Ball Bearing (볼 베어링), FEA (유한요소해석), Vibration (진동)

## I. 서 론

† 2011년 8월 19일 접수 ~ 2011년 11월 28일 심사완료

\* 정희원, 안동대학교 기계교육과

\*\* 정희원, 한국항공우주연구원

교신저자, E-mail: [jrhee@kari.re.kr](mailto:jrhee@kari.re.kr)

대전시 유성구 과학로 115

\*\*\* 정희원, 공주대학교 광공학과

무인항공기(UAV: Unmanned Aerial Vehicle) 및 헬리콥터 등에 장착이 되어 운용되는 고정밀 관측 다축·구동 EO/IR (Electro-Optical/Infrared) 카메라의 개발을 위한 연구가 수행되었다.

본 연구는 다축·구동 EO/IR 카메라 광학계의

진동특성 규명에 중점을 두었으며, 이를 위한 볼 베어링의 유한요소모델링 (FE-modeling: Finite Element Modelling) 기법을 제시하였으며, 이것의 신뢰성 및 정확성을 실험 데이터와 비교 검토하였다.

이의 연구 결과는 우주용 카메라를 포함한 우주용 부품들에 사용되는 볼 베어링의 유한요소모델링 기법에 적용 될 수 있다. 기존의 볼베어링의 모델은 접촉요소(Contact Element)를 사용한 해석이 대부분이었다. 그러나 이것은 모델링에 수많은 요소가 사용되어 해석에 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라 접촉요소 사용에 따른 수렴의 어려움이 있고 해석의 정확도가 떨어진다. 따라서 본 연구에서는 단순하면서도 해석의 정확성을 향상시키는 새로운 모델을 제시하였다.

현재, 시험모델(TM: Test Model)과 기술모델(EM: Engineering Model)의 설계가 이루어졌으며, 시험모델에 대한 진동시험이 수행되었다.

다축·구동 EO/IR 카메라를 설계함에 있어서 여러 가지 설계 조건을 고려하여야 한다[1-3]. 구조적 측면에서의 설계 조건들은 형상, 반사경의 가공오차, 광기계 요소의 구조물정력/조립오차, 다양한 외력환경(중력, 열변형 및 관성모멘트 등)에 의한 변형오차, 운전환경으로부터 발생하는 정현파, 랜덤, 음향 및 충격 하중 등의 진동요소들을 고려하여야 한다.

## II. 본 론

### 2.1 다축·구동 EO/IR 카메라 모델

Fig. 1은 다축·구동 EO/IR 카메라의 시험모델 및 기술모델의 형상을 나타낸다. Fig. 1(a)의 시험모델은 진동 등의 동특성을 파악하기 위하여 카메라 본체를 같은 중량의 더미로 대체하였으며, 제작되어 진동시험이 수행되었다. Fig. 1(b)의 기술모델은 현재 제작 중에 있으며, 시험모델의 전산구조해석(FEA: Finite Element Analysis)/진동해석에 의한 진동시험 결과를 바탕으로 설계 및 제작되고 있다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 카메라는 x축과 y축의 회전이 가능하도록 볼 베어링이 장착되어 있으며, 외부로부터 인가되는 진동을 저감하도록 양쪽 프레임에 방진구가 부착되어 있다.

### 2.2 구조 및 볼베어링 유한요소모델링

시험모델과 기술모델의 구조해석을 수행하기 위한 첫 단계로 유한요소 모델링을 하였다. 3D

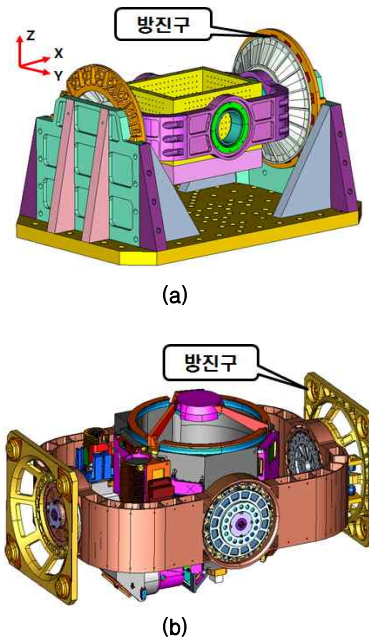


Fig. 1. Multi-axial Driving EO/IR System's TM (a) and EM (b)

사각뿔요소 (Tetrahedral), 빔(Beam) 및 스프링(Spring) 요소를 사용하여 모델링을 하였다.

