

한지 구조물의 실험적 동특성 해석

Experimental Modal Analysis of the Hinge Structure

전병희* · 양명석** · 강휘원** · 이기범**

Byoung-Hee Jeon, Myoung-Seog Yang, Hui-Won Kang and Kee-Bhum Lee

Key Words : Experimental Modal Analysis(실험적 동특성 해석), Random Vibration(랜던 진동),
The Total Missile Structure(유도탄 전기체)

ABSTRACT

Modal parameters of the total missile structure including a hinge mechanism are estimated by the experimental modal analysis. The free-free boundary condition is simulated by hanging the missile structure with a wire rope, and the missile structure is excited by the random vibration technique. Test results are used to verify the FE analysis, the 1-D FE model is modified by 3-D model at the hinge part. Consequently, the modal parameters of the missile structure are estimated precisely.

1. 서 론

실험적 동특성 해석은 선형 시스템의 모달매개변수 즉, 주파수, 감쇠율과 모드형상등을 실험적인 방법으로 구하는 것을 말하여, 유한 요소 해석과 같은 해석적인 방법으로 추출한 모달매개변수들의 타당성을 검증하고 해석모델의 모델 수정에 필요한 기초적인 자료를 제공한다.

본 연구의 대상은 한지 구조물을 갖는 유도무기 전기체(KVLA:Korea Vertical Launching Assembly)이며, 그림 1과 같이 어뢰부, 추진기관부 및 기체부로 구성되는데 어뢰와 추진기관은 원통형 구조물이지만 기체부는 상·하로 전개되는 한지 구조로 구성되어있다.

일반적으로 유도탄은 비행 중에 외부 하중에 의해 기체가 진동을 하게 되어 기체의 정확한 자세를 알아내기가 어렵고 기체의 동특성과 TVC(Thrust Vector Control)를 위한 구동장치의 동특성 간의 간섭이 발생하는 경우 제어에 문제가 발생할 수 있다. 그러므로 비행시험 이전의 기체의 정확한 동특성을 파악하는 것이 중요하다.

본 연구는 한지 구조물을 갖는 유도무기 전기체에 대한 고유 진동수, 감쇠율 및 모드형상 등 동특성 자료를 실험적 동특성 해석 기법으로 도출하였다. 동특성 시험은 자유-자유 경계조건 상태에서 전기체를 가진하였고, 전기체의 응답과 모달매개변수 추출은 I-DEAS TDAS(Test Data Analysis System)를 운용하였다.

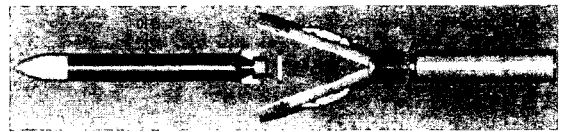


Fig.1 Composition of the KVLA missile

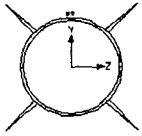
2. 전기체 동특성 시험

2.1 경계조건 및 동특성 시험수행

일반적으로 유도탄 전기체의 동특성 시험은 정상적인 비행상태를 구현하고 비행체의 피치(Pitch) 및 요(Yaw) 방향으로 진동을 주어 수행하게 된다. 특히 본 연구 대상인 장거리 대잠어뢰 전기체의 경우 기체부가 상·하 방향으로 분리되기 때문에 상·하방향(피치방향) 및 좌·우방향(요 방향)의 강성의 차가 크기 때문에 피치 및 요 방향 모두를 고려하여 동특성 시험을 수행하였다. 전기체에 적용한 좌표계는 다음과 같이 정의 된다.

