

1자유도 모델을 사용한 발사반발력 해석에 관한 연구

A Study on the Analysis of the Rebounding Force using the 1-DOF Model

이종주*

Jong-Ju Yi

김좌일*

Chwa-Il Kim

김재호*

Jae-Ho Kim

함일배*

Il-Bae Ham

Abstract

This paper describes about the analysis of firing rebounding force exerted on the launching system supporting structure. The measured high pressure data at the launching tube is used as external force. The maximum firing rebounding force was occurred when the snubber of inner structure contacts the surface of wall in launching tube

Keywords : Firing Rebounding Force(발사반발력), Launching Tube(발사관), 1-DOF Model(1자유도 모델)

1. 서론

수중발사장치는 수중에서 탑재무장을 발사시키는 무장발사체계이다. 수중발사장치의 사출방식은 크게 자영방식과 강제사출방식으로 나눌 수 있다. 자영방식은 탑재 무장의 자체 추진장치에 의한 사출방식으로 스크류 회전에 의한 추진력을 이용하는 어뢰의 경우 자영사출방식에 해당된다. 강제사출방식은 탑재무장 자체의 사출장치 없이 발사관 내에 탑재무장을 사출하기 위한 에너지원이 별도로 존재하며, 사출 에너지원을 사용하여 짧은 시간에 큰 압력을 생성하여 탑재무장을 사출시킨다.

탑재무장은 발사관 사출압력에 의해 일정속도 이상으로 발사관을 이탈하게 된다. 탑재무장을 보호하기 위해 발사관과 연결구조 사이에 완충장치를 설치하였으며, 연결구조 측면에 완충장치의 허용범위이상의 변

형을 구속하기 위한 구속기구를 설치하였다. 연결구조 내부에 탑재무장이 탑재된다.

사출에너지원에 의하여 탑재무장이 발사관을 이탈할 때 발사관 지지구조에 발사반발력이 발생하며, 이에 대한 예측 및 분석이 필요하다.

발사반발력은 발사관의 축방향과 반경방향으로 연성되어 작용하나 충격하중의 피크값을 보이는 초기 거동에서는 축방향 반발력이 지배적이라 예상할 수 있으므로, 본 연구에서는 발사관의 축방향 거동에 따른 발사반발력을 고려하였다. 발사시 생성되는 발사반발력을 예측하기 위하여 발사관의 완충장치 시스템을 1자유도 모델링으로 간략화 하였다. 1자유도 모델을 검증하기 위해서 정적하중에 의한 처짐량에 대한 실험결과 및 해석결과를 상호 비교 및 분석을 하였다.

본 연구는 연결구조, 탑재무장의 자중에 의한 정적하중과 사출압력에 의한 동적하중, 구속기구에 의한 충격을 고려한 발사반발력 예측방안을 제시하고자 한다.

† 2012년 4월 9일 접수~2012년 6월 29일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 이종주(leongreal@add.re.kr)

2. 완충장치 개요

수중발사장치의 완충장치는 연결구조에 연결되어 탑재무장의 하중을 지지한다. 완충장치의 완충기로 상용탄성마운트를 사용하였다. 축방향 마운트는 4개가 설치되어 있으며, 재질은 고무이다. 나머지 24개 완충기는 와이어로프형으로 반경방향 완충 구조를 가지고 있다. Fig. 1은 연결구조에 설치된 축방향 완충기와 반경방향 완충기 배치를 보여주고 있다. 반경방향 완충기는 두가지 종류로 되어 있으며, A 반경방향 마운트는 Fig. 1과 같이 반경방향으로 4개가 설치되며, B 반경방향 마운트는 반경방향으로 4개씩 5열로 총 20개가 설치되어있다.

