

KSR-III 의 전기체 모달 시험 Ground Vibration Test for Korea Sounding Rocket - III

우 성 현*·김 영 기*·이 동 우*·문 남 진*·김 홍 배*

Sung-Hyun Woo, Young-Key Kim, Dong-Woo Lee, Nam-Jin Moon and Hong-Bae Kim

Key Words : KSR-III(과학로켓 3 호), KARI(Korea Aerospace Research Institute, 한국항공우주연구원), GVT(Ground Vibration Test, 전기체 모달 시험), MIMO(MuIti-Input-Multi-Output, 다입력 다출력), Pure Random Excitation(순무작위 가진), SDOF Curve Fitting(단일자유도 커브 피팅), Polyreference Curve Fitting(다기준 커브 피팅), MIF(Mode Indicator Function, 모드 지시 함수), MCF(Modal Confidence Factor, 모드 신뢰 인자), MAC(Modal Assurance Criteria, 모드 상관 계수)

ABSTRACT

KSR-III(Korea Sounding Rocket - III), which is being developed by Space Technology R&D Division of KARI(Korea Aerospace Research Institute) will be launched in late 2002. It is a three-stage, liquid propellant rocket which can reach 250 km altitude and will carry out observation of ozone layer and scientific experiments, such as microgravity experiment, and atmospheric measurement. KSR-III is believed to be an intermediate to the launch vehicle capable of carrying a satellite to its orbit. Space Test Department of KARI performed GVT(Ground Vibration Test) for KSR-III EM at Rocket Test Building of KARI. GVT is very important for predicting the behavior of rocket in its operation, developing flight control program and performing aerodynamic analysis. This paper gives an introduction of rocket GVT configuration and information on test procedures, techniques and results of it. In this test, to simulate free-free condition, test object hung in the air laterally by 4 bungee cords specially devised. For the excitation of test object, pure random signal by two electromagnetic shakers was used and total 22 frequency response functions were achieved. Polyreference parameter estimation was performed to identify the modal parameters with MIMO(Multi-Input-Multi-Output) method. As the result of the test, low frequency mode shapes and modal parameters below 60Hz were identified

1. 서 론

한국항공우주연구원은 한반도 주변의 오존층 및 전리층 탐사, 태양 및 천체 X-선 관측 시험 등의 수행을 위한 과학로켓 개발 사업을 수행 중에 있다.



Fig. 1 Launch of KSR-II

이를 위하여 1993 년, 탑재중량 150kg, 도달 고도 40~55km, 중량 1.2ton, 길이 6.7m 의 1 단형 과학로켓 KSR-I 의 개발사업을 완료하여 2 회에 걸쳐 성공적으로 발사하였으며, 이어 1997 년에는 복합재 노즈콘 및 날개, 단분리 장치, 노즈 페어링 분리 장치, 카나드 자세제어 시스템을 갖춘, 탑재중량 150kg, 도달 고도 130~150km, 중량 2ton, 길이 11.1m 의 2 단형 과학로켓 KSR-II(Fig. 1)를 개발하여 '97 년 7 월 9 일과 98 년 6 월 11 일 2 회에 걸쳐 비행시험을 수행하였다. 현재는 2002 년 발사를 목표로 소형위성 우주발사체의 독자개발을 위한 액체추진체 로켓인 KSR-III 를 개발중에 있다.

동연구원 우주시험연구그룹은 위성체의 발사환경시험을 위하여 총 112 개 채널(64 가속도계 채널, 32 direct 채널, 16 microphone 채널)의 다채널 신호 획득 및 처리 시스템과 이와 연계하여 사용할 수 있는 이동용 신호 처리 및 저장 장치를 보유하고 있다. 본 연구에서는 상기 장비들을 활용하여 현재 제작 완료된 KSR-III EM(Engineering Model)에 대한 전기체 모달 시험을 수행하였다(Fig. 2).

