

KSR-III 1단부 도로운송에 의한 진동하중

전영두*, 조병규**, 박동수***, 황승현****, 박정주*****

Vibration Loads on the 1st stage of KSR-III during Its Ground Transportation

Young-Doo Chun*, Byoung-Gyu Cho**, Dong-Soo Park***,
Seung-Hyun Hwang****, Jeong-Joo Park*****

Abstract

It is conducted to analyze vibration loads on the 1st stage of KSR-III(KSR: Korea Sounding Rocket) 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.

초 록

본 논문에서는 KSR-III 1단부의 도로운송과 핸들링시에 예상되는 진동하중의 분석을 다룬다. 일반적으로 기체가 이송 중에 겪는 진동하중은 실제 기체가 비행 중에 겪는 진동 환경과는 많은 차이가 있다. 이송시 겪는 진동하중 특성에 대한 부적절한 해석은 이송 중에 로켓시스템에 직접적인 손상을 야기할 수 있을 뿐만 아니라, 비행임무 실패로 이어질 수도 있다. 그러므로, 기체 설계단계에서부터 이송시 진동하중을 함께 고려하여야 하며, 이송에 대한 적절한 방법을 강구해야 한다. 본 연구에서는, KSR-III의 도로운송이나 핸들링시의 진동하중을 예측하여 그 규격을 설정하는 과정을 기술하며, 저진동 이송치구의 동특성 분석과 사전도로테스트를 통하여 이송치구와 이송과정의 타당성을 검증하고, KSR-III 단인증 모델(1단)의 이송결과를 정리하고 분석한다. KSR-III 운송과정중의 최대 허용 진동하중은 2g이며, 실제 운송결과 이보다 작은 값이 기록되었다.

키워드 : 진동하중(vibration loads), 도로운송(ground transportation), 핸들링(handling)

* 설계종합그룹/ydchun@kari.re.kr

*** 설계종합그룹/dspark@kari.re.kr

***** 우주탐사체체계실/jjpark@kari.re.kr

** 설계종합그룹/busycho@kari.re.kr

**** 설계종합그룹/shhwang@kari.re.kr

1. 서 론

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 목적으로 개발되었다. 일반적으로 인공위성이나 로켓, 우주발사체의 경우 조립장과 발사장이 불가피하게 멀리 떨어져 있는 경우가 대부분이므로, 전기체나 각 부분 조립체 별로 트럭, 항공기, 기차, 선박 등의 운송수단을 통해 이송하는 과정이 반드시 필요하게 된다. 장시간 운송 중에 기체는 계속되는 랜덤진동과 예기치 못한 충격진동을 겪게 되고, 기체의 조립과정이나 상/하차 과정에서도 충격이 가해지는 상황이 빈번히 발생한다. 이러한 운송 중 전기체나 각 부분 조립체가 겪게 되는 진동하중은 비행시 겪는 환경조건과는 서로 상이하다. 따라서 기체 설계단계에서부터 운송과 핸들링 하중에 대한 고려가 포함되어야 하고, 필요시 운송하중 규격을 만족할 수 있도록 운송방법에 대한 대책을 마련해야 한다. 운송 및 핸들링 하중에 대한 잘못된 예측과 부적합한 대책은 결국 예기치 못한 충격진동이나 계속된 피로하중의 축적으로 인해 기체에 손상이 가해질 수 있고, 이는 비행임무의 실패로 이어질 수도 있다[1,2,3].

본 논문에서는, KSR-III 1단부의 운송이나 핸들링 과정에서 발생하는 충격/진동하중에 관한 허용하중 규격설정 방법 및 이송방법, 이송중의 진동하중 기록과 실시간 모니터링을 위한 시스템 구성 방법에 대해 다루고 있으며, 기존의 선행연구 자료와의 비교를 통해 기체 이송시의 허용하중 규격설정에 대한 타당성을 검증하고, 사전 운송테스트를 수행하여 기체의 이송과 관련된 일련의 과정을 평가한다. KSR-III 단인증 모델의 경우, 날개가 없는 1단부 조립체(엔진부+산화제탱크부+탱크연결부+연료탱크부+가압탱크부)를 대전 항우연에서 충남 서해안 발사장까지 일반국도를 통해 운반된 후 연소시험을 하게 된다.

