

동적 거동을 이용한 연식주퇴장치의 주퇴력 저감 기법 연구

A Study on the Reduction Technique of Recoil Force for
Soft Recoil System using Dynamic Behavior

유삼현* Sam-Hyeon, Yoo	이재영* Jae-Yeong, Lee	이종우* Jong-Woo, Lee	조성식* Seong-Sik, Jo
김주희* Ju-Hee, Kim	김인수* In-Su, Kim	임수철* Soo-Chul, Lim	

ABSTRACT

The future combat system is likely to be studied and developed in terms of enhancing both firepower and mobility simultaneously. Increased firepower often necessitates a heavier firing system. In return, the body of the vehicle needs to be light-weight in order to improve the mobility of the whole system. For this reason, in the areas of weapons systems such as the tank and self-propelled artillery, a number of studies attempting to develop designs that reduce recoil force against the body of the vehicle are being conducted. The current study proposes a tank construction that has a mass-spring-damper system with two degrees of freedom. A tank structure mounted with a specific soft recoil system that was implemented using a soft recoil technique and another tank structure based on a general recoil technique were compared to each other in order to analyze the recoil forces, the displacements of recoil, and the firing intervals when they were firing. MATLAB-Simulink was used as a simulating tool. In addition, the relationship between the movement of the recoil parts and the positions of the recoil latches in each of the two structures were analyzed. The recoil impact power, recoil displacement, firing interval, and so on were derived as functional formulas based on the position of the recoil latch.

주요기술용어(주제어) : Recoil System(주퇴장치), Recoil Force(주퇴력), Recoil Latch(주퇴걸림쇠)

1. 머리말

미래전투체계(FCS)에서의 기동 무기체계는 화력, 기

동성 및 생존성을 동시에 향상시키는 방향으로 연구 및 개발될 것이다. 그러나 화력 증강시키기 위해서는 주퇴장치와 포탑을 포함하는 무기체계의 무게를 증가시켜야 하고, 이는 무기체계의 체적을 증가시키는 요인이 되어 기동 및 생존성에 좋지 않은 영향을 미치게 된다.

사거리 및 살상반경과 같은 화력향상을 위해 약실

† 2007년 8월 28일 접수~2007년 10월 18일 게재승인

* 육군사관학교(KMA) 무기·기계공학과

주저자 이메일 : samyoo@kma.ac.kr

에서의 보다 높은 압력과 보다 큰 구경의 포신이 요구된다. 이와 같은 이유에서 화력을 증강하기 위해서는 차체가 받는 주퇴력이 커지게 되며, 일반적으로 사용되는 기본 주퇴장치의 경우 그러한 충격력을 무기 자체에서 흡수해야 하는 제한으로 경량 무기체계를 유지하며 화력을 증강시키는 것은 어렵다.

따라서 사격 시 발생하는 충격력에 의한 주퇴력을 완화시키기 위해 포구제퇴기, 주퇴제동기, 복좌기, 복좌완충기 등 사격에 관련된 기본적인 구조 개선에 의한 주퇴장치의 기능을 향상시켜 왔다.

최근 MR(magneto-rheological) 유체를 이용한 충격완화 댐퍼 및 반 주퇴방향으로의 운동량을 기구적으로 발생시켜 주퇴운동을 제어하는 충격량 관리 기술에 대한 연구가 진행되고 있다. 이러한 기술들은 민수뿐만 아니라 군수분야에 적용되고 있다. 건물 내진설계^[1] 및 차량^[2]에의 MR 완충기의 적용, 바이패스형 MR 충격 댐퍼 설계에 대한 연구^[3] 등은 민수분야의 예로 고 충격력을 발생시키는 시스템의 동적 거동 해석^[4] 및 주퇴작용식 발사기구의 완충 특성에 대한 연구^[5] 등은 군수분야에 적용된 예이다.