각 완충기는 5, 7.1, 7.1Hz 범위의 고유진동수를 가지고 있으며, 감쇠상수는 다음과 같은 식을 사용하여 계산하였다.

$$C = 2m\omega_n\zeta = \frac{2K\zeta}{\omega_n}$$

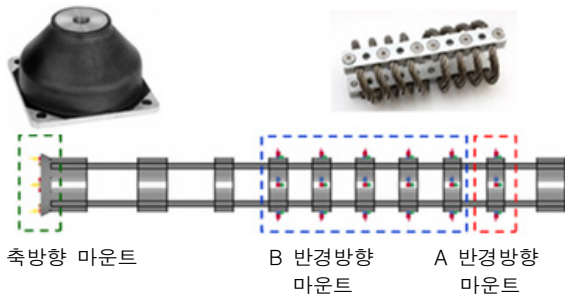


Fig. 1. The mounting system of launching tube

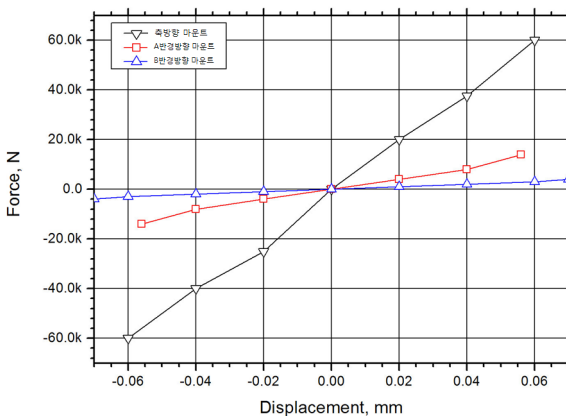


Fig. 2. The characteristic curve of mount

각 마운트에 대한 감쇠특성은 Table 1에 표시하였고 마운트의 힘-변위 특성곡선은 Fig. 2와 같다.

Table 1. The damping of mount(Axial direction)

특성	축방향 마운트	A 반경방향 마운트	B 반경방향 마운트
Stiffness (N/m)	1,000,000	100,000	300,000
Natural Frequency (Hz)	5	7.1	7.1
Damping Ratio	0.07	0.15	0.15
Damping Constant (Ns/m)	4456.3	672.5	2017.5

3. 발사거동 구속기구

완충기의 허용범위 이상의 변형을 방지하기 위하여 고무로 제작된 발사거동 구속기구를 Fig. 3과 같이 연결구조 측면에서 축방향 완충기의 사이에 원주방향으로 4개를 설치하였다. 각 구속기구는 직육면체 형상이다. 구속기구의 힘-변위 특성곡선은 Fig. 4와 같다.

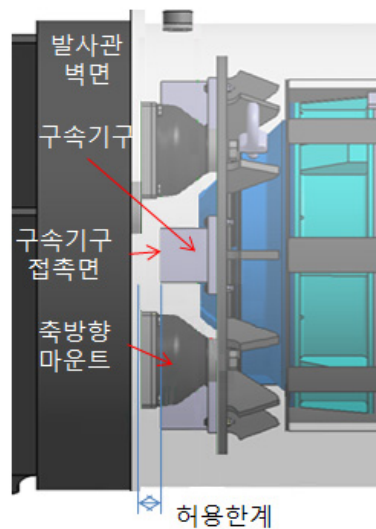


Fig. 3. The figure of launching tube in axial direction

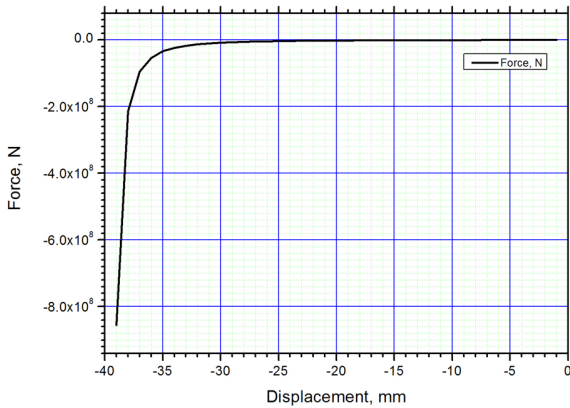


Fig. 4. The characteristic curve of stopper

발사시 구속기구 고무면은 연결구조가 축방향으로 허용한계 이상 이동하면 발사관 벽면과 접촉한다. 이때 구속기구 고무의 변형-하중 특성에 의하여 연결구조의 축방향 거동은 구속되며, 구속기구에 순간적인 접촉하중이 발생하고 이 하중은 연결구조와 구속기구의 접촉이 종료되면 소멸된다.

