

유도탄의 유연성을 고려한 발사초기 동역학 해석

Flexible Multibody Dynamic Analysis of Missile Behavior for the Initial Launching Stage

안진수* 임범수*
Ahn, Jin-Soo, Lim, Beom-Soo

ABSTRACT

Dynamic behavior of missile which is fired in canister is analyzed by flexible multibody dynamics. The bending elasticity of missile is very important in case that missile is fired in the inclined launcher. In this paper, the force element model for the missile launching stage and the finite element model of missile are developed. The FEA model of missile is condensed into five lumped mass element model and the consistence between FE model and lumped mass model of missile is verified by modal analysis. As a result of analysis, sabot reaction force and pitch rate of missile for the variation of gap size and force element are obtained.

주요기술용어 : Dynamic analysis(동역학 해석), Pitch rate(피치각속도), Sabot(탄지지대), Canister(발사관), Gap(간극), Stiffness(강성)

1. 서론

유도탄을 지상 또는 함상으로부터 발사시킬 때 발사대를 떠나는 순간 유도탄이 갖는 초기 각운동량은 일정 속도에 이를 때까지 유도탄의 안정성에 영향을 주므로 이 값들을 최소화 시키는 것이 필요하다. 유도탄을 발사하는 방법으로 발사각에 따라 수직형과 경사형으로 구분할 수 있다. 수직형 발사방식은 표적의 방향에 관계없이 유도탄을 발사시킨 다음 방향제어 노즐을 이용하여 유도탄의 방향을 표적방향으로 바꾸어 주는 방식이고 경사형 발사 방식은 표적의 방향에 따라 발사대를 회전시켜 유도탄을 표적 방향으

로 발사시키는 방법이다. 경사형 발사대에서 유도탄을 발사할 때 유도탄의 초기 각 운동량에 영향을 줄 수 있는 요인으로 중력침하(Tip-off) 및 발사대 진동이 있다⁽¹⁾. 중력침하는 유도탄의 지지점이 발사대로부터 자유상태가 되는 시간의 차이로 인해 유도탄의 무게에 의한 모멘트가 발생되어 중력 방향의 각 운동이 증대되는 현상으로 발사대와 유도탄의 간섭현상을 배제하고 회전운동을 최소화 하기 위해 발사 초기 동역학적 관계 규명이 매우 중요하다.

유도탄 발사시 초기 동역학 해석에 관한 연구로써, 국내에서는 다연장 로켓을 DADS-3D 프로그램으로 강체모델을 구성하여 발사오차 해석 및 탄착 분산 최소화 해석을 수행하였고⁽²⁾, 궤도차량을 이용한 발사대의 동역학을 해석하기 위한 전용프로그램을 개발하였

* 국방과학연구소

으며³⁾ 지대공 유도탄의 초기거동 및 유도탄 각 운동량을 해석하기 위하여 ADAMS를 이용하여 3차원해석을 수행한 바 있다⁴⁾.

그러나 이러한 연구는 발사대 및 유도탄을 모두 강체로 가정하여 해석하였으므로 유도탄과 발사대의 지지점 사이에 강성을 모두 가정하여야 하며 유도탄의 굽힘운동을 정확히 고려하기가 매우 어렵다. 특히 유도탄 발사시 지지점이 유도탄 후방에 존재하여 굽힘특성이 매우 중요한 문제의 해석에는 해의 오차가 크고 실제 발생하는 현상을 시뮬레이션하기가 어렵다. 최근 다물체 동력학의 발달로 유연성을 포함하는 기법이 개발되고 유한요소해석과 조합하는 연구가 활발히 진행되어 오고 있으며 유연성이 중요한 동력학 연구에 적용되고 있다.

본 논문에서는 발사관에서 탄지지대 방식의 유도탄 발사시 발생하는 동력학적 관계를 정확히 규명하기 위하여 발사대는 강체모델로 구성하였으며, 유도탄을 유한요소 모델로 구성하여 유연성을 고려한 동력학 해석을 시도하였다. 전산 동력학 범용 해석 S/W인 ADAMS를 이용하여 유도탄의 이동 단계를 3단계로 나누어 강체 모델을 구성하였고, 유도탄은 MSC/NASTRAN을 이용하여 보(beam)요소로 모델링하였으며 ADAMS/FEA 모듈을 이용하여 5개의 강체모델로 변환한 다음 집중질량 및 강성 행렬을 구하였다.

