

다목적 실용위성 2호의 운송 컨테이너 개발

우성현** • 김홍배* • 문상무* • 김영기

A Study on the Dynamic Characteristics of S/C Shipping Container Isolation System

Sung-Hyun Woo, Hong-Bae Kim, Sang-Mu Moon, Young-Key Kim

ABSTRACT

A Satellite shipping container must afford the satellite a relatively benign thermal, vibration, and particle environment that is oblivious to the extreme temperatures, sand, dust, vibrations and shocks that can accompany the transportation. In this study, we have designed a vibration isolation system of a spacecraft container that will be used to transport a satellite called KOMPSAT (KOREA Multi-Purpose SATellite) -2 from KARI (Korea Aerospace Research Institute) Taejon to its launch site. To identify the dynamic characteristics of the system, a 1/3-scaled mockup of the container was developed. A large electro-magnetic shaker (Max. 240 KN) was used to excite the mockup, and vibration signals from 20 points were collected for modal tests. Numerical simulations through CATIA 3D Modeling were performed to identify the behavior of isolation springs. The results showed that a simplified model predicts the behavior in a reasonable accuracy. Moreover, the model guides us how to design a full-scaled satellite-shipping container.

1. 서론

위성체 이송용 컨테이너는 위성의 안전한 운반을 목적으로 사용되는 지상 지원 장비(Mechanical Ground Support Equipment, MGSE)의 일종으로, 탑재물이 장착된 위성체 dml 운송시 발생하는 기계적 충격으로부터 위성체를 보호하는 역할을 수행한다. 또한 일반적으로 외부 동조장비와 연계하여 내부의 온도 습도를 조절함으로써 위성체 구조물 및 탑재물의 최적 운송환경을 유지하도록 설계되어진다.

다목적 실용위성 1호(KOMPSAT-1)의 경우, 미 TRW 사와의 기술협력을 통하여 위성체 이송 컨테이너 설계 및 제작기술을 이전 받았으나, 상대적으로 규모가 큰 아리랑 2호 및 국산통신위성과 같은 향후 위성프로그램에 있어서는 독자적인 기술을 통한 개발 및 운영이 요구된다. 특히 2호의 경우 정밀 지상관측을 위한 고해상도 카메라(Multi Spectral Camera)를 비롯한 각종 자세제어체를

탑재하고 있어 운송과정 중 발생하는 충격환경은 위성체의 주요 구조물 및 탑재물을 치명적으로 손상시킬 수 있다. 따라서 위성체 운송 컨테이너의 설계 단계에서 적절한 설계 요구 조건을 설정하고, 운용환경에서의 내부 제진 시스템의 동적 거동을 예측하는 것은 위성 사업의 성공적인 수행을 위해서 필수적인 일이다. 본 논문에서는 현재 항공우주연구원 우주시험연구그룹이 개발중인 다목적 실용위성 2호기 운송 컨테이너의 설계 요구조건을 선정하였으며, 제진 스프링의 사양 선정 및 동특성 파악을 위하여 제진시스템의 1/3 규격 모델을 이용한 모드 해석 시험을 수행하였다. 이와 별도로 운송 컨테이너의 CATIA 3 차원 모델단계에서 고비용 장시간이 소요되는 해석방법을 사용하지 않고 복잡한 형상의 제진스프링을 적절한 탄성계수를 지닌 간단한 CATIA 3D 평판으로 모델링함으로써 컨테이너 제진시스템의 주요 모드를 예측할 수 있는 해석방법을 고안하였으며, 앞선 1/3 규격 모델의 시험 결과와 비교하였다. 이와 같은 결과들은 다목적 실용위성 2호기 뿐만 아니라 대형

* 정희원, 한국항공우주연구원, 연구원

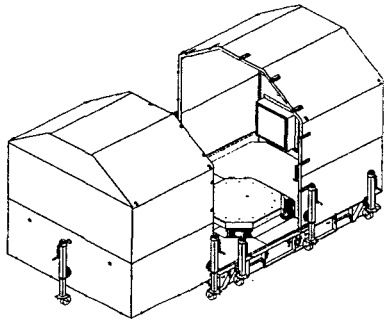
** 한국항공우주연구원, 연구원

통신위성을 포함한 추후 개발될 위성체의 운송 컨테이너 및 내부 제진 시스템의 제작에 중요한 정보로 사용되어질 것이다.