2. 이송하중 허용규격 설정

2.1 진동 환경시험 규격과 기체의 동특성

이송하중 허용규격을 설정하기 위해서는 이송 경로상의 도로상황과 이송차량의 동특성을 바탕으로 이송대상물의 질량특성(외형, 질량, 관성모멘트)과 진동특성을 알고 있어야 하며, 이송하중의 특성을 결정된 후 이를 진동/충격 환경시험 조건에 반영할 필요가 있다. 비록 KSR-III에서는 핸들링이나 운송하중에 대한 초기설계가 자세히 언급되지 않았지만, 상용발사체의 환경시험 규격에 준하도록 콤포넌트나 부분 조립체에 대해 환경시험을 수행하였으므로, 어느 정도는 이송하중에 대한 인증을 거쳤다고 볼 수 있다. 기체이송 동안의 총 하중효과 (Effective loads)는 최소한 진동환경 수탁시험 수준보다 작아야 한다는 요구조건이 적용될 수 있으며, 각 부분체의 진동시험 규격이 다르기 때문에 그림 1과 같이 가장 낮은 진동시험 규격을 기준으로 이송하중 허용규격을 설정하였다[10].

또한 이송하중 허용규격을 설정하기위해선 기체자체의 동특성을 고려해야 한다. 그림 2는 KSR-III EM 기체에 대한 모달시험을 나타낸다 [4]. 기체를 번지케이블로 매달아서 양쪽 끝단이 모두 자유단이 되도록 하였고, 모달시험용 가진기 2개를 서로 직교하게 배치하여 기체 측면방향으로 가진되도록 하였다.

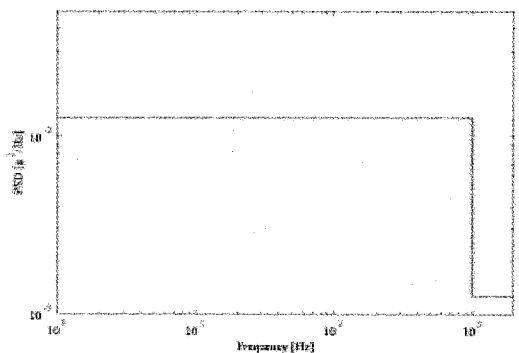


그림 1. 부분체의 랜덤진동 수탁시험 최소레벨

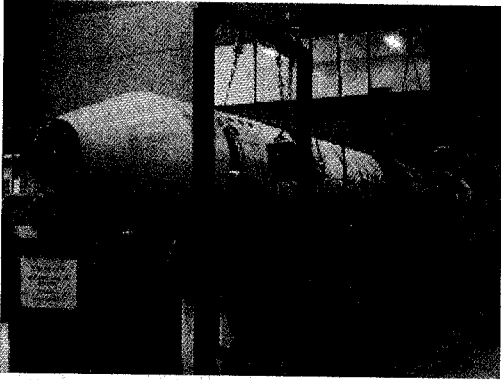
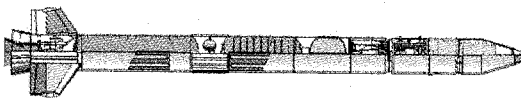


그림 2. KSR-III EM 기체 모델시험

측면방향을 향한 2축 가속도계를 기체 길이방향으로 11지점에 부착시킨 후 진동반응을 측정하였으며, 표 1은 가장 낮은 공진주파수 5개에 대한 결과를 보여준다. 이때 진동모드는 기체가 빔 모델의 횡방향 모드로 나타나게 된다.

표 1. KSR-III EM 기체 모드별 주파수

Mode	Frequency (Hz)	Damping (%)
1	9.3	3.46
2	10.4	0.88
3	12.0	1.80
4	18.2	1.03
5	25.3	0.99



(a) KSR-III 전기체 모델 (길이 14m)



(b) KSR-III 단인증 모델 1단부 (길이 10m)