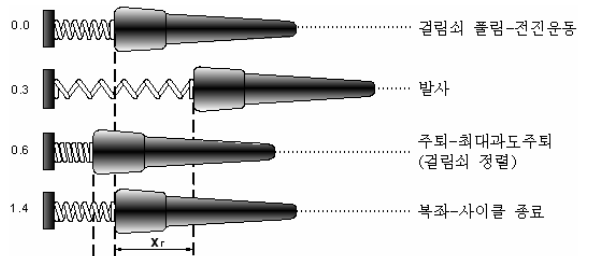
본 연구의 목적은 특정 연식주퇴장치^[6]가 적용된 전차 구조물에서의 주퇴걸림쇠(latch)의 사용 시 구조물에 가해지는 충격량이 최소화 되는 시간을 분석하고, 주퇴걸림쇠의 위치에 따라 주퇴 장치의 동적거동을 분석한다. 이를 이용해 연식주퇴장치를 사용하였을 때 차체가 받는 힘의 감소 정도와 사격 주기를 일반 주퇴 장치의 거동과 비교 분석하는데 있다. 연구 목적을 달성하기 위해 전차의 구조물을 집중질량으로 가정하여 시스템을 모델링하고, 실제 무기체계와 유사한 특정 집중질량, 스프링 상수, 댐핑 계수 하에서 시뮬레이션을 수행한다. 사격 시 발생하는 충격력이 시스템의 입력값으로 사용되며, 주퇴걸림쇠의 위치를 변화시킴에 따른 주퇴부의 동적 거동에 의한 주퇴거리, 사격주기 그리고 차체가 받는 주퇴력을 분석하였다.

본 논문에서 사용된 시뮬레이션은 일부 가정을 적용한 모델로부터 수행되지만, 그 결과의 일부는 실제 시스템에 적용 가능한 정보를 제공하여, 자주포나 전차의 화력 증강과 경량화를 동시에 만족시킬 수 있는 기술에 크게 기여할 것으로 판단된다.

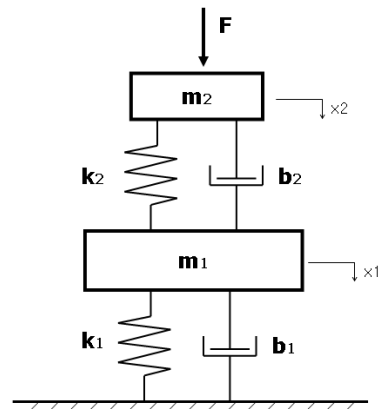
2. 연식주퇴장치 기술 및 모델링

화력장비에 있어서 포신과 포이(trunnion)에 지나친 반동력이 전달되어, 구조물에 많은 응력이 발생된다. 이런 반동력을 감소시키기 위해 적용될 수 있는 연식주퇴장치 기술을 그림 1에서 보여주고 있다. 연식주퇴장치는 포가 복좌되고 있는 동안 탄을 발사하여 주퇴운동량의 일부가 복좌운동량으로 인하여 상쇄되도록 하여 주퇴거리와 포이에의 작용력을 감소시키는 기술을 적용한 시스템이다^[6].

그림 2에서 연식주퇴기술을 적용한 무기체계의 도식적 모델링을 보여주고 있다.



[그림 1] 연식주퇴기술



[그림 2] 연식주퇴기술 적용 시스템 모델링

시스템의 수학적 모델링을 위해 연식주퇴기술이 적용된 무기체계에서 시스템은 크게 주퇴부와 차체부-주퇴부를 제외한 나머지 부분-로 구성되는 2자유도계로 가정하며, 사격 시 차체부에 미치는 충격력은 3차원 해석이 요구되지만 차체에 수직으로 작용하는 충

력력만 고려한다.

그림 2에서 F 는 사격 시 발생하는 충격력을, m_1 , m_2 는 각각 주퇴부 및 차체부의 집중 질량을, k_2 , b_2 는 각각 주퇴부와 차체부 사이의 스프링상수 및 댐핑계수를 그리고 k_1 , b_1 은 각각 차체부와 지면 사이의 스프링상수 및 댐핑계수를 나타낸다.