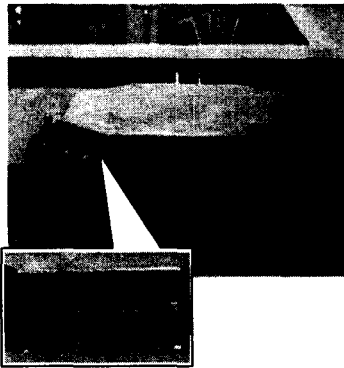
2. 다목적 실용위성 2호 운송 컨테이너의 형상

일반적으로 위성체 운송 컨테이너는 알루미늄 허니컴 판재와 구조적 강도 보장을 위한 알루미늄 각재로 제작되어진다. 덮개는 위성체 탈장착시 넓은 공간 확보가 가능하도록 양쪽으로 완전 분리가 가능하게 설계되어지며, 컨테이너의 중간에는 위성체를 설치하기 위한 강건한 구조의 받침대와 이를 지지하면서 외부의 운송 충격으로부터 위성체를 보호할 수 있는 와이어 스프링을 사용한 제진 시스템으로 구성되어진다.

그림 1은 직립 형태의 다목적 실용위성 1호기 운송 컨테이너 형상 및 내부 제진 시스템의 모습을 보여주고 있다.



(a) KOMPSAT-1 Shipping Container



(b) Shock Isolation System

Fig. 1 KOMPSAT-1 Shipping Container and Its Shock Isolation System.

다목적 실용위성 2호는 주 탑재물인 고해상도 카메라의 장착을 위하여 1호에 비하여 상대적으로 큰 규모와 중량을 가진다. 그림 2는

현재 개발중인 다목적 실용위성 2호기의 주요 형상 제원을 나타내며, 그림 3은 다목적 실용위성 2호기의 발사장 운송 작업에 사용되어질 보잉 747 수송기의 내부 선적 가능 체적을 나타낸다.

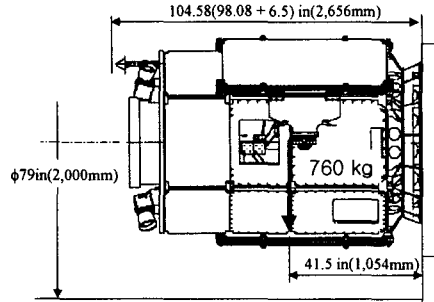


Fig. 2 Main Dimensions of KOMPSAT-2

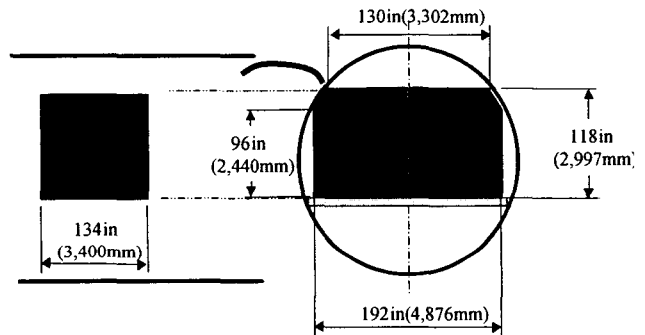


Fig. 3 Maximum Allowable Luggage Envelop of Boeing 747 Freighter

위의 그림에서 보인 바와 같이 2호기의 증가된 전장으로 인하여 1호기와 같은 직립형태의 운송 컨테이너의 사용이 불가능하며, L형 치구를 이용한 횡립 형태의 운송 컨테이너를 설계하였으며, 제진 스프링도 사각 받침면의 긴쪽에 2개, 짧은 쪽에 1개씩 총 6개를 배치하였다. 그림 4는 4.2(L)×2.4(W)×2.7(H)m의 크기로 최종적으로 설계된 다목적 실용위성 2호기 운송 컨테이너의 CATIA 3차원 모델이다. 컨테이너의 4구석에는 컨테이너의 이동 및 덮개의 개폐를 위하여 바퀴가 달린 리프트 잭(Lift Jack)을 장착하였으며, 컨테이너 하부에는 상차 및 하차 작업을 위하여 횡방향으로 두개의 포크 리프트(Fork Lift)용 관통구멍을 설계하였다.

