

# KSR-III 로켓의 도로운송 및 핸들링에 의한 진동하중 Vibration Loads on KSR-III during Ground Transportation and Handling

전영두\*·조병규\*\*·박동수\*\*·황승현\*\*·김준\*\*

Young-Doo Chun, Byoung-Gyu Cho, Dong-Soo Park, Seung-Hyun Hwang, and Jhoon Kim

Key Words : Vibration Loads(진동하중), Rocket(로켓), Ground Transportation(도로운송), Handling(핸들링).

## ABSTRACT

It is conducted to analyze vibration loads on KSR-III(KSR: Korea Sounding Rocket) and its major segments during their ground transportation and various handling process. These loads may be different from the real flight environment. Inadequate assessment of these loads can cause not only local damages on the rocket system but also the critical problem like flight mission failure. Therefore, transportation and handling loads must be considered during design and attenuated to ensure that the rocket structural damage does not occur. This work is concerned with the generation of criteria and prediction of transportation and handling loads for KSR-III. The results show that the shipping container is well designed to satisfy the design requirements. The maximum vibration level recorded during whole transportation and handling for KSR-III is less than 2g, the criteria of KSR-III movement condition.

## 1. 서론

KSR-III(Korea Sounding Rocket III)는 국내 최초의 액체추진제를 기반으로 개발된 과학로켓이며, 한반도 표준대기 상태 등의 과학관측 임무와 함께 향후 한국형 인공위성 발사체의 필수 기술을 확보하기 위한 목적이 있다(Fig. 1 참조). 일반적으로 인공위성이나 로켓, 우주발사체의 경우, 조립장과 발사장이 불가피하게 멀리 떨어져 있는 경우가 대부분이므로, 전기체나 각 부분별로 트럭, 항공기, 기차, 선박 등의 수단을 통해 운송하는

과정이 반드시 필요하게 된다. 장시간 운송 중에 기체는 랜덤진동이나 예기치 못한 충격진동을 겪게 되고, 기체의 조립과정이나 상/하차 과정에서도 충격이 가해지는 상황이 종종 발생한다<sup>[1]</sup>. 이렇듯 운송과정이나 핸들링 도중에 발생하는 충격이나 진동하중은 기체가 비행할 때 겪게 되는 것과는 그 특성이 상이하기 때문에, 운송이나 핸들링시의 진동하중을 고려하지 않고 이송을 수행하게 되면, 기체 각 부분에 손상이 가해질 수 있고, 이로 인해 비행임무가 실패하는 경우도 발생한다. 그러므로, 기체의 설계단계에서부터 운송이나 핸들링시의 하중이 고려되어야 하며, 또한 적절한 이송기준을 설정하여 이송치구를 제작하고 기체를 안전하게 발사장까지 운송하는 방법을 결정해야 한다<sup>[2,3]</sup>. KSR-III의 경우는 대전 KARI에서 부분 조립된 후, 방진설계가 된 이송컨테이너를 이용하여 시험장이 있는 안흥까지 일반국도를 통해 이송해야 한다.

본 연구에서는 KSR-III를 이송하는데 있어, 진동하중에 대한 기준을 설정하고, 적절한 이송치구를 제작하며, 방진특성을 살펴본다. 그리고, 실제 이송결과를 바탕으로 운송이나 핸들링과정의 적합성을 분석해 본다.

## 2. 진동하중 기준설정 및 이송치구 제작

### 2.1 기체이송시의 진동하중 기준설정

기체이송시의 진동하중에 대한 기준을 설정하기 위해서는, 우선 기체자체의 동특성을 파악해야 하며, 기체의 진동환경시험 기준과의 비교를 통해

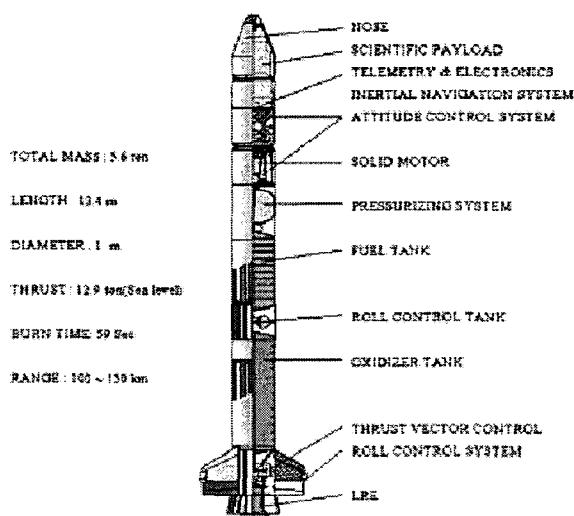


FIG. 1 Configuration of KSR-III

\* 한국항공우주연구원 우주발사체연구부  
E-mail : ydchun@kari.re.kr  
Tel : (042) 860-2906, Fax : (042) 860-2233