볼트는 빔 요소로, 볼 베어링은 회전과 병진 자유도를 가지는 스프링 요소로, 그리고 방진구는 병진과 댐핑을 가지는 스프링 요소로 모델링 하였다. 시험모델의 경우 480,252개의 요소로, 기술모델은 1,109,517개의 요소로 모델링 하였다.

볼 베어링과 방진구의 강성을 보여 주는 Table 1과 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 시험모델은 LOAD사의 AM004-14 방진구 12개가 장착되었으며, 기술모델은 AM008-1 방진구 4개가 장착되었다.

본 해석에는 상용 소프트웨어인 IDEAS와 NASTRAN Solver가 사용되었다. 본 연구에서는 광학계에 사용된 볼 베어링을 모델링하는 방법을 새롭게 제시한다. 제시되는 모델링 방법은 수많은 시행착오와 검증을 거쳤으며, 가장 정확한 결과를 얻을 수 있는 기법이다.

다축·구동 EO/IR 카메라의 전산구조해석/진동해석에서 가장 핵심적인 요소는 베어링의 모델링이다. 초기에 다양한 방법이 검토되었고, 수많은 해석과 시행착오를 통하여 최적의 모델링 방법을 찾았다. Fig. 3은 베어링의 모델링 방법을 나타낸다. 베어링 시스템은 베어링 자체(c), 베어링 샤프트 (a), 베어링 하우징(b)으로 크게 구성된다. 베어링 시스템의 모델링에서는 Fig. 3에 제시된 바와 같이 베어링 자체의 볼 각각을 모델링

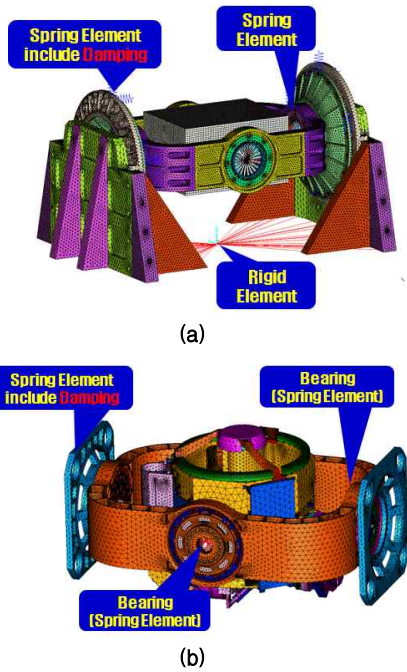


Fig. 2. FE-model Configuration of TM (a) and EM (b)

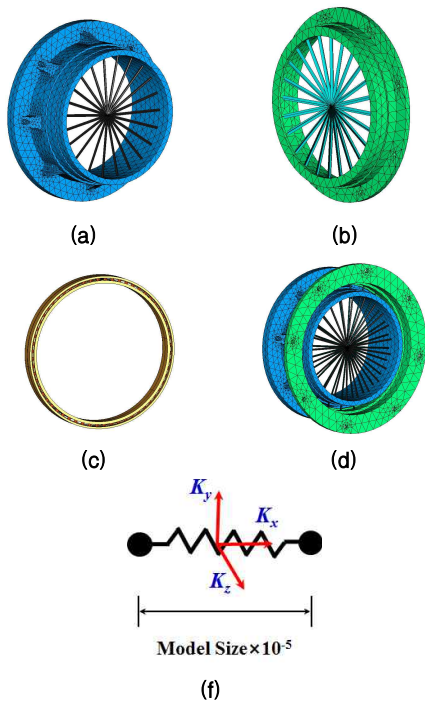


Fig. 3. Bearing FE-model: (a) Bearing Shaft, (b) Bearing Housing, (c) Bearing CAD Model, (d) Bearing Shaft and Housing and 3-axis spring element concept (f)