그림 2에 대한 시스템의 운동방정식 및 행렬 상태 방정식은 각각 식 (1)과 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + (b_1 + b_2) \dot{x}_1 - b_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_1 - k_2 x_2 &= 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + b_2 \dot{x}_2 - b_2 \dot{x}_1 - k_1 x_1 + k_2 x_2 &= F \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 + b_2 - b_2 & b_2 \\ -b_2 & b_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 - k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 \\ F \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 상태변수 x_1 , x_2 는 각각 차체부와 주퇴부의 변위를 나타낸다. 즉, x_2 는 시간에 따른 주퇴부의 변위를 나타내는 출력으로서 최대 주퇴거리를 예측 가능케 하며, 차체부의 변위인 x_1 의 2차 미분항 \ddot{x}_1 은 차체부의 질량 m_1 과의 곱에 의해 차체부의 운동에 의한 힘으로 계산된다.

3. 동적 거동을 통한 충격력 저감 기술

연식주퇴작용을 하는 시스템에서의 주퇴력 저감 기법에는 시스템의 특성값의 변화나 댐핑 효과가 큰 작동유체의 사용 등의 방법들이 사용되어 왔다. 본 연구에서는 주퇴부와 차체부의 동적 거동을 이용하여 충격력이 작용했을 때, 차체부에 미치는 주퇴력을 최소화하는 기술을 적용한다.

그림 1과 식 (1)로부터 주퇴부의 집중 질량 m_2 는 사격 시 발생하는 외력 즉, 충격력에 의한 강제진동(excited vibration)을, 차체부의 집중 질량 m_1 은 자유진동(free vibration)의 동적 거동을 한다. 단, 주퇴부의 초기 거동은 주퇴걸림쇠에의 위치에 의한 초기

값 $x_2(0)$ 으로부터 사격전까지 일정시간 자유진동의 동적 거동을 한다.

주퇴걸림쇠가 풀리며 초기값 $x_2(0)$ 에 의해 주퇴부 m_2 는 자유진동에 의한 전진운동을 한다. 주퇴부가 전진운동을 하는 동안 차체부 m_1 역시 동일한 방향으로 운동을 한다. 차체부의 전진운동에 있어서 변위 x_1 , 속도 \dot{x}_1 그리고 가속도 \ddot{x}_1 의 측정이 가능하며, 차체부의 가속도가 최대가 되는 지점에서 전진방향으로의 최대 힘 $m\ddot{x}_{1,max}$ 을 갖게 된다.

전진방향으로 차체부에 최대 힘이 작용하는 시점에서 탄을 발사할 경우, 차체부에 작용하는 힘은 주퇴부에 작용하는 충격력에 대해 반대방향으로 작용하고, 최대 힘만큼의 주퇴력 상쇄효과를 얻을 수 있게 된다. 이러한 동적 거동을 이용한 기술을 적용함으로써 주퇴력 저감, 주퇴거리 감소 등의 효과 및 짧은 사격주기에 의한 발사속도 증가 효과를 얻을 수 있다.

차체부의 최대 가속도가 발생하는 지점, 또는 최대 힘이 작용하는 지점은 주퇴걸림쇠가 풀리면서 주퇴부가 자유진동을 하는 과정을 분석함으로써 얻을 수 있다.

4. 시뮬레이션 및 분석

시뮬레이션을 위해 식 (1)의 운동방정식을 변환하면 식 (3)과 같다.

