

유한요소법을 이용한 발사역학 해석

Analysis of Launching Dynamics Using Finite Element Method

이 학 렬* **송 오 섭****
 Lee, Hak-Yeol Song, Oh-Seop

ABSTRACT

During the launching phase, a launcher is vibrated by launching forces and as a result, the vibrating launcher affects the behavior of the missile. One of the important performances of the launcher is that the launched missile should be in a stable condition at the launching stage. In this paper, the launcher vibration at the launching phase is investigated in order to secure the stable flight of the missile. Using the finite element method, launching dynamics is investigated to analyze the behaviors of the launcher and missile considering the effect of the launcher vibration. In addition, performance of consecutive launching and launching dynamics of the launcher which launches missiles consecutively are studied for the various conditions after first launch.

주요기술용어(주제어) : Launching Force(발사하중), Launching Dynamics(발사역학), Consecutive Launch(연속발사)

1. 머리말

발사관 압력을 이용하여 유도탄을 발사대에서 이탈시키고 공중에서 유도탄의 주 모터를 점화하는 발사 방식은 유도탄 추력만을 이용한 발사방식보다 발사하중이 큰 편이다. 본 연구 대상 발사대는 발사하중이 크고 발사하중을 발사대 구조에서 지지하는 형식이다^[1,2]. 본 발사대와 같이 발사하중을 발사대가 지지하는 경우에는 발사하중에 의해 발사안정성이 영향을 받을 수 있다. 유도탄이 발사대를 이탈할 때 안정적인 자세를 갖도록 하는 것은 발사대의 주요 성능 중의 하

나이므로 발사대 구조의 거동을 고려한 발사역학 해석을 통한 분석이 필요하다. 유도탄이 발사대를 이탈 시 발사거동을 해석하는 발사역학 해석은 지금까지는 다물체 동역학 해석 기법을 이용하여 해석해 왔으나^[3], 복잡한 구조의 발사대 거동을 고려하여 해석하는 데는 한계가 있다.

최근에 유한요소해석 프로그램의 인터페이스 모델링 기능이 향상되면서 유한요소법을 이용한 발사역학 해석이 시도되었으며 그 가능성이 확인되었다^[4]. 특히 발사하중을 발사대 구조에서 지지하는 경우에 연속발사 성능을 예측하기 위하여 발사대 구조의 흔들림을 고려한 해석이 필수적이다.

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 발사하중을 받는 발사대에 대한 발사역학 해석을 수행하였고, 발사대의 흔들림, 유도탄 거동, 책 반력 등의 발사성능을 분석하였다. 또한 초탄 발사 후 다양한 발사대 혼

† 2008년 3월 24일 접수~2008년 5월 2일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

** 충남대학교 기계공학과

주저자 이메일 : lhy7168@add.re.kr

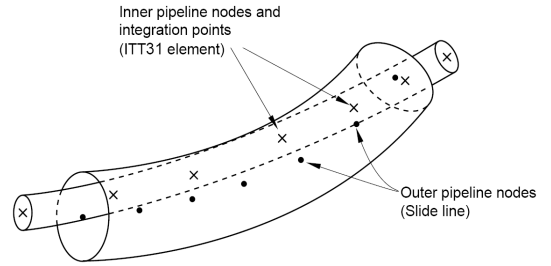
들림 조건에 대한 연속발사 해석을 수행하여 연속발사 거동을 분석하였다.

2. 유한요소모델

발사대는 기본 베이스 구조 역할을 하는 하부프레임, 유도탄을 탑재하고 발사 시에 발사각으로 구동되는 상부프레임과 상부/하부 프레임을 연결하는 링크구조, 상부프레임을 발사각으로 구동하는 고각구동기, 발사 시 발사대를 지지하는 잭 등으로 구성되며, 유압장치에 유압을 공급하는 유압동력장치, 발전기, 전원분배기, 발사대제어기 등의 전기장치가 발사대 하부프레임에 장착되어 있다. 유도탄은 원통형의 발사관 내에 장착되어 있고 유도탄의 후미와 전방부에 발사관에 고정된다.

