

# 힌지 연결된 분할형 동체를 갖는 유도탄의 고유진동특성 연구

A Study on Natural Frequencies of a Missile having Split Airframes  
with Hinged Joints

**강 춘 길\***                      **원 명 식\***  
Choon-Gil, Kang              Myong-Shik Won

## ABSTRACT

The missile for this study has shown different natural frequency characteristics depending on the test conditions; natural frequencies obtained from its flight test are higher than those in its ground test. It was found that the hinged joints connecting front airframe to rear one had the nonlinear stiffness and caused the missile to show very complex dynamic characteristics. The angular stiffness at hinged joints was calculated using 3D finite element analysis, and it was verified that there was a highly nonlinear relationship between angular stiffness and external load. Natural frequencies calculated considering the nonlinearity of angular stiffness were nearly the same as test results. Through this study, the dynamic characteristics of a missile having split airframes with hinged joints could be clearly identified and a way of maintaining its natural frequencies consistent was generated.

주요기술용어(주제어) : Natural Frequency(고유진동수), Angular Stiffness(회전강성), Dynamic Characteristics(동특성), Hinged Joint(힌지 연결부), Flight Test(비행시험), Ground Test(지상시험)

## 1. 서론

유도탄의 조종명령은 탑재된 센서로부터 획득한 탄의 거동자료를 근거로 생성된다. 따라서 비행 중 발생하는 유도탄의 진동은 탄의 비행자세를 호도하여 불필요한 명령을 생성시킬 수도 있다. 외부 가진 여부와 상관없이 모든 물체는 자체의 고유진동수를 가지고 있으며, 이러한 고유진동특성은 유도탄의 비행 거동을 왜곡시킬 수 있는 중요한 요인 중의 하나이

다. 따라서 비행에 앞서 시스템의 고유진동수 정보를 사전에 확보하여 조종명령으로의 유입을 차단하는 것은 상당히 중요한 준비 과정중의 하나이다.

본 연구의 대상인 유도탄은 추력 방향을 변화시켜 초기 비행궤적을 조정하는 제트베인 구동방식을 적용하고 있다. 따라서 외란으로 인한 조종명령의 왜곡은 제트베인 구동명령으로 유입되어 발사초기부터 심각한 문제를 유발할 수 있기 때문에, 정확한 고유진동수 산출의 중요성은 다른 유사 무기체계에 비해 훨씬 높다고 할 수 있다. 동특성시험 결과에 따르면 본 유도탄의 고유진동수는 피치와 요 방향이 크게 다르고, 특히 요 방향은 매우 낮고 일관되지 못한 특성을 보였다. 뿐만 아니라 고유진동수는 물체의 고유한 특성

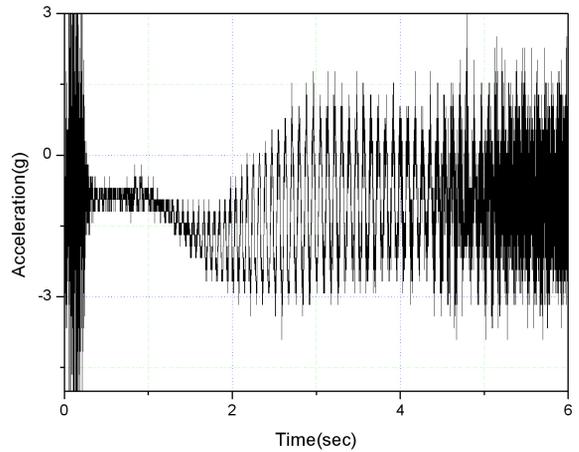
† 2007년 2월 21일 접수~2007년 8월 23일 게재승인

\* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : kang123@add.re.kr

이기 때문에 환경의 영향을 받지 않아야 함에도 불구하고 비행 중인 유도탄의 고유진동수가 지상시험의 결과보다 훨씬 높아지는 경향을 보였다<sup>[1]</sup>.

본 연구에서는 유한요소해석 기법을 이용하여 기체의 비선형적인 강성 거동을 확인하였으며, 해석적으로 구한 기체의 강성을 정규모드해석에 반영하여 시험에서 나타난 복잡한 고유진동특성을 재현하였다. 이를 통하여 힌지 연결된 분할형 동체를 갖는 본 유도탄의 독특한 고유진동특성의 원인을 규명하였다. 상기의 연구결과를 활용함으로써 본 유도탄의 고유진동수를 증가시켰고, 외부 환경에 관계없이 일관된 동특성을 갖는 기체구조를 개발할 수 있었다<sup>[2]</sup>.



