# 다목적 실용위성 2 호 운송콘테이너의 동특성분석

°김 홍 배* • 우 성 현** • 문 상 무* • 이 상 설*

# Analysis on the Dynamic Characteristics of KOMPSAT-2 Shipping Container

Hong-Bae Kim, Sung-Hyun Woo, Sang-Mu Moon, Sang-Seol Lee

## 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 shock that can accompany the transportation. Korea Aerospace Research Institute has developed a new shipping container system that will be used to transport KOMPSAT-2(KOrea Multi-Purpose SATellite) from Tae-jon to launch site. To verify the dynamic characteristics, a Finite Element Analysis model and a 1/3 scaled mockup of the container were developed before the fabrication of real one. After fabrication of real shipping container, experimental modal analysis was performed to identify the dynamic characteristics. This paper presents a series of development process of KOMPSAT-2 shipping container.

## 1. 서 론

위성체 이송용 콘테이너는 위성의 안전한 운반을 목적으로 사용되는 지상 지원 장비(Mechanical Ground Support Equipment, MGSE)의 일종으로, 탑재물이 장착된 위성체를 운송시 발생되는 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(KOMPSAT) 2 호의 경우, 정밀 지상관측을 위한 고해상도 카메라(Multi Spectral Camera)를 비롯한 각종 자세제어계를 탑재하고 있어 운송과정 중 발생되는 진동·충격환경은 위성체의 주요 구조물 및 탑재물을 치명적으로 손상 시킬 수 있다. 따라서 위성체 운송 콘테이너의 설계 단계에서 적정한 설계 요구 조건을 설정하고, 제작이 이루어진 후 동특성분석 등을 통하여 운용환경에서의 내부 제진 시스템의 동적 거동을 예측하는 것은 위성 사업의 성공적인 수행을 위해서 필수적인 일이다.

대상물의 개발을 위하여 설계 요구조건을 선정하였으며, 사용되어지는 제진 스프링의 사양 선정 및 동특성 분석을 위하여 제진시스템의 1/3 규모로 모형을 제작한 후, 이를 이용하여 모드 해석 시험을 수행하였다. 이와 별도로 유한요소해석기법을 이용하여 콘테이너 제진시스템의 주요 모드를 예측할 수 있도록 해석을 수행하여, 1/3 규모 모형의 시험 결과와 비교하였다. 이와 같은 시험 및 해석를 바탕으로 다목적 실용위성 2 호기의 운송 콘테이너의 설계 및 제작을 수행하였고, 최종적인 검증을 위하여 위성체 1/1 모형과 연계한 동특성분석을 수행하였다.

본 논문에서는 한국항공우주연구원이 2 년여의 개발기간을 거쳐 최근 제작을 완료한 다목적 실용위성 2 호기 운송 콘테이너의 개발과정을 소개하고자 한다.

* 정회원, 한국항공우주연구원
** 한국항공우주연구원

## 2. 다목적 실용위성 2 호 운송 콘테이너의 설계요구조건

그림 1.에서 보인 바와 같이 2 호기의 증가된 전장으로 인하여 1 호기와 같은 직립형태의 운송 콘테이너의 사용이 불가능하며, L 형 치구를 이용한 횡립 형태의 운송 콘테이너를 설계하였으며, 그림 2. 와 같이 4.2(L) ×2.4(W)×2.7(H)m 의 크기로 제진 스프링도 사각 받침면의 긴쪽에 2 개, 짧은 쪽에 1 개씩 총 6 개를 배치하였다. 다목적 실용위성 2 호 콘테이너의 경우, 운반 시 연료가 빈 상태이며, 이 경우 위성체 무게 약 800kg, 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 모든 하중조건들을 고려한 설계기준하중인 준 정적하중 (Quasi-static Load)은 콘테이너의 상하방향으로 최대 4.5G, 길이방향으로 최대 3G, 좌우방향으로 1.7G 정도이다. 또한 동적 및 정적 가속도 성분에 의한 위성체와 콘테이너의 충돌을 방지하기 위하여 최소 50mm(약 2in)의 여유를 가지도록 요구하고 있으며, 위성체를 지지하고있는 플랫폼에 대한 강체모드 고유진동수는 위성체의 저차 유연모드와의 동적 연성을 최소화하기 위하여 위성체 자체 고유진동수의 1/3 이하가 되도록 설계되어지는 것이 일반적이다[2]. 또한 제진시스템의 고유진동수가 너무 낮으면 외부가진력에 의한 변위값이 커짐에 따라 위성체 운송시 위험요소로서 작용할 수 있으므로 최적화된 고유진동수 값의 선정이 중요하다. 다목적 실용위성 2 호의경우 위성체의 수직축 방향으로는 약 35 Hz, 수평방향으로는 약 20 Hz 의 1 차 공진주파수를 가지고 있으므로 콘테이너 제진 시스템의 공진주파수는 수직방향에 대하여 약 10Hz,수평방향에 대하여 12Hz 범위에 분포하도록 설계/제작되어야 한다.