발사대 구조는 형강과 강관 등으로 구성되고 유한요소모델은 보 요소와 쉘 요소를 이용하여 모델링하였고, 발사대에 탑재되는 장비는 집중질량으로 모델링하여 무게효과를 반영하였다. 링크구조, 고각구동기, 발사대 잭 등은 빔 요소로 모델링하고, 연결점에서 두 요소의 변위는 구속하고 회전은 자유 상태로 하여 실제 연결 상태를 모사하였다. 그리고 발사자세 시 상부프레임을 고정하는 잠금 부위는 강성이 큰 보요소로 연결하였다. 발사 시 발사하중을 효과적으로 지지하기 위하여 발사관 후방을 발사대 구조와 밀착시키게 되는 데, 이는 겹 요소를 이용하여 모델링하였다.

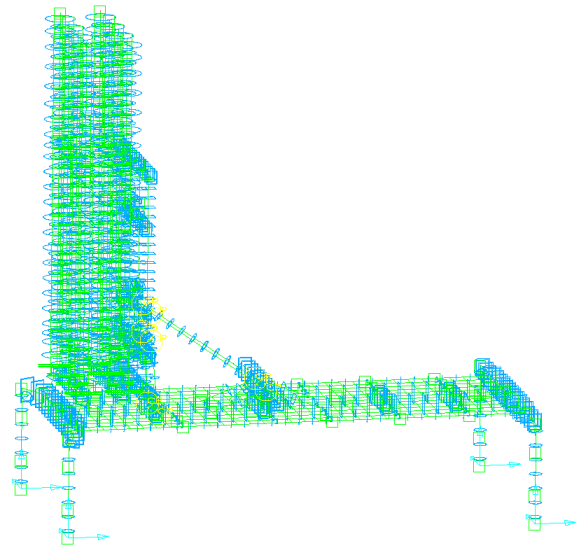
발사관과 유도탄은 원통형 보요소로 모델링하였다. 발사관은 집중질량을 이용하여 무게 및 무게중심을 실제와 동일하게 하였고, 유도탄은 유도탄의 3차 고유모드까지 일치시키고 무게 및 무게중심이 실제와 같도록 모델링하여 유도탄의 운동을 나타낼 수 있도록 하였다. 유도탄 발사 시 유도탄은 유도탄과 발사관의 인터페이스 부품에 의해 전방부와 후미에서 발사관의 내면에 안내되면서 이탈된다. 발사관과 유도탄의 연결은 강성이 큰 보 요소로 연결하였다. 발사 시 유도탄이 발사관에서 이탈되는 과정은 그림 1과 같이 ABAQUS/Standard에서 제공하는 관대관 접촉요소 (tube to tube contact element)를 이용하였다^[5].



3-D external tube contact

[그림 1] 관대관 접촉요소

그림 1의 관대관 접촉요소에서 발사관은 외측 관으로, 유도탄의 후미 및 전방의 가이드 부는 각각 내측 관으로 모델링하였다. 이상의 발사대 유한요소모델 형상은 그림 2와 같고, 잭 지지 점은 볼 조인트로 구속하였다. 유한요소모델에서 발사대 길이방향이 x 좌표, 횡 방향이 y 좌표, 높이 방향이 z 좌표이다.



[그림 2] 발사대 유한요소 모델

3. 발사역학 해석

발사역학 해석은 중력효과를 고려하기 위하여 자중에 대한 정적해석을 수행한 후 발사역학 해석을 수행하였다. 0.1초 동안 정적평형을 구한 후 발사관과 유

도탄을 연결한 요소를 제거하고 유도탄과 발사관에 각각 발사하중을 가하는 순서로 해석을 수행하였다. 유도탄은 발사관 하부의 압력발생장치에 의해 압력이 생성되면 압력판이 유도탄을 밀어서 이동시키고, 압력판은 발사관 끝단의 제동기에 의해 멈춰진다. 해석에 사용된 하중 조건은 발사 시 작용하는 하중과 제동력을 그림 3과 같이 가정하여 사용하였다. 발사역학 해석은 발사대의 흔들림이 가장 많을 것으로 추정되는 위치에서 유도탄을 발사하는 경우에 대하여 수행하였고, 이는 바깥에 위치한 유도탄을 발사하는 경우이다. 유도탄이 발사대를 이탈할 때의 각속도는 유도탄의 회전 초기조건이 되므로 유도탄의 자세를 결정하는