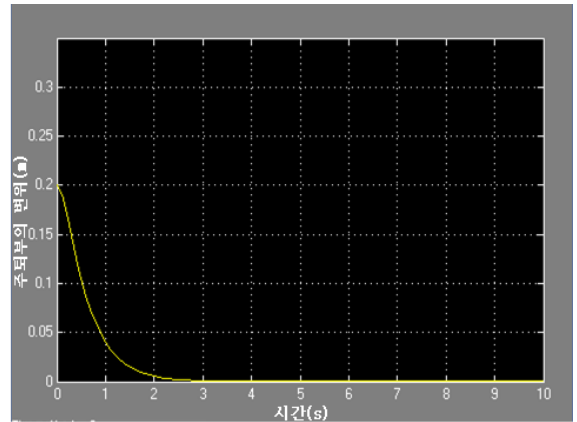
$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 &= \frac{b_2}{m_1} \dot{x}_2 - \frac{(b_1 + b_2)}{m_1} \dot{x}_1 - \frac{(k_1 + k_2)}{m_1} x_1 + \frac{k_2}{m_1} x_2 \\ \ddot{x}_2 &= -\frac{b_2}{m_2} \dot{x}_2 + \frac{b_2}{m_2} \dot{x}_1 + \frac{k_1}{m_2} x_1 - \frac{k_2}{m_2} x_2 + F \end{aligned} \quad (3)$$

시뮬레이션을 위한 시스템의 상수 및 사격에 의한 충격력 F 는 표 1과 같다.

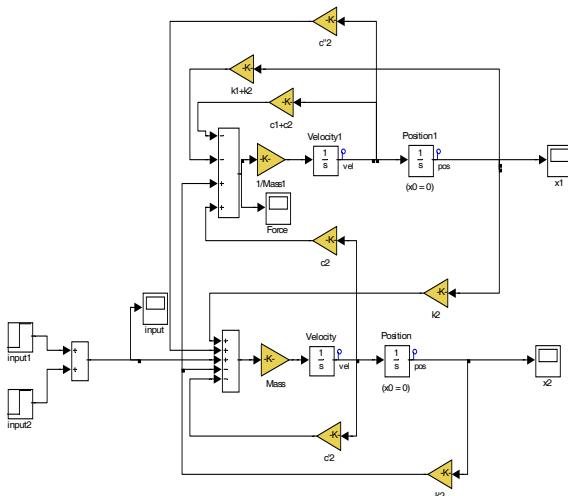
식 (3)에 대하여 Matlab-simulink 시뮬레이션 블록선도의 설계를 그림 3에서 보여주고 있으며, 자유적분기(free integrator)를 이용하여 주퇴부 및 차체부의 변위, 속도 그리고 가속도 측정이 가능하다.

[표 1] 시스템 상수 및 사격 총격량

구 분	단 위	제 원(값)
m_1	kg	200
m_2		35,000
k_1	N/m	400,000
k_2		2,400
b_1	N · s/m	200,000
b_2		1,600
F	N · s	200



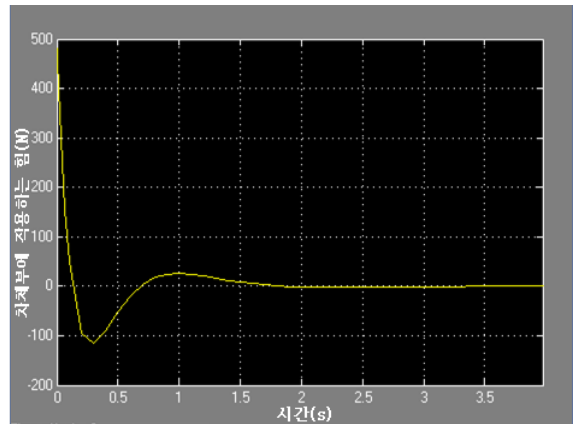
[그림 4] 초기값에 의한 주퇴부 변위



[그림 3] Simulink를 이용한 시스템 블록선도

그림 4와 5에서 주퇴걸림쇠가 풀리며 사격 전까지 초기값에 의해 자유진동을 하는 동안 주퇴부의 거동과 차체부가 전진방향으로 최대 가속도를 갖는, 즉 반 주퇴방향으로의 최대 힘이 작용되는 시간을 각각 보여주고 있다. 여기서 초기값 $x_2(0)$ 는 0.2m를 적용했으며, 차체부에 전방방향으로 작용하는 최대 힘은 주퇴걸림쇠가 풀린 후부터 0.3초에서 116N이 된다.