* 한국항공우주연구원 우주시험연구그룹
E-mail : mach@viva.kari.re.kr
Tel : (042) 860-2381, Fax : (042) 860-2234



Fig. 2 KSR-III EM GVT(at Rocket Test Building of KARI)

시험 대상물의 가진을 위해서는 순무작위(Pure Random) 신호재생기(Signal Generator)와 두 개의 전자기 가진기가 사용되었으며, 획득된 주파수 응답 함수(Frequency Response Function, FRF)로부터 다기준 커브 피팅법(Polyreference Curve Fitting)을 사용하여 60Hz 미만의 저주파수 대역의 모드 형상 및 모드 인수를 얻어내었다. 시험을 통하여 얻어진 KSR-III 전기체의 동적 특성은 기개발된 구조해석 모델과 비교되고, 일련의 최적화 작업을 통하여 KSR-III의 운용환경에서의 동적 거동의 예측은 물론, 비행 제어 성능 향상을 위한 모델 구현, 공력 해석 및 공탄성 안정성 해석등에 사용될 예정이다.

2. 시험 장치의 구성

2.1 시험 대상물의 구성

시험에 사용된 KSR-III EM은 실제 비행모델과 동일한 구조를 가지며, 전장 13.3m, 동체 지름 1m, 전체 무게는 5.4 톤에 이른다. KSR-III EM의 세부 구성을 Fig. 3에 나타내었다.

2.2 가진기(Excitator)의 구성

로켓이나 항공기와 같은 대형 구조물의 동특성 측정시험에는 일반적으로 전체 구조물을 가진하기 위한 충분한 가진력을 공급하고 신호 획득에 필요한 시간 및 수행 절차를 줄이기 위하여 다입력 랜덤 가진법을 사용한다. 본 시험에서는 Fig. 4와 같이 2개의 전자기 가진기를 노오즈 페어링 섹션이 끝나는 STA 2100 위치에 한 개는 수직방향으로, 한 개는 수평방향으로 설치하였으며, 각각은 가진기의 반작용에 의한 가진력의 재반사 현상

을 막기 위하여 고정틀에 고무 밴드를 이용하여 공중에 매달아 사용하였다. 또한 가진기의 축방향 가진력만을 전달하고 횡방향 가진력을 소멸시킬 수 있도록 각각의 가진기는 직경을 최대한 줄인 강철 가진봉을 사용하였으며, 가진봉의 끝에는 힘 센서(Force Transducer)를 설치하여 주파수 응답함수(Frequency Response Function, FRF)의 계산을 위한 기준 신호(Reference Signal)로 사용하였다.

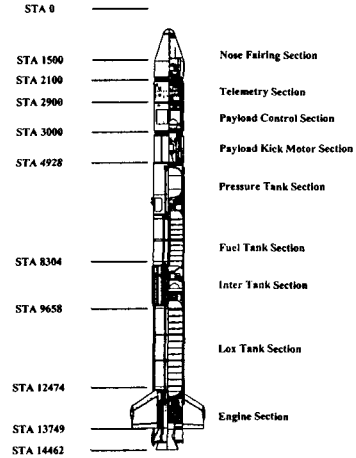


Fig. 3 KSR-III EM Configuration



(a) Vertical Shaker Configuration

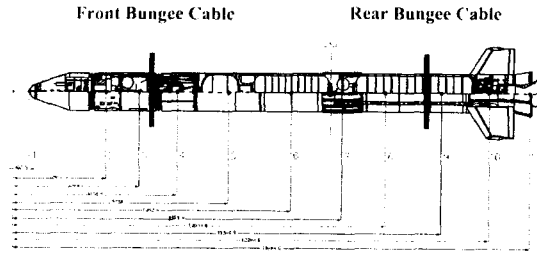


(b) Lateral Shaker Configuration

Fig. 4 Shaker Configuration

2.3 Bungee Cable 의 구성

대상물 동체의 길이 방향으로 총 11 개의 위치를 선정하였으며, 시험대상물의 시험 조건을 최대한 비행조건(free-free condition)에 근사시키기 위하여 그 중 강성이 보장되는 3 번과 4 번, 8 번과 9 번 위치 사이를 Fig. 5 와 같이 테스트홀 천정 크레인과 특별히 설계된 4 개의 번지 스프링으로 체결하여 시험대상물이 자유롭게 흔들리도록 구성하였다.