[표 1] 발사대 이탈 시 유도탄 각속도

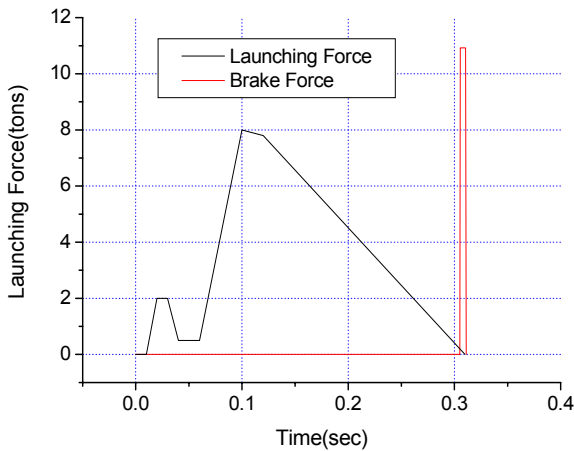
구분	각속도(deg/sec)
요 각속도	2.6~3.8
피치 각속도	1.3~2.6

주요한 요소이다. 유도탄 발사 시 유도탄의 각변위를 그림 4에 나타내었고, 각변위의 기울기가 각속도이며 이를 표 1에 나타내었다.

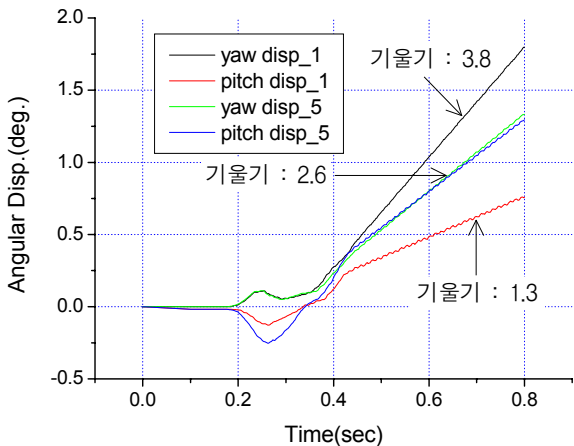
수직발사이므로 발사대가 강제이면 각속도는 거의 발생되지 않아야 하지만, 발사하중에 의해 발사대의 흔들림이 발생하고 이로 인해 유도탄의 각속도가 발생하는 것으로 판단된다. 이는 그림 4에서 발사하중이 가해지는 시점에서 유도탄의 각변위가 생성되는 것으로부터 유추할 수 있다. 발사 시 유도탄의 요 및 피치 각속도는 각각 2.6~3.8deg/sec, 1.3~2.6deg/sec이다. 각속도는 발사관을 이탈하는 순간의 각속도이고 발사대의 흔들림 양상에 따라 달라질 수 있으므로 절대적인 수치보다는 경향을 파악하는 자료로 활용되어야 할 것이다.

발사하중에 의한 발사대의 흔들림은 발사관 끝단에서 최대가 된다. 유도탄 발사 시 전후/좌우 방향 변위를 그림 5에 나타내었으며 이를 표 2에 나타내었다.

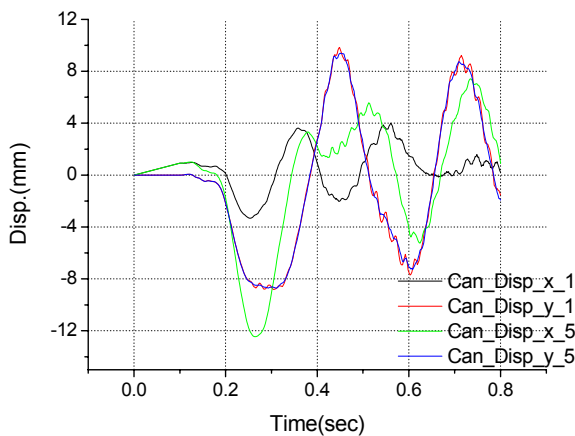
전후 방향의 변위는 자중에 의한 처짐으로 인해 1mm 전방 변형이 발생한다. 발사 시 발사하중에 의한 변위는 -13.2mm~-4.5mm이며, 후방변위가 발생