그림 3. KSR-III 전기체와 단인증 모델의 비교

KSR-III 단인증 모델(기체 1단부)은 그림 3(b)와 같이 1단부(엔진부+산화제탱크부+탱크연결부+연료탱크부+가압탱크부) 조립체로 운송하게 되어있으며, 이송 초기계획에서는 기체 길이방향을 따라 고정점을 모두 6지점으로 하고, 시험장에서 기체를 설치하기 용이하도록 저진동 이송치구가 설계되었다(그림9 참조). 이때 기체를 고정하는 이송치구가 기체보다 강성이 더 크게 설계될 예정이므로 이송치구 자체의 모드형상은 고려하지 않기로 가정하고, 기체의 고정지점을 진동모드의 노드점으로 고려한다면, 6지점 고정점은 결국 6노드점을 의미하게 되므로, 다섯째의 진동모드가 기본 공진모드로 작용하게 될 것이다. 그리고 빔 모델에 대한 공진주파수(f)는 길이(l)에 대해 $f \propto 1/l^2$ 의 관계가 있으므로, 그림 3과 같이 전기체에 비해 길이가 대략 10/14 수준으로 줄어들었기 때문에, 유사성을 이용하여 1단부만의 공진주파수를 근사적으로 계산해 보면 표 1의 값에 비해 $1/(10/14)^2 \cong 2$ 배 정도 증가할 것으로 예측된다. 이 경우 기본 공진모드는 전기체의 다섯째 진동모드에 해당될 수 있고, 공진주파수는 표 1의 다섯째 공진주파수보다 2배 정도 증가된 50Hz로 근사시킬 수 있을 것이다. 그러나 기체를 고정하는 이송치구가 실제로는 강체가 아니므로 이러한 해석결과와는 많은 오차가 있을 것이다. 만일 기체를 빔으로 모델링하고 고정치구 역시 동일한 길이와 재질의 빔으로 모델링하여, 두 빔을 서로 접친다고 가정하면, 공진주파수(f)는 두께(h)에 대해 $f \propto h$ 의 관계에 있으므로 두께가 2배가 되면 공진주파수도 2배가 된다. 따라서 첫째 진동모드에 해당되는 KSR-III 1단부 공진주파수는, 짧아진 길이의 영향과 이송치구로 인하여 대략 4배정도의 증가가 예상되며, 표 1의 첫째 공진주파수를 참고하면 결국 1단부의 공진주파수는 대략 40Hz 정도에 분포함을 알 수 있다. 그러나 이러한 모델링에도 상당한 오차가 포함되어 있으므로, 위의 결과종합해 보면 KSR-III 1단부와 이송치구의 결합체의 기본 공진주파수는 대략 30Hz 정도에 분포할 것으로 판단된다. 그러나 실제 이송 대상체와 이송치구에 대하여 FEM 이나 모델시험을 통해 보다 정확하게 동특성을 파

악해야 하나, 여러 제약조건으로 인해 본 연구에서는 위의 가정을 근거하여 기체이송을 준비하였다.

일반적으로 운송치구는 스프링과 장착베드 시스템으로 구성되며, 운송 대상체가 장착베드에 고정된 상태에 대해 1자유도 스프링-질량 시스템으로 모델링하게 된다. 이때의 고유주파수 (f_{target})는 운송대상물의 고유주파수 (f_{system})와 식 (1)의 관계가 성립되도록 설계가 권장된다 [5,6,7].

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

만일 방진시스템의 고유진동수가 너무 낮으면 외부 가진력에 의한 변위값이 커짐에 따라 기체 운송시 위험요소로서 작용할 수 있으므로 최적화된 고유진동수 값의 선정이 중요하다. 본 연구에서는 기체 1단부의 고유주파수 (f_{system})를 30Hz로 예측하였으므로, 기체가 장착된 운송치구 전체의 고유주파수가 10Hz정도가 되도록 저진동 이송치구를 제작할 필요가 있었다.

2.2 등가의 랜덤진동 수준과 하중주기

계산방법

일반적으로 랜덤진동과 조화진동 간에는 물리적으로 등가의 상관관계가 명확히 밝혀져 있지 않기 때문에 정확히 서로의 등가하중을 산출할 수는 없다. 하지만 랜덤진동의 경우에는 진동레벨과 가해진 주기에 따라 등가의 피로하중을 예측하는 일반적인 방법이 알려져 있으므로, 이를 참고하여 이송하중 허용규격을 설정하고자 한다.

진동하중레벨(W)와 시험주기(T)는 식 (2)의 등가 피로하중관계를 갖는다[8].

$$W_1/W_2 = (T_2/T_1)^{(1/4)} \quad (2)$$

여기서, 진동하중레벨(W)는 g^2/Hz 또는 g_{rms} , 시험주기(T)는 hour의 단위를 갖는다. 따라서 그

림 1의 랜덤진동 하중규격을 기준으로 시험 주기별 등가하중을 산출해 보면 아래와 같다.

표 2. 랜덤진동 하중의 주기별 등가하중

		Case1	Case2
hour		5	10
PSD (g^2/Hz)	1 ~ 1000Hz	0.003589	0.003018
	1000 ~ 2000Hz	0.0003589	0.0003018

그러므로 운송 중 평균진동하중은 이송시간에 따라 표 2의 값을 넘지 않도록 주의해야 한다. 그러나 이 값은 주파수 영역에서의 평균진동하중을 나타내므로, 운송과정 중 진동신호를 실시간 모니터링하면서 주파수 영역에서의 평균치를 관찰하는 것은 바람직하지 않기 때문에, 시간영역에서의 진동하중에 대한 규격을 선정할 필요가 있다.