해석 결과 유도탄의 발사관내 운동으로 인한 발사 초기 각운동 발생과정을 규명하였고 유도탄 지지부위의 간극 및 강성 변화에 따른 지지하중 및 각운동량의 변화를 구하였다.

2. 유도탄과 발사대의 강체 모델

2.1 유도탄의 발사관내 운동

본 논문에서 사용된 경사형 발사대는 그림 1과 같

이 유도탄이 장입된 발사관을 외부 구조물에 의해 일정고각으로 고정한다.

발사관내 유도탄은 그림 2와 같이 길이방향으로 3곳이 탄지지대로 지지되어 있으며, 원주방향으로는 전방 4개, 중간과 후방에 각각 2개로 지지되어 있다.

유도탄 발사후 탄지지대는 발사관내에서 유도탄과 함께 이동하다가 발사관 이탈 후 탄지지대에 조립된 스프링의 압축력에 의해 유도탄과 간섭없이 분리된다.

발사관 방식에서 유도탄의 발사단계는 그림 3과 같이 발사관을 이동하면서 발생하는 탄지지대 지지단계에 따라 4단계로 구분할 수 있다.

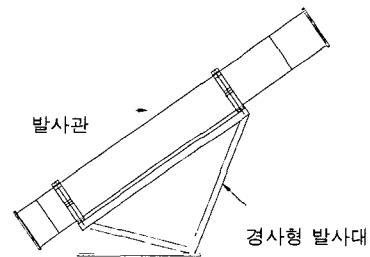


그림 1 발사대 형상

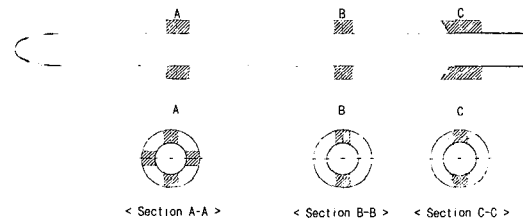


그림 2 유도탄과 발사관의 조립형상

1단계는 그림 3(a)와 같이 유도탄이 전방, 중간, 후방탄지지대에 지지되어 발사관내에서 이동하는 단계로 주로 하부에 위치한 탄지지대에 의해 유도탄이 지지되며 유도탄 무게에 의한 정하중이 작용한다.

2단계는 전방탄지지대 이탈 후 그림 3 (b)와 같이 중간탄지지대(F22)와 후방탄지지대(F32)로 지지되는 단계로 유도탄 굽힘 운동에 의한 동하중이 작용한다.

3단계는 중간탄지지대 이탈 후 그림 3 (c)와 같이 후방탄지지대(F41, F32)로 지지되는 단계로 2 단계에서와 같이 유도탄 굽힘운동에 의한 동하중이 작용한다.

4단계는 후방탄지지대 이탈 후 그림 3 (d)와 같이 유도탄이 추력에 의해 자유비행하는 단계이다.

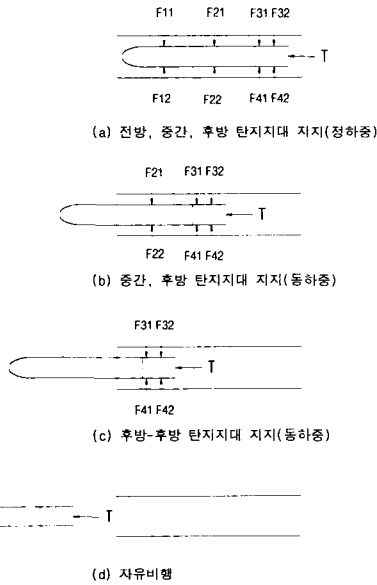
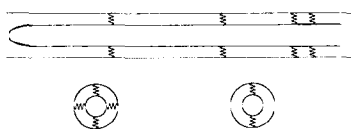


그림 3 유도탄 초기 발사단계

2.2 힘요소 모델링

2.2.1 탄지지대 모델링

탄지지대는 그림 2와 같이 유도탄과 함께 발사관내에 조립되어 있다. 탄지지대의 질량은 유도탄의 질량보다 매우 작으므로 관성력을 무시하고 그림 4와 같이 스프링 요소로 모델링하였다.