[그림 3] 해석에 사용된 발사하중



[그림 4] 발사대 이탈 시 유도탄 각변위



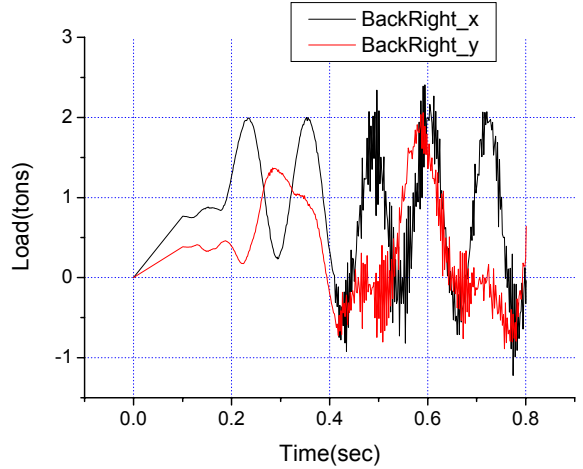
[그림 5] 발사관 끝단 변위

[표 2] 발사관 끝단 변위

구분	정적변위 (mm)	발사하중에 의한 변위 (mm)
전후방향	1	-13.2~-4.5
좌우방향	-	8.5

되는 원인은 발사위치가 발사대 후방에 위치하여 발사하중에 의한 변형이 하부프레임의 전체적인 굽힘보다는 후방부의 변형으로 발생하기 때문이다. 좌우 방향의 변위는 8.5mm로 거의 동일하다. 이는 유도탄 발사 위치에서 발사대의 횡 방향에 대한 강성이 거의 같기 때문인 것으로 판단된다.

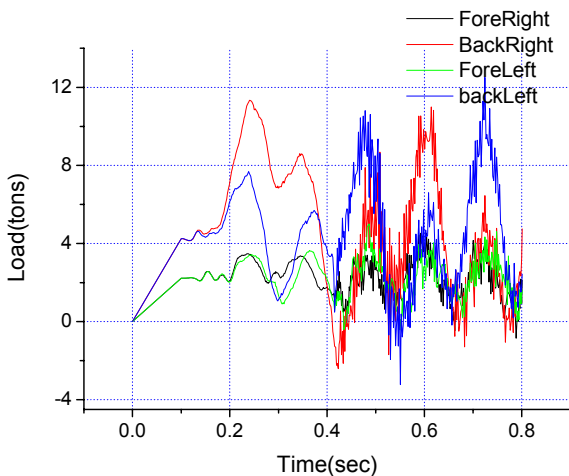
발사하중 작용 시 발사대를 지지하는 잭의 반력은 바깥쪽 유도탄 발사 시 각 각의 경우가 유사했으며, 잭의 수직방향 및 횡방향 반력을 그림 6, 7에 나타내었고 각 단계의 최대 하중을 표 3에 요약하였다. 정하중이 작용할 경우 잭의 수직반력의 합은 발사대 무게와 같고, 발사하중에 의한 잭의 수직반력은 유도탄 발사 위치에 근접한 후방우 잭에서 약 7톤 정도 추가되고 후방좌 잭에서 약 3.3톤의 하중이 추가된다. 전체 잭의 수직하중 증가량이 최대 발사하중인 8톤보다 크게 나타나는데 이는 발사하중이 동적으로 가해지기 때문인 것으로 판단된다. 그림 4와 0.1초부터 발사하중이 가해진 점을 감안하면 발사하중은 0.2초 부근에



[그림 7] 잭의 횡방향 반력

[표 3] 잭의 반력

구분		정적(ton)	발사하중(ton)
수직	우후방	4.3	11.3
	좌후방	4.3	7.6
	우전방	2.2	3.4
	좌전방	2.2	3.4
전후	우후방	0.76	2.0
좌우	좌후방	0.38	1.4



[그림 6] 잭의 수직반력

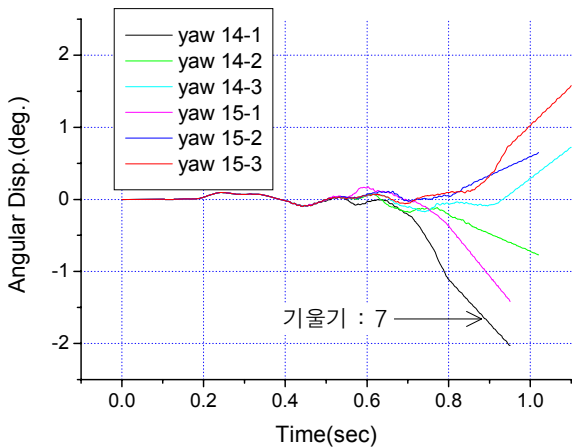
서 최대로 작용하고 서서히 감소하는 양상인데, 잭의 반력은 0.2초 이후에 계속적으로 증가하는 모양에서 유추할 수 있다. 그림 6에서 잭의 수직 반력이 음의 값을 가지는 경우가 있는데 이는 잭을 볼 조인트로 구속하였기 때문에 발생하는 것으로 실제로는 잭이 지면에서 떨어지는 것으로 볼 수 있다. 그림 6에서 잭의 수직반력이 음의 값을 가지는 시점에 그림 7의 잭의 횡방향 반력이 존재하므로 실제 발사시험에서는 발사하중에 의한 발사대의 진동에 의해 발사대가 횡 방향으로 움직일 가능성이 있는 것으로 판단된다.