Table 1. Part Stiffness

| 품명           | 종류                  | 값               |
|--------------|---------------------|-----------------|
| 베어링          | Radial Stiffness    | 65,088.8 N/mm   |
|              | Axial Stiffness     | 24,264.0 N/mm   |
|              | Moment Stiffness    | 53,475.9 Nm/rad |
| 방진구 AM004-14 | Spring Coefficient  | 20 KN/m         |
|              | Damping Coefficient | 484 Ns/m        |
| 방진구 AM008-1  | Spring Coefficient  | 280.5 KN/m      |
|              | Damping Coefficient | 1598 Ns/m       |

하지 않고, 베어링 하우징과 베어링 샤프트를 각각 독립적으로 먼저 모델링 한다. 베어링 샤프트와 하우징의 각각의 중심점에서 각각의 프레임을 연결하는 강성 요소(Rigid Body)를 충분한 개수만큼 사용하여 각 파트를 일체화 시킨다. 다음 단계로 베어링 자체의 강성을 표현하기 위하여 샤프트와 하우징의 중심 노드를 서로 연결하는 3축 스프링 요소를 적용한다. 스프링 요소의 강성은 Table 1에 보여진다. 여기서 핵심적인 것은 스프링 요소로 연결하는 두 개의 노드 즉 샤프트의 중심점 노드와 하우징 중심점 노드의 거리가 전체 모델 사이즈의  $10^{-5}$  배 정도 되게 한다. 이유는, 두 노드점의 거리가 아주 충분히 작지 않으면 서로 방향이 다른 두 힘에 의한 모멘텀의 영향이 매우 지배적으로 작용해서 해석의 결과에 많은 오류가 나타나게 된다.

방진구 역시 댐핑을 나타낼 수 있는 3축 스프링 요소로 모델링 한다.

### 2.3 시험모델의 진동해석 및 실험결과 비교

광학계의 구조 설계에서 가장 핵심적인 부분은 내진설계이며, 특히 랜덤진동이 중요한 것은 광학계가 부착되는 본체에 의한 불규칙한 진동을 받기 때문이다. 이러한 불규칙 진동은 일반적으로 확률론적 접근 방법(PSD: Power Spectral Density)에 의해서 해석을 한다. PSD 형태의 가진 종류로는 변위, 속도 및 가속도 등이 있으며, 이중 어느 것도 입력 가진이 될 수 있다. 랜덤진동을 해석하는 방법에도 여러 가지 종류가 있으나, EO/IR 카메라를 진동 선형 시스템이라 가정하고 정적랜덤 (Stationary Random Vibration) 해석을 수행하였다. 랜덤신호가 시간에 따라 변하지 않는다고 가정하면, 랜덤변수  $x(t)$ 의 제곱의 평균은 식 (1)의  $\overline{x^2}$ 와 같다.

$$\bar{x}^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad (1)$$

랜덤진동에서 얼마나 빨리 변수들이 변하는가를 자기상관함수(Auto Correlation Function)로 나타내면 다음과 같다.

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau) dt \quad (2)$$

이 함수에서  $\tau$  는  $x(t)$ 가 샘플링된 지점의 시간차를 나타낸다. 랜덤진동과 같이 불규칙적인 주기를 갖고 있는 함수를 나타낼 때 유용하게 적용되는 것이 Fourier Series이다. 자기상관함수의 Fourier 변환은  $S_{xx}(\omega)$ 로 표현되는 PSD를 나타내며, 다음과 같다.

$$S_{xx}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (3)$$

식(3)에 주어진 PSD 응답함수 또한 충격 응답함수로 나타내어질 수 있다. 식(2)을 식(3)에 대입하면,

$$s_{xx}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(\sigma)x(\sigma+\tau) dt \right] e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (4)$$

위의 식에서 적분항의  $x(t)$ 를 외력함수  $F$  로 대체하면 식(5)와 같다.

$$S_{xx}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \left[ \int_{-\infty}^{\infty} F(\sigma-\theta)h(\theta)d\theta \right] \left[ \int_{-\infty}^{\infty} F(\sigma-\theta+\tau)h(\theta)d\theta \right] d\sigma \right] e^{-j\omega\tau} d\tau$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \left[ \int_{-\infty}^{\infty} F(\hat{t})F(\hat{t}+\tau) \int_{-\infty}^{\infty} h(\theta)e^{-j\omega\theta} d\theta \right] d\sigma e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (5)$$