[그림 1] 유도탄 진동신호

## 2. 유도탄의 고유진동특성

### 가. 초기 안정성시험 결과

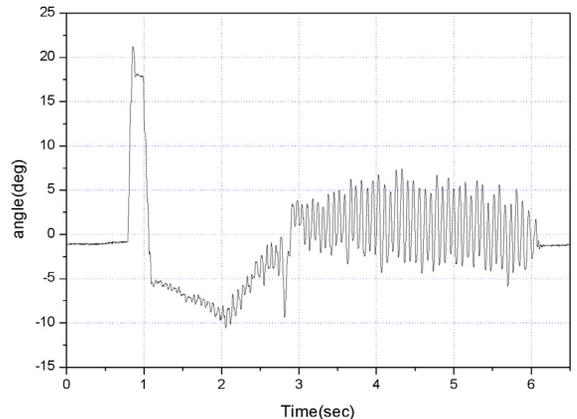
유도탄의 초기비행 안정성과 제트베인의 조종성능을 확인하기 위한 비행시험을 수행한 결과, 탄은 제트베인이 작동하는 동안 그림 1에서 보는 바와 같이 비교적 큰 진폭으로 진동하였다<sup>[3]</sup>. 계측된 가속도신호를 주파수 분석해 보면 표 1에서 알 수 있듯이 비행시간이 경과함에 따라 지배적인 진동수가 낮아지는 특성을 보였다. 이는 비행시간이 경과할수록 추진제가 연소됨에 따라 탄의 중량이 줄게 되므로 고유진동수가 높아져야 하는 일반적인 경우와는 반대되는 현상이었다.

또한 제트베인은 그림 2에서 보는 바와 같이 탄 발사 후 추진기관이 분리될 때까지 저주파수의 진동성분이 구동명령에 합성되어 불필요하게 구동하였다. 제트베인 구동명령에 대한 주파수분석 결과가 표 1의 유도탄 진동성분과 동일하여, 유도탄 진동과 제트베인 구동명령이 서로 밀접하게 연관되어 있음을 알 수 있다. 기체 후방의 추진기관에 부착되어 있는 제트베인이 그림 2와 같이 구동하게 되면 유도탄은 강제진동(forced vibration)을 하게 된다. 본 시험에서 나타난 유도탄의 진동이 제트베인에 의한 강제진동으로만 본다면 제트베인의 이상구동 원인은 알 수가 없게 된다.

제트베인 구동명령은 조종컴퓨터(GNC)에 장착된 센서가 계측한 탄의 거동을 분석하여 생성되므로, 이

[표 1] 가속도신호에 포함된 지배 진동수

비행시간(초)	0.00~0.64	0.64~1.90	1.90~2.56	2.56~3.20	3.20~
진동수(Hz)	17.2	15.0	14.0	12.5	11.0



[그림 2] 제트베인 구동명령

와 같은 현상이 발생하려면 유도탄이 표 1과 같은 주파수로 진동해야 한다. 외부에 특별한 가진 원인이 없는 한, 비행 중 나타나는 유도탄의 주요 진동 원인은 고유진동수이다. 이상의 현상들을 종합해 보면, 본 유도탄의 고유진동수는 일반적인 고유진동특성과는 달리 환경에 따라 변화되는 특성을 갖는 것으로 보인다.

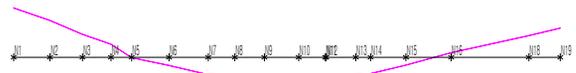
나. 지상 동특성시험 결과

초기 안정성시험에서 발생한 제트베인의 이상구동 원인을 분석하기 위한 과정의 하나로써, 시험탄과 동일한 사양으로 구성된 예비탄에 대한 고유진동수 측정 시험을 지상에서 수행하였다. 예비탄을 더미 탑재체, 기체, 더미 추진기관 등으로 구성하였으며, 내부의 탑재장비는 더미 중량으로 대체하여 유도탄의 중량특성이 시험탄과 동일하도록 설계하였다. 상부와 하부로 나누어진 기체부의 구조상 특성으로 피치와 요 방향의 강성이 서로 다를 수 있기 때문에, 피치 방향과 요 방향 각각에 대하여 별도로 시험을 수행하였다. 그림 3은 동특성시험의 장면을 보여주고 있다.

동특성시험 결과, 기체부의 제작 및 조립 상태에 따라 표 2에서 보는 바와 같이 약간의 차이를 나타내고 있지만, 대체적으로 피치 방향의 고유진동수가 요 방향보다 약 2~3Hz 정도 높았다. 또한 그림 4의 진동 모드를 살펴보면 피치 방향은 일반적인 모드형상을 보이지만 요 방향은 힌지를 기준으로 전방과 후방이 강체 거동을 하는 모드형상을 보이고 있어 힌지의 요 방향 강성이 다른 부위에 비하여 상대적으로 작음을 알 수 있다. 실험적으로 측정된 유도탄의 고유진동수가 초기 안정성시험에서 나타난 기체 진동수와 유사한 값을 보이고 있어 제트베인의 이상구동 원인이 유도탄의 고유진동수 때문이었던 것으로 결론지을 수 있었다. 그러나 비행시간이 경과될수록 고유진동수가 낮아지는 원인과 관련해서는 지속적인 시험과 분석이 요구되었다.