4. 연속발사 발사역학 해석

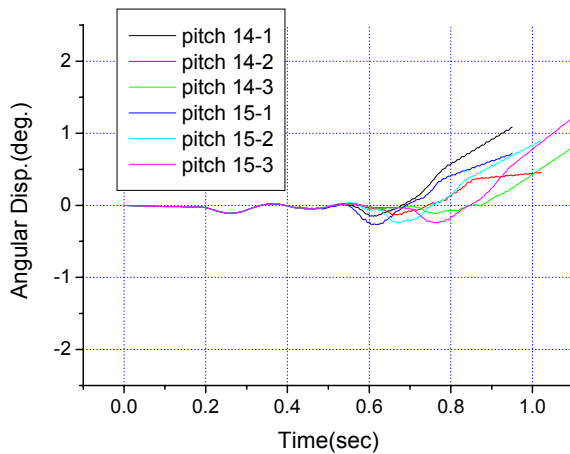
연속발사 발사역학 해석은 초탄 발사 후 발사대가

흔들리는 상태에서 후탄을 발사하는 경우에 대한 해석이다. 초탄 발사 후 후탄의 발사시점을 발사대의 흔들림의 조건에 따라 설정하고 이 조건에 대한 해석이 필요하다. 연속발사 해석조건은 바깥쪽 유도탄을 발사하고 반대편 및 동일 측면의 유도탄을 후탄으로 발사하는 경우로 설정하였다. 후탄의 발사시점은 그림 5에서 이탈이 완료된 후 발사관의 횡방향 변위가 최대, 최소 및 0인 시점으로 하였고 이때의 후탄 발사 시점은 0.45초, 0.52초 및 0.6초이다. 그림의 인덱스에서 14는 반대 방향, 15는 같은 방향 연속발사를 나타내고, “-”이후의 숫자는 발사시점을 차례로 나타낸 것이다. 서로 반대편의 유도탄 및 동일 측면의 유도탄을 연속발사 시 후탄의 요방향 및 피치방향의 각변위를 각각 그림 8, 9에 나타내었다. 요방향의 각변위는 발사시점에 따라 크기와 방향이 바뀌는 양상을 보이는 반면에 피치방향의 각변위는 동일한 방향을 나타내고 각속도의 최대 크기는 7deg/sec이다. 유도탄 각변위의 방향은 유도탄이 발사대를 이탈하는 시점의 각속도에 의해 결정되고 발사대의 흔들림이 계속되기 때문에 정량적인 수치보다는 정성적인 특징으로 이해하는 것이 타당할 것으로 생각된다. 따라서 후탄의 각속도는 발사시점에 따라 다양하게 변할 수 있고 최대 약 7deg/sec 이상이 될 가능성도 있다.

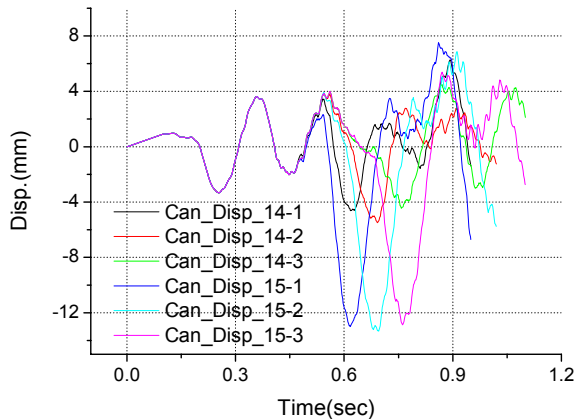
연속발사에서 발사관의 변위는 그림 10, 11과 같다. 종방향 변위는 유도탄 발사 후 반대편의 유도탄을 발사하는 경우에 진폭의 변화가 작으나, 동일 측면의 유