(a) Bungee Cable Location



(b) Rear Bungee Cable

Fig. 5 Bungee Cable Configuration

2.4 응답점의 설정

응답 가속도계는 11 개의 위치에 일반적으로 수직 방향의 단축 가속도계를 동체 상면에 2 축 가속도계를 동체 옆면에 Fig. 6 과 같이 설치하였다. 해석 모델의 구성에는 전체 모드 해석(Global Mode)에 상대적으로 중요성이 높은, 동체 접선 방향(T)의 센서를 제외한, 수평, 수직 방향(Z, Y)의 총 22 개의 가속도계를 사용하였다. Fig. 7 은 최종적으로 구성된 해석 모델 및 기준 좌표계를 나타낸다.

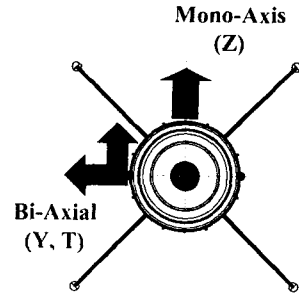


Fig. 6 Accelerometer Location

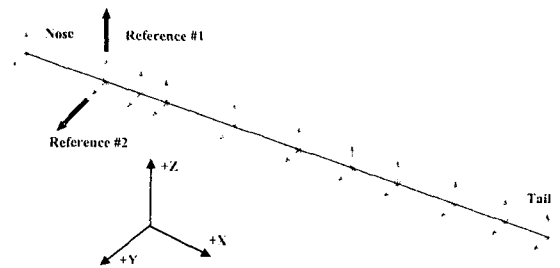


Fig. 7 KSR-III Test Model

2.5 측정 장비의 구성

랜덤 가진 신호의 생성에는 Concurrent Eng.사의 ISTAR 프로그램의 랜덤 신호 생성기(Random Signal Generator)를 사용하였으며, 신호 저장기에 저장된 랜덤 신호는 시험 현장에서 증폭기에 의해 증폭되어 각각의 가진기를 구동하게 된다. 가진력은 가진기의 최대 가진 용량 및 가진 신호의 전달 정도를 고려하여 가진점에서 대략 100N 정도의 크기를 가지도록 조절되었으며, 가진기에 의해 부과된 동하중은 대상물 전체를 가진하게 되고 이때 대상물에 설치되어 있는 가속도계와 가진기 가진봉에 부착된 힘센서에서 나오는 신호는 일단 신호 저장기에 저장되어 주파수 응답 함수 계산 시 각각 응답신호(Response Signal)와 기준 신호(Reference Signal)로 사용되어졌다. 계산된 주파수 응답함수는 IDEA TDAS 로 구성된 시험모델의 각 측정점에 부과되어 모달변수의 추출, 각종 모달 특성 함수의 계산에 사용되어졌다. Fig. 8 은 KSR-III EM 전기체 모달 시험을 위하여 구성된 시험 장치의 전체적인 구성을 나타낸다.