* 국방과학연구소
E-mail : jbhpeh@hanafos.com
Tel : (042) 821-4006, Fax : (042) 823-3400

** 국방과학연구소



X 축 : 기체의 축방향
 Y 축 : 기체의 상·하방향
 Z 축 : 기체의 좌·우방향
 (동체 분리선이 위치한 방향)

수평방향으로 자유 경계조건(Free-Free BC)을 구현하기 위하여 1차적으로 유한요소 해석에서 획득한 최 저차 모드 형상의 노달점(Nodal Point) 전방과 후방에 와이어로프를 이용하여 기체를 천장에 매달음으로써 기체의 수평방향운동이 구속되지 않도록 하여 실제 비행조건과 유사한 자유-자유 경계조건을 구현하였다. 이 때 와이어로프의 길이는 비행체의 강체 운동주기가 예상되는 최 저차 고유진동 주기의 약 1/10 배가 되도록 조정하였다.⁽¹⁾

유도탄 전기체의 동특성 자료를 추출하기 위한 시험장비는 그림 2와 같이 랜덤 신호 발생기(Random Signal Generator) 랜덤 신호를 증폭하는 신호증폭기, 랜덤 신호를 기체에 가진하기 위한 전자식(Electromagnetic) 가진기로 구성되어 있다. 측정에 사용된 센서는 기체에 전달되는 가진력의 크기를 측정하기 위한 압전 하중계(Piezoelectric Force Transducer)와 기체의 동적응답을 측정하기 위한 동특성 시험용 가속도계(Modal Array Accelerometer)로 구성되어 있다. 측정된 가진력과 응답은 분석장비의 신호처리 모듈을 통하여 FFT(Fast Fourier Transform)변환 및 평균화되어 주파수 응답함수를 획득하게 된다. 각각의 시험장비의 재원은 표 1 에 나타내었다.

전기체에 가능한 많은 진동현상이 발생할 것으로 예상되는 위치에 가진기를 설치하여 유도탄 전기체에 랜덤 하중을 부가하였다. 이때 전기체의 진동이 기체의 맨 앞과 뒤까지 충분한 진동을 발생하기 위하여 가진력의 크기를 조절하였으며, 가진방향은 기체의 피치 및 요 방향인 수평방향이다. 동적 응답측정위치는 대형 구조물인 경우 측정 대상물의 상태와 획득하고자 하는 동특성 자료의 특성을 참고하여 선정하는데 본 시험에서는 전기체의 거시적 동적거동과 힌지 구조를 가지고 있는 기체부를 중심으로 그림 3 과같이 총 18개 지점에서 전기체의 동적 응답을 측정하였다. 힌지 구조물을 갖고 있는 전기체 유도탄의 동특성 자료를 획득하기 위한 샘플링(Sampling), 트리거(Trigger), 창(Windows), 평균횟수(Average)는 표 2 와 같이 설정하였다. 획득하고자 하는 주파수 대역은 이론적인 해석 결과를 근거하여 0 ~ 100 Hz의 범위를 설정하였고, 주파수해상도(Frequency Resolution)즉 주파수 한 눈금의 간격은 0.125 Hz로 정하였다. 그리고 하나의 주파수 응답함수를 획득하기 위해 적용된 샘플링 시간은 8 초이고, 데이터를 획득하기 위한 트리거 방법(Trigger Method)과 창(Windows)은 랜덤 가진에서 널리 사용되는 있는 프리런(Free Run)과 해닝 브로드(Hanning Broad) 방법을 적용하였다. 또한 신뢰성 있는 주파수 응답함수를 획득하기 위하여 50회 평균

하여 획득하였다.

이러한 절차를 거쳐 측정된 가진력과 동적 응답을 모달 분석기로 분석하는데, 모달 분석기는 시간영역 자료인 가진력과 동적 응답을 주파수 영역 자료로 변환하여 각 측정위치에서의 주파수 응답함수와 상관함수를 도출한다. 이들 주파수 응답함수와 상관함수는 측정된 위치에서의 위상, 진폭, 실수부, 허수부에 대한 모든 정보를 포함하고 있다.

