

# 소형위성용 구경 120mm 지구관측카메라의 진동시험 Vibration test of 120mm aperture sized earth imaging camera for small satellite

강명석† · 최영완\* · 양승욱\* · 김종운\*, 김홍배\*\*, 임종민\*\*

Myung-Seok Kang, Young-Wan Choi, Seung-Uk Yang, Jongun Kim,  
Hong-Bae Kim and Jong-Min Im

**Key Words :** vibration test (진동시험), Earth imaging camera (지구관측카메라), Earth observation camera(지구관측카메라)

## ABSTRACT

SAC is earth observation camera being developed by satrec initiative. It provides 10m in multi-spectral channel and 50km swath width at 685km altitude. The EQM of SAC has been developed and tested. In this paper, the procedure and result of the vibration test of SAC to validate structural design and to verify structural toughness are described.

## 1. 서론

지구관측위성은 카메라를 탑재하여 위성의 궤도로부터 영상을 획득하고 지상으로 내려준다. 1986년 해상도 10m의 SPOT1이 발사된 이래 많은 상업용 위성이 지구관측의 임무를 띠고 발사되어 운용<sup>(1)</sup>되고 있다. 지구관측카메라는 임무에 따라 다양한 해상도, 관측폭, 그리고 관측주파수 대역을 갖는다. 기상정보를 획득하기 위한 광학계는 낮은 해상도와 넓은 관측폭을 갖도록 설계되며, 지상의 건물, 도로망 등의 정보를 획득하기 위한 임무를 수행하기 위한 카메라는 약 1m의 해상도에 상대적으로 좁은 관측폭을 갖는다.

㈜세트렉아이는 2000년 초에 설립되어 소형위성 및 이에 탑재하는 지구관측카메라를 개발하고 있다. 지난 2005년에는 고도 685km에서 흑백 2.5m, 칼라 5m의 해상도와 20km의 관측폭을 갖는 카메라 MAC(medium sized camera)<sup>(2,3,4)</sup>과 이를 탑재하는 200kg급 위성<sup>(5)</sup>을 말레이시아의 ATSB社와 공동으로 개발하였으며 2006년 하반기에 발사예정이다. 또한 고도 685km에서 칼라 10m의 해상도와 50km의 관측폭을 갖는 소형위성용 카메라 SAC(small sized camera)<sup>(6)</sup>를 개발 중에 있다. 지난해 12월, SAC의 EQM(engineering qualification model)에 대해 진동시험을 수행하였다. 본 논문에서는 SAC의 EQM 모델에 대한 진동시험사양을 결정

하고 시험을 통해 해석모델의 신뢰성과 SAC의 구조적인 안전성을 검증한 것에 대하여 기술하고자 한다.

## 2. 시험계획

### 2.1 시험조건

위성카메라 SAC의 진동시험은 발사환경에서의 안전성을 시험하고 검증하기 위한 것이다. SAC의 발사환경은 SAC가 탑재될 100kg급 위성과의 연계해석(coupled load analysis)으로 결정하였다.

위성과의 연계해석에서는 100kg급 위성의 유한요소모델과 SAC의 유한요소모델을 결합하고 발사체로부터의 랜덤가진을 위성의 발사체와의 체결부에 가하여 SAC의 체결점에서의 응답을 구하였다. 이 응답의 포락선에 노칭을 가하여 SAC의 진동시험조건으로 하였다.

#### (1) 노칭조건

진동시험 시 시험방향에 따라 진동시험기의 head expander 또는 slip table에 시험편을 부착하고 시험사양에 따라 강제진동을 가하여 발사환경을 모사한다.