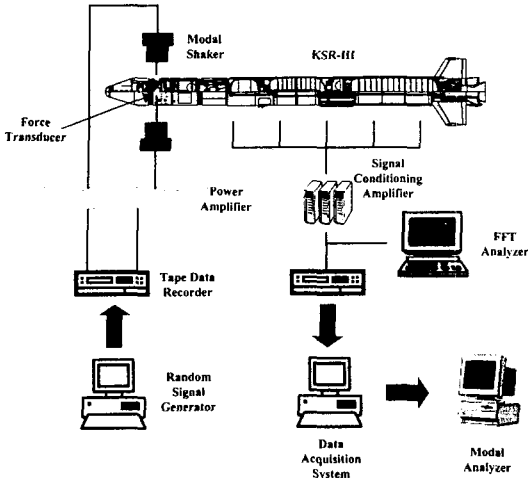


Fig. 8 KSR-III EM GVT Overall Configuration

3. 시험 결과 및 분석

3.1 주파수 응답함수

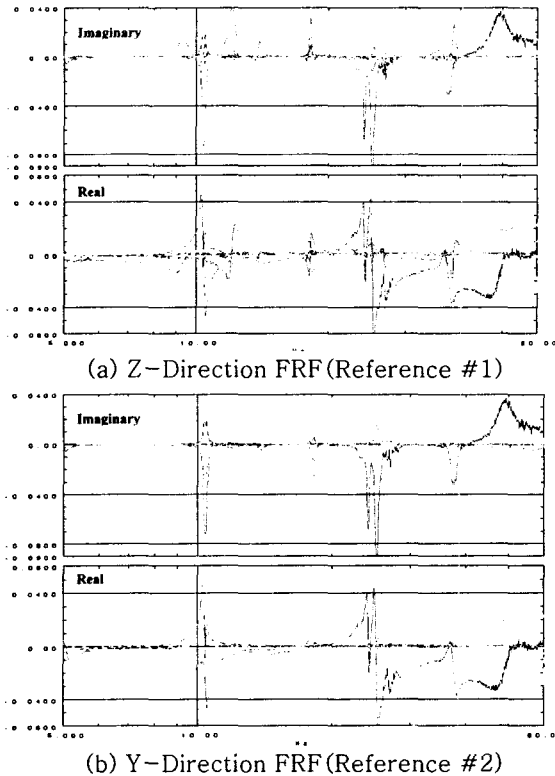


Fig. 9 Frequency Response Function

모드 형상 및 모드 인수의 추출을 위하여 각 기준 신호와 동일한 방향의 응답신호를 기준으로 측정 주파수 대역의 주파수 응답함수를 비교하여 보았다(Fig. 9). 일반적으로 로켓과 같은 축대칭 형상이 지배적인 대상물의 경우 축에 수직인 방향으로의 두개의 대칭 모드가 중첩되어 나타나는데 본 대상물의 경우도 동일한 양상을 나타냈으며, Y 축, Z 축 방향으로의 첫번째 굽힘 모드(Bending Mode)가 대략 10Hz 근방에서 존재했다.

3.2 모드 인수(Modal Parameter)의 추출

다중 모드 지시 함수(Multivariate MIF)는 다 입력 가진을 통하여 얻어진 응답함수로부터 각 모드의 위치를 지시할 뿐 아니라 응답 방향 간 연성(Coupling)의 존재 여부를 나타내준다. 다중 모드 지시 함수는 가진 신호의 개수와 동일한 개수의 함수로 구성되며 2 개의 가진 신호를 사용한 본 시험에서는 주함수(Primary)와 부함수(Secondary) 구분되어 독립적인(Decoupled) 모드에 대해서는 주함수만의 극소값으로, 연계(Coupled) 모드에 대해서는 두 함수 모두의 극소값으로 표시되어진다.

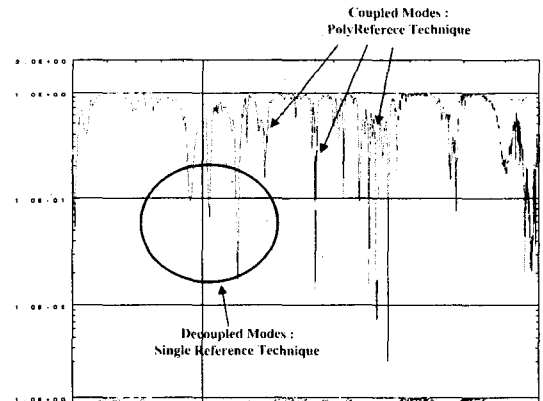
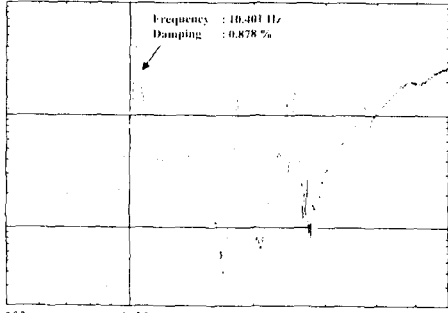
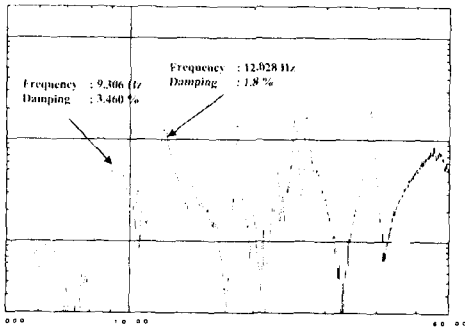