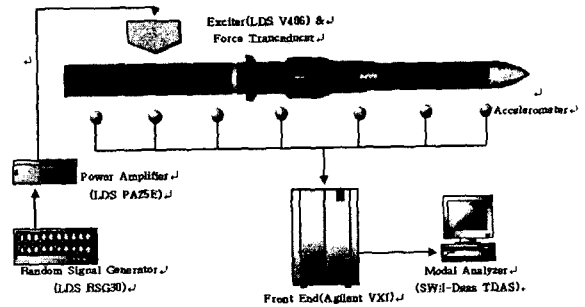


Fig.2 Diagram for modal analysis equipment

Table 1. Experimental modal analysis equipment resource

구분	장비명	Model No.	규격	비고
가진	Random Signal Generator	LDS RSG30	30 ch.	랜덤신호 발생
	Power Amplifier	LDS PA25E		신호 증폭
	Exciter	LDS V406	44 lbs	랜덤 가진
측정 및 분석	Force Transducer	PCB 208A02	100 lbs	가진력 측정
	Accelerometers	PCB 333A31	±50g	응답 측정
	Front End	Agilent VXI	48 ch.	신호 증폭/획득
	Modal Analyzer	NT Computer	I-DEAS	모달 분석

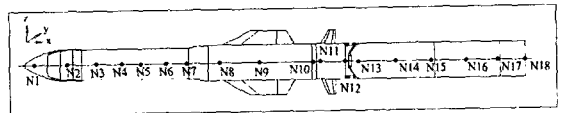


Fig.3 Measurement positions

Table 2. FRF data acquisition method

항목	설정값	비고	
Sampling	Spectral Line	801	Yaw/Pitch
	Freq. Band	0~100 Hz	
	Freq. Resol.	0.125 Hz	
	Frame Leng.	8 sec	
	Frame Size	2048	
	Sampling Freq.	Hz	
Trigger	Free Run		
Windows	Hanning Broad		
Average	50		

2.2 동특성 시험결과

동특성 시험은 추진기관부의 추진계가 6초간 연소된 추진기관과(이하 Case#1) 11초간 연소된 기체에(이하 Case#2) 대해서 피치와 요 방향에 대해 수행하였다. 그림 4, 5 는 Case#1에 대한 전기체의 피치 및 요 방향 주파수 응답함수를 허수부와 실수부로 나누어 도시한 것이다. 측정된 주파수 응답함수를 가지고 모달 분석 S/W 인 TDAS(Test Data Analysis Software)를 이용하여 모달 매개변수인 고유 진동수, 모드형상 및 감쇠율을 그림 6 과 같은 일련의 과정을 통하여 추출하였다. 획득한 18 개의 주파수 응답함수로부터 그림 7과 같은 모드지시함수(MIF, Mode Indicator Function)를 가진점에 대한 최대치(Peak Valley)를 구하여 모드형상을 분리한다. 여기서 모드지시함수는 시스템의 전달함수 특이값(Singular Value)을 구하기 위해 전달함수 행렬을 분할(SVD, Singular Value Decomposition)하고, 각 특이값을 주파수의 함수로 나타낸 것으로 다음과 같이 표현 할 수 있다.⁽²⁾

$$MIF = \frac{\text{real part} * \text{magnitude}}{\text{magnitude}^2}$$

모드시험수에서 공진점은 골(Valley)로 나타나게 되어 공진점이 보다 확실하게 나타나고 특히 진폭이 작은 모드나 국부적인 모드를 잘 구분할 수 있다. 모드지시함수를 구한다음 기준점과 응답점에서의 진폭과 위상에 대한 잔여(Residual)을 계산하여 이동 응답 모드 형상법을 적용하여 모드 형상을 추출하게 된다. 여기서 사용한 이동 응답 모드형상법은 모드지시함수에서 선정된 고유 진동수에 대해 각각의 측정점에 대한 전체응답(실수부, 허수부 또는 진폭)을 추출하는 기법이다.

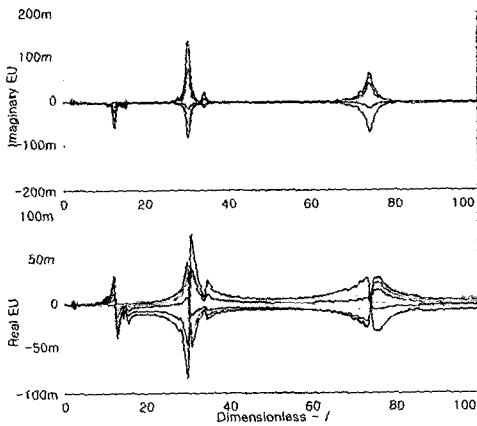


Fig.4 Real and imaginary part of the pitching vibration motion KVLA in case#1.