4. 정적처짐 모델링

발사반발력을 해석하기 앞서서 정적처짐(Static Deflection)에 대한 해석을 진행하였다. 발사관에 존재하는 질량요소는 탑재무장, 연결구조이다. 수중발사장치에서 사출되기 전에는 이 2가지 요소가 정적처짐의 하중으로 작용하기 때문에 단순한 1자유도 운동을 하는 요소로 볼 수 있다. Fig. 5는 정적처짐에 대한 1자유도 모델링이다.

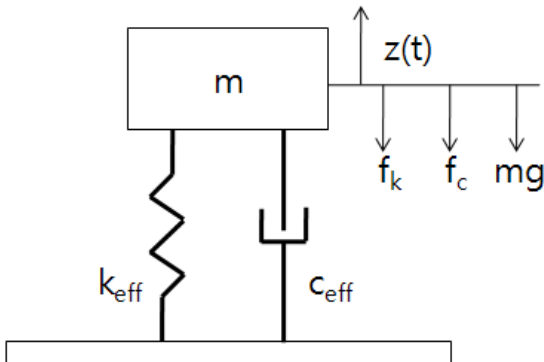


Fig. 5. 1-DOF modeling - static displacement

지배방정식은

$$m\ddot{z} = -f_k - f_c - mg \quad (1)$$

이다. 여기에서, $z(t)$ 는 무하중인 경우를 0으로 하는 좌표계이다. m 은 연결구조, 탑재무장 질량이며, g 는 중력가속도이다. f_k 와 f_c 는 마운트의 강성 및 감쇠력이다. f_k 와 f_c 에 대한 정의는

$$f_k = k_{eff}z$$

$$f_c = c_{eff}\dot{z}$$

이며, k_{eff} 와 c_{eff} 에 대한 정의는 각각

$$k_{eff} = 4k_v + 4k_A + 20k_B$$

$$c_{eff} = 4c_v + 4c_A + 20c_B$$

이다. k 와 c 는 각 마운트의 탄성력과 감쇠력이고 첨자 v 는 수직마운트, A 는 A반경방향 마운트, B 는 B반경방향 마운트를 의미한다. Fig. 6, 7은 식 (1)에 따른 계산 결과이며, 충분한 시간이 지난 후 정적 평형에 도달하여 수렴되는 값을 정적 처짐량으로 무차원화한 결과이다.

연결구조의 질량만을 고려한 경우(Case A)와 연결구조, 탑재무장의 질량을 고려한 경우(Case B)에 대한 정적처짐 해석결과는 Fig. 6, 7과 같다.