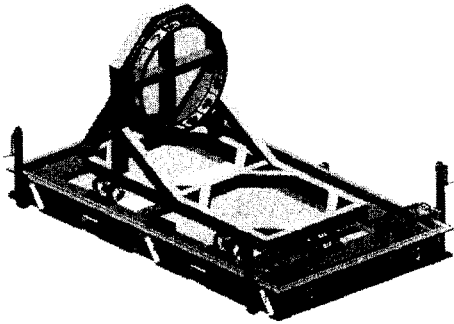


Fig. 4 KOMPSAT-2 Shipping Container

3. 컨테이너 설계 요구조건

다목적 실용위성 2 호 컨테이너의 경우, 운반 시 연료가 빈 상태이며, 이 경우 위성체 무게 760kg, 어댑터 및 L 형 받침대의 무게 240kg 을 고려하여 총 1000kg 의 적재질량을 설계기준으로 하였다. 일반적으로 위성체운송 시 위성체가 받게되는 진동환경은 첫째로 방진차량에 탑재되어 육상운송이 이루어지는 경우 차량의 급가/감속에 의한 최대 0.7G 가량의 동적가진이 존재하며, 항공수송 시에는 항공기 급상승/하강으로 인하여 최대 4 ~ 5G 의 정적하중이 존재하고, 제트엔진의 소음 및 진동으로 인한 랜덤진동가진이 위성체에 부가될 수 있다[1]. 이러한 준정적하중 (Quasi-static Load) 중 현재까지 육상, 항공수송과정 및 하역작업등에서 기록된 가장 높은 가속도치를 기준으로하여 컨테이너의 상하방향으로 최대 4.5G, 길이방향으로 최대 3G, 좌우방향으로 1.7G 의 설계하중을 설정하였다. 또한 동적 및 정적 가속도 성분에 의한 위성체와 컨테이너의 충돌을 방지하기 위하여 최소 50mm(약 2in)의 여유를 가지도록 요구하고 있으며, 그림 1 과 같이 설치된 스프링과 위성체가 이루는 강체모드에 대한 고유진동수는 위성체의 유연모드와의 동적 연성을 최소화하기 위하여 위성체 자체 고유진동수의 1/3 이하가 되도록 설계되어진다[2]. 또한 제진시스템의 고유진동수가 너무 낮으면 외부가진력에 의한 변위값이 커짐에 따라 위성체 운송시 위험요소로서 작용할 수 있으므로 최적화된 고유진동수 값의 선정이 중요하다. 다목적 실용위성 1 호의 경우 위성체의 수직축 방향으로는 약 60 Hz, 수평방향으로는 약 40

Hz 의 1 차 공진주파수를 가지고 있으므로 컨테이너 제진 시스템의 공진주파수는 수직 방향에 대하여 약 20Hz, 수평방향에 대하여 10Hz 범위에 분포 하도록 설계되었다.

4. 제진 시스템 1/3 규격 모델 시험

현재 상세 설계가 진행중인 다목적 실용위성 2 호 운송컨테이너의 내부 제진 시스템에 사용될 와이어 스프링의 동적특성 측정과, 설계 요구조건을 만족하는 스프링 사양의 선택, 추후 진행될 운송 컨테이너 실물에 대한 동특성 측정 시험의 준비를 위하여 실크기의 1/3 에 해당되는 모형을 만들어 강체 모드 공진 주파수 탐색 시험을 수행하였다.

그림 4 는 시험을 위해 제작된 제진스프링 1/3 규격 모델이다.