2.3 충격진동 허용상한선 계산방법

정규분포를 따르는 랜덤신호에 대해서, 최대 값은 대략 3σ 의 값을 상한으로 하여 나타나게 된다. 따라서 Miles 방정식과 3σ 관계를 이용하면 식 (3)과 같이 입력 스펙트럼에 대한 최대 반응 스펙트럼이 주파수 영역에서 예측되어질 수 있다 [8,9].

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

여기서, Q 는 일반적으로 10 값을 사용하며, $G(f)$ 는 PSD를 나타낸다. 식 (3)를 그림 1에 있는 진동환경 수락시험 규격을 적용하면, 최대반응 스펙트럼은 그림 4와 같이 계산되어진다. 그림 4의 주파수 영역에서의 최대반응 예측치에 대하여 시간영역에서의 최대입력 가속도의 특성을 파악하기 위해서는 우선 입력신호를 적절히 모델링해야 한다.

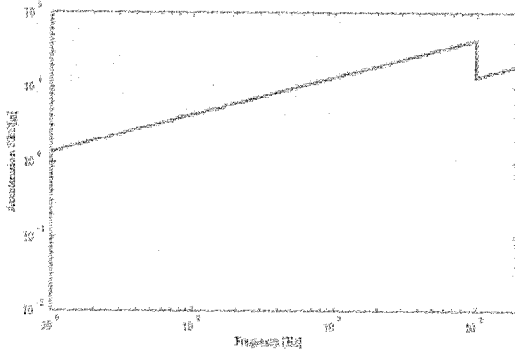


그림 4. 최대반응 스펙트럼

본 연구에서는 입력신호를 모델링 하기 위해, 그림 5와 같이 충격신호 입력모델로 많이 사용되고 있는 반주기 조화함수로 가정하였다.

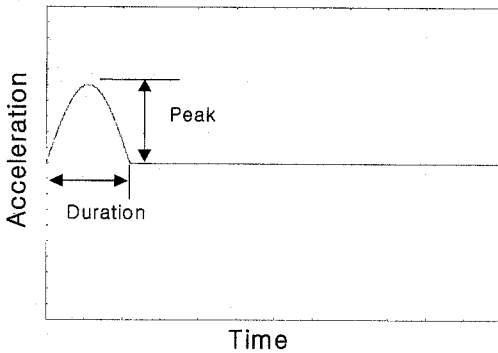


그림 5. 충격신호 입력모델

이때 입력 가속도의 모양은 주기(duration)와 피크(peak) 값으로 정의할 수 있다. 그림 5와 같이, 반주기 조화입력 가속도 모델을 이용하여 주기와 피크 값을 변화시키면서 충격응답스펙트럼(Shock Response Spectrum)를 구하고, 그림 4의 최대응답 예측치와의 비교를 통해 최대 허용입력 가속도 크기를 결정할 수 있다. 그림 6은 입력가속도의 피크 값을 2g로 고정하고, 주기를 1, 10, 100ms로 변화시키면서 계산한 충격응답을 나타낸다. 이때 앞서 운송치구의 고유주파수

를 10Hz가 되도록 설계하였기 때문에 100ms 이상의 큰 충격은 기체에 가해지지 않는다고 가정하였다. 계산결과를 살펴보면, 충격의 시간길이 100ms일 경우에는 그 크기가 2g를 넘어서는 안되며, 주기가 100ms보다 짧아질수록 허용 가능한 충격크기는 조금 더 증가될 수 있음을 확인할 수 있었다.

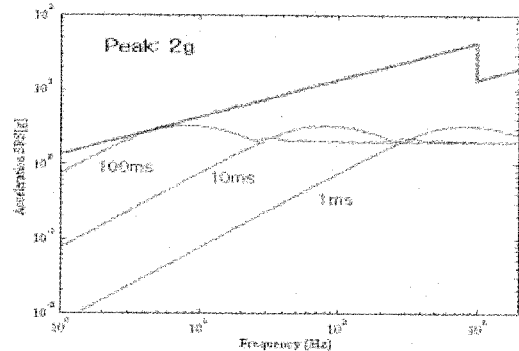
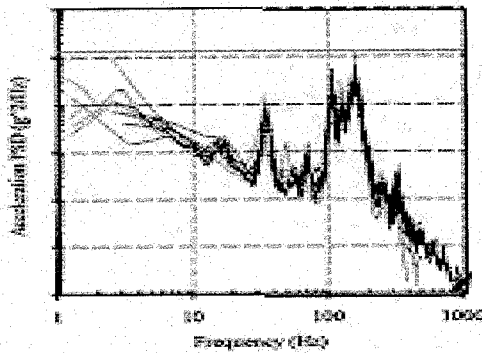