\*\* 한국항공우주연구원 우주발사체연구부

허용 가능한 진동수준을 평가해야 한다.

(1) 기체의 동특성 파악<sup>[4]</sup>

Fig. 2 에서는 KSR-III EM 전기체에 대한 모드 해석과정을 보여준다.



FIG. 2 Experimental setup for modal test of KSR-III with free-free boundary condition. Two orthogonal electromagnetic shakers excite the rocket in lateral direction (reference [4])

기체를 스프링으로 매달아 양끝이 자유단 경계조건이 되도록 하였고, 수직 방향의 두개의 가진기를 이용하여 기체를 횡방향으로 가진하며 기체의 동특성을 관찰한다. 전기체의 경우 첫번째 횡방향 고유모드는 9.3Hz 에 위치하며, 다섯번째 횡방향 고유모드는 25.3.Hz 에 분포한다.

그러나, 본 이송에서는 Fig. 3 과 같이 엔진부, 산화제 탱크부, 탱크 연결부, 연료 탱크부, 가압 탱크부로 구성되는 기체의 1 단이 대상이며, 길이는 전기체의 70%에 해당된다. 그러나, 기체 1 단부만의 진동해석시험을 따로 수행하지 않았기 때문에 Fig. 2 의 전기체 모드시험의 데이터를 바탕으로 예측해야 했다.

이송될 기체 1 단부를 Fig. 3 과 같이 양끝단을 포함해서 모두 6 지점을 고정시키도록 이송치구가

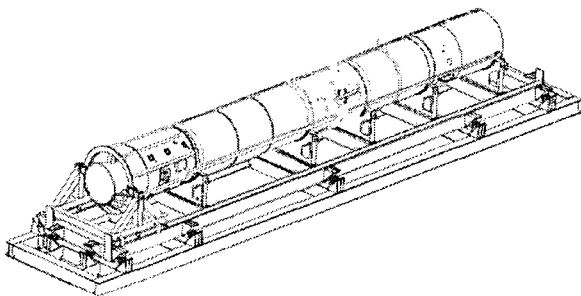


FIG. 3 Configuration of transportation jig for the first stage of KSR-III

설계될 예정이므로, 기체 1 단부의 다섯번째 횡방향 고유모드가 전체 기체거동에 지배적으로 기여할 것으로 파악된다. 전기체 모드시험 결과를 근거하여 이송될 기체 1 단의 다섯번째 횡방향 공진 모드를 예측해 보면 대략 30Hz 이상에 위치할 것으로 계산되었다.

일반적으로 운송치구는 스프링과 방진베드로 구성되며, 운송대상이 베드에 장착된 상태를 1 자유도 스프링-질량 시스템으로 모델링한다. 이때의 고유주파수 ( $f_{target}$ )는 운송대상물의 고유주파수 ( $f_{system}$ )와 다음과 같은 관계가 되도록 설계가 권장된다<sup>[5,6,7]</sup>.

$$f_{target} \approx (1/3)f_{system} \quad (1)$$

만일 방진시스템의 고유진동수가 너무 낮으면 외부가진력에 의한 변위값이 커짐에 따라 기체 운송시 위험요소로서 작용할 수 있으므로 최적화된 고유진동수 값의 선정이 중요하다. 본 연구에서는 기체 1 단부의 고유주파수 ( $f_{system}$ )를 30Hz 로 선정하여 기체가 장착된 운송치구 전체의 고유주파수가 10Hz 정도가 되도록 설계되었다.