<전방탄지지대> <중간, 후방탄지지대>

그림 4 탄지지대 모델링

탄지지대 이탈을 위한 스프링의 초기 압축길이는 25mm이며, 후방탄지지대의 경우 길이방향으로의 길이가 길기 때문에 길이방향으로 2개의 스프링을 사용하여 모델링하였다. 탄지지대에 작용하는 반력은 식 (1)과 같다.

$$F_{sabat} = \begin{cases} K_{sabat} \cdot \Delta + K_{spring} \cdot (25 + \Delta) & : \text{탄지지대} - \text{발사관 내} \\ 0 & : \text{탄지지대} - \text{발사관 이탈} \end{cases} \quad (1)$$

K_{sabat} : 탄지지대 강성
 K_{spring} : 탄지지대 spring 계수
 Δ : 탄지지대 압축량

2.2.2 추력 모델링

유도탄의 추력은 추진제의 연소에 의해 얻어지며 본 논문에서는 추력은 그림 5와 같이 유도탄의 평균 가속도가 10 g가 되도록 가정하여 사용하였다.

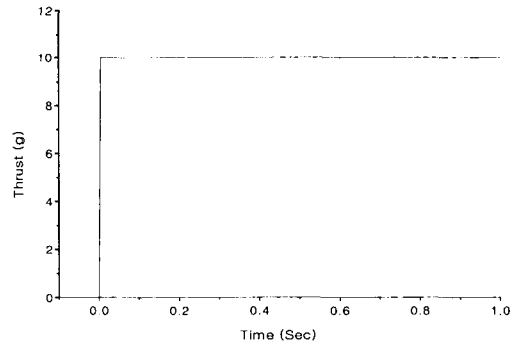


그림 5 유도탄 추력 모델링

2.2.3 마찰력 모델링

발사관과 탄지지대 사이의 마찰력은 일반적인 마찰계수를 사용하여 식 (2)와 같이 모델링하였다.

$$F_{friction} = \mu \cdot F_s \quad (2)$$

여기서 μ 는 0.3으로 가정하였고 F_s 는 탄지지대의 수직반력을 나타낸다.

3. 유도탄의 유한요소 모델

유도탄 발사와 같은 대변위문제의 동력학적 거동해석에서는 유도탄 전체를 한 개의 강체로 가정하여 해석하는 방법이 주로 사용되어져 왔으나 본 논문의 발사방식과 같이 발사시 매우 큰 굽힘하중을 받는 경우에는 유도탄의 유연성(flexibility)이 해에 미치는 영향이 매우 크다.

ADAMS에서 구조물의 유연성을 고려하는 방법으로는 유한요소 모델로부터 여러개로 나누어진 집중질량체로 가정하여 강성행렬과 감쇄행렬을 구하는 discrete method와 유한요소 모델의 고유치 해석을 통해 얻어진 고유벡터(eigen vector)를 이용하는 Modal Flexibility Method가 사용되고 있으며 본 연구에서는 Discrete Method를 이용하였다⁶⁾.

3.1 유도탄 집중질량 요소 변환

MSC/NASTRAN의 보 요소를 사용하여 기체강성을

모형화하고 각종 탑재 장비를 비구조 질량으로 모형화하여 유도탄의 질량특성과 강성특성을 나타낸 후 Superelement 기법을 이용하여 5개의 집중질량체와 각 질량체를 연결하는 강성행렬을 구하였다⁶⁾. 표 1은 강성행렬을 나타낸 것이다. 집중질량 모델로 변환된 ADAMS 모델의 검증에 위하여 부스터 부분이 고정된 경계조건에 대하여 고유치 해석을 수행하였고 유한요소 모델의 고유치 해석 결과와 비교하였으며 그결과는 표 2와 같다.

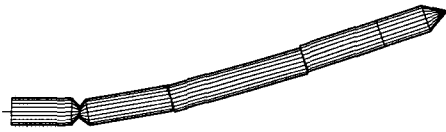
Fig. 6~Fig. 8은 유도탄의 모드형상을 나타낸다.

[표 2] 고유치 해석결과 비교

모드 번호	고유진동수 (Hz)		비 고
	FEA 모델	ADAMS 모델	
1	3.528	3.528	1차 굽힘 모드
2	22.026	22.026	2차 굽힘 모드
3	53.475	53.475	3차 굽힘 모드
4	81.516	81.514	4차 굽힘 모드