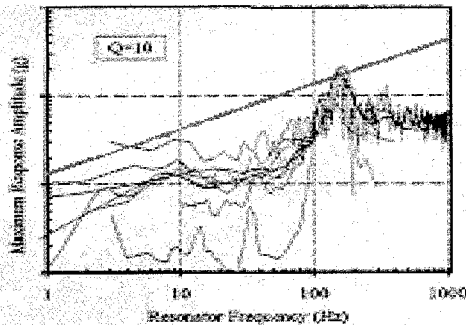
그림 6. 충격응답 스펙트럼

따라서 최대응답 예측치와의 비교를 통해 운송과 핸들링 중에 기체에 입력되는 가속도의 최대 허용치를 주기 100ms이하, 피크 값 2g이하로 규정하였다.

지금까지 계산된 결과에 대한 타당성을 검증하기 위하여 외국사례와 비교를 수행해보면, 참고문헌[1]의 경우, 핸들링과정 중에는 대략 1.3g (40ms)이상의 충격은 거의 없었던 것으로 기록되어 있으며, 운송 중에는 진동레벨이 0.2 ~ 1.0g 수준인 것으로 파악된다. 또한 참고문헌[2]의 경우, 운송과정에서는 충격 크기가 대략 0.7g 수준임을 확인할 수 있다. 그림 7(a)는 주파수영역에서의 PSD (Power Spectrum Density) 계산결과이며, 붉은 선은 그림 1의 랜덤진동 수라시험 레벨을 나타낸다. 이 경우의 도로이송 진동레벨은 KSR-III 진동환경시험에 비해 낮게 나타나고 있다. 여기서 100 ~ 200Hz부근에서의 피크는 실험에 사용된 차량자체의 특성으로 인해 나타났기 때문에 도로의 특성이라 할 수는 없다.



(a) 가속도 PSD



(b) 최대반응 스펙트럼

그림 7. 도로테스트 진동데이터 (참고문헌[2])

그림 7(b)는 SRS(Shock Response Spectrum)를 구한 결과이고, 붉은 선은 그림 4에서 예측한 SRS에 해당되며, 랜덤진동 수락시험 레벨이 대부분의 주파수 영역에서 실제 측정 데이터를 커버하고 있음을 나타낸다. 또한 참고문헌[3]의 경우, 그림 8은 측정된 가속도신호를 바탕으로 SRS를 구한 결과이며, 붉은 선은 그림 4에서 예측한 SRS에 해당된다. 동일한 시험조건에서도 이송차량의 운송물 적재 위치에 따라 기록되는 진동하중에 많은 차이가 있음을 보여주며, 트레일러 종류에 따라서도 많은 차이가 존재한다. 그 결과 lowboy 트레일러의 중앙에 운송물을 적재하는 것이 가장 운송 중 진동하중이 가장 낮음을 알 수 있다. 또한 랜덤진동 수락시험 레벨이 대부분의 주파수 영역에서 실제 측정 데이터를 커버하고 있음을 알 수 있다.

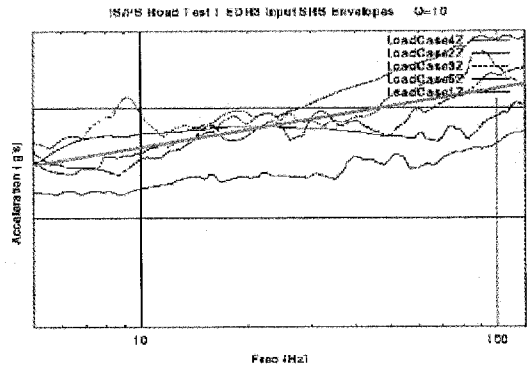


그림 8. 도로테스트 진동데이터 (참고문헌[3])

3. 이송컨테이너 설계

저진동 이송차구의 초기설계는 그림 9와 같이 설계되었으며, 설계초기의 허용 운송하중은 최대 4g로 설정되었다. 그리고 기체 1단부를 6지점에서 받치며 엔진부 끝단은 힌지(hinge)로 고정하고 나머지 5개소는 슬링(sling)으로 고정하도록 했으며, wire-rope 타입의 스프링 14개를 사용하도록 하였다. 이송컨테이너는 일반 트레일러에 실려 운반될 수 있는 표준규격을 갖는다.