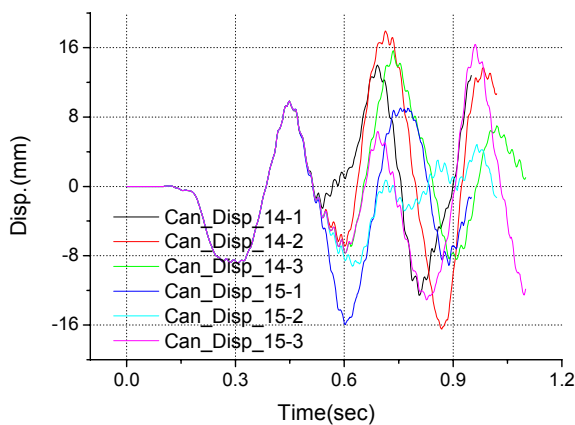
[그림 8] 연속발사 시 요방향 각변위



[그림 9] 연속발사 시 피치방향 각변위



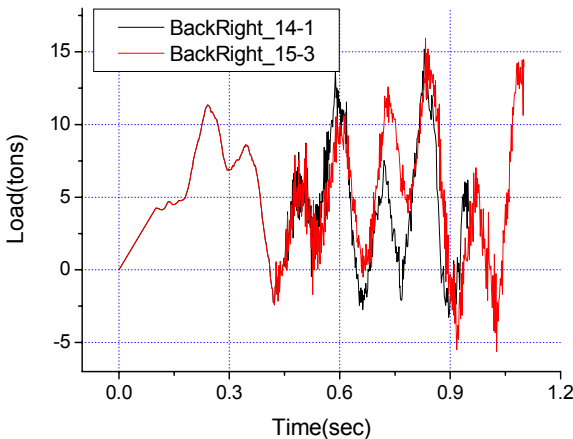
[그림 10] 연속발사 시 발사관 종방향 변위



[그림 11] 연속발사 시 발사관의 횡방향 변위

도탄을 발사하는 경우에는 진폭의 변화가 크다. 후탄으로 동일측면의 유도탄을 발사한 경우의 변위가 그림 5의 발사역학 해석결과에서 후탄 발사 시의 변위 크기와 유사하다. 횡방향 변위는 후탄이 발사된 후 최대 진폭이 약 50% 정도 증가하는 양상을 보이고 후탄에 따른 변화도 작게 나타난다. 이는 후탄의 위치가 바깥에 위치하여 초탄과 유사한 횡방향 변위를 발생시킬 수 있는 위치이기 때문인 것으로 판단된다. 이상의 결과로부터 연속발사 위치에 따라 각 방향의 변화량이 다르게 나타남을 알 수 있다.

연속발사 시 발사대 잭 반력의 변화는 그림 12와 같다. 그림 6의 발사역학 해석결과와 비교하면, 반력의 진폭이 증가함을 알 수 있고 반력이 음의 값을 가지는 크기가 크므로 발사대의 횡방향으로 움직일 가능성이 증가할 것으로 판단된다.



[그림 12] 연속발사 시 잭의 수직반력

5. 맺음말

유한요소법을 이용한 발사대의 발사역학 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 발사하중에 의한 발사대의 흔들림을 고려한 발사

역학 특성을 파악하기 위하여 유한요소법을 이용하여 발사역학 해석을 수행하여 발사특성을 파악할 수 있었다.

- 발사대에 가해지는 발사하중으로 인한 발사대 구조의 변형에 의해 유도탄의 이탈 각속도가 어느 정도 발생함을 알 수 있었다.
- 발사하중에 의해 발사관 끝단 변위를 예측하고 발사위치에 따라 발사대 흔들림 양상이 다름을 확인하였다.
- 발사대의 진동에 의해 발사대가 횡 방향으로 움직일 가능성이 있음을 알 수 있었다.
- 연속발사에서 유도탄의 이탈각속도는 발사대의 흔들림 조건에 따라 다양하게 변할 수 있고, 발사관 변위의 변화는 연속발사 위치에 따라 다르게 나타난다.
- 연속발사 시 잭의 반력은 증가하는 양상을 보이고 발사하중에 의한 발사대의 횡방향 움직임이 발생하기 쉬울 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] Lee, H. Y., "A Study on the Preliminary Design of Launcher(II)", ADD Technical Report, MADC-416-010218, 2001.
- [2] Shim, W. J., "Design of Launcher for Exploratory Phase", ADD Technical Report, ADDR-416-070898, 2007.
- [3] Ha, J. H., "An Analysis of Launching Dynamics Using Rigid Body Modeling", ADD Technical Report, MADC-416-020183, 2002.
- [4] Kim, J. C., "An Analysis of Launching Dynamics of Vertical Launcher Using FEM", 12th Conference on the Guided Missile, ADD, pp. 377~380, 2003
- [5] ABAQUS/Standard User's Manual, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.