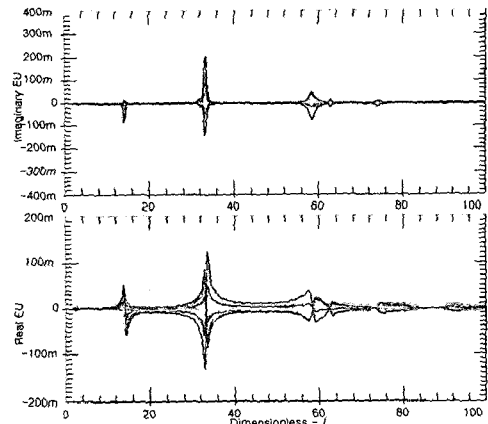


Fig.5 Real and imaginary part of the yawing vibration motion KVLA in case#1.

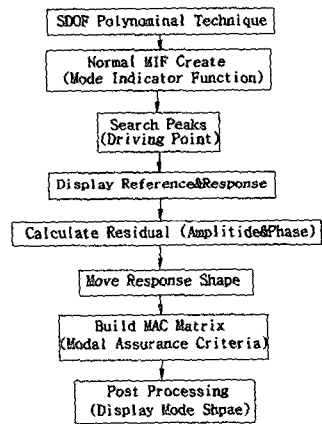


Fig.6 Modal analysis flow chart

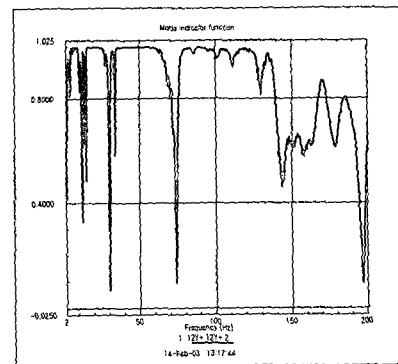


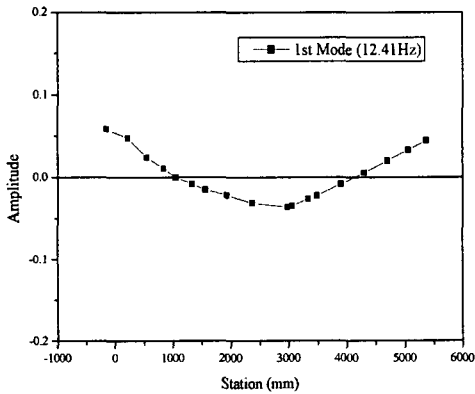
Fig.7 Mode indicator function of the pitching vibration motion KVLA in case#1.

위와 같은 일련의 과정을 통하여 표 3과 같이 힌지

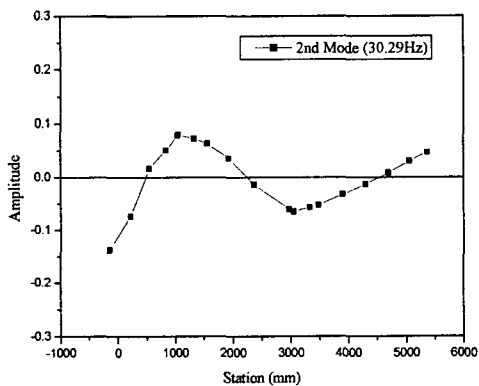
구조물 갖는 장거리 대잠어뢰 전기체 동특성 시험결과를 나타내었다. 그림 8과 9는 VLT 6초급에 대한 피치와 요 방향의 모드형상을 나타내었다. 1차 모드형상을 비교해 보면 어뢰부를 감싸고 있는 기체 구조물이 상·하로 분리되는 피치방향 진동모드가 힌지점을 기준으로 양쪽으로 강제운동을 하고 있고 좌·우 방향으로 즉 요 방향로는 연속체 운동을 하고 있다.