그림 3.은 제진시스템에 사용되는 Aeroflex 사의 Wire 스프링의 형상 및 스프링상수를 나타내며, 일반적으로 와이어 스프링은 하중의 증가에 따라 스프링 강성이 감소하는 연화 스프링(Softening Spring)특성을 지님으로[1],

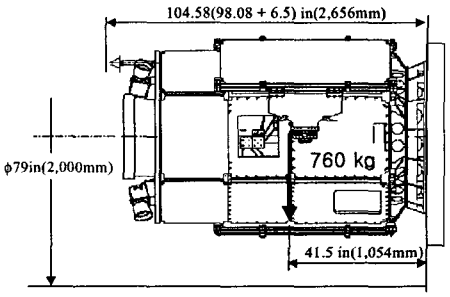



Fig. 1 Main Dimensions of KOMPSAT-2

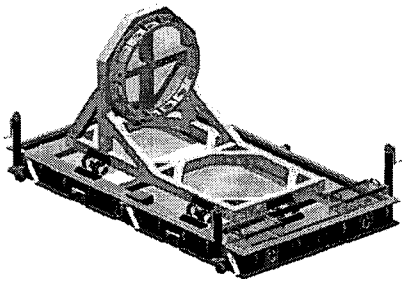
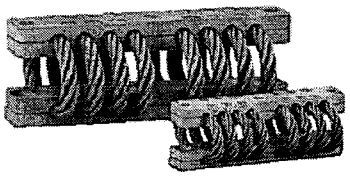
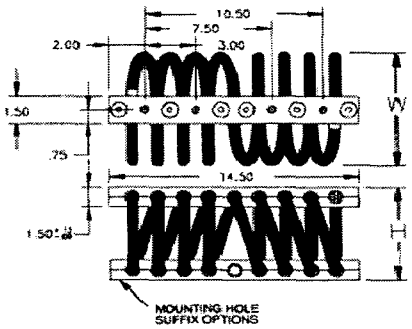


Fig. 2 KOMPSAT-2 Shipping Container



(a) Wire-Flex Spring 3D View




(b) Dimension

| W (in) | H (in) | Shock Stiffness(N/m) | Vibration Stiffness(N/m) |
|---|---|---|---|
| 6.25 | 7.00 | 356,526 | 963,583 |

(c) Spring Stiffness

Fig. 3 Isolation Spring Specification

저준위 진동시의 고유진동수 $f_v$와 충격부과시의 고유진동수 $f_s$비는 대략 다음과 같다.

$$f_s \approx 0.6 \cdot f_v \qquad (1)$$

이에 따라, 저준위진동시험에 의한 고유진동수 요구조건은 모든 방향에 대하여 약 15Hz 이하, 수평방향에 대하여 약 20Hz 이하에 분포하도록 설계되어야 한다.

## 3. 1/3 규모 모형을 위한 설계기법 검증

다목적 실용위성 2 호 운송콘테이너의 실물에 대한 설계 및 제작전에 내부 제진 시스템에 사용될 와이어 스프링의 동적특성 분석 및 설계기법의 검증을 위하여 실크기의 1/3 에 해당되는 모형을 설계/제작하여 실험적 모드해석 및 동특성분석 시험을 수행하였다.

그림 4 는 시험을 위해 제작된 제진스프링 1/3 규모 모형이다. 1/3 규모 모형에 사용된 제진 스프링은 실제 운송 콘테이너 제진 시스템에 사용되어질 것과 동일한 형상의 와이어 스프링을 사용하였으며, 스프링 탄성계수의 적정 사양 선정을 위하여 식 (2)과 같은 계산을 수행하였다.