Fig. 10 Multivariate MIF (Primary, Secondary)

Fig. 10 측정된 주파수 응답함수로부터 계산된 다중 모드 지시 함수를 나타내며 10Hz 근방의 초기 세 모드는 응답 방향간의 연성이 작으므로 단일 자유도 커브 피팅(SDOF Curve Fitting) 방법이 적합하며, 그 이상 주파수 대역의 모드에 대해서는 두 가진 신호 모두를 동시에 고려한 다기준 커브 피팅(Polyreference Curve Fitting) 방법이 적합함을 알 수 있다. Fig. 11 은 단일 자유도 커브 피팅법을 사용한 초기 세 모드의 모드 인수 추출과정을 나타낸다.



(a) SDOF Curve Fitting(Z-Axis, Ref #1)



(b) SDOF Curve Fitting(Y-Axis, Ref#2)

Fig. 11 SDOF Curve Fitting

다기준 커브 피팅(Polyreference Curve Fitting)을 위한 고유진동수의 선정은 모드 신뢰인수(Mode Confidence Factor, MCF)의 반복적인 계산을 통하여 얻어지는 모드 안정성 도표(Stability Diagram)를 기준으로 한다. 이때 신뢰할 수 있는 모드에 대한 MCF의 값은 1에 근사한 값을 나타낸다. Fig. 12 주파수 응답함수와 중첩하여 도시한 모드 안정성 도표를 나타내며, Table 1은 각 모드의 고유진동수와 해당 MCF 값을 보여주고 있다.

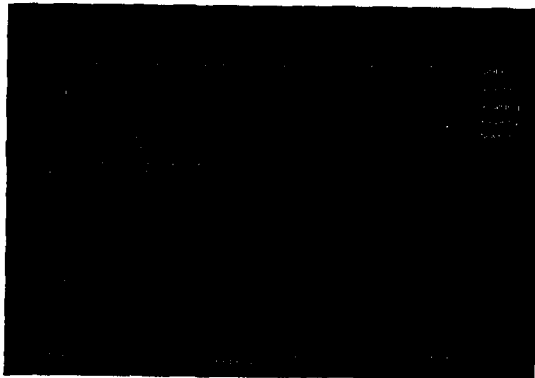


Fig. 12 Stability Diagram & FRF

Table 1 Polyreference Curve Fitting Results

Parameter Level	Frequency (Hz)	Damping (%)	Amplitude	Phase	MCF
1	10.347	1.167	1.27E-02	-1.571	0.96
2	12.075	1.884	2.99E-02	-1.571	0.976
3	18.215	1.026	1.62E-02	1.571	0.973
4	25.29	0.985	6.84E-02	-1.571	0.986
5	26.869	1.008	1.46E-01	-1.571	0.994
6	37.593	1.639	1.47E-02	-1.571	0.994
7	38.613	1.028	1.79E-01	-1.571	0.993

다기준 커브 피팅을 통하여 MCF 값이 0.96 이상이 되는 총 7 개의 모드를 선정하였다. 이때 단일 자유도 커브 피팅으로 선정된 3 개의 모드 중 초기의 9.306Hz 모드를 제외한 나머지 두 모드는 다기준 커브 피팅으로도 드러남을 알 수 있다. 9.306Hz의 모드가 단일 자유도 커브 피팅에서만 나타나는 이유는 이 주파수에 해당되는 모드 형상이 Y 축 방향의 응답 특성이 지배적이어서 두 가지 방향 모두의 상관(Correlation)성을 고려하는 다기준 커브 피팅으로는 오히려 신뢰성이 떨어지기 때문이다.

최종적인 고유진동수 및 모드 인수는 저주파수 대역의 단일 자유도 커브 피팅의 결과와 고주파수 대역의 다기준 커브 피팅의 결과를 중첩하여 Table 2와 같이 구성하였다. 이때 MCF의 값은 다기준 커브 피팅 모드에 대해서만 의미를 가진다.