여기서  $\hat{t} = \sigma - \theta$ 는 함수  $F$ 에 의해 계산되어지고 적분항의 바깥으로 빠져 나올 수 있다. 식(5)에서 괄호안의 두 적분 항은 충격응답함수의 Fourier 변환이며,  $H(\omega)$ 와 켈레복소함수  $H(-\omega)$ 로 표현할 수 있다. 주파수 응답함수  $H(\omega)$ 를 사용하여 식(5)를 다시 표현하면,

$$S_{xx}(\omega) = |H(\omega)|^2 \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{ff}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \right] \quad (6)$$

$$= |H(\omega)|^2 S_{ff}(\omega)$$

여기서  $R_{ff}$  와  $S_{ff}$ 는 각각 외부힘 및 입력함수  $F(t)$ 에 대한 자기상관함수와 PSD를 나타낸다.

### 2.3.1 모달해석

Fig. 1(a)의 시험모델에 대하여 진동시험이 수행되었다. 시험모델의 경우 실제 모델이 제작되어 진동시험이 수행되었다. 랜덤진동을 해석하기 위한 전 단계로서 시험모델의 모달해석이 수행되었으며, 모달해석을 통해서 구해진 모드들을 중첩하여 랜덤진동의 해를 구하였다.

Fig. 4에서 첫 번째 모드와 두 번째 모드는 베어링에 의해서 회전 자유도가 구속되지 않았기 때문에 강체모드(Rigid Body Mode)가 나타난다. 즉 x축 베어링과 y축 베어링의 축방향의 회전 자유도가 구속되지 않았다. 세 번째 모드, 즉 의미 있는 첫 번째 모드인 16.4Hz 모드는 x축 방향 모드이다(1st: 0Hz → 강체모드/ 3rd → 1st). 25Hz 모드는 z 축방향의 회전 모드이며, 다섯 번째 와 여섯 번째 모드는 Fig. 4에서와 같이 약 37Hz와 105Hz에서 나타나며 복합적인 모드를 나타낸다. 특히 여기서 주목할 점은 저차의 지배적인 모드가 전부 스프링의 강성에 의해서 나타난 것들이다.

### 2.3.2 랜덤진동해석

Fig. 5는 EO/IR 카메라의 랜덤진동 스펙을 나타낸다. 랜덤진동 스펙은 구조물이 운행되는 환경에서의 실측 진동 데이터를 기본으로 하여 작성된다.

시험모델의 랜덤진동해석에서는 2.3절의 랜덤진동 이론을 기반으로 하여 본 연구에서 제시된 2.2절의 베어링 모델링 기법에 의한 유한요소모델을 사용하여 수행되었다. 여기서 중요한 것은 전체적인 해석뿐만 아니라 카메라 해석에서 가장 핵심 요소인 볼 베어링 모델링의 정확성이다. 해석에서는 5~2000Hz 사이에 있는 수많은 모드들