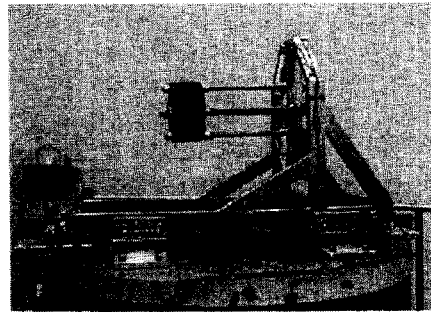


Fig. 5 Shipping Container 1/3 Scale Model

1/3 규격 모델에 사용된 제진 스프링은 실제 운송 컨테이너 제진 시스템에 사용되어질 것과 동일한 형태의 와이어 스프링을 사용하였으며, 스프링 탄성계수의 적정 사양 선정을 위하여 그림 6, 식 (1)과 같은 계산을 수행하였다.

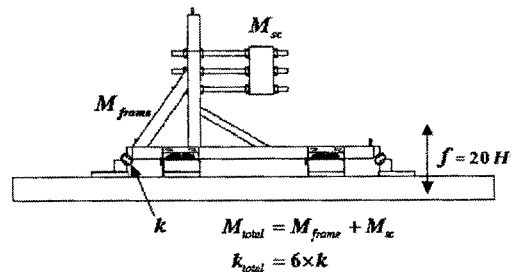


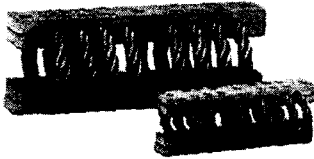
Fig. 6 Isolation Spring Stiffness Calculation

$$\omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{k_{total}}{M_{total}}}$$

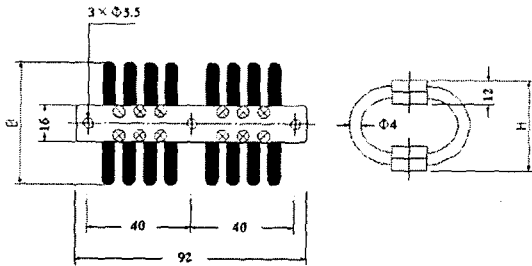
$$k_{total} = 6k = 4\pi^2 f^2 M_{total}$$

$$k = 32.7 \text{ kgf/cm} \quad (1)$$

위와 같은 계산을 통하여 최종적으로 선정된 제진 스프링의 사양을 그림 7에 나타내었다.



(a) Wire-Flex Spring 3D View



(b) Dimension

Name	Dimension(mm)		Stiffness(kg/cm)		
	H	B	Compression	45deg Compression & Roll	Shear
WF 043B	38	53	64.4	45.4	22.9

± 32.7kgf/cm

(c) Spring Stiffness

Fig. 7 Isolation Spring Specification

시험에는 한국항공우주연구원 우주시험동에 설치되어있는 대형 전자기 가진기(240KN 급)가 사용되었으며, 시험 대상물의 바닥 치수를 고려하여 직경 1.8m 의 헤드익스팬더(Head-Expander)의 상면에 6 개의 와이어 스프링(Wire-Flex Spring)을 각각의 고정치구를 사용하여 체결하였다. 또한 대략적인 질량분포를 맞추기 위하여 30kg 의 위성 질량보상체(Mass Simulator)를 실제 위성체 무게중심 위치에 해당하는 곳에 설치하였다.

가진기의 제어를 위하여는 1 개의 가속도계를 Head Expander 중앙에 설치하였으며, 위성체와

받침대의 강체모드 형상 검출을 위하여 총 20 개의 가속도계를 그림 8 과 같이 설치하였다.

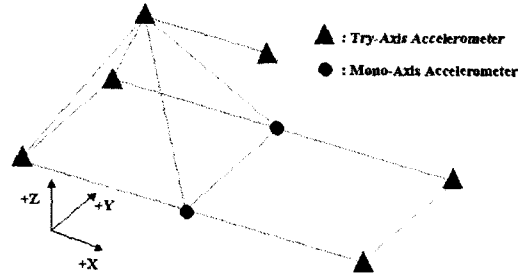


Fig. 7 Isolation Spring Specification

이때 측정 가속도계는 저주파 대역에서도 충분한 민감도를 가지는 것을 사용하였다. 일반적으로 제진용으로 사용되는 와이어 스프링은 하중의 증가에 따라 스프링 강성이 감소하는 연화 스프링(Softening Spring)특성을 지님으로[1], 이러한 비선형특성을 시험적으로 파악하기 위하여 5 ~ 100Hz 의 주파수 대역에 0.05G-peak 에서 0.225G-peak 까지 하중 조건으로 Sine Sweep 시험을 수행하였다.