Table 2 Overlapped Mode Parameters

Parameter Level	Frequency (Hz)	Damping (%)	Amplitude	Phase	MCF
1	9.306	3.46	1.28E-02	-1.571	0
2	10.401	0.878	2.84E-02	-1.571	0
3	12.028	1.8	1.93E-02	-1.571	0
4	18.215	1.026	1.62E-02	1.571	0.973
5	25.29	0.985	6.84E-02	-1.571	0.986
6	26.869	1.008	1.46E-01	-1.571	0.994
7	37.593	1.639	1.47E-02	-1.571	0.994
8	38.613	1.028	1.79E-01	-1.571	0.993

각 모드 간의 독립성을 확인하기 위하여 선택된 모드 간의 모드 상관 함수(Mode Assurance Criteria, MAC)를 계산하였으며, Fig. 13과 같이 대각 위치의 값이 비대각 위치의 값에 비하여 상

대적으로 큰 값을 나타내는 것으로부터 선택된 모드 간의 선형적인 종속성(Linear Dependency)이 적은 것으로 나타났다.

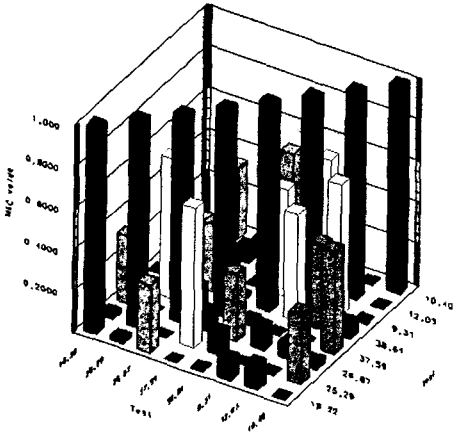


Fig. 13 Mode Assurance Criteria(MAC)

3.3 모드 형상

Fig. 14 는 KSR-III EM 전기체의 측정 모드 형상과 고유진동수를 나타낸다. 측정점 4 번과 5 번 사이는 2 단 추진 엔진이 위치하는 부분으로 2 단 분리시 외피가 6 조각으로 분리되는 구조로, 내부에 특별한 보강재가 존재하지 않는 유연한 구조로 되어 있어서 이 부분을 경계로 응답특성이 크게 달라지는 것을 볼 수 있다. 이러한 이유로 20Hz 이상에서는 동체 전체의 모드보다는 동체 앞쪽의 국부 모드가 지배적으로 나타나는 것을 볼 수 있다.

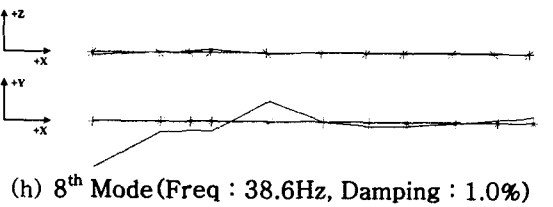
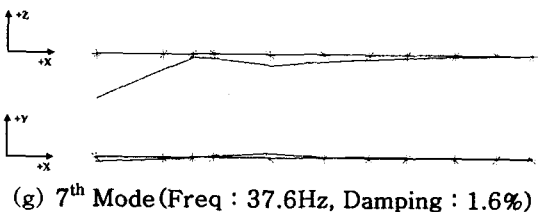
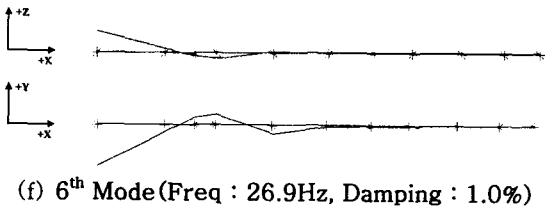
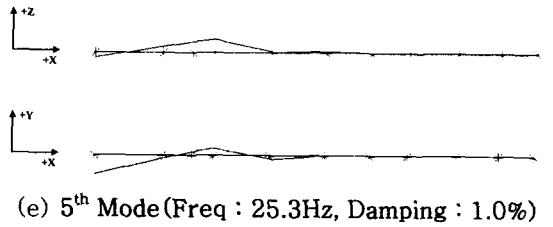
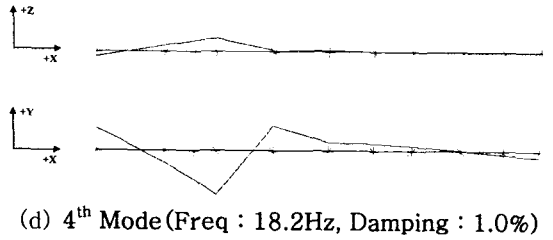
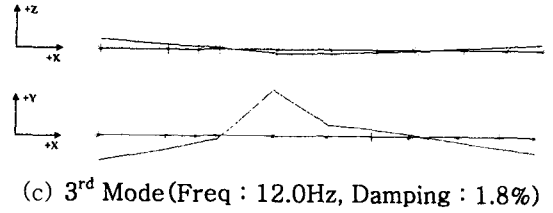
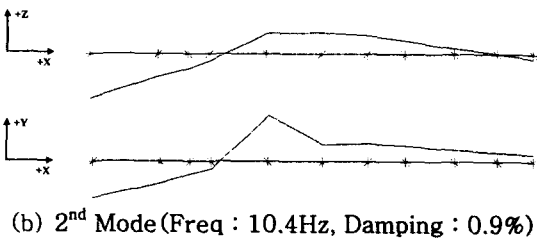
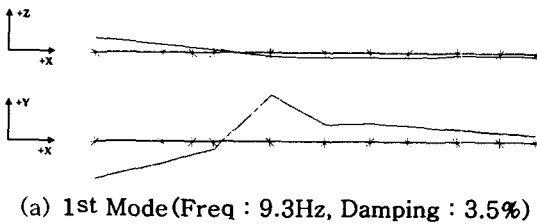