본 연구에서 적용된 시스템에 대하여 사격시간을 주퇴부와 주퇴걸림쇠로부터 풀린 후 0.3초로 적용했을 경우, 주퇴걸림쇠의 최적 위치는 주퇴거리, 사격 주기 및 차체부가 받는 주퇴력 등에 의해 결정될 수 있다.

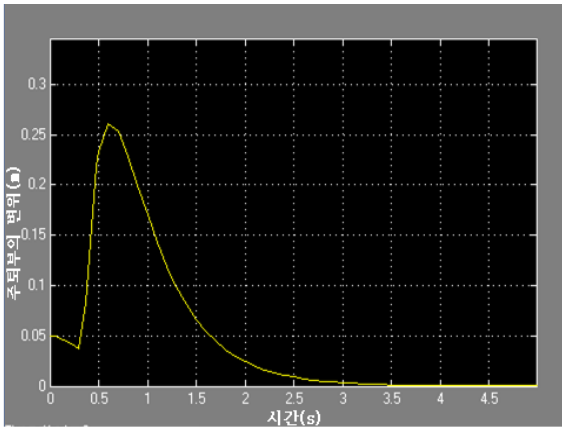


[그림 5] 차체부에 작용하는 힘

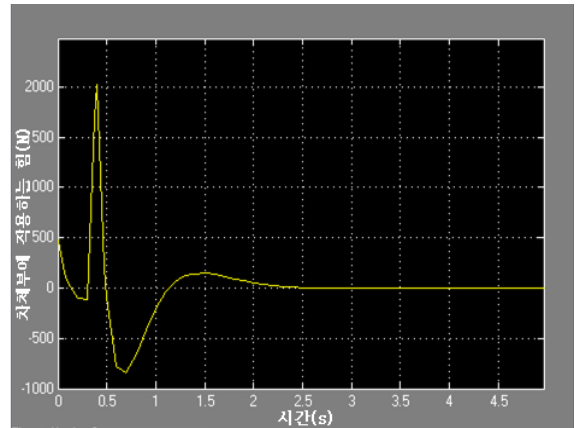
주퇴걸림쇠 위치 $x_2(0)$ 를 0m부터 0.35m까지 0.05 m 간격으로 변화시키며 시뮬레이션을 실시하였으며, 초기값 $x_2(0)$ 가 0m인 경우는 기존 주퇴기술의 결과를 의미한다.

시뮬레이션 결과 중 주퇴걸림쇠의 위치가 0.05m, 0.2m 및 0.3m에 대한 각각의 주퇴부의 변위와 차체부에 작용하는 주퇴력을 그림 6에서 그림 11까지 보여주고 있다.

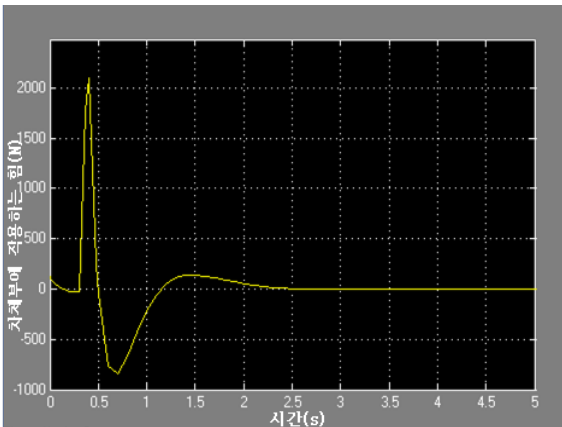
이상의 그림에서 주퇴거리는 주퇴걸림쇠 위치로부터 주퇴부의 최대변위이며, 사격주기는 주퇴부의 주퇴걸림쇠가 풀리기 시작한 시점으로부터 사격 후 최초상태에 도달하는데 걸리는 시간이다. 이때 차체부에 작용하는 주퇴력은 피크 점에서 결정된다. 주퇴걸