그림 8 과 Table. 1 은 0.05g 가진 레벨에서 각각 수직 방향 채널의 주파수 응답함수(Frequency Response Function, FRF)와 주요 강체모드의 공진 주파수를 표시한 것이다.

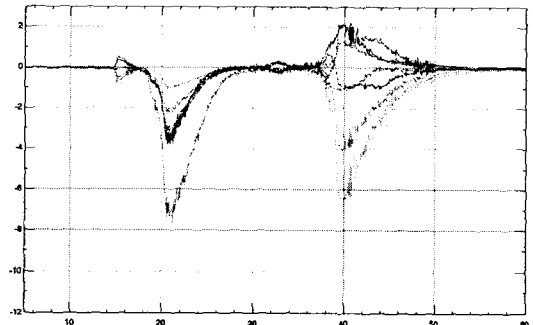


Fig. 8 Imaginary Part of FRF

Table 1 Measured Natural Frequency

Mode	Frequency(Hz)
Lateral	15.3
Vertical	20.9
Longitudinal	39.7

강체 모드중 횡방향 모드가 가장 먼저 나타났으며, 수직 모드는 설계시 목표로 했던 20 Hz 근방에서 나타났다. 또한 짧은 면에 하나씩 배치된 제진 스프링은 종방향 모드의 강성을 크게 증가시키는 것을 알 수 있다.

Table 2 Natural Frequency Variation

Excitation Level(g)	Frequency(Hz)			Max. Acc (g)	Amplif. Ratio
	Lateral	Vertical	Longi.		
0.05	15.3	20.9	39.7	0.35	7.11
0.1	14.2	19.1	37.3	0.48	4.16
0.125	14.6	18.6	36.6	0.52	4.12
0.15	13.3	17.25	36	0.62	3.68
0.175	12.8	17.5	35.5	0.6	3.54
0.2	12.2	16.04	36.1	0.72	3.3
0.225	12.2	15.74	36.3	0.75	3.31

Table 2 는 가진 레벨 증가에 따른 주요모드의 공진주파수 변화와 증폭비의 변화를 나타낸다. 와이어 스프링의 전형적인 비선형 특성으로 인하여 레벨의 증가에 따라 공진 주파수와 증폭비가 현저하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 광범위한 하중 조건에 따른 제진 시스템의 동적거동의 정확한 예측을 위해서는 선형성이 보장되는 영역에 국한된 강성값이나 하중 영역에서 평균화된 강성값이 아닌 다항함수로 유도된 탄성값을 고려해야 됨을 의미한다.

5. 위성체 운송 컨테이너 CATIA 3D Model 해석

위성체 운송컨테이너의 설계 단계에서 내부 제진 시스템의 대략적인 동적 거동을 파악하는 작업은 설계의 최적화와 신뢰도 향상에 매우 중요하다. 하지만 일반적으로 이러한 작업은 NASTRAN 과 같은 별도의 상용 해석 패키지를 사용하여야 되므로 적절한 설계 모델의 전환 작업이 요구되어지며, 필요에 따라서는 해석만을 위한 별도의 설계 모델을 구성하여야 하는 단점이 있다.

본 연구에서는 복잡한 형상의 제진 스프링을, 형상 치수를 조정하여 각 방향으로 적절한 강성을 부여한 등방성 평판으로 모사하여 컨테이너 CATIA 3 차원 모델에 부착시킴으로써, 동일 패키지 내에서 간단하고 신속한 방법으로 제진 시스템 저차모드를 추출해 내는 방법을 개발하였으며, 이를 상기의 1/3 규격 모델에 적용하여 보았다.

외팔보의 축방향 및 회방향 가진으로 인한 등방성의 변형은 Fig. 9 와 같이 나타내어진다.