Fig. 14 Mode Shapes and Natural Frequencies

또한 2 단 추진부의 구조적 연성을 고려한다면, Z 방향과 Y 방향의 첫번째 굽힘 모드는 각각 2 번과 3 번 모드에 대응시킬 수 있으며, 모드의 위치도 시험대상물의 축대칭 형상으로 인하여 2Hz 정도의 고유진동수 차이를 보이며 매우 인접하게 존재함을 알 수 있다. 1 번 모드는 동체 후반부에 절점(node-point)이 존재하지 않으므로, 동체 전반부에 국부 응답 포함한 동체 전체의 강체 운동을 나타내고 있는 것으로 파악될 수 있다. 이것은 시험대상물이 변지 스프링에 의해 매달려 있는 관계로 수평 방향인 Y 방향으로의 강체 운동이 자유롭게 발생하기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 현재 한국항공우주연구원이 개발하고 있는 KSR-III 의 전기체를 대상으로 지상 모달 시험을 수행하였으며, 이를 통하여 전기체의 주요 모드 형상 및 모드 인수들을 추출해 내었다. 추후 획득된 정보는 KSR-III 비행 모델의 운용환경에서의 동적 거동 예측, 구조 모델의 개선 및 공력 해석 작업 등에 중요한 정보로 사용되어질 것이다.

후 기

본 연구는 정보통신부의 선도기반기술개발사업(과제번호 : IMT2000-A1-2)에 의한 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 우성현 외, 2001, “과학로켓 2 호(KSR-II) 준비행 모델의 지상 진동 시험”, 한국소음진동공학회 2001 년 춘계학술대회논문집 pp. 546 ~ 551.
- (2) Michael W., Lawrence C. F. “Aircraft Ground Vibration Testing at the NASA Dryden Flight Research Facility – 1993”, NASA Technical Memorandum, June, 1994
- (3) Richard S. P., Jocelyn I. P. and Ralph D. B. “Vibro-Acoustics Modal Testing at NASA Langley Research Center”
- (4) Albert J. P., Etienne B. “A Ground Vibration Test on the GARTEUR Test Bed SM AG-19”
- (5) Ralph D. B., Gary A. F. and Richard S. P. “Finite Element Model Development and Validation for Aircraft Fuselage Structures”, Proceedings of the 18th International Modal Analysis Conference, San Antonio, Texas, February 7-10,
- (6) Masa-aki S., Keiji K. and Masakatsu M. “Comparison of Modal Testing Methods of Aircraft”