이 같은 진동시험은 두가지 측면에서 과도한 시험이 될 가능성이 있다. 먼저 시험사양을 가능한 진동환경조건인 포락선으로 설정함으로써 시험사양 자체가 많은 여유를 포함할 수 있다. 위성은 발사체측에서 제공하는 시험사양으로 설계/시험하며 위성측에서 도출된 시험사양으로 카메라를 설계/시험한다. 또 다른 측면으로 실제 카메라는 유연체인 위성에 탑재되나 시험에서는 강체에 장착된다. 시험에서는 위성의 유연성에 의한 완충작용을 반영하지 못하여 공진주파수에 대해 실제상

† ㈜세트렉아이  
E-mail : kms@satreci.com  
Tel : (042) 365-7543, Fax : (042) 365-7549

\* ㈜세트렉아이

\*\* 한국항공우주연구원, 우주시험그룹

황과 달리 과도한 가진을 가할 수 있다.

진동시험에서 기본 시험사양에 노칭을 가하여 공진을 억제하여 실제적이지 않은 과도한 가진으로부터 카메라를 보호한다.

SAC의 진동시험에서 노칭은 다음의 기준으로 결정하였다. 첫째, 노칭으로 전체적인 가진수준의 저하는 10% 이내로 한다. 둘째, 진동시험에 의한 응답이 설계하중조건보다 작아야 한다.

설계하중은 실제 발사 시 탑재체에서의 가속도를 질량에 대해 나타난 질량-가속도 곡선(MAC; Mass Acceleration Curve)에 설계여유를 더하여 설정하였다. 질량-가속도 곡선은 발사 시 실제로 겪는 가속도의 최대값을 나타낸 것이다.

SAC 광학계에서 진동환경에 대해 가장 취약한 부분은 주경부, 부경부, 그리고 검출기 부분이다. 주경과 부경은 fused silica로 제작하였으며 검출기와 함께 광학적으로 정렬되어 있다. 진동시험 후 광학계는 파손 또는 영구변형이 발생하지 않아야 하며 각 부품간의 미끄러짐이 허용되지 않는다.

랜덤가진에 대한 주요부에서의 응답은 유한요소법으로 해석하여 예측하였다. 해석으로 랜덤가진 조건에서 노칭의 초기값을 정하였다. Fig. 1은 SAC의 진동해석에 사용한 유한요소모델이다. 주경과 부경은 solid 요소를 사용하였고 그 외 다른 부분은 쉘요소를 사용하였다.

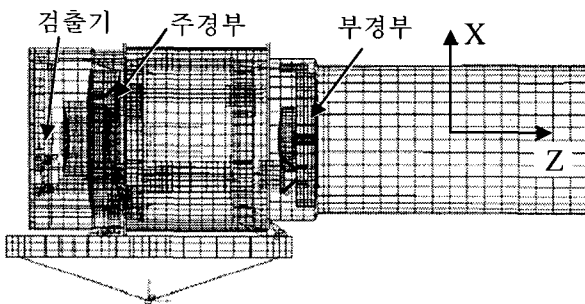


Fig. 1 FE Model of SAC

해석에 사용한 유한요소모델은 실제와는 차이가 있다. 이 유한요소모델을 기반으로 하여 설계/제작되었기 때문에 진동시험에서는 유한요소모델의 적절성을 확인하고 제작된 카메라의 발사환경에 대한 안전성을 시험한다.

시험에서는 먼저 낮은 수준으로 가진하여 진동에 대한 전달함수를 구하고 식(1)과 식(2)로부터 랜덤하중에 대한 응답을 구하였다. 이로부터 노칭 값을 보정하였다.

$$W_R(f) = |H(f)|^2 W_I(f) \quad (1)$$

$$\sigma_R^2 = \int_0^\infty |H(f)|^2 W_I(f) df \quad (2)$$

여기서,  $f$ 는 주파수,  $H(f)$ 는 전달함수,  $W_I(f)$ 는 입력 파워밀도함수, 그리고  $W_R(f)$ 는 응답 파워밀도함수이다.  $\sigma_R$ 은 응답의 RMS(root mean squared) 값으로 실제 적분구간은 진동시험의 주파수범위인 0~2000Hz이다.