[표 2] 초기 안정성시험용 유도탄의 고유진동수

진동 모드	고유진동수(Hz)					
	1차 시험		2차 시험		3차 시험	
	피치	요	피치	요	피치	요
1차	14.4	12.4	15.1	12.1	16.1	13.0



(a) 피치 방향

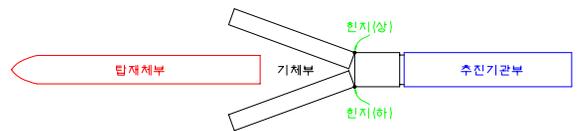


(b) 요 방향

[그림 4] 1차 진동모드

다. 고유진동특성 분석

본 유도탄은 그림 5에서 보는 바와 같이 탑재체부, 기체부 및 추진기관부로 구성되어 있다. 탑재체부는 완전 원통형의 알루미늄 구조물로서 기체에 탑재되고 추진기관은 내부에 추진체를 충전하고 있는 강재 구조물이다. 기체는 비행에 필요한 공력을 생성시키고 내부의 탑재 장비들을 보호해 주는 구조물로서 탑재체를 신속, 정확하게 분리시키기 위하여 상부와 하부로 분할된 구조로 설계되었다.



[그림 5] 유도탄 구성도

유도탄 구성상 기체가 탑재체와 추진기관을 연결하는 중앙부에 위치하고 있어 기체의 강성이 전체 유도탄의 고유진동수를 결정한다. 탑재체의 원활한 탑재와 분리를 위하여 상·하부로 나누어진 전방동체와 일체형의 후방동체는 각각 상부와 하부에 위치한 힌지판에 의해서만 연결되어 있다. 따라서 힌지부의 강성은 전 단면에 걸쳐서 고르지 못할 뿐더러, 유도탄의 다



[그림 3] 지상 동특성시험 장면

른 부위와 비교하여 매우 작다. 이와 같은 구조상의 특성은 본 유도탄이 유사 무기체계에 비하여 낮은 고유진동수를 갖도록 하고 있다.

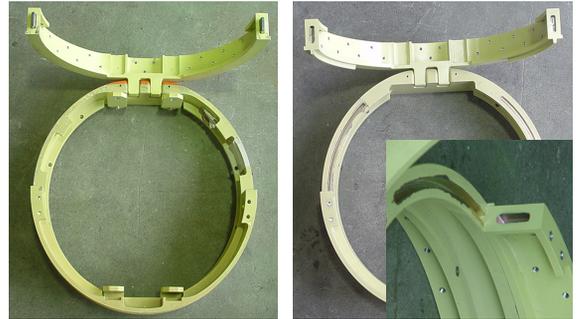
초기 안정성시험 이후 수차례의 유사한 비행시험이 수행되었으며, 그 준비과정에서 동일 유도탄에 대한 동특성시험이 선행되었다. 시험결과, 표 3에서 보는 바와 같이 동특성시험과 비행시험 결과가 상당히 큰 차이를 보이고 있으며, 동특성시험의 경우 시험대상이 동일함에도 불구하고 요 방향으로는 7.1~13.5Hz에 달하는 넓은 주파수 대역을 가지고 있었다.

약 10Hz 미만의 낮은 고유진동수는 유도탄의 조종 성능을 저하시킬 수 있으므로 그 심각성은 매우 크다고 할 수 있다. 이에 반하여, 표 3의 비행시험 결과는 초기 안정성시험 결과와는 달리 전 비행구간에서 동특성시험 결과보다 훨씬 증가한 17Hz 부근의 비교적 일정한 진동 특성을 나타내었다.

초기 안정성시험 과정에서 발생한 유도탄의 과도한 처짐을 방지하고, 동특성시험 결과에서 나타난 요 방향의 낮은 힌지강성을 증가시키기 위한 방안으로 힌지부의 형상을 그림 6과 같이 변경한 바 있다. 전·후방 힌지프레임이 조립 시 서로 끼워지는 개념으로서 상·하로 나누어진 전방 힌지프레임이 하중을 받아도 원형을 유지할 수 있도록 하여 유도탄의 처짐을 줄이고 힌지가 없는 요 방향의 강성을 보강하기 위한 형상이다. 결과적으로 그림 6과 같은 힌지프레임의 형상 변경은 동특성시험 결과에는 영향을 미치지 못했지만, 비행시험에서는 진동수를 높였고 비교적 일관된 값을 유지하도록 하는 결과를 얻었다.