[표 1] 유도탄 강성 행렬

요소 1과 요소 2의 연결 강성				요소 2와 요소 3의 연결강성			
행렬요소	강성(N/mm)	행렬요소	강성(N/mm)	행렬요소	강성(N/mm)	행렬요소	강성(N/mm)
K ₁₁	0.90661D+06	K ₂₂	0.37264D+05	K ₁₁	0.13150D+07	K ₂₂	0.10144D+05
K ₆₂	0.13769D+08	K ₃₃	0.37264D+05	K ₆₂	0.69990D+07	K ₃₃	0.10144D+05
K ₅₃	-0.13769D+08	K ₄₄	0.33205D+10	K ₅₃	-0.69990D+07	K ₄₄	0.17782D+10
K ₃₅	-0.13769D+08	K ₅₅	0.94482D+10	K ₃₅	-0.69990D+07	K ₅₅	0.71645D+10
K ₂₆	0.13769D+08	K ₆₆	0.94482D+10	K ₂₆	0.69990D+07	K ₆₆	0.71645D+10
요소 3과 요소 4의 연결 강성				요소 4와 요소 5의 연결 강성			
행렬요소	강성(N/mm)	행렬요소	강성(N/mm)	행렬요소	강성(N/mm)	행렬요소	강성(N/mm)
K ₁₁	0.11151D+07	K ₂₂	0.14589D+05	K ₁₁	0.11163D+07	K ₂₂	0.16634D+05
K ₆₂	0.86003D+07	K ₃₃	0.14589D+05	K ₆₂	0.92404D+07	K ₃₃	0.16634D+05
K ₅₃	-0.86003D+07	K ₄₄	0.20813D+10	K ₅₃	-0.92404D+07	K ₄₄	0.22087D+10
K ₃₅	-0.86003D+07	K ₅₅	0.78031D+10	K ₃₅	-0.92404D+07	K ₅₅	0.80336D+10
K ₂₆	0.86003D+07	K ₆₆	0.78031D+10	K ₂₆	0.92404D+07	K ₆₆	0.80336D+10



(그림 6) 유도탄 1차 모드 (3.528Hz)



(그림 7) 유도탄 2차 모드 (22.03Hz)



(그림 8) 유도탄 3차 모드 (53.47Hz)

4. 해석 결과 및 고찰

유도탄, 탄지지대, 발사관의 진직도, 가공오차, 조립공차 등의 요인으로 인하여 유도탄과 탄지지대 사이에 간극이 존재하며, 이러한 간극은 유도탄의 운동 및 탄지지대 반력에 영향을 준다. 특히 후방탄지지대의 간극은 전방탄지지대 이탈 후 중간탄지지대와 후방탄지지대에 작용하는 동하중에 많은 영향을 미친다. 본 연구에서는 유도탄과 탄지지대 사이의 간극이 탄지지대 반력에 미치는 영향을 알아보기 위하여 표 3과 같이 전방, 중간탄지지대의 간극을 표준간극(nominal gap)으로 하고 후방탄지지대 간극을 변화시키며 해석을 수행하였다.

[표 3] 유도탄과 탄지지대 사이의 간극

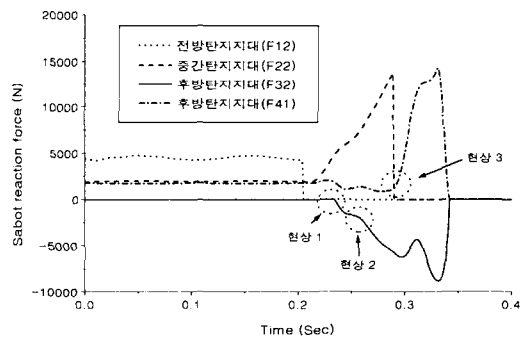
간극 조건	전방 탄지지대	중간 탄지지대	후방 탄지지대	탄지지대 강성
간극 1	0.2mm	1.8mm	0.2mm	5000 N/mm
간극 2	0.2mm	1.8mm	0.8mm	
간극 3	0.2mm	1.8mm	1.3mm	

또한 탄지지대 강성이 탄지지대 반력에 미치는 영향을 알아보기 위하여 탄지지대 강성을 변화시키며 해석을 수행하였다.

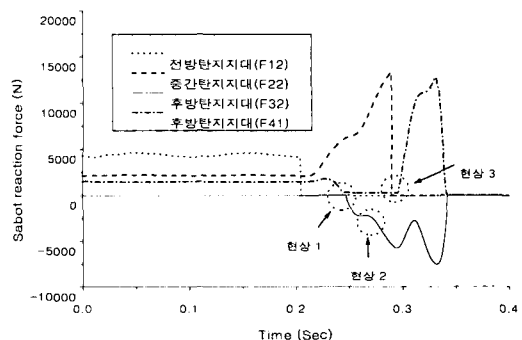
4.1 탄지지대 간극에 따른 탄지지대 반력

그림 9~11은 후방탄지지대 간극에 따른 탄지지대 반력을 나타낸다.