Table 3. Natural frequency of the pitching and yawing vibration motion KVLA.

구분	Case#1		Case#2		모드형상
	Pitch	Yaw	Pitch	Yaw	
1차(Hz)	12.41	14.37	14.62	15.71	1차 굽힘
2차(Hz)	30.29	33.37	32.88	37.58	2차 굽힘
3차(Hz)	73.73	58.60	78.97	64.14	3차 굽힘

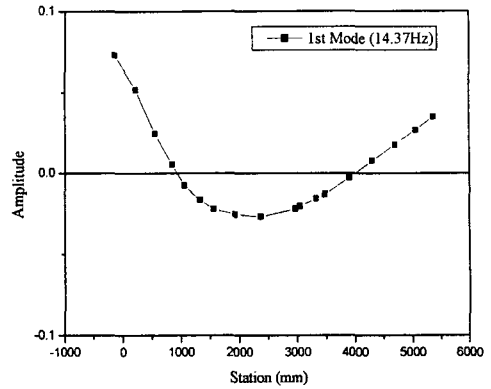


(a) 1st Mode Shape : 12.41Hz

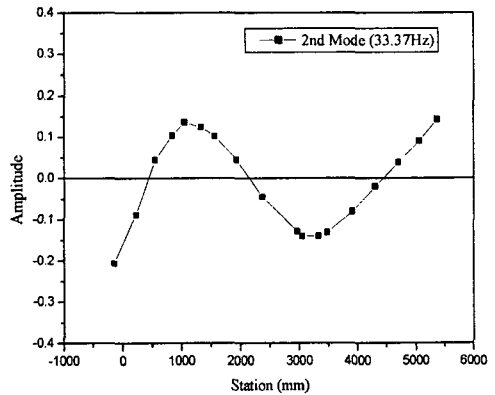


(b) 2nd Mode Shape : 30.29Hz

Fig.8 Mode shape of the pitching vibration motion KVLA in case#1.

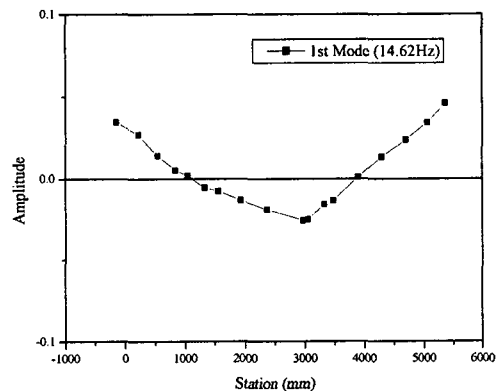


(a) 1st Mode Shape : 14.37Hz

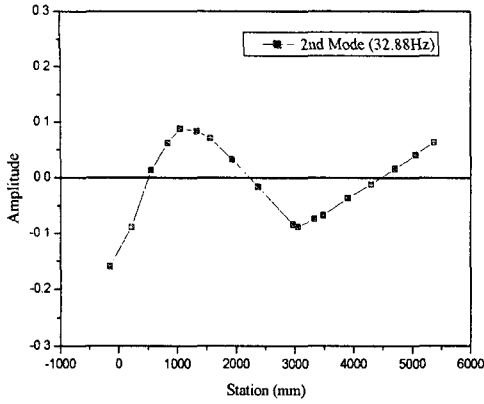


(b) 2nd Mode Shape : 30.29Hz

Fig.9 Mode shape of the yawing vibration motion KVLA in case#1.