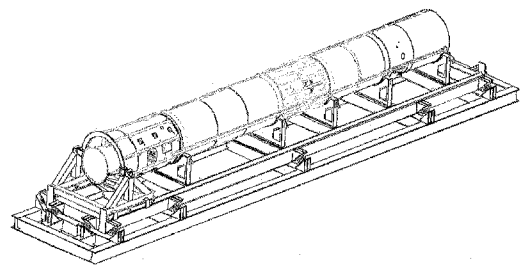


그림 9. 저진동 이송차구 설계 개념도

그러나 실제 최종 이송차구에는 그림 10과 같이, 질소가스를 사용하는 튜브스프링 6개, 인장스프링 8개, 압축스프링 4개가 사용되었으며, 가압탱크부와 연료 탱크부 사이의 받침대를 제거하여 엔진부 힌지를 포함하여 모두 5지점에서 기체를 고정하도록 하였다. 또한 받침대와 기체의 확실

한 접촉을 위해 받침대의 면 높이를 조정가능하게 했으며, 슬링으로 고정하지 않고, 고정치구를 별도로 제작하여 기체 윗면에서도 고정치구의 높이를 조절하여 기체와의 확실한 접촉이 가능하도록 수정하였다. 이러한 일련의 수정사항은 사전 도로테스트를 통해 운송하중 측정/분석 결과를 바탕으로 하였다. 그리고 사전 도로테스트 전에 간단한 진동시험을 수행하여 운송치구의 공진 주파수가 대략 8 ~ 10 Hz 부근에 존재함을 확인했으며, 예상치와 거의 일치함으로써 수정내용이 타당했음을 알 수 있었다.

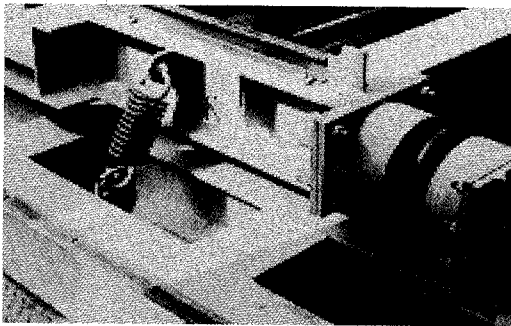


그림 10. 저진동 이송치구 사진

4. 이송하중 모니터링 시스템

기체 운송중의 진동하중을 적절히 기록/모니터링 할 수 있는 시스템을 그림 11과 같이 구성하였다. 운송 중 진동하중 측정은 크게 충격기록계와 실시간 모니터링 시스템으로 이루어졌다. shockwriter3000 충격기록계는 사용이 간단하나 최소 트리거 레벨이 2g 이상으로 큰 진동환경에 적합한 제품이라는 단점이 있으며, MSR-3C 충격기록계는 9채널(3ch * 3set)로 구성되어 있으며, 트리거 레벨에 제한이 없고, 최대 3.2kHz 샘플링 가능하며 자체메모리가 허용하는 범위까지 측정 이벤트와 기록시간을 임의로 조절 가능하고, 전용 가속도계를 이용하기 때문에 계측하고자 하는 위치에서의 진동신호를 정밀하게 측정할 수 있는 장점이 있다.

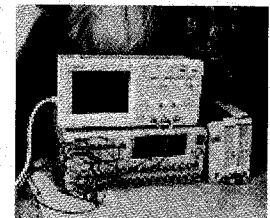
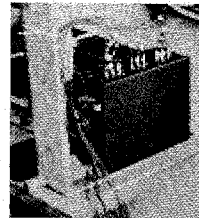
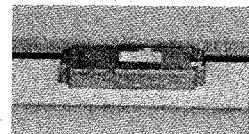
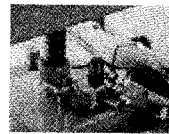
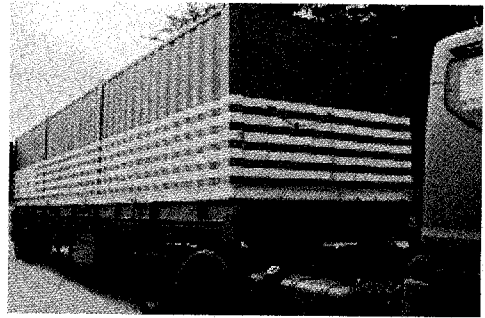


그림 11. 이송차량, 이송컨테이너, 진동센서, 충격기록계, 모니터링 시스템

이와 함께 운송 중 실시간 진동하중을 모니터링하기 위해 “가속도계+컨디셔닝 앰프+오실로스코프”를 이용하였으며, 진동신호 수준에 따라 차량의 운행조건을 실시간으로 변경시킬 수 있도록 하였다. 그리고 DAT-tape 기록계를 추가로 부착하여 이송구간마다 도로하중 신호를 기록하여 추후 신호분석에 이용하도록 하였다.