(2) 시험절차

시험은 Z 방향, Y 방향, X 방향 순으로 진행하였다. 먼저 해석을 통해 랜덤진동에 대한 노칭을 정하였다. 진동시험에서 먼저 Pre-LLRV(Low Level Random Vibration) 시험으로 전달함수를 구하여 해석모델의 전달함수와 비교하여 해석모델의 적합성과 노칭의 초기안의 적합성여부를 판단하였다. 해석모델과 시험결과 사이에 증폭비와 고유진동수 값의 차이가 있으므로 이를 보정하여 노칭을 확정하였다. 결정한 입력값으로 랜덤진동시험을 수행하였다. 다시 LLRV를 수행하여 랜덤시험 전/후의 LLRV의 결과를 비교함으로써 광학계의 구조적인 손상여부를 판단하였다.

시험 전/후의 LLRV 결과의 비교로는 구조적인 손상만을 판단할 수 있으며 광학적인 성능의 변화는 진동시험 이후 시스템 MTF를 측정하여 검사하였다.

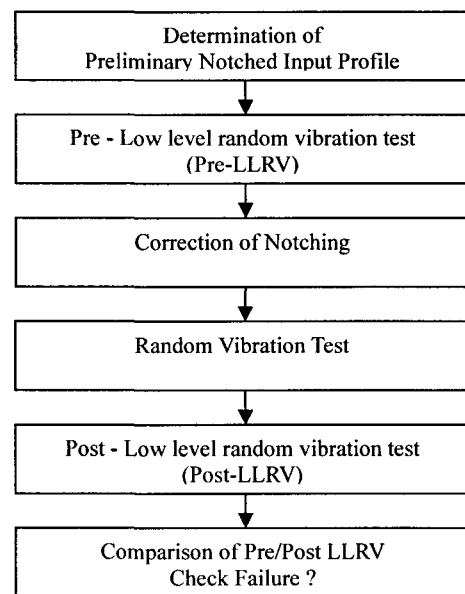


Fig. 2 Test Procedure

### 3. 진동시험 및 결과

#### 3.1 랜덤진동시험

랜덤진동시험은 항공우주연구원에서 수행하였다. X방향의 시험에서는 Fig. 3과 같이 전동자(armature)에 연결부를 두고 직접 부착하여 시험하였다. Y, Z 방향에 대해서는 Fig. 4과 같이 slip table에 카메라를 부착하고 카메라의 방향을 돌려가며 시험하였다.



Fig. 3 X-Directional RV Test

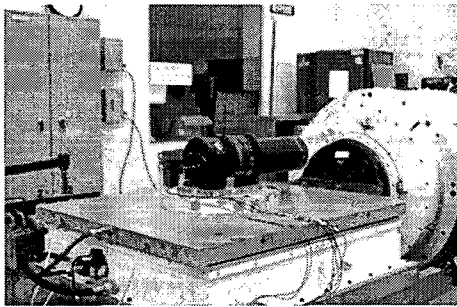


Fig. 4 Z-Directional RV Test

#### 3.2 주파수응답함수

유한요소해석으로 구한 주파수응답함수와 LLRV 시험에서 구한 주파수응답함수를 Fig. 5~Fig. 7에 나타내었다. 약 400Hz 이하의 주파수 구간에서는 시험결과와 해석결과가 상당한 유사성을 보였다. 1000Hz 이상에서는 연관성을 찾아보기 어려운 정도의 차이를 보였으나 고주파영역에서의 진동은 구조강도에 미치는 영향이 작아 설계에 사용한 해석모델이 유효함을 확인하였다.