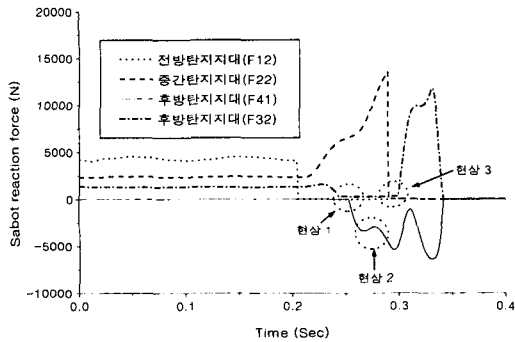
후방탄지지대의 간극이 커질수록 전방탄지지대 이탈 후 중간탄지지대를 중심으로 유도탄의 강제회전 시간이 길어지므로 현상 1과 같이 후방탄지지대(F32)에 의해 지지되어질 때까지의 시간이 길어지며, 강제회전 시간이 길수록 후방탄지지대(F32)에 지지되는 순간 각속도가 크다. 따라서 현상 2와 같이 초기 반력 기울기가 커지고 지지 충격으로 인한 유도탄의 상하 흔들림으로 인하여 반력변화가 커진다.



(그림 9) 탄지지대 반력 (간극 1)

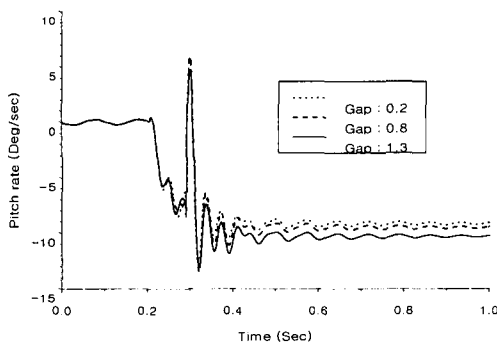


(그림 10) 탄지지대 반력 (간극 2)



[그림 11] 탄지지대 반력 (간극 3)

중간탄지지대(F22)와 후방탄지지대(F32)로 지지된 후 유도탄 굽힘운동이 발생하며, 굽힘운동 초기에 중간탄지지대가 이탈한다. 중간탄지지대 이탈 후 후방탄지지대의 간극으로 인하여 유도탄이 후방탄지지대(F41)에 의해 지지될 때까지 시간차가 발생하며, 이것은 현상 3과 같이 간극이 클수록 시간차가 커진다. 후방탄지지대(F41)와 후방탄지지대(F32)로 지지 후 유도탄의 굽힘운동이 다시 시작되며 굽힘 운동에 의한 반력이 점차 증가하다가 후방탄지지대가 이탈한다. 간극이 클수록 전방탄지지대 이탈 후 유도탄의 굽힘운동의 시작이 지연되고(현상 3) 굽힘운동 시작 후 후방탄지지대의 이탈까지의 시간이 짧아지므로 후방탄지지대 반력(F32, F41)이 작아진다.



[그림 12] 유도탄 피치 각속도 (탄지지대 강성 5000 N/mm)

그림 12는 유도탄의 4번째 강체의 피치 각속도를 나타낸다. 간극이 클수록 유도탄의 굽힘운동을 충분히 지지하지 못하고 이탈하기 때문에 피치 각속도가 증가한다. 표 4는 간극에 따른 반력 및 피치 각속도를 나타낸 것이다.

[표 4] 탄지지대 반력 및 피치각속도

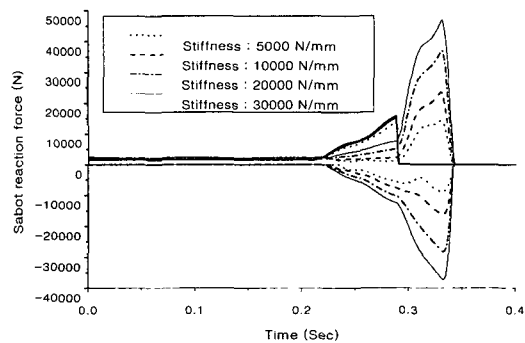
구분	반 력 (N)			피치각속도 (Deg/sec)
	F22	F32	F41	
간극 1	13767	8801	14320	-9.09
간극 2	13386	7512	12799	-9.54
간극 3	13633	6411	11806	-10.29

4.2 탄지지대 강성에 따른 탄지지대 반력

탄지지대 간극을 표준간극인 전방 0.2mm, 중앙 1.8mm, 후방 0.2mm로 탄지지대 강성을 5000, 10000, 20000, 30000 N/mm로 변화시켜 해석을 수행하여 반력 변화 및 유도탄 운동을 살펴보았다.