[표 3] 유도탄의 고유진동수 비교

유도탄	고유진동수(Hz)		비고
	지상 동특성시험	비행시험	
	피치		
#1	14.3	9.6	17, 18
#2	17.4	13.5	17, 20.5
	15.6	7.1	
	13.5	9.1	
	16.5	11.7	



(a) 수정 전

(b) 수정 후

[그림 6] 힌지프레임 형상

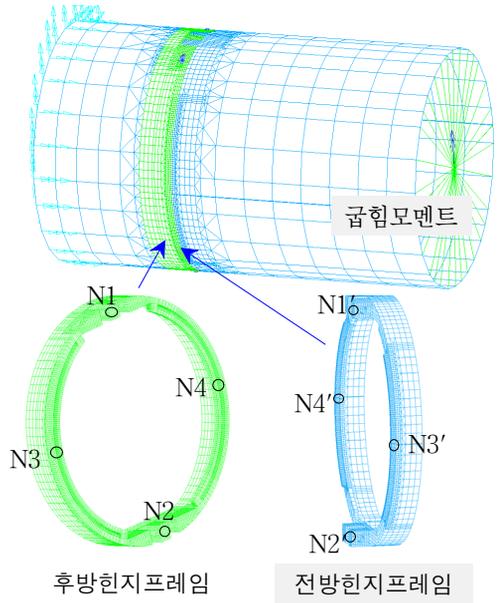
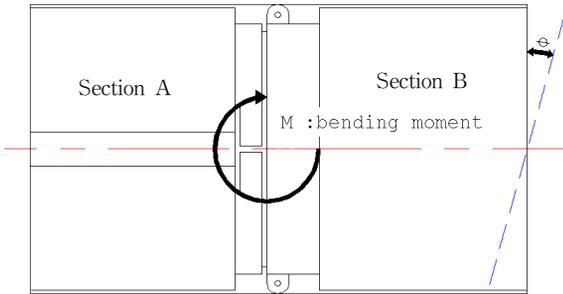
본 연구 대상인 유도탄의 고유진동특성을 한마디로 요약하면, 지상시험에서는 일관성이 없는 고유진동특성을 보이지만 비행시험에서는 비교적 일관된 진동특성을 보인다는 것이다. 지상시험과 비행시험의 가장 큰 경계조건 차이는 유도탄에 작용하는 공력하중의 존재이다. 일반적인 유도탄의 구조물은 부가되는 하중의 크기에 상관없이 거의 일정한 강성을 지니고 있어 지상시험과 비행시험에서 거의 동일한 고유진동수를 나타낸다. 따라서 본 유도탄은 외부 하중에 대하여 비선형적인 강성을 갖는 부분이 존재하며, 이는 구조적으로 가장 취약한 힌지부일 가능성이 매우 높다.

### 3. 힌지부의 비선형성 규명

#### 가. 회전강성의 정의

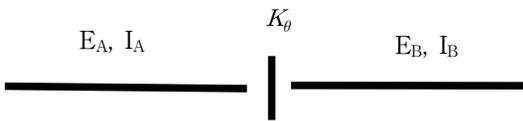
기체에 부가되는 굽힘모멘트로 인하여 발생하는 하중 흐름(load flow; load per unit length)은 서로 다른 섹션을 연결해주는 조립부에서 항상 변하게 된다. 이와 같은 강성의 불연속으로 인하여 나타나는 영향은 실험이나 유한요소해석 기법을 이용하여 규명할 수 있다. 이러한 강성의 불연속성은 기체의 변형이나 응력에 커다란 영향을 미칠 뿐만 아니라 유도탄의 고유진동특성을 결정할 수 있는 중요한 요인이 된다. 본 연구 대상과 같이 매우 큰 불연속성을 가진 연결부 강성 계산에는 국부적인 회전강성(local angular stiffness  $K_{\theta}$ )개념을 도입한다.

섹션 연결부의 국부적인 회전강성 특성은 다음과 같이 구할 수 있다. 구조물의 강성을 1차원 보요소로 모델링할 경우, 강성 불연속 단면의 국부적인 회전강성은 3차원 요소들로 구성된 모델에서 구한 단면의 변형각( $\theta$ )과 부가되는 굽힘모멘트( $M$ )를 이용하여 식 ' $K_\theta = M/\theta$ '로 계산할 수 있다. 이와 같은 방법으로 구한 연결부의 국부적인 회전강성은 기체의 고유진동수 해석에 직접적으로 사용된다<sup>[4]</sup>.



[그림 7] 유한요소해석 모델

$E_A, E_B$  : Young's modulus of section A and B  
 $I_A, I_B$  : moment of inertia of section A and B  
 $K_\theta = M/\theta$  : local angular stiffness



나. 유한요소 모델링

회전강성을 계산하기 위하여 힌지부에 대한 정밀 유한요소 해석을 수행하였다. SDRC/I-DEAS를 이용하여 전·후방 힌지프레임을 정밀하게 모델링하고 모든 조립부는 접촉요소(gap element)로 연결하였다. 후방힌지프레임과 연결된 동체를 완전 고정하고 전방힌지프레임과 연결된 동체부에 굽힘모멘트를 부가하였다. 굽힘모멘트는 힌지부에 작용하는 비행 하중의 2배로 선정하였다. ABAQUS의 비선형 접촉해석 기법을 사용하여 각 절점의 변위와 접촉 압력을 계산하였다. 그림 7은 유한요소해석 모델이다.