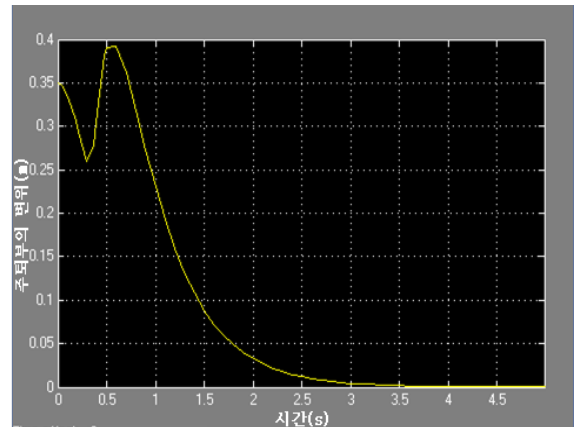
[그림 6] 주퇴부 변위, $x_2(0)=0.05\text{m}$



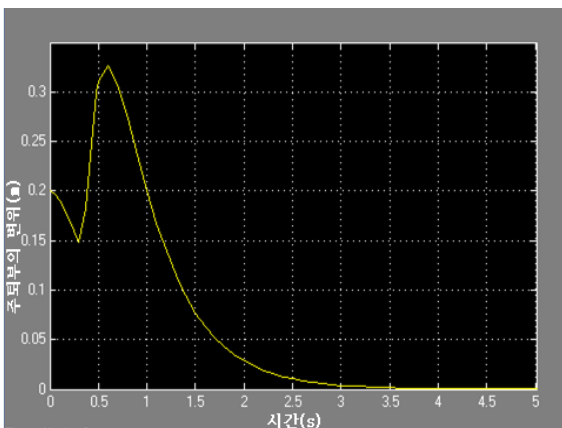
[그림 9] 차체부에 작용하는 힘, $x_2(0)=0.2\text{m}$



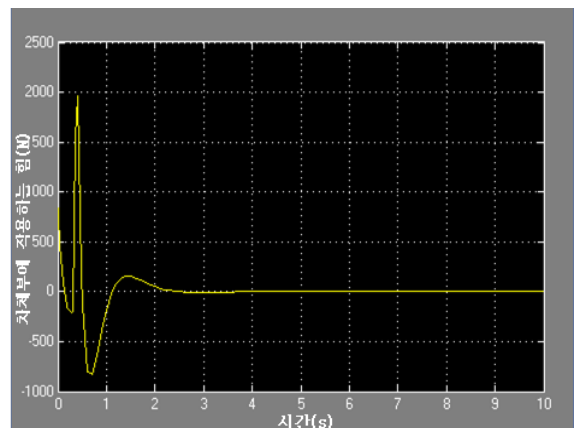
[그림 7] 차체부에 작용하는 힘, $x_2(0)=0.05\text{m}$



[그림 10] 주퇴부 변위, $x_2(0)=0.35\text{m}$



[그림 8] 주퇴부 변위, $x_2(0)=0.2\text{m}$



[그림 11] 차체부에 작용하는 힘, $x_2(0)=0.35\text{m}$

림쇠 위치에 따른 시뮬레이션 결과는 표 2에서 보여주고 있다.

시뮬레이션 결과에서 보여주는 바와 같이 주퇴걸림쇠 위치 $x_2(0)$ 의 값을 증가시킬 경우, 주퇴부의 동적인 거동 특성에 의해 주퇴거리 및 차체부에 작용하는 충격력은 감소됨을 알 수 있다. 주퇴거리와 충격력을 감소시키기 위해 주퇴걸림쇠 위치를 제한 없이 증가시키는 것은 사격전 시스템에 미치는 과부하의 문제로 발생될 수 있다.