Axial Load and Deflection

Lateral Load and Deflection

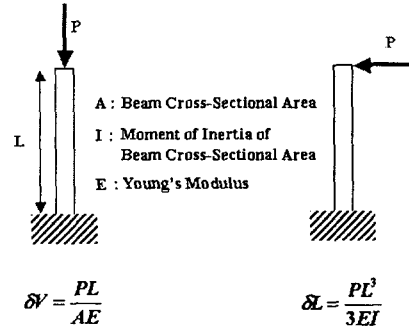


Fig. 9 Load and Deflection of a Cantilever Beam

탄성계수는 단위 하중에 따른 변형으로 정의됨으로 Fig. 10 과 같은 형상의 등방성 평판 모델을 가정하면 축방향 및 횡방향의 단위 하중에 의한 변형은 식 (2), (3)과 같이 표시될 수 있다.

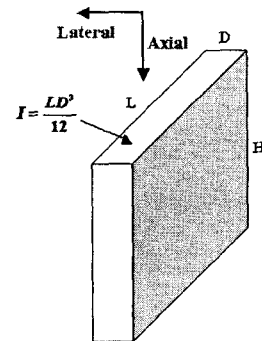


Fig. 9 Isotropic 3D Plate

$$\delta V = \frac{PH}{AE} = \frac{H}{LDE} \quad \text{Axial Deflection (2)}$$

$$\delta L = \frac{PH^3}{3EI} = \frac{4H^3}{ELD^3} \quad \text{Lateral Deflection (3)}$$

위 두식으로부터 각 방향의 탄성계수는 영의 계수(Young's Modulus) E 와 평판의 세방향 치수에 의하여 결정되며, 또한 두 방향의 탄성계수의 비는 식 (4)와 같이 D 와 H 의 비만으로 결정됨을 알 수 있다.

$$\frac{\delta L}{\delta V} = \frac{4H^3}{ELD^3} = \frac{4H^2}{D^2} = 4 \left(\frac{H}{D} \right)^2 \quad (4)$$

1/3 규격 모델의 제작에 사용되어진 와이어 스프링의 축방향 및 횡방향 탄성계수 비를 대입하여 등가 스프링 모델의 H/D 비를 구하면 식 (5)와 같이 주어진다.

$$\left(\frac{H}{D}\right)^2 = 0.3546$$

$$\frac{H}{D} = 0.5955 \text{ (If } D = 16\text{mm)}$$

$$H = 0.5955 \times 16$$

$$= 9.528\text{mm}$$

위의 계산에 의해 최종적으로 결정된 등가 스프링의 형상은 그림 10 과 같다.

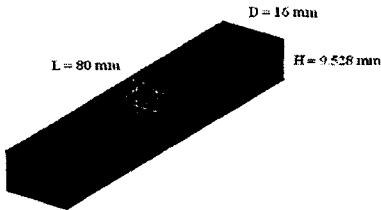


Fig. 10 Equivalent Spring Model(CATIA)

스프링 모델의 영의 계수 값은 축방향 단위 하중과 변형 δV 로부터 식 (6)과 같이 계산되어진다.

$$\sigma = E\varepsilon$$

$$\frac{P}{A} = E \frac{\delta V}{H}$$

$$E = \frac{PH}{LD\delta V}$$

$$= 469785\text{N} / \text{m}^2$$

해석 모델의 구성을 위하여 계산된 등가 스프링 모델의 한쪽 면을 기존의 위성 운송 컨테이너 제진 시스템 CATIA 모델에 장착-연결(Fastened-Connection)시키고 나머지 한쪽에는 고정 조건(Rigid Boundary Condition)을 부과하였으며, 30kg 질량체는 버추얼 파트(Virtual Part)로 연결된 집중질량으로 모사하였다. 그림 11 은 최종적으로 완성된 컨테이너 3 차원 해석모델을 나타내고 있다. 유한요소해석에는 선형 요소(Linear Element)만을 사용하였으며, 해석기(Solver)는 CATIA 내장 해석기인 엘피니(Elfini) 해석기를 사용하였다.