힌지단면의 회전각은 유한요소해석으로 구한 전·후방 힌지프레임의 변위량을 이용하여 계산하였다. 그림 7의 N1과 N2, N1'와 N2'는 각각 전·후방 힌지프레임의 피치 방향 최상부 및 최하부 절점을 나타낸

다. 또한, N3과 N4, N3'와 N4'는 전·후방 힌지프레임의 요 방향 최상부 및 최하부 절점이다. 이들 절점의 변위를 이용하면 힌지단면의 회전각은 다음과 같이 계산된다.

$$\theta_{pitch} = \frac{[(X_{N1} - X_{N1'}) - (X_{N2} - X_{N2'})]}{D}$$

$$\theta_{yaw} = \frac{[(X_{N3} - X_{N3'}) - (X_{N4} - X_{N4'})]}{D}$$

여기서  $\theta_{pitch}, \theta_{yaw}$  : 피치 방향 및 요 방향 회전각  
 $X_{Ni}$  : 절점  $Ni$ 의 프레임 축 방향 변위량  
 $D$  : 구조물의 직경

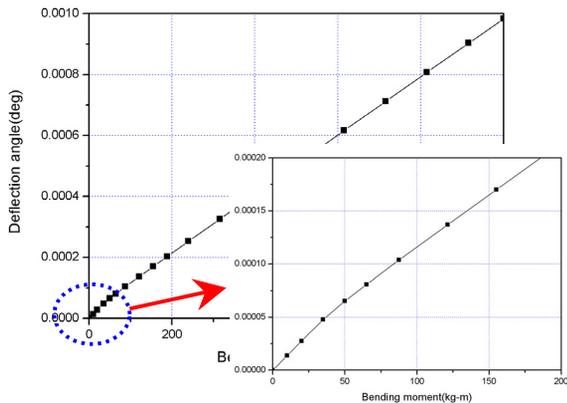
다. 해석결과 및 분석

1) 피치 방향

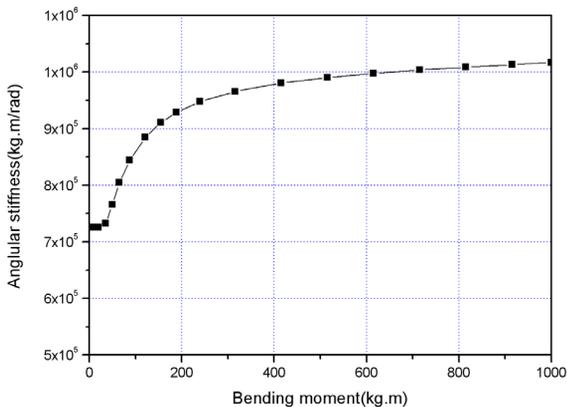
유한요소해석 결과를 이용하여 계산한 힌지부의 피치방향 회전각은 그림 8과 같다. 굽힘모멘트가 작은 구간에서는 완만한 비선형성을 보이지만 하중이 일정 수준 이상에 도달하면 선형적인 거동을 나타낸다.

그림 8의 회전각을 이용하여 계산한 피치 방향의 회전강성은 그림 9에서 보는 바와 같이 부가된 굽힘

모멘트가 아주 작아도 약  $7.3 \times 10^5 \text{kgf} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 의 강성을 가지고 있는데, 이것은 접촉의 영향을 배제한 순수 힌지강성이다. 부가되는 굽힘모멘트가 커지면 회전강성이 비선형적으로 증가하여 약  $10.0 \times 10^5 \text{kgf} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 에 수렴하였다. 이것은 전방힌지프레임이 변형되면서 후방힌지프레임과 접촉하게 되고, 후방힌지프레임이 변형을 지지함으로써 회전강성을 증가시키기 때문이다.



[그림 8] 힌지부의 회전각(피치 방향)



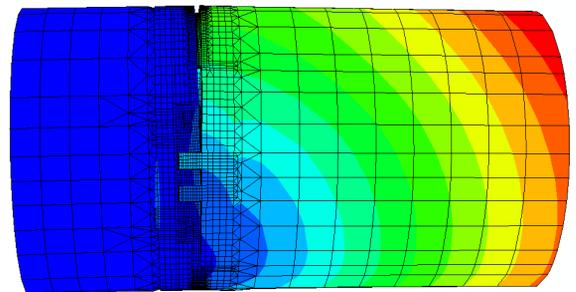
[그림 9] 힌지부의 회전강성(피치 방향)

이상의 결과에서 보는 바와 같이 피치 방향은 힌지 연결만으로도 기본적인 강성을 보유하고 있으며, 접촉으로 인한 비선형적인 강성 증가 효과는 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 앞서 수행된 수차례의 동특성 시험에서 피치 방향의 고유진동수가 비교적 일정한 값을 유지할 수 있었던 것도 이와 같은 이유이다.