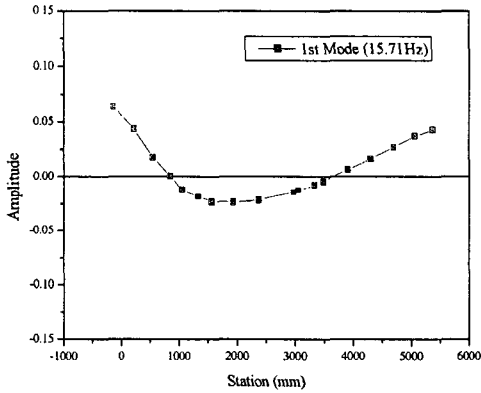


(a) 1st Mode Shape : 14.62Hz

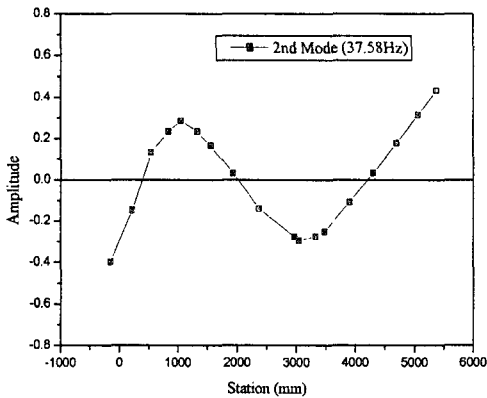


(b) 2nd Mode Shape : 32.88Hz

Fig.10 Mode shape of the pitching vibration motion KVLA in case#2.



(a) 1st Mode Shape : 15.71Hz



(b) 2nd Mode Shape : 37.58Hz

Fig.11 Mode shape of the yawing vibration motion KVLA in case#2.

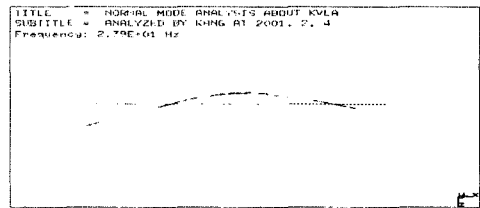
2.3 전기체 동특성 해석보정⁽³⁾

동특성 시험결과를 이용한 해석 모델의 보정을 위해 전기체 동특성 해석을 수행하였다. 해석 모델은 어뢰, 기체부 및 추진기관으로 나누어 전기체의 주요단면을 등가 시킨 보요소만을 이용하여 1차원 유한요소모델을 구성하였다. 특히 기체부의 보 요소 모델에는 구조물의 강성에 영향을 줄 수 있는 보강재, 외피, 프레임, 주익 등이 포함되어 있으며 이외에 강성에 크게 영향이 없는 탑재장비는 비 구조질량요소나 집중질량으로 고려하였다. 모델링은 I-DEAS를 이용하였고 해석은 MSC/NASTRAN을 이용하여 수행하였다.⁽⁴⁾

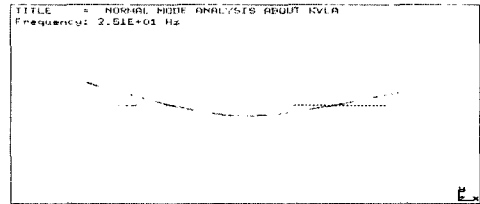
전기체를 1차원 보 요소만을 이용하여 해석한 결과를 표 4와 그림 13에 나타내었다. 해석결과 동특성 시험결과와 비교해 보면 피치와 요 방향으로 10Hz 이상의 차이를 보이고 있는데 그 원인은 현지 구조물의 강성을 너무 과다하게 설정한 것으로 판단된다.

Table 4. Natural frequency of 1D FEM model

구분	Case#1		모드형상
	Pitch	Yaw	
1차(Hz)	25.1	27.9	1차 굽힘
2차(Hz)	59.3	69.6	2차 굽힘
3차(Hz)	187	213	3차 굽힘



(a) Pitch



(b) Yaw

Fig.13 Mode shape of 1D FEM model in case#1

1차원 보 요소 모델의 경우, 국부적으로 이루어지는 현지 구조물의 강성전달이 전 단면에 대하여 이루어진다고 가정하기 때문에 현지부의 단면을 구속하여 기체의 강성을 증가시키고 결과적으로 높은 고유 진동수를 예측하였다. 따라서 현지 구조물의 강성전달 모델을 실제와 가

장 유사하게 묘사하는 것이 중요하다고 판단되어 그림 14와 같이 3차원 기체모델을 삽입하였다. 1차원 보 요소와 3차원 기체 모델을 합성한 합성모델의 해석결과 고유 진동수와 모드형상을 표 5와 그림 15에 나타내었다.