(2) 입력가속도의 기준설정

기체의 각 부분은 서로 다른 수준의 랜덤진동과 조화진동, 충격진동 등의 주어진 수락환경시험을 거치면서 검증을 받았으며, 이송될 기체 1 단부에서는 Fig. 4 와 같이 탱크연결부의 진동시험수준이 가장 낮았다. 따라서, 기체 이송시의 최대 진동 수준은 이를 기준으로 설정되어야 한다.

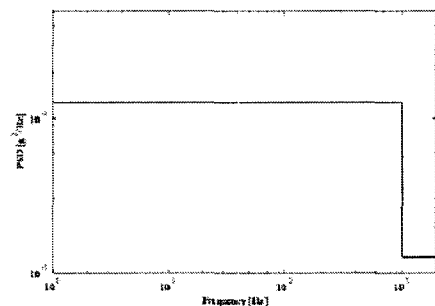


FIG. 4 Random vibration specification for a subsystem including avionic components of KSR-III

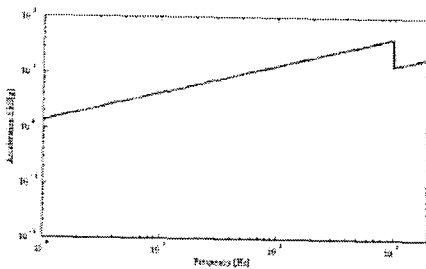
그러나, 일반적으로 랜덤진동이나 조화진동, 충격진동 간에는 정확한 등가의 상관관계가 밝혀져 있지 않기 때문에, 본 연구에서는 많이 사용되어지

는 랜덤진동특성을 이용하는 방법<sup>[8]</sup>으로 이송조건을 선정하고자 한다. 정규분포를 따르는 랜덤신호에 대해서, 최대값은 대략  $3\sigma$ 의 값을 상한으로 하여 나타나게 된다. 따라서, Miles 방정식과  $3\sigma$ 관계를 이용하면 식 (2)과 같이 가진입력 스펙트럼에 대한 최대 반응스펙트럼이 주파수에 따라 예측되어질 수 있다.

$$A(f) = 3\sqrt{(\pi/2)GfQ} \quad (2)$$

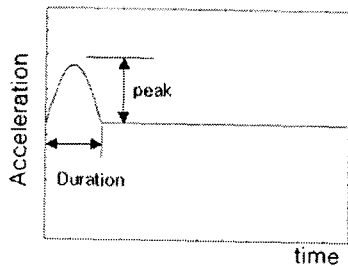
where  $A(f)$ : Maximum response spectrum [g]  
 $G(f)$ : Power spectral density [ $g^2/Hz$ ]  
 $Q$ : Q-factor (= 10)

식 (2)을 이용하여 Fig. 4의 랜덤가속도 스펙트럼에 대한 최대반응스펙트럼을 예측해보면 Fig. 5와 같이 계산되어진다.



**FIG. 5** Maximum allowable acceleration level estimated from random vibration specification on figure 4 using  $3\sigma$  formulation of equation (2)

Fig. 5의 주파수 영역에서의 최대반응 예측치에 대하여 시간영역에서의 최대입력 가속도의 특성을 파악하기 위해서는 우선 입력신호를 적절히 모델링해야 한다. 본 연구에서는 일반적으로 충격신호 입력모델로 많이 사용되고 있는 Fig. 6과 같이, 반주기 조화함수로 가정하였다<sup>[9]</sup>. 이때 입력 가속도의 모양은 주기와 피크 값으로 정의할 수 있다.

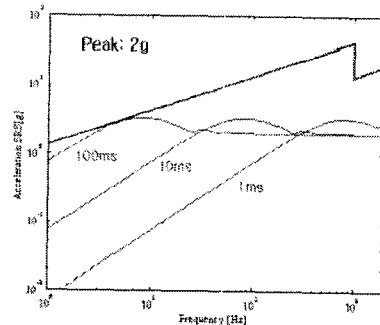


**FIG. 6** Input acceleration shape of half-sine defined by its peak and duration

Fig. 6과 같이, 반주기 조화입력 가속도 모델을 이용하여 주기와 피크 값을 변화시키면서 충격응

답함수(SRS)를 구하고, Fig. 5의 최대응답 예측치와의 비교를 통해 최대 허용입력 가속도 크기를 결정할 수 있다.

Fig. 7은 입력가속도의 피크 값을 2g로 고정하고 주기를 1, 10, 100ms로 변화시키면서 계산한 충격응답을 나타낸다.