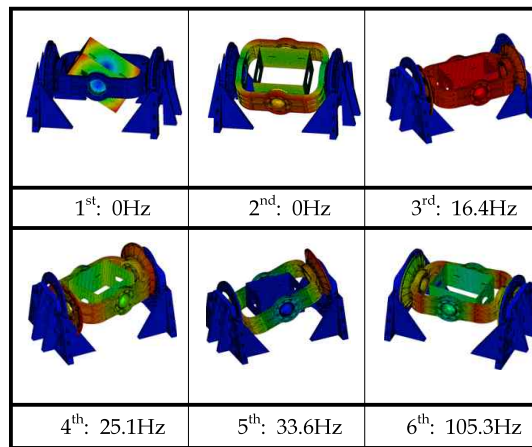


Fig. 4. Mode and Frequency of TM

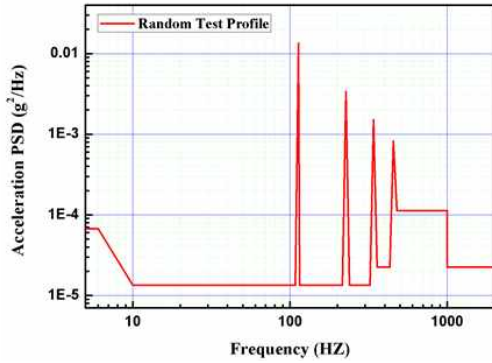


Fig. 5. Random Vibration Specification for EO/IR Camera

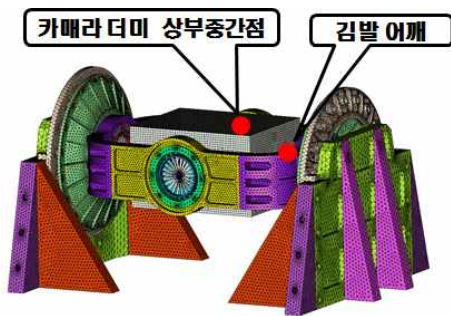


Fig. 6. Data Acquisition Points of Random Vibration Test

중에서 기여도가 높은 것부터 총 70개의 모드를 사용하여 모드 중첩법에 의하여 응답을 구하였다.

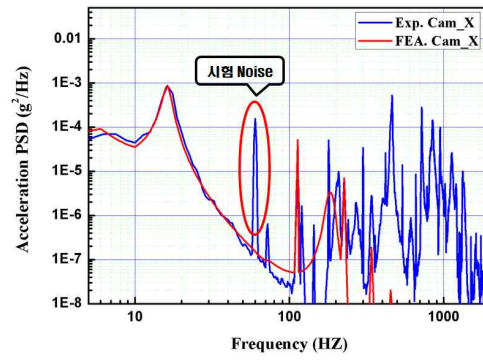
Fig. 6은 해석 결과와 시험결과를 비교하기 위한 데이터 획득 지점을 나타낸다. 두 지점에서의 결과를 서로 비교 분석하였다. 한 개는 카메라 더미 상부 중간점 이며 다른 하나는 김발 어깨이다.

서로 비교한 결과를 Fig. 7에 그림으로 나타내었다. x-방향(축방향)으로 가진 하였을 때, x-축방향의 응답을 서로 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 전산구조해석/진동해석 결과가 실험결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

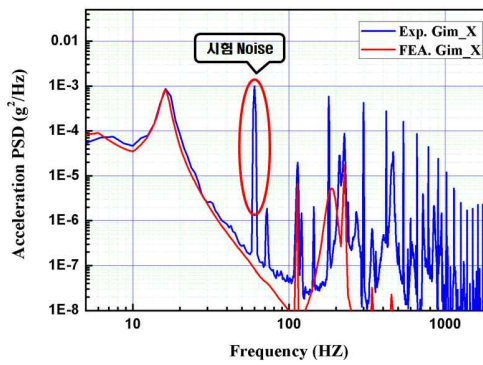
초기의 16.4Hz와 105Hz가 x-축 방향의 지배적인 모드이며, 이 결과를 Fig. 7의 결과에서 확인할 수 있다. 고차 주파수에서는 해석의 결과가 부정확하다. 이것은 구조 진동해석 해석에서 모드를 중첩을 할 때, 저차의 몇몇 중요한 모드만 활용하여 랜덤진동의 응답을 얻었기 때문이다.

2.3.3 랜덤진동 시간이력해석

시간이력해석은 시간 영역에서의 가진에 대한 진동계의 응답을 얻는 것으로써 응답을 표현하는



(a)



(b)

Fig. 7. Random Vibration Test Results Comparison between FEA and Experiment: (a) at Camera, (b) at Gimbal

변수는 가속도, 속도, 변위 또는 힘이 될 수 있다. 여기서는 Rice[4], Engelhardt[5] 등의 연구에 제시된 주파수-시간 변환함수 이론에 의하여 주파수 영역의 진동시험 프로파일을 이에 상응하는 과도해석 입력함수로 변환하여 과도해석을 수행하였다. 이것은 실제의 진동시험을 수치해석 시뮬레이션을 통해 각종 응답을 구하는 매우 효과적인 방법이다. 랜덤진동의 과도해석은 실제 랜덤진동에 대한 응답을 PSD의 형태가 아닌 직접적인 변위와 가속도 등으로 구할 수 있으므로 진동시험을 하는 것과 똑같은 효과를 가지며, 진동에 의한 동적 피로파괴 등의 해석도 가능하게 한다.

이러한 해석의 중요성은, 불규칙한 진동의 경우 과도해석에서는 하중을 제대로 적용하기 어려울 뿐만 아니라 하중을 적용하기 위해서는 매우 작은 시간간격을 요구하기 때문에 해석에 시간과 비용이 많이 소요되는데 있다.