그림 13은 탄지지대 강성에 따른 탄지지대 반력을 나타낸 것이다.

초기 정하중에 의해 발생하는 간극이 탄지지대의 강성이 클수록 작아지므로 전방탄지지대 이탈 후 후방탄지지대(F32)에 지지되는 시간은 강성이 클수록



[그림 13] 탄지지대 강성에 따른 탄지지대 반력 변화

짧아지며, 중간탄지지대(F22)와 후방탄지지대(F32)로 지지되는 과정에서 후방탄지지대(F41)의 반력이 증가한다. 탄지지대의 강성이 클수록 중간탄지지대 이탈 후 후방탄지지대의 반력이 증가하며 이것은 탄지지대의 강성이 클수록 후방 후방 지지조건에서의 유도탄 굽힘운동 주기가 빨라지므로 중간탄지지대 이탈 후 후방탄지지대 이탈까지의 같은 시간동안 반력이 더 증가하기 때문이다.

그림 14는 탄지지대 강성에 따른 유도탄 4번째 강체의 피치 각속도를 나타낸 것이다. 강성이 클수록 후방탄지지대의 반력증가로 인하여 유도탄의 굽힘운동이 충분히 지지되고 이탈하므로 피치 각속도는 작아진다. 표 5는 탄지지대 강성에 따른 탄지지대 반력 및 피치 각속도를 나타낸 것이다.

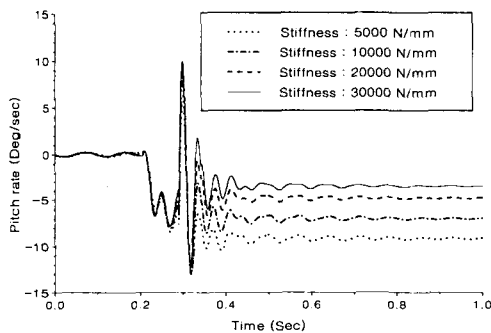


그림 14 탄지지대 강성에 따른 피치각속도 변화

(표 5) 탄지지대 반력 및 피치각속도

구분	반력 (N)			피치각속도 (Deg/sec)
	F22	F32	F41	
5000	13767	8801	14320	-9.13
10000	15680	16156	23554	-6.90
20000	15712	28161	37031	-4.81
30000	15793	37266	46975	-3.49

5. 결 론

본 연구를 통하여 발사관내에서 경사형으로 발사하는

탄지지대 발사방식에 대하여 동역학 해석을 수행하였다. 특히 발사관내 이동중 큰 굽힘하중을 받는 유도탄의 유연성을 고려하기 위하여 유도탄 FEA 모델로부터 5개의 집중질량과 집중질량을 연결하는 강성행렬을 구하였다.

구성된 동역학 모델을 이용하여 유도탄과 탄지지대 사이의 간극과 탄지지대 강성에 따른 탄지지대 반력과 유도탄 운동을 시뮬레이션 하였다. 해석결과 탄지지대 간극이 클수록 후방탄지지대에 동하중이 작게 작용하고 발사관 이탈 후 피치 각속도는 커짐을 알 수 있었다. 탄지지대 강성이 클수록 유도탄의 굽힘운동 주기의 상승으로 인하여 후방탄지지대에 큰 하중이 작용하며 발사관 이탈 후 피치 각속도는 작아진다.

유도탄 운동 및 탄지지대 반력은 유도탄의 고유진동수, 탄지지대 간극, 탄지지대 강성, 탄지지대 사이의 거리에 의해 결정됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. S.S, CHIN, "Missile configuration Design", McGRAW-HILL Book Company, Inc, 1961.
2. 이종원의, "다연장 로켓 발사대의 동력학적 모델 개발 및 동특성해석에 관한 연구", 한국과학기술원, 육군사관학교, 1984, 5.
3. 유완석외, "발사대 CAE 시스템 개발에 관한 연구", 부산대학교, 1992.
4. 임범수외, "발사관에서 발사되는 유도탄의 초기 거동 해석", 3차 유도무기 학술대회 논문집, 1993, 9.
5. ADAMS (Automated Dynamic Analysis and Mechanical system) User's Manual, Mechanical Dynamics Inc.,USA, 1998.
6. MSC/NASTRAN User's Manual, MacNeal-Schwendler Corporation, USA, 1994.