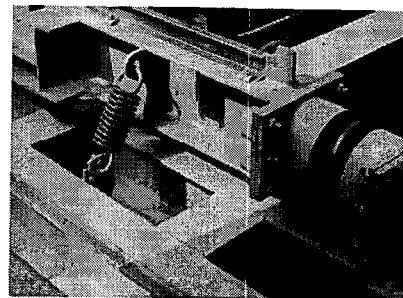


**FIG. 7** Calculation of SRS (Shock Response Spectrum) using half-sine acceleration input with 2g-peak and 1, 10, 100ms duration

앞서 운송치구의 고유주파수를 10Hz가 되도록 설계하였기 때문에 100ms 이상의 큰 충격은 기체에 가해지지 않는다고 가정하였다. Fig. 7에서와 같이, 최대응답 예측치와의 비교를 통해 운송과 핸들링 중에 기체에 입력되는 가속도의 최대 허용치를 주기 100ms 이하, 피크 값 2g 이하로 규정하였다.

## 2.2 기체 운송치구 제작 및 동특성 해석

기체 운송치구에 사용된 방진베드는 Fig. 8과 같이, 세 종류의 스프링(공기튜브, 압축, 인장타입)으로 구성되었다. 스프링의 종류와 개수 등은 기체 및 방진베드의 전체무게와 운송중의 진동하중 제한조건 그리고, 공진주파수가 함께 고려되어 선택되었다. 이 운송치구는 컨테이너로 덮이며



**FIG. 8** Three kinds of springs such as air type, tension type, and compression type are used to reduce the transmission of transportation vibration loads.

일반 트레일러에 실려 운반된다.

기체운송 시나리오에 맞춰 이루어진 사전검증 도로테스트를 통해, 최적의 이송조건이 되도록 튜닝작업을 수행하면서 이송치구의 방진성능을 확인하였다.

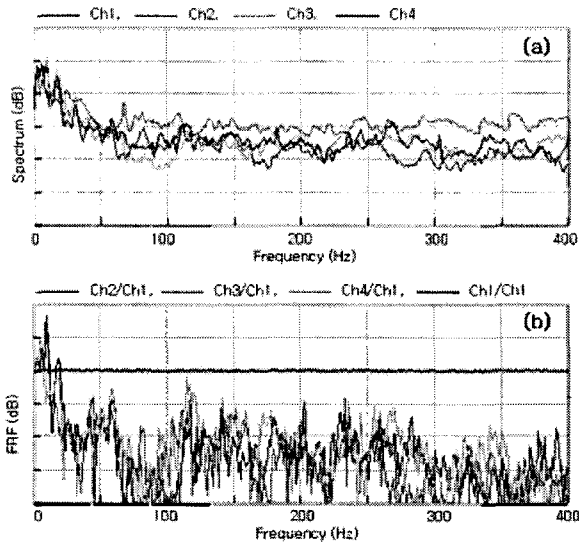


FIG. 9 Measured vibration spectrums on container bottom and the rocket surface during pre-transportation test

Fig. 9 는 기체표면(ch2, 3, 4)과 컨테이너 바닥(ch1)에서 측정된 가속도 신호에 대하여 스펙트럼과 주파수전달함수를 나타낸다. 도로운송 중에 발생하는 진동특성은 Fig. 9(a)와 같이, 운송치구의 공진주파수인 10Hz 근처를 제외하면 주파수영역에서 고른 랜덤진동 특성이 있음을 보여준다. 또한, Fig. 9(b)에서 알 수 있듯이, 20Hz 이상의 대역에서는 컨테이너 바닥에서부터의 진동이 기체로 잘 전달되지 않고 있음을 알 수 있어, 설계/제작된 기체 이송치구의 방진효과가 우수함을 확인할 수 있다.