[표 2] 주퇴걸림쇠 위치에 따른 주퇴거리, 사격주기 및 차체부에 작용하는 충격력

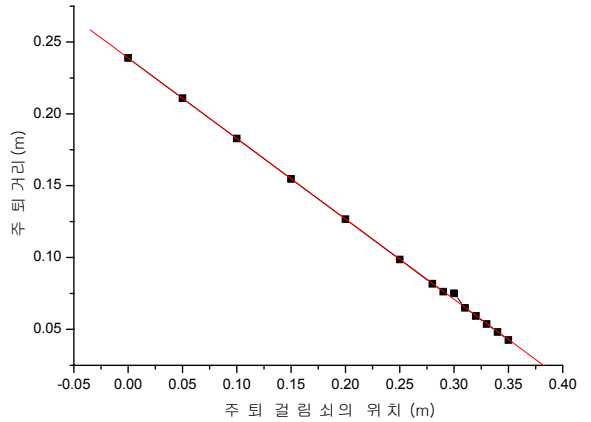
주퇴걸림쇠 위치 x , (m)	주퇴거리 y , (m)	사격주기 t , (s)	충격력 f , (N)
0.00	0.24	3.50	2115.7
0.05	0.21	1.63	2094.4
0.10	0.18	1.30	2071.0
0.15	0.15	1.13	2048.7
0.20	0.13	1.00	2026.3
0.25	0.10	0.90	2004.0
0.30	0.08	0.81	1981.6
0.35	0.04	0.84	1959.3

사격체계에 있어서 또 다른 중요한 요소는 발사속도이며, 이는 사격주기에 의해 결정된다. 시뮬레이션 결과에서 주퇴걸림쇠 위치의 증가에 따라 사격주기가 감소하나 0.3m와 0.35m 사이에서 증가하고 있음을 알 수 있다.

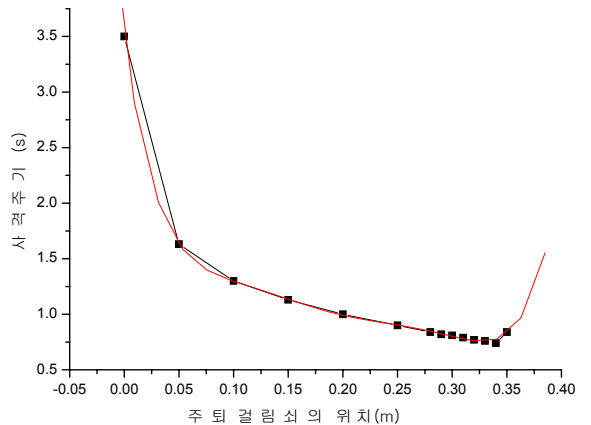
표 2에서 주퇴걸림쇠 위치에 대한 주퇴거리, 사격주기 및 충격력의 곡선적합(curve fitting) 결과를 아래 그림과 식에서 보여주고 있다.

$$y = 0.23881 - 0.55945x \tag{4}$$

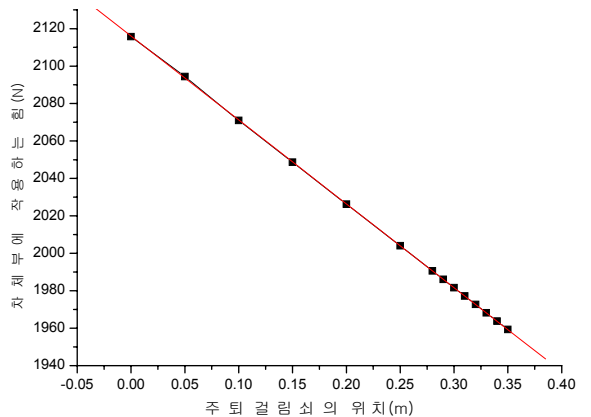
$$t = 3.5 - 74.1x + 1069.4x^2 - 8235.1x^3 + 34025x^4 - 71367.8x^5 + 59623.6x^6 \tag{5}$$



[그림 12] 주퇴걸림쇠 위치에 따른 주퇴거리



[그림 13] 주퇴걸림쇠 위치에 따른 사격주기



[그림 14] 주퇴걸림쇠 위치에 따른 충격력

$$f = 2116.03 - 447.98x \quad (6)$$

식 (4)로부터 식 (6)까지의 변수 x 는 주퇴걸림쇠 위치, y 는 주퇴거리, t 는 사격주기 그리고 f 는 차체부에 작용하는 주퇴력이다.