Fig. 6에서 정적처짐 무차원화 결과는 -1.0으로 실측한 결과와 거의 차이가 발생하지 않았다. Fig. 7에서

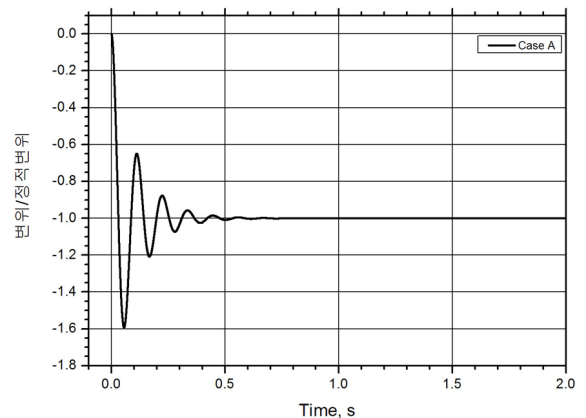


Fig. 6. The results of static displacement - Case A

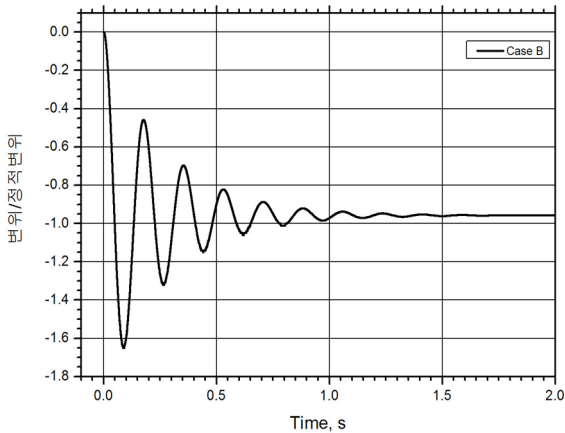


Fig. 7. The results of static displacement - Case B

정적처짐 무차원화 결과는 -0.956으로 실제 측정값에 비해 약 4% 정도 오차를 보이고 있으나 전체적으로 연결구조의 1자유도 모델에 대한 가정이 실제 현상을 잘 모사한다고 판단되었다.

5. 동적하중에 의한 발사반발력 해석

사출압력은 연결구조에 동적하중으로 작용한다. 또한 사출압력에 의하여 연결구조의 변위가 허용한계이상 될 경우, 연결구조에 설치된 구속기구의 접촉면이 발사관 벽면과 충돌하게 되며 이에 따른 발사반발력이 생긴다. 질량으로 작용하는 요소는 정적처짐과 달리 연결구조 질량요소이다. 이는 사출압력으로 인하여 탑재무장이 발사관을 이탈하기 때문이다. 이러한 과정을 정적하중에 의한 1자유도 모델링에 적용하여 구속기구 하면과 발사관 벽면의 충돌 전후로 나누어 Fig. 8, 9와 같이 모델링을 하였다.

각 모델링에 쓰인 기호에 대한 정의는 다음과 같다.

- f_k : 마운트에 의한 강성력
- f_c : 마운트에 의한 감쇠력
- f_{ks} : 구속기구에 의한 강성력
- f_{cs} : 구속기구에 의한 감쇠력
- m : 연결구조 질량
- g : 중력가속도
- P : 사출압력
- A : 사출압력이 작용하는 단면적

f_k : Fig. 2의 특성곡선 따른 탄성력

$$f_c = c_{eff}\dot{z}(t)$$

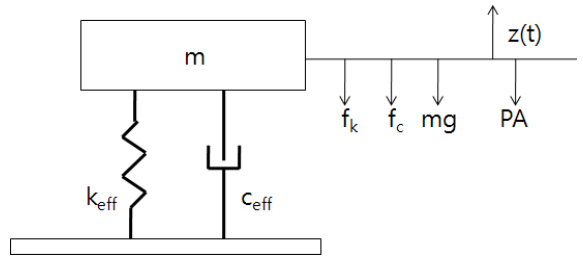


Fig. 8. 1-DOF modeling before collision of stopper

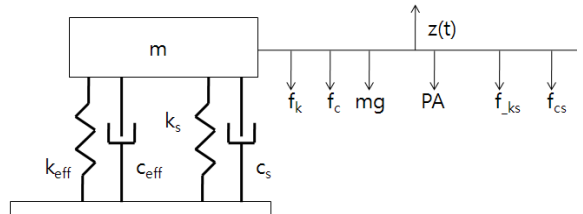


Fig. 9. 1-DOF modeling after collision of stopper

구속기구가 작용할 경우 발생하는 f_{ks} 와 f_{cs} 는 무하중 기준 변위(z)를 고려하여 다음과 같이 표현하였다.