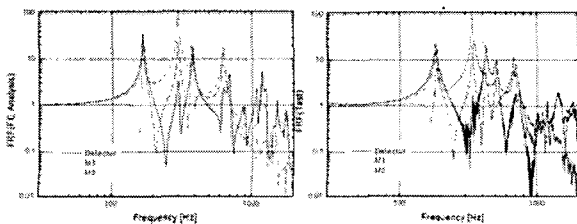


Fig. 5 X-Directional FRF

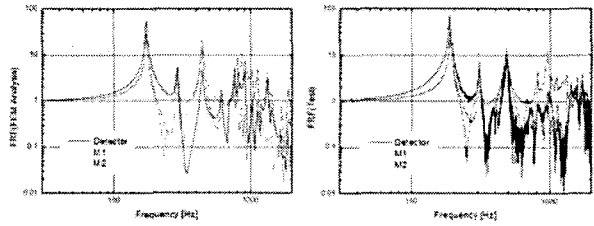


Fig. 6 Y-Directional FRF

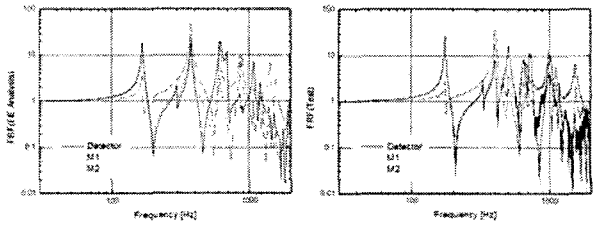


Fig. 7 Z-Directional FRF

#### 3.3 랜덤진동사양

Fig. 8~Fig. 10은 LLRV 시험에서 구한 동적특성으로 노칭을 보정한 랜덤진동사양이다.

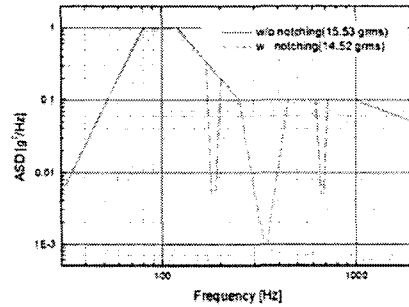


Fig. 8 X-Directional RV Input (duration: 1min)

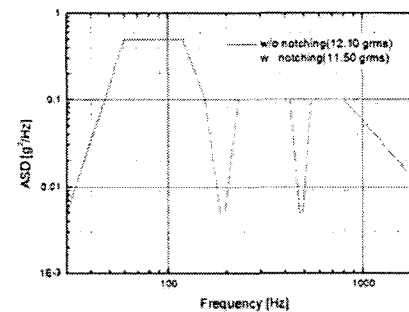


Fig. 9 Y-Directional RV Input (duration: 1min)

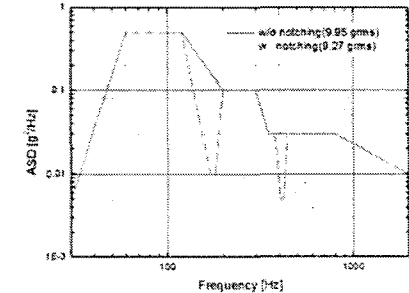


Fig. 10 Z-Directional RV Input (duration: 1min)

3.4 랜덤진동시험

Fig. 8~Fig. 10의 가진을 입력으로 하는 랜덤시험의 결과를 Fig. 11~Fig. 13에 나타내었다.