5. 사전테스트 및 실제이송 결과정리

단인중 모델(기체 1단부)를 실제 운송하기에 앞서, 제작된 운송치구의 성능검증을 위해 KSR-III EM 1단부를 대상으로 실제 이송경로를 따라 사전 도로테스트를 수행하였으며, 이때의 결과를 바탕으로 이송치구의 형상수정과 적절한 운송조건을 얻고자 하였다. 초기 제작된 운송치구는 그

림 9와 같이, 엔진부 힌지고정을 포함하여 6지점 받침이 있었으나, 높이를 조절할 수 없는 구조였으므로 대부분의 받침부와 기체 사이에 간극이 존재했으며, 3지점 슬링 고정을 하였다. 발사장까지 1차 운송시험을 했으며 그 결과는 그림 12에 나타나 있다. 운송 중 계속해서 기체에 충격진동이 발생하고 있음을 확인하였고, 최대 17g 이상의 충격이 기록되는 등 저진동 이송치구의 효과가 거의 없다는 것을 알게 되었다.

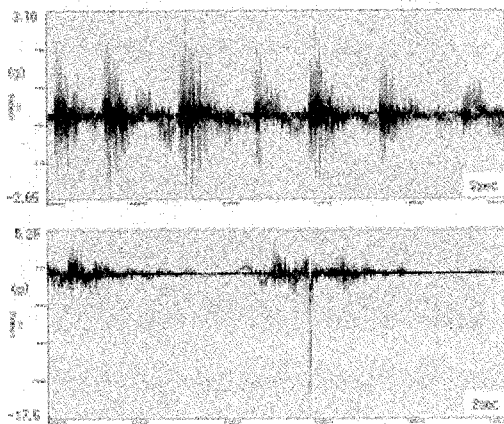


그림 12. 1차 사전 도로테스트 결과

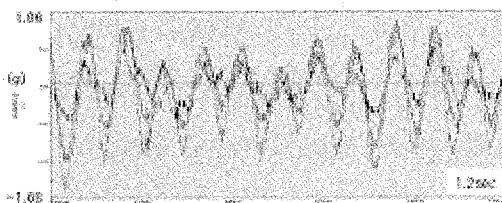


그림 13. 3차 사전 도로테스트 결과

이러한 사전 도로테스트 결과를 바탕으로 이송치구의 문제점을 찾아내고 적절히 수정을 수행한 결과, 그림 13과 같이 3차 사전 도로테스트에서는 운송하중 규격에 만족하는 진동하중(2g 이하)이 기록됨을 확인할 수 있었다. 그림에서의 사인파형 진동신호는 설계된 이송치구의 기본 공진주파수로 대략 10Hz에 해당된다. 이때의 운행

조건은 최대시속 45km/h였으며, 평균적으로 35~40km/h를 유지하도록 하였으며, 도로중간의 둔덕이나 파인 곳, 교량 이음매 등에서는 주의하도록 하였다.