$$f_{ks} = 4k_s(z(t) - (-X_L))$$

$$f_{cs} = 4c_s\dot{z}(t)$$

f_k, f_{ks} 의 k_{eff}, k_s 는 변위에 따라 변화하는 값이기 때문에 f_k 와 f_{ks} 는 변위에 따라 지속적으로 변한다. c_{eff} 와 c_s 는 상수로 각각 39,140Ns/m, 118,483.2Ns/m이다. 사출압력과 사출압력이 작용하는 단면적의 곱을 동적하중으로 작용하게 하였다. 초기 변위 및 속도 값은 각각 정적처짐에서 해석된 값으로 하였다.

지배방정식은 연결구조와 구속기구의 접촉위치 X_L 을 기준으로 구분하였다.

$z > X_L$ 이면

$$m\ddot{z} = -f_k - f_c - mg - PA$$

$z \leq X_L$ 이면

$$m\ddot{z} = -f_k - f_c - mg - PA - f_{ks} - f_{cs}$$

발사반발력(F)도 변위 X_L 을 기준으로 다음과 같이 계산하였다.

$z > X_L$ 이면

$$F = -f_k - f_c$$

$z \leq X_L$ 이면

$$F = -f_k - f_c - f_{ks} - f_{cd}$$

해석결과는 다음과 같다.

Fig. 10, 11, 12, 13은 각 해석결과에서 도출된 최대값을 기준으로 해석결과를 무차원화하였다. 각 그래프에서 절대값이 1.0인 부분이 해석결과 중 최대값을 의미한다.

초기 변위로부터 사출압력에 의한 동적하중에 의한

연결구조 변위가 변하였다. 변위 해석데이터에서 연결구조와 구속기구의 접촉위치 X_L 이상 움직인 구간은 0.0453 ~ 0.0590초, 0.1197 ~ 0.1257초 사이이다. 초기 0.0초부터 0.0453초까지의 변위는 축방향 마운트와 반경방향 마운트에 의한 힘이 발사반발력으로 작용하였다. 0.0453초부터 0.0590초 사이에 구속기구 접촉 후 압착에 의해 발생된 힘은 연결구조 속도, 가속도, 발사반발력에 급격한 변화를 일으켰다. 특히 발사반발력은 1차 충돌에서 급격한 발사반발력 변화를 보이고 있으며, -0.0476초에서 최대값이 나타났다.

두 번째 충돌이 일어난 0.1197 ~ 0.1257초의 변위는 1차 충돌에 비해 구속기구의 압축 변위가 작아서 발사반발력에 크게 기여하지 않은 것으로 판단된다. 발사반발력 해석 결과에서 0.1208초에 결과값이 조금 튀는 경향이 나타나는데 이 시점이 2차 충돌이 일어난