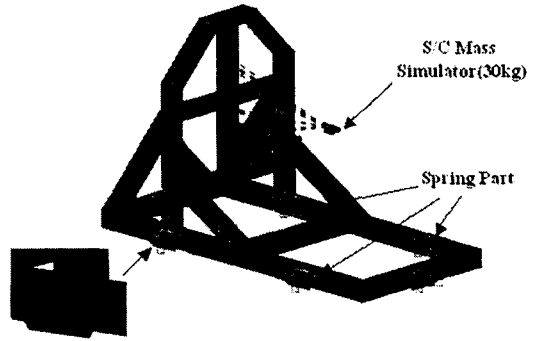
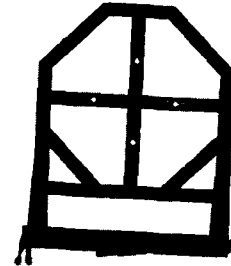
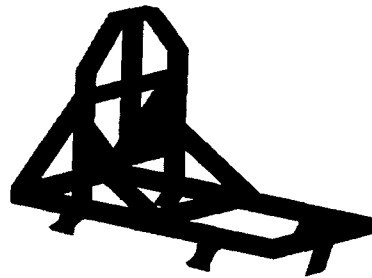


Fig. 10 Isolator System 3D Analysis Model

그림 (7)과 (8)은 해석 결과로 얻어진 제진 시스템의 최저차 두개의 모드 형상과 공진 주파수를 나타낸다.



(a) Lateral Mode(15.88 Hz)



(b) Vertical Mode(21.2 Hz)

Fig. 11 Mode Shapes and Frequencies

상기의 해석 결과는 컨테이너 설계에 있어 가장 중요한 변수인 저차 두 모드 대하여 앞선 1/3 규격 모델 시험결과와 동일한 값을 나타냄을 알 수 있다. 따라서 추후 실제 컨테이너에 사용될 제진 스프링 선정시 위와 같은 일련의 계산을 통하여 위성체가 장착된 제진 시스템의 동적 거동을 신뢰성 있게 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

6. 결론

조립 및 환경시험이 완료되어 발사장으로 운송되어지는 위성체는 많은 자본과 인력 및 시간이 투자된 고가의 물품으로 운송시 각별한 주의가 필요하다. 또한 위성체의 운송에 사용되어지는 컨테이너는 운송도중 발생하는 외란에 의한 충격으로부터 위성체를 보호하는 역할을 하므로 그의 적절한 설계와 제작은 위성체의 성공적인 임무수행을 위해 매우 중요한 요소이다.

본 연구에서는 다목적 실용위성 2 호의 지상지원장비 개발과정의 일환으로 추후 제작될 운송 컨테이너의 설계 요구 조건을 기술 하고 컨테이너 내부에 안치된 위성체의 동적 거동에 증대한 영향을 끼치는 제진 시스템의 동특성 분석을 위하여 수행된 1/3 규격의 모델 시험의 결과를 기술하였다. 또한 컨테이너 설계 단계에서 간단하게 적용할 수 있는 제진 시스템 해석 기법을 개발하여 앞선 1/3 해석모델에 적용하였으며, 시험치와 동일한 결과를 얻어내었다. 본 연구를 통하여 얻어진 정보와 경험은 추후 제작될 다목적 실용위성과 대형 통신위성을 포함한 차세대 위성체 개발 사업의 지상지원장비 개발 연구에 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

- (1) Harris, M., 1988, Shock and Vibration Handbook 3rd edition, McGraw-Hill, Inc.
- (2) Singal R. K., Maynard I. K., 1990, "Vibration Validation of a Spacecraft Container", Proceedings - Institute of Environmental Science, pp.509 ~514.
- (3) TRW Civil & International Systems Division, Space & Electronics Group, 1999, KOMPSAT FM Spacecraft Transportation form KARI to Launch Site.
- (4) 김홍배, 문상무, 우성현, 이상철, "위성체 이송용 컨테이너의 방진시스템 특성 연구", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp.1240~1245.
- (5) Sine Burst Test, Technical Memorandum, NASA Goddard Space Center.