## 2) 요 방향

순수 굽힘하중을 받는 구조물이 변형하면 위쪽은 인장, 아래쪽은 압축을 받게 되며 중심에는 인장도 압축도 받지 않는 면, 즉 변형이 되지 않는 면이 존재한다. 이를 중립면이라고 하는데, 순수 굽힘하중을 받는 원통형 구조물의 경우 원의 중심선과 거의 일치한다<sup>[5]</sup>.

힌지부가 요 방향의 굽힘하중을 받으면 힌지는 중립면상에 위치하게 되므로 거의 하중을 지지하지 못하게 된다. 따라서 힌지는 요 방향의 회전강성에 거의 영향을 주지 못한다. 그림 10은 요 방향의 변형 거동을 나타낸 것인데, 상부는 인장력을 받아 전·후방 힌지프레임 사이가 벌어지고 하부는 압축력을 받아 닫혀지는 형태로 변형하고 있으며 힌지는 거의 상·하 변형의 중심에 위치하고 있음을 알 수 있다. 힌지부가 요 방향의 굽힘하중을 받을 때 인장하중을 받는 상부는 하중을 지탱할 수 있는 아무런 구조가 없기 때문에 크게 변형하지만, 압축하중을 받는 하부는 전·후방 힌지프레임 사이에 견고한 접촉이 형성되어 상대적으로 거의 변형을 하지 않는 거동을 보인다.

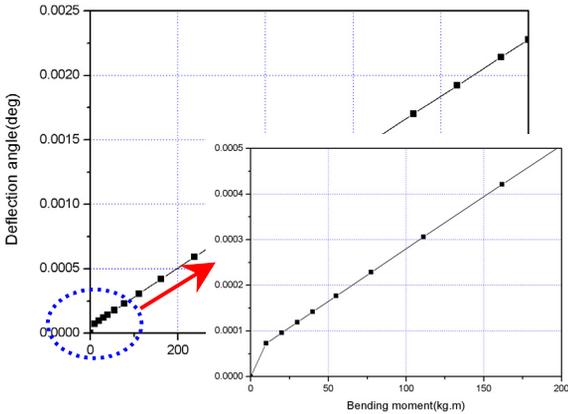


[그림 10] 힌지부의 변형 거동(요 방향)

힌지부의 요 방향 회전각은 그림 11에서 보는 바와 같이 작은 굽힘모멘트에서는 비선형성을 보이지만 하중이 일정수준 이상으로 증가하면 선형적인 거동을 보인다. 전체적인 거동은 피치 방향과 유사하지만 초기 비선형성의 정도는 피치 방향보다 훨씬 크다.

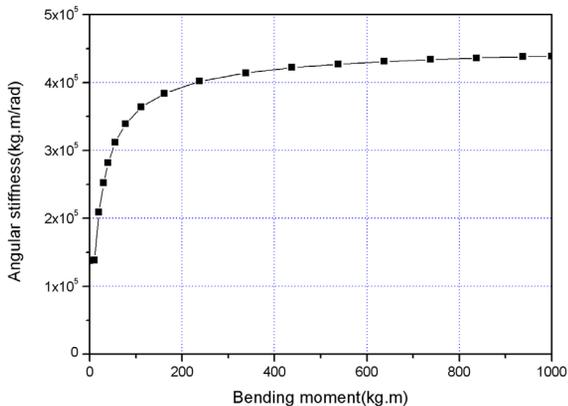
요 방향의 회전강성은 피치 방향과는 달리 하중이 없는 상태에서는 강성이 매우 작지만, 굽힘모멘트가 증가하면 강성이 급격하게 증가하여 약  $4.4 \times 10^5 \text{kgf} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 에 수렴하는 것으로 나타났다. 이 결과에 따르

면 하중이 없는 상태에서의 힌지부 강성은 매우 작지만, 약간의 하중 증가에도 강성이 크게 높아진다는 것을 알 수 있다. 따라서 하중을 전혀 받지 않는 상태에서 수행되는 동특성시험에서는 요 방향의 강성이 매우 작기 때문에, 힌지를 기준으로 전·후방 기체가 강체거동을 하는 낮은 고유진동수를 가지게 된다.



[그림 11] 힌지부의 회전각(요 방향)

본 유도탄의 하중해석 결과에 따르면 비행 중 힌지부에 부가되는 최대 굽힘모멘트는 약  $500\text{kgf}\cdot\text{m}$  정도이다. 그림 12에서 알 수 있듯이, 이 값은 힌지부에 충분한 강성을 생성시킬 수 있는 크기이므로 비행 중의 유도탄 고유진동수가 지상 동특성시험 결과보다 훨씬 높게 나타나는 것은 당연한 결과라고 할 수 있다.