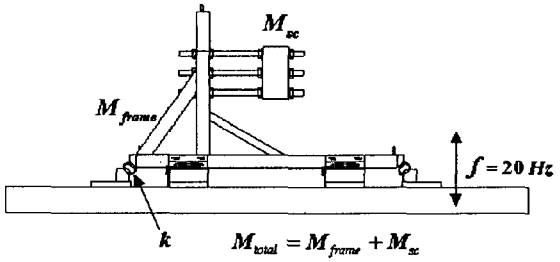



Fig. 4 Isolation Spring Stiffness Calculation

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

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

$$k = 32.7 kgf/cm \qquad (2)$$

제작된 모형의 시험적 검증작업은 한국항공우주연구원 우주시험동에 설치되어있는 대형 전자기 가진기(300KN 급)가 사용되었으며, 시험

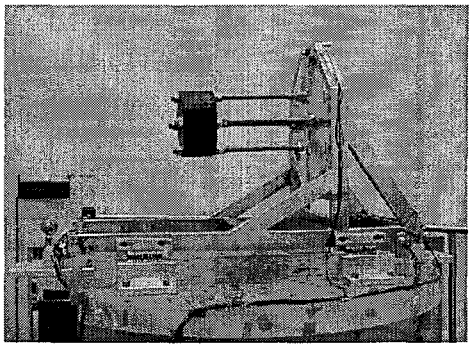


Fig. 5 Shipping Container 1/3 Scale Model

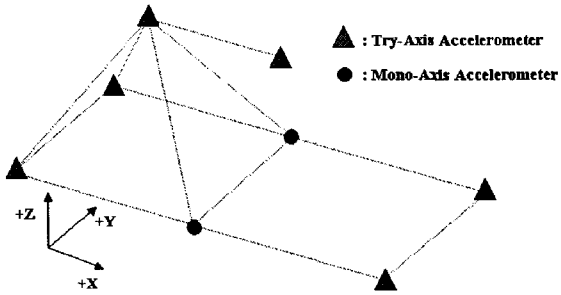



Fig. 6 Accelerometer Configuration

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. 비선형특성을 시험적으로 파악하기 위하여 5 ~ 100Hz 의 주파수 대역에 0.05G-peak 에서 0.225G-peak 까지 하중 조건으로 Sine Sweep 시험을 수행하였다.

Table 1 은 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 탄성값를 고려해야 됨을 의미한다. 강체 모드중 횡방향 모드가 가장 먼저 나타났으며, 수직 모드는 설계시 목표로 했던 20 Hz 근방에서 나타났다.

Table 1 Natural Frequency Variation

| Exciation 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 |

## 4.위성체 운송 콘테이너 제작 및 검증

실물크기의 운송 콘테이너를 설계하기 위하여 그림 7.과 같이 유한요소해석을 수행하였다. 프레임의 형상은 1/3 규모 모형과 동일하며, 해석 모델의 구성을 위하여 계산된 등가 스프링 모델의 한쪽 면을 기존의 위성 운송 콘테이너 제진 시스템 CATIA 모델에 장착-연결(Fastened-Connection)시키고 나머지 한쪽에는 고정조건(Rigid Boundary Condition)을 부과하였으며, 800kg 질량체는 버추얼 파트(Virtual Part)로 연결된 집중질량으로 모사하였다. 유한요소해석에는 선형 요소 (Linear Element)만을 사용하였으며, 해석기 (Solver)는 CATIA 내장 해석기인 엘피니(Elfini) 해석기를 사용하였다.

그림 8 의 해석결과와 1/3 규모 모형의 시험결과와 비교시 횡방향과 수직방향모드가 잘 일치하고 있음을 나타내고 있다. 이러한 시험 및 해석결과를 바탕으로 약 12 개월간의 설계 및 제작 기간을 거쳐, 2002 년 6 월 제작이 완료되었고, 실물에 대한 동특성분석시험을 수행하기 위하여 한국항공우주연구원으로 납품되었다. 제지시스템의 바닥면의 크기가 3.6(L)mx2.4(W)m 으로 항공우주연구원에서 보유중인 가진장치의 수용범위를 벗어나므로, 1/3 규모 모형시 사용되었던 가진방법의 사용이 불가능함에 따라 그림 9, 10.과 같이 여러 개의 모드해석용 가진장치를 사용하여 동특성분석 시험을 수행하였다. 동특성분석의 정확성 및 실제 위성과의 간섭점검을 위하여 기제작된 실물크기의 위성체 모형을 제작된 위성체 고정 프레임 및 제진시스템에 장착한후, x, y, z 3 축에 충분한 가진이 이루어지도록 그림 10 와 같이 가진기를 배치하였다. 응답측정용 가속도 센서는 1/3 규모 모형에 대한 시험 및 유한요소 모델에 대한 해석결과를 바탕으로 저차의 주요 모드들을 충분히 측정할 수 있게끔 그림 11.과 같이 10 곳의 위치에 각각 3 축 가속도계를 이용하였다. 가진방법은 10Hz 에서 130Hz 범위의 서로 독립된 저준위 랜덤신호를 3 개의 가진기에 각기 부과하였다.