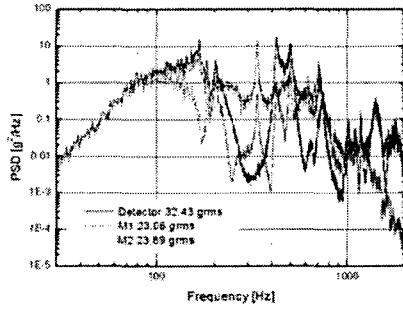


Fig. 11 X-Directional RV Test Result

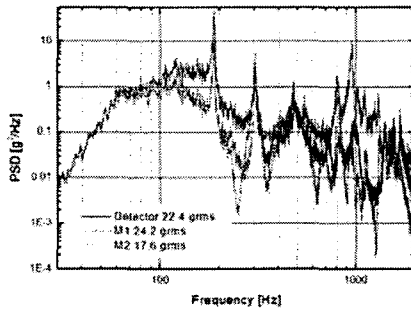


Fig. 12 Y-Directional RV Test Result

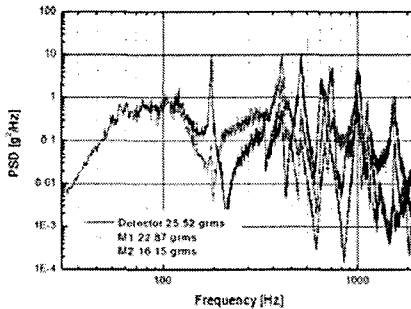


Fig. 13 Z-Directional RV Test Result

Table 1에서는 랜덤진동시험의 RMS 가속도 결과를 해석결과와 함께 나타내었다. 이 해석결과는 LLRV 시험 전에 해석으로 결정한 초기노칭값을 적용한 결과이다. X-방향의 진동시험에서 검출기에서의 응답을 제외하고는 전체적으로 계획한 진동수준으로 시험을 수행하였음을 확인할 수 있었다.

unit: g rms

Excitation Direction	M1		M2		Detector	
	FEM	Test	FEM	Test	FEM	Test
X	25.3	23.1	20.5	23.9	23.9	32.4
Y	28.0	24.2	15.3	17.6	20.7	22.4
Z	24.1	22.9	15.0	16.2	25.5	25.5

Table 1 Comparison of Test & Analysis Results

진동시험 후 SAC 를 광학실로 옮겨 광학성능을 평가하였으며 진동시험 전/후의 광학성능에서 의미있는 차이를 발견하지 못하였다.

4. 결론

고도 685km 에서 해상도 10m 이 소형위성용 지구관측카메라 SAC 의 EQM 모델을 개발하고 진동시험을 성공적으로 수행하였다.

설계하중은 질량-가속도곡선을 근거로 하여 결정하였으며 진동시험 시 적절한 노칭을 부여하여 공진에 의한 과도한 하중조건을 회피하였다.

해석결과와 시험결과를 비교하여 큰 차이가 없었으며, 이로써 유한요소해석모델을 검증하고 진동시험에 대한 계획에 부합하도록 시험이 수행되었음을 확인하였다.

랜덤가진 전/후에 수행한 LLRV 시험의 결과를 비교함으로써 구조적인 결함이 나타나지 않았으며 광학시험을 통해 광학성능의 변화가 없음을 검증하였다.

참고문헌

- (1) Jacobsen, K., *Map se of Very High Resolution Satellite Imagery*,? Fernerkundung und GIS. Warschau, 2005.
- (2) E.-E. Kim and et al, *Development of Engineering Model of Medium-sized Aperture Camera System*,? 4<sup>th</sup> IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation, Apr. (2002).
- (3) E.-E. Kim Y.-W. Choi, H.S. Yang, et al, *Development of Engineering Model of Medium-sized Aperture Camera System*,? Digest of Small Satellites for Earth Observation, pp. 137-144, 4<sup>th</sup> Int. Symp. Of the IAA, 2003.
- (4) E.D. Kim, Y-W Choi, M-S Kang, et al, *Medium-sized Aperture Camera for Earth Observation*,? Proc. Of the 5<sup>th</sup> International Conference on Space Optics, SP-554, ESA, 2004.
- (5) B.J. Kim, S.Park, E.-E. Kim, et al, *ACSAT - A Mini-Satellite Approach to High Resolution Space Imaging*,? Proc. Of 17<sup>th</sup> AIAA/USU Conf. on Small Satellites, SSC03-VI-8, 2003.
- (6) Y.-W. Choi and et al, *Development of Small-sized Aperture Camera (SAC) for high performance imaging on small satellites*,? Proc. SPIE Vol.5542, p.125-132, Earth Observing Systems IX; William L. Barnes, James J. Butler; Eds., Oct. 2004