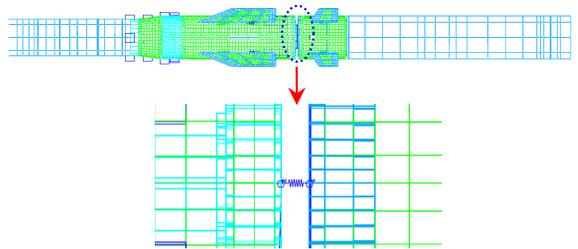
[그림 12] 힌지부의 회전강성(요 방향)

이상에서 힌지부의 비선형적인 강성 변화를 해석적으로 고찰해 보았다. 해석결과 나타난 강성의 거동이 그 동안 복잡한 양상을 보였던 본 유도탄의 고유진동 특성을 어느 정도 설명한다고 할 수 있다.

유한요소해석을 통하여 계산한 힌지부 강성의 물리적인 타당성은 아래에 기술되는 고유진동수 해석결과를 통하여 확인하였다.

라. 고유진동수 해석

유한요소해석을 통하여 구한 힌지부의 회전강성을 고유진동수 해석 모델에 반영하여 각각의 회전강성에 대한 고유진동수를 계산하였다. 고유진동수 해석 모델은 기체를 3차원으로 모델링하고, 탑재체와 추진기관은 등가의 1차원 보요소로 묘사한 모델에 전방과 후방 힌지의 연결부를 등가 스프링요소로 대체한 후 피치 및 요 방향의 회전강성을 스프링강성으로 부여하였다. 그림 13은 고유진동수 해석 모델을 나타낸다.



[그림 13] 회전강성을 이용한 고유진동수 해석 모델

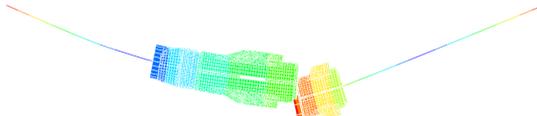
I-DEAS의 정규모드해석 모델을 사용하여 양단 자유 경계조건에 대한 해석을 수행하였다. 해석 결과, 표 4에서 보는 바와 같이 피치 방향은 15Hz대의 거의 일정한 고유진동특성을 보이고 있으나, 요 방향은 11.6Hz에서부터 14.8Hz까지 비교적 큰 폭으로 변화하는 고유진동수를 나타내었다. 해석적으로 구한 고유진동수가 동특성시험 결과와 유사한 경향을 보이는 것으로 보아 계산된 회전강성이 타당하다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 그 동안 지상 동특성시험에서 나타났던 요 방향 고유진동수의 복잡한 거동은 힌지부의 비선형적인 회전강성 때문이라고 결론지을 수 있다.

[표 4] 고유진동수 해석결과

피치 방향		요 방향	
회전강성 ( $kgf \cdot m/rad$ )	1차 고유진동수 (Hz)	회전강성 ( $kgf \cdot m/rad$ )	1차 고유진동수 (Hz)
$7.2 \times 10^5$	15.1	$1.0 \times 10^5$	11.6
$8.85 \times 10^5$	15.24	$3.0 \times 10^5$	14.23
$10.0 \times 10^5$	15.4	$4.35 \times 10^5$	14.8

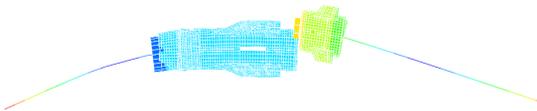
그림 14와 15는 힌지부가 거의 하중을 받지 않는 상태에서 구한 회전강성(피치 방향의 경우  $7.2 \times 10^5 kgf \cdot m/rad$ , 요 방향의 경우  $1.0 \times 10^5 kgf \cdot m/rad$ )을 적용했을 때 계산된 요 및 피치 방향의 1차 고유진동모드를 각각 도시하고 있다. 힌지부의 꺾이는 정도가 요 방향이 피치 방향보다 훨씬 크다는 것을 알 수 있으며, 이는 요 방향의 회전강성이 강체거동을 방지할 수 있을 만큼 충분히 크지 않다는 것을 나타낸다.