Fig. 8은 Fig. 2(b)의 기술모델에 대한 랜덤 시간 이력해석 결과를 나타낸다. 각축의 랜덤가진

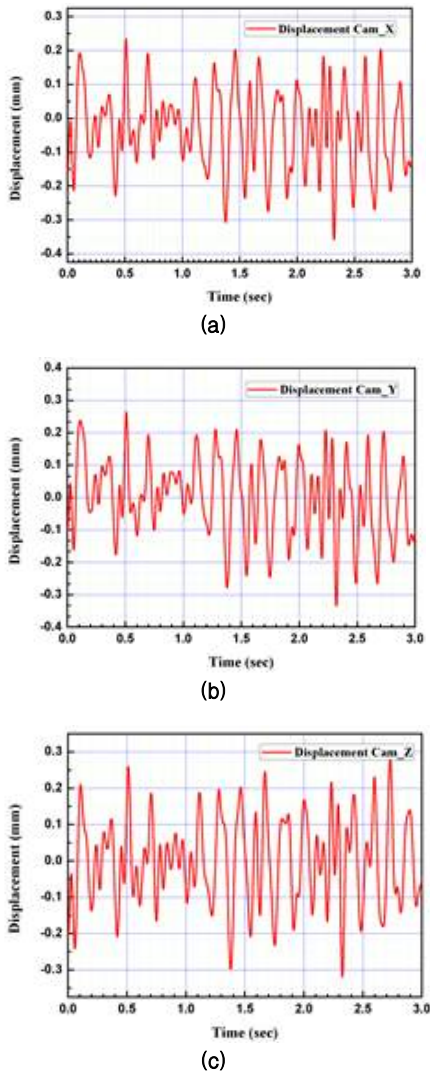


Fig. 8. Random Transient Analysis Results at Camera Dummy: (a) x-excitation vs. x-response, (b) y-excitation vs. y-response, (c) z-excitation vs. z-response

(Fig. 5)에 의한 김발 어께에서의 응답을 나타낸다. 전반적인 변위는 약  $\pm 0.2 \sim 0.3 \text{mm}$  정도이며, 설계 기준상 안전한 영역의 범위에 속해있다. 랜덤진동의 시간 이력해석 결과를 자세히 살펴보

면, 2.3.1절에서 구했던 고유진동 주파수들이 서로 합성되어 나타나는 것을 알 수 있다.

### III. 결 론

다축·구동 EO/IR 카메라의 전산구조해석/진동해석이 수행되었다. 카메라 볼 베어링의 모델링에서 내부의 베어링 축 및 외부의 베어링하우징을 각각 독립적으로 강성요소를 사용하여 연결한 뒤 3축 스프링 요소를 사용하여 베어링 각축의 강성을 표현하였다. 이러한 방식을 사용한 해석결과가 실험결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

다축·구동 EO/IR 카메라의 랜덤진동해석 및 랜덤진동 시간이력해석을 통하여 광학계 구조계의 진동 특성을 정확히 해석할 수 있는 기술적 기반을 확보 하였다.

차후 우주용을 포함하는 광학계 설계의 중요한 핵심 기술 자료로 활용될 수 있다.

### 참고문헌

- 1) B. J. Kim, S. D. Park, E. E. Kim, "MACSAT-A Mini-Satellite Approach to High Resolution Space Imaging", 17<sup>th</sup> AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2003.
- 2) Y. W. Choi, S. W. Yang, M. S. Kang, "Development of TMA-based Imaging System for Hyperspectral Application", ICSO, 2008.
- 3) J. H. Lee, C. W. Lee, I. Kang, T. S. Jang, H. S. Tang, W. Han, J. O. Park, S. W. Rhee, "A Compact Imaging Spectrometer(COMIS) for the Microsatellite STSAT", Proc. of SPIE, Vol. 6744 67441C-8.
- 4) S. O. Rice, "Mathematical Analysis of Random Noise", Bell System Technical Journal, Vol. 23, 1994, pp. 282~332.
- 5) C. W. Engelhardt, "Random Vibration Analysis Using Statistically Equivalent Transient Analysis", International Modal Analysis Conference, 1999, pp. 1852~1855.