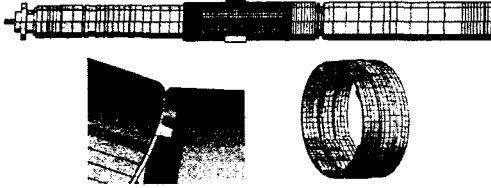


Fig.14 Composition(1D+3D) FEM model

Table 5. Natural frequency of Composition FEM model

구분	Case#1		모드형상
	Pitch	Yaw	
1차(Hz)	12.8	2.84	1차 굽힘
2차(Hz)	30.3	51.7	2차 굽힘
3차(Hz)	71.3	80.3	3차 굽힘

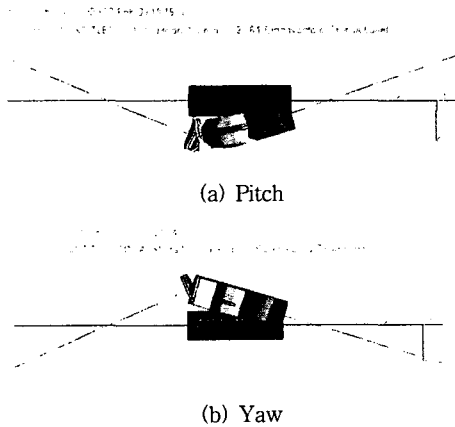


Fig.15 Mode shape of composition FEM model

보정을 통해 전기체의 추진기관이 6초간 연소된 기체에 대해 시험과 해석결과를 표 6에 나타내었다. 표에서도 알 수 있듯이 1차원 보 요소만으로는 힌지 구조물의 강성을 묘사하는 것이 어렵고, 또한 기체부를 3차원 모델링 하여 해석한 결과 피치 방향으로는 기체부의 강성을 유사하게 구현하였지만 요 방향으로는 힌지 구조물의 강

성을 구현하기가 힘들다. 이러한 요인은 고유 진동수 해석에서는 힌지 프레임의 요 방향 접촉요소를 사용할 수 없기 때문에 전·후방 힌지를 제외하면 요 방향의 경우 힌지가 운동방향에 대해서 강성을 가질 수 없는 조건이 되어 전·후방이 강제로 거동한 것으로 판단된다. 그러나 실제 현상에서는 힌지 프레임사이에서 접촉이 존재하고 접촉에 의한 강성이 전달되기 때문에 요 방향으로 해석결과가 클 것으로 생각된다. 향후 접촉을 고려한 고유 진동수 해석방법으로 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 보인다.

Table 6. Comparison of modal test and FEM in case#1

구분	Test		FEM			
	Pitch	Yaw	Pitch	Yaw	Pitch	Yaw
1차	12.4	14.3	25.1	27.9	12.8	2.84
2차	30.2	33.3	59.3	69.6	30.3	51.7
3차	73.7	58.6	187	213	71.3	80.3
비교	-		1D		1D+3D	

3. 결론

힌지부를 갖는 유도탄 전기체 구조물의 동특성 자료를 랜덤진동시험을 통하여 도출하였다. 동특성시험을 위하여는 와이어 로프로 유도탄을 천정에 매달아 수평방향으로 자유-자유 경계조건을 구현하였다.

도출한 동특성 자료는 유한요소해석 결과와 비교하여 해석 기법의 타당성을 검증하는데 사용되었다. 분석결과 유한요소모델은 힌지부를 3차원모델을 이용한 상세모델로 수정되었으며, 수정모델은 보다 정확하게 유도탄의 동특성을 평가할 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) 전병희, 1997, "실험적 동특성 분석기법 연구", 연구보고서, 국방과학연구소, MADC-416-970410
- (2) SDRC, 1994, I-DEAS User's Manua
- (3) 강춘길 등, 2003, "힌지부를 갖는 분할형 유도탄 동체의 고유진동수 고찰", 제12차 유도무기학술대회 논문집, pp.419~422.1
- (4) Ken Blskely, "MSC/NASTRAN Basic Dynamic Analysis", MSC/NASTRAN User's Guide.