RESULTS: 1 - B, C, 1, NORMAL\_MODE 1, D, SPLACEMENT\_1  
 NODE 1 - FREQ: 11.61805  
 D, SPLACEMENT - IRG, M, N, 3, 05E-06, MAX, 3.43E-04  
 DEFORMATION: 1 - B, C, 1, NORMAL\_MODE 1, D, SPLACEMENT\_1  
 NODE 1 - FREQ: 11.61805  
 D, SPLACEMENT - IRG, M, N, 3, 05E-06, MAX, 3.43E-04  
 FRAME OF REF: PART VALUE OPT: ON ACTUAL



[그림 14] 요 방향의 1차 고유진동모드

RESULTS: 2 - B, C, 1, NORMAL\_MODE 2, D, SPLACEMENT\_2  
 NODE 2 - FREQ: 15.1152  
 D, SPLACEMENT - IRG, M, N, 1, 30E-05, MAX, 6.45E-04  
 DEFORMATION: 2 - B, C, 1, NORMAL\_MODE 2, D, SPLACEMENT\_2  
 NODE 2 - FREQ: 15.1152  
 D, SPLACEMENT - IRG, M, N, 1, 30E-05, MAX, 6.45E-04  
 FRAME OF REF: PART VALUE OPT: ON ACTUAL



[그림 15] 피치 방향의 1차 고유진동모드

이상과 같이 본 유도탄의 고유진동특성을 해석적으로 규명하였는데, 힌지 연결된 분할형 동체를 갖는 유도탄의 고유진동수를 증가시키고 일관된 값을 가지도록 하기 위해서는 힌지부 회전강성의 비선형성을 제거해야 함을 알 수 있었다. 힌지부의 비선형성은

전·후방 힌지프레임 사이의 접촉상태가 외부하중 크기에 따라 변하기 때문에 발생하는 현상이므로, 두 개의 힌지프레임을 최초로 조립할 때 강제적인 접촉을 부가하여 외부하중의 크기와 관계없이 일정수준 이상의 접촉강성을 유지한다면 힌지부의 비선형성은 크게 완화될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

상·하부에 위치한 2개의 힌지구조에 의해서만 섹션이 연결되는 유도탄 기체는 피치 방향과 요 방향의 고유진동수가 서로 다르고, 특히 요 방향의 고유진동수는 동일 구조물일지라도 힌지부의 조립상태에 따라 크게 달라지는 복잡한 동특성을 보이고 있다. 외부환경에 따라 변하는 기체의 고유진동수는 체계운용 관점에서 많은 문제점을 유발시킬 수 있으므로, 본 연구에서는 힌지 연결된 분할형 동체를 갖는 유도탄의 고유진동특성을 해석적으로 규명하고 대안을 모색해 보았다. 주요 연구결과는 다음과 같다.

- 유한요소해석 기법을 적용하여 힌지부 강성의 비선형성을 확인하였다. 힌지가 변형 방향의 상부와 하부에 위치하게 되는 피치 방향은 힌지에 의하여 일정 수준의 구조강성을 보유하고 있다. 그러나 요 방향은 힌지가 중립면 상에 위치하는 관계로 기본적인 힌지의 구조강성을 보유하지 못하고 접촉강성만 갖기 때문에 부가되는 외부하중에 대하여 매우 민감한 비선형성을 나타낸다.
- 해석적으로 구한 힌지부의 회전강성을 정규모드해석 모델에 적용하여 고유진동수를 계산한 결과, 피치 방향은 부가되는 하중의 크기와는 거의 상관없이 약 15Hz대의 일정한 값을 갖지만 요 방향은 부가되는 하중의 크기에 따라 11~15Hz까지 고유진동수가 달라졌다. 해석적으로 도출된 이와 같은 경향은 지상의 동특성시험 결과와 거의 일치한다.
- 해석적으로 구한 힌지부 회전강성의 비선형성은 지상 동특성시험보다 비행시험에서 본 유도탄의 고유진동수가 높아지는 원인을 충분히 설명해주고 있다. 동특성 시험에서 요 방향의 고유진동수가

조립 조건이나 시험 환경에 따라 큰 폭으로 변동하는 원인은 요 방향의 회전강성이 외부하중 조건에 민감하게 변하기 때문이다.

본 연구를 통하여 힌지 연결된 분할형 동체를 갖는 유도탄의 복잡한 고유진동특성은 힌지부의 비선형적인 회전강성 때문임을 확인할 수 있었다. 힌지부의 비선형성은 전·후방 힌지프레임 사이의 접촉상태가 외부 하중의 크기에 따라 변하기 때문에 발생하는 현상이므로, 최초 조립 시 강제적인 접촉을 부가하여 외부하중의 크기와 관계없이 일정수준 이상의 접촉강성을 유지하는 것이 일관된 고유진동수를 얻을 수 있는 방안으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 강춘길 외, “기체구조 연구보고서(동특성 해석 및 시험 결과)”, 국방과학연구소, MADC-416-031095.
- [2] 강춘길 외, “동특성 연구보고서”, 국방과학연구소 보고서, MADC-216-060802.
- [3] 강춘길 외, “2002년도 비행시험 결과보고서(기체 구조분야)”, 국방과학연구소, MADC-516-021026.
- [4] Matra Bae Dynamics, Mistral Offset Program for Korea, MOA No DEG/JLL/3019-3 B7 Session Airframe structure Vol. 2 Airframe structural analysis.
- [5] 김규남 외, “재료 역학”, 청문각, 1990.