그림 13.은 실험적 모드해석 결과로 얻어진 제진 시스템의 최저차 두개의 모드 형상과 공진 주파수를 나타낸다. 두개의 모드가 약 16 ~ 17Hz 범위에 분포하고 있음을 볼 수 있다.

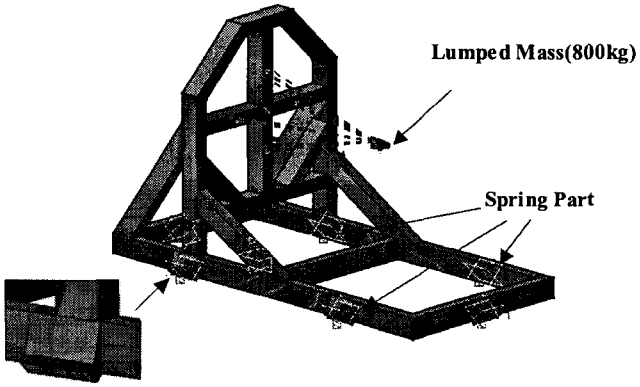
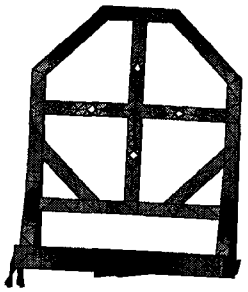
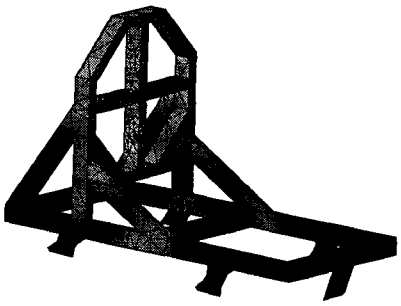



Fig. 7 Isolator System 3D Analysis Model



(a) Lateral Mode(15.88 Hz)



(b) Vertical Mode(21.2 Hz)

Fig. 8 Mode Shapes and Frequencies

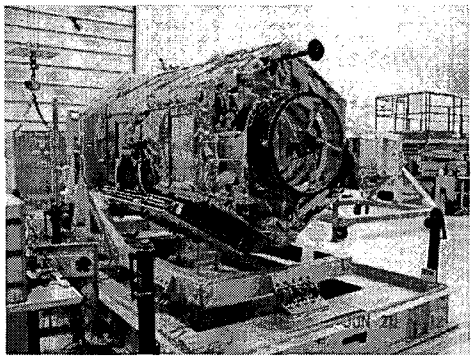
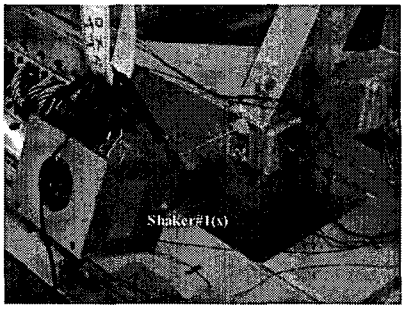
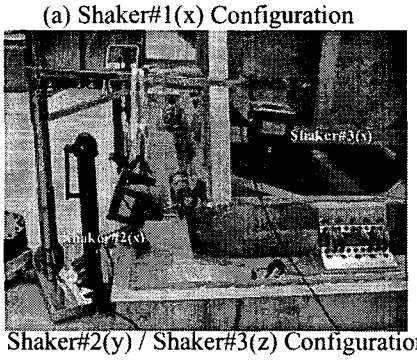


Fig. 9. Shipping Container Modal Test Configuration




(a) Shaker#1(x) Configuration




(b) Shaker#2(y) / Shaker#3(z) Configuration

Fig. 10. modal Shaker Configuration

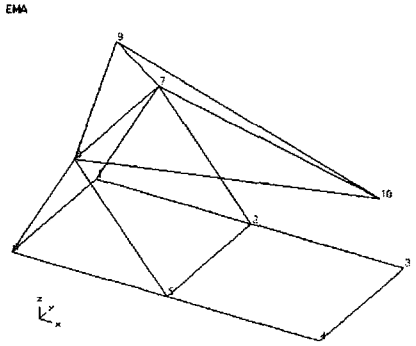



Fig. 11 Accelerometer Config.