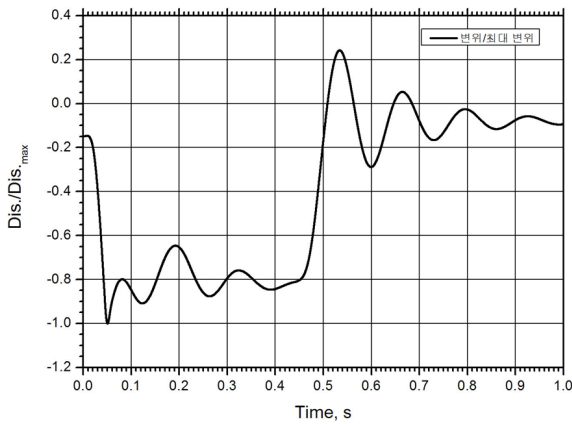


Fig. 10. The analysis result - Displacement

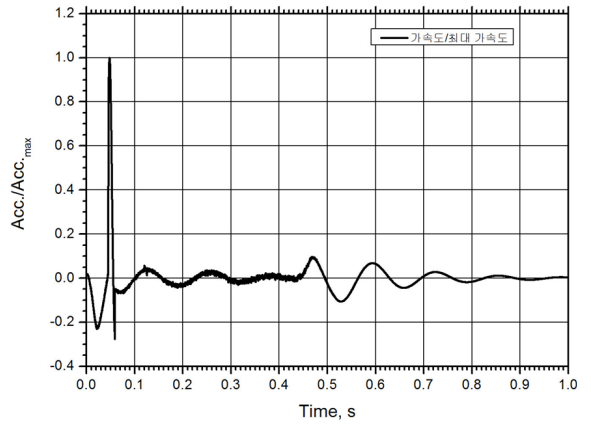


Fig. 12. The analysis result - Acceleration

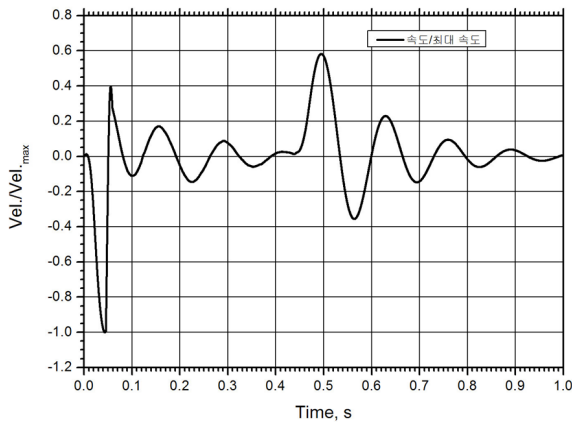


Fig. 11. The analysis result - Velocity

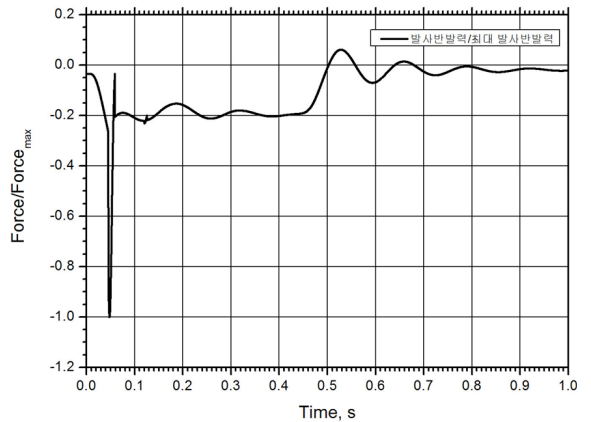


Fig. 13. The analysis result - Rebounding force

시점이다.

탑재무장을 발사하기 위한 사출압력은 시험마다 조금씩 경향과 크기가 달라지므로 발사반발력의 크기와 경향이 조금씩 다를 것으로 예상된다.

6. 결론

탑재무장을 발사할 때 발사반발력 해석 및 분석기법으로 연결구조를 1자유도 모델로 가정하여 발사반발력을 해석하였다.

정적하중인 연결구조의 질량, 동적하중인 사출압력, 일정량 이상 변위가 발생하면 작동되는 구속기구등 발사반발력에 영향을 줄 수 있는 요소들을 고려한 1자유도 모델을 정립하였다. 사출압력은 시험에서 계측

한 데이터를 사용하였다.

발사반발력에 가장 큰 영향을 주는 요소는 구속기구인 것으로 파악되었으며, 발사초기에 구속기구 접촉면과 발사관 벽면의 충돌로 인하여 발사반발력의 최대값이 발생함을 알 수 있다.

References

- [1] 함일배, “수중발사장치 연결구조 사출거동 구속기구 설계보고서”, 국방과학연구소, ADDR-413-091777.
- [2] 황재혁, 정태건, 이진복, 김성원, 기계진동학, 반도출판사, 1995.
- [3] Christian Lalanne, Mechanical Vibration and Shock Analysis 2, WILEY, 2002.