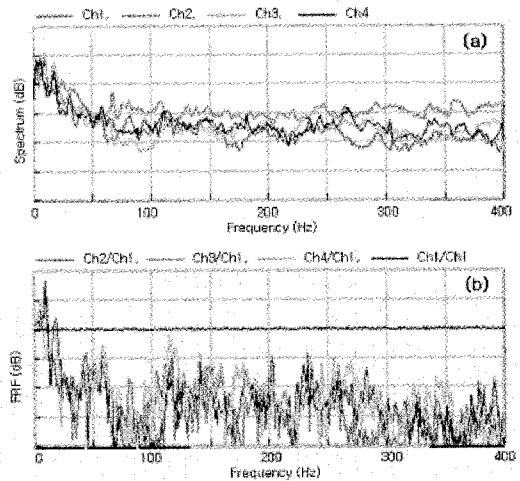


그림 14. 이송치구의 저진동 성능분석

그림 14는 3차 사전테스트에서 실시간 모니터링 시스템의 DAT-Tape recorder에 기록된 진동 신호로 주파수영역 해석을 수행한 결과를 보여준다. 여기서 ch1은 이송컨테이너 바닥에 위치한 가속도계 신호이며, ch2, ch3, ch4는 기체와 저진동 베드에 위치한 가속도계 신호이다. 위쪽 그래프는 각 채널별 스펙트럼을 나타내는데, 35Hz이하의 저주파영역에서는 차량자체의 동특성(3~4Hz), 이송치구의 공진(8~10Hz), 기체의 공진(~30Hz)으로 인해 진동레벨이 상대적으로 높게 나타나지만, 그 이상 주파수 영역에서는 진동레벨이 낮으며 백색잡음 패턴을 보여주고 있다. 특히 ch1의 컨테이너 바닥에서의 진동이, 이송치구의 저진동 시스템으로 인해 ch2, 3, 4와 같이 기체나 저진동 베드 쪽으로 그대로 전달되지 못하고 상당량 감소되었음을 볼 수 있다. 또한 아래쪽 그래프는 ch1 신호에 대한 ch2, 3, 4 신호간의 주파수 응답함수(FRF)를 계산한 결과이다. 이송치구의 공진주파수로 설계된 10Hz 대역을 제외한 나머지 주파수 영역에서는 크기가 1이하로 운

송치구의 진동감쇄가 효과적으로 일어나고 있음을 확인할 수 있다.

이를 바탕으로 KSR-III 단인증 실제 모델 (기체 1단부)을 대전 항우연에서 충남 서해안 발사장에 안전하게 운송할 수 있었다. 기체를 포함한 이송컨테이너의 상하차에서는 1.0g 이상의 충격은 발생하지 않았으며, 운송 중에서도 1.0g 이상의 진동기록은 가압탱크부의 맨 끝단을 제외하곤 4~5번 정도에 그쳤으며, 전체적으로 모두 2.0g 이하의 진동이 기록되어 기체이송 진동하중 규격을 만족하였음을 확인되었다. 그림 15는 계측된 데이터 중에서 ch.A, B의 시간영역에서의 진동신호를 나타낸다. 도로 수직방향으로의 가속도가 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 또한, 여기서 주목할 점은 그림 15(b)에서와 같이 운송치구의 고유주파수 성분 뿐만 아니라, 이보다 낮은 주파수 특성이 있는 차량전체의 고유주파수 성분역시 크게 기여한다는 사실이다.

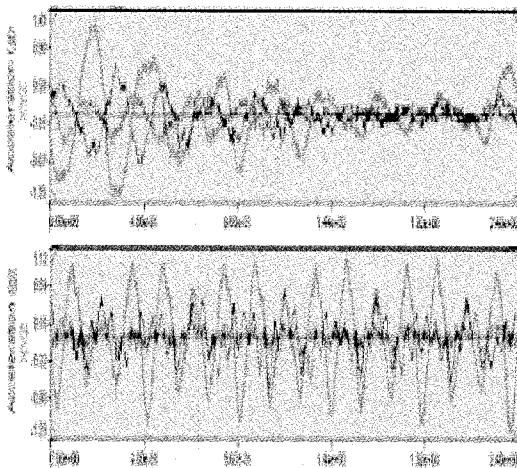


그림 15. 실제 이송시의 측정결과

6. 결 론

본 연구는, 부분 조립된 KSR-III 1단부를 대전 항우연에서부터 충남 서해안 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.

참 고 문 헌

1. Ostrem, F. E, "Transportation and Handling Loads," NASA SP-8077, 1971.
2. D. P., and Hibbert, B. E., "A Round Robin Exercise on Road Transportation Data," Proceedings of Institute of Environmental Sciences. 1993, pp. 336~346.
3. Long, K. C., "Techniques to Reduce Vibration during Ground Transportation for Sea Launch Hardware," S/C and L/V Dynamics Environments Workshop, 2001.
4. 장영순, 윤세현, 박순홍, 이영무, "KSR-III EM 전기체 모달시험," 3rd Symposium on Space Launch Technology, 2000.
5. Singal, R. K., and Maynard, I. K., "Vibration Validation of a Spacecraft Container," Proceedings of Institute of Environmental Sciences. 1990, pp. 509~513.
6. 김홍배, 문상무, 우성현, 이상철, "위성체

- 이송용 컨테이너의 방진시스템 특성 연구”, 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, 2000, pp. 1240 ~ 1245.
7. 우성현, 김홍배, 문상무, 김영기, “다목적 실용위성 2 호의 운송컨테이너 개발,” 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, 2001.
 8. Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, MIL-STD-810F, 2000, pp. 516.5~11 and pp.514.5B-9.
 9. Tom Irvine, “An introduction to the shock response spectrum”, Lecture note, 2000.
 10. 전영두, 조병규, 박동수, 황승현, 김준 “KSR-III 로켓의 도로운송 및 핸들링에 의한 진동하중,” 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, 2002, pp. 250~254.