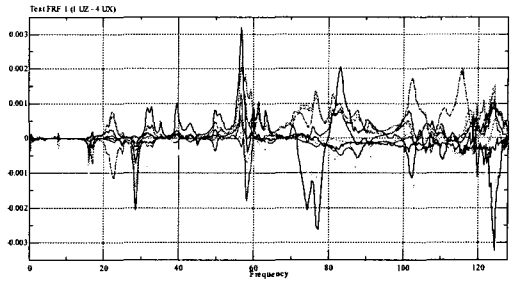
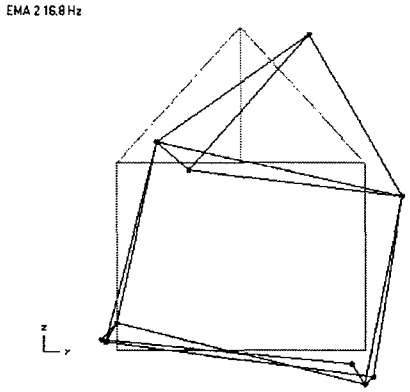
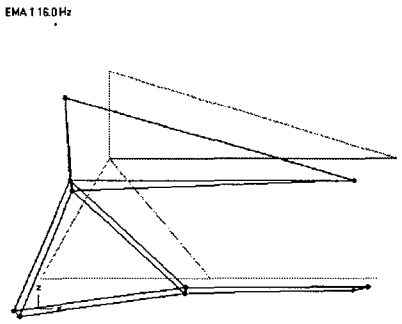


Fig. 12. Test FRF(Reference : Exc_z)




(a) Lateral Mode(16.9 Hz)




(b) Vertical Mode(16.0 Hz)

Fig. 13. Mode shapes and Frequencies

현재까지 수행한 콘테이너 제진시스템에 대한 동특성분석시험은 시험실내에서 저준위 가진력을 이용한 해석모델과의 유사성 여부를 점검하기 위한 시험이며, 실제 운송과정중 발생할 수 있는 도로상의 bump 충격 및 선적/하역시의 충격과 위성체 운송시 사용되는 방진차량(Air Riding Van)과의 연성시험등을 수행하기 위해서는 그림 14 와 같이 위성체의 운송로를 사전에 답사하는 모의 운송시험과정이 필요하다. 이러한 시험을 통하여 실제 콘테이너에 부과되는 충격레벨에 따른 고유

Fig. 14. Transportation of S/C(Air Riding Van)

진동수의 범위를 확인할 수 있을 것으로 기대된다.

## 5. 결 론

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

본 연구에서는 다목적 실용위성 2 호 운송콘테이너의 실제 제작에 앞서 콘테이너 내부에 설치된 위성체의 동적 거동에 중대한 영향을 끼치는 제진 시스템의 동특성 분석을 위하여 1/3 규격 모델을 사용한 모달 시험을 수행하였으며, 동모델에 대한 유한요소해석을 수행하여 시험치와 유사한 결과를 얻어냄으로써 신뢰성 있는 해석 기법을 개발하였다. 또한 상기로부터 얻어진 경험과 기술을 바탕으로 실제 운송 콘테이너의 제진 시스템의 사양을 선정하였으며, 최근 제작 완료된 실제 위성콘테이너를 대상으로하는 동특성 측정 시험을 통하여, 제진 시스템의 주요 설계 변수에 부합되는 적절한 제작이 이루어진 것을 확인할 수 있었다. 추후 기제작된 위성 콘테이너, 위성체의 질량 모사체 및 제진차량을 사용하여 실제 운송환경과 동일한 조건에서의 운송시험을 수행함으로써 충격환경에 따른 운송콘테이너의 비선형 특성을 파악하고, 진동신호 모니터링 장비의 검증 시험을 수행 할 예정이다. 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.

## 6. 참고문헌

(1) 우성현, 김홍배, 문상무, 김영기, "다목적 실용위성 2 호의 운송콘테이너 개발", 2001 년 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp.933~939.

(2) 김홍배, 문상무, 우성현, 이상설, "위성체 이송용 콘테이너의 방진시스템 특성 연구", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp.1240~1245.

(3) Harris, M., 1988, Shock and Vibration Handbook 3rd edition, McGraw-Hill, Inc.

(4) Singal R. K., Maynard I. K., 1990, Vibration Validation of a Spacecraft Container", Proceedings - Institute of Environmental Science, pp.509 ~514.

(5) TRW Civil & International Systems Division, Space & Electronics Group, 1999 KOMPSAT FM Spacecraft Transportation form KARI to Launch Site.

(6) Sine Burst Test, Technical Memorandum, NASA Goddard Space Center.