### 3. 기체이송 결과분석

KSR-III 의 1 단부는 대전에 위치한 KARI 에서 조립된 후, 발사시험장이 위치한 안흥까지 일반국도를 통해 상용 트레일러에 실려 운반되었다. 도로상황에 따라 차이는 있지만, 시속 45km/h 이하의 정속주행을 원칙으로 했다. 기체에 가해지는 진동이벤트를 기록하기 위해 9 채널의 MSR3C 충격기록계를 운송 컨테이너 내부에 설치하였다. 또한, 기체표면에서 측정되는 진동신호의 실시간 모니터링을 위해 이송차량의 조수석에는 오실로스코

프를 장착하였으며, 관찰되는 진동신호의 크기를 바탕으로 차량의 운행속도를 조절하여 기체의 안전운송이 이루어 질 수 있도록 하였다. 운송 전 구간에 걸쳐 기체에 1g 이상의 가속도가 측정된 이벤트는 4 번이었으며, 최대 1.3g 로 기록됨으로써 운송조건 (2.0g 이하)을 만족했다.

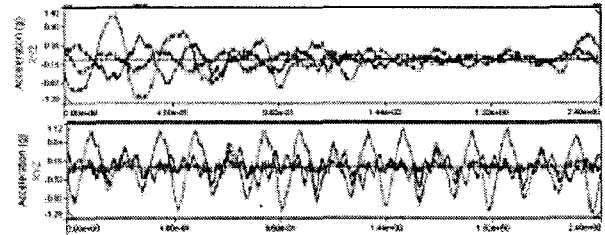


FIG. 10 Two typical acceleration signals of the recorded events

Fig. 10 은 한 이벤트에 대해 기록된 진동신호의 예를 나타낸다. 도로 수직방향으로의 가속도가 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 또한, 여기서 주목할 점은 Fig. 10(b)에서와 같이 운송치구의 고유주파수 성분 뿐만 아니라, 이보다 낮은 주파수 특성이 있는 차량전체의 고유주파수 성분(Fig. 10(a)) 역시 크게 기여한다는 사실이다.

### 4. 결론

본 연구는, 부분조립된 KSR-III 1 단부를 조립장에서부터 발사장까지 도로운송 및 핸들링 과정에서 기체가 겪는 진동하중에 대한 분석과 실험결과에 대한 해석을 주로 다루었다. 일반적으로 운송과정에서의 진동하중은 기체가 비행중에 겪게 되는 것과는 그 특성이 서로 상이하기 때문에, 이를 제대로 고려하지 않고 이송작업을 수행할 경우, 이 과정에서 기체에 심각한 손상이 가해질 수 있다.

기체 각 부분의 진동환경시험 데이터를 바탕으로 이송시의 등가 진동하중 규격을 설정하였고, 기체 자체의 진동특성을 바탕으로 하여 적절한 이송치구의 설계를 수행하였으며, 예비이송시험을 수행하여 이송시의 진동하중 규격에 맞도록 튜닝작업을 하였다. 그리고, 실제 기체의 운송 및 핸들링 과정에 있어, 모든 작업이 선정된 진동하중 규격에 맞게 이루어 졌으며, 이송치구의 적절한 방진성능을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구를 수행하는데 있어, 항공우주연구원 우주시험실의 기술적 자문과 장비지원에 감사를 표합니다.

### 참고문헌

- (1) Ostrem, F. E., 1971, "Transportation and Handling Loads," NASA SP-8077
- (2) Richards, D. P., and Hibbert, B. E., 1993, "A Round Robin Exercise on Road Transportation Data," Proceedings of Institute of Environmental Sciences. pp. 336~346.
- (3) Long, K. C., 2001, "Techniques to Reduce Vibration during Ground Transportation for Sea Launch Hardware," S/C and L/V Dynamics Environments Workshop
- (4) 장영순, 윤세현, 박순홍, 이영무, 2000, "KSR-III EM 전기체 모달시험," 3<sup>rd</sup> Symposium on Space Launch Technology
- (5) Singal, R. K., and Maynard, I. K., 1990, "Vibration Validation of a Spacecraft Container," Proceedings of Institute of Environmental Sciences. pp. 509~513.
- (6) 김홍배, 문상무, 우성현, 이상철, 2000, "위성체 이송용 컨테이너의 방진시스템 특성 연구", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 1240 ~ 1245.
- (7) 우성현, 김홍배, 문상무, 김영기, 2001, "다목적 실용위성 2 호의 운송컨테이너 개발," 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집
- (8) Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, 2000, MIL-STD-810F, pp. 516.5~11 and pp.514.5B-9.
- (9) Tom Irvine, 2000, "An introduction to the shock response spectrum", Lecture note