주퇴걸림쇠 위치가 증가함에 따라 주퇴부의 주퇴거리 및 차체부에 작용하는 충격력의 크기는 선형적으로 감소하며, 식 (5)와 그림 13에서 보여주는 바와 같이 사격주기는 일정 위치에서 변곡점을 갖는 곡선의 형태로 변화한다. 결과로부터 최적의 사격주기를 고려한 주퇴걸림쇠 위치는 약 0.34m이며, 이 때 사격주기는 0.74초, 차체부에 작용하는 주퇴력은 1963.8N 이 된다. 이 결과는 기존 주퇴장치를 적용한 결과보다 약 152N의 주퇴력을 감소시키는 효과이다.

5. 결론

전차나 자주포에 탑재된 사격체계에 있어서 화력 증강에 따른 주퇴거리, 주퇴력 및 사격주기의 증가는 기동성 및 생존성 보장에 좋지 않은 영향을 미친다. 이러한 문제점을 보완하기 위한 방법으로 연식주퇴기술을 적용한 주퇴장치의 개선이 필요하다.

본 연구에서 적용된 연식주퇴장치 기술은 주퇴걸림쇠로부터 이완된 주퇴부가 전진운동을 하는 동안 차체부도 전진운동을 하게 된다. 차체부가 전진방향으로 최대 가속되는 순간 사격을 실시하여 주퇴부의 주퇴에 의한 충격력을 감소시키는 방법을 적용하였다. 이를 통해운동을 감쇠 통해 주퇴걸림쇠의 위치에 따라 주퇴거리, 주퇴력 그리고 특정 구간에서의 사격주기 등이 변화되고 있음을 알 수 있었다.

주퇴걸림쇠의 위치 즉 $x_2(0)$ 의 값을 크게 설정할 경우 주퇴거리 및 차체부에 작용하는 주퇴력을 보다 더 감소시킬 수 있었으며, 사격주기의 경우 주퇴걸림쇠 위치의 특정 한계점을 갖고 있음을 보여주고 있다.

본 논문의 연구 결과 주어진 제원 하에서 주퇴걸림

쇠 위치에 따라 주퇴거리와 충격력은 선형적으로 감소하였다. 주퇴걸림쇠 위치가 0.05m 증가함에 따른 주퇴거리는 0.03m, 충격력은 약 23N 감소하였다.

그러나 주퇴걸림쇠 위치 증가에 따른 사격주기는 일정시간동안 감소하였으나 주퇴걸림쇠 위치가 0.3m가 되는 순간 다시 증가하는 추세를 보이고 있다.

본 연구에서 제시된 주퇴부의 동적 거동을 이용한 주퇴력 저감 기법은 모든 사격체계의 설계에 있어서 크게 기여할 것으로 판단된다. 그러나 실제 시스템에 대한 3차원 모델링 과정, 시스템 구성 요소의 정확한 제원, 최적 설계를 위한 효과도 분석 그리고 주퇴부 복좌하며 주퇴걸림쇠에 고정되기까지 운동에너지를 소산시킬 수 있는 기술 등에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

- [1] Yang, G. Spencer Jr, B. F., Carlson, J. D. and Sain, M. K., "Large-scale MR fluid damper : Modeling and dynamic structure", Engineering Structures, Vol. 24, No. 3, pp. 309~323, 2002.
- [2] Stelzer, G. J., Schulz, M., "A magnetorheological semi-active isolator to reduce noise and vibration transmissibility in automobiles", J. of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 14, pp. 743~765, 2003.
- [3] 남윤주 외, "바이패스형 MR 충격 댐퍼의 설계 및 성능 해석", 대한기계학회논문집 제30권 제5호, pp. 550~559, 2006.
- [4] 박춘식 외, "고 충격 시스템의 충격력 및 동적 거동 해석", 한국소음진동공학회 추계 학술발표회 논문집, pp. 597~602, 2001.
- [5] 김상균 외, "주퇴작용식 발사기구의 완충 특성 해석", 한국소음진동공학회 춘계 학술발표회 논문집, pp. 104~108, 2002.
- [6] 이희각 외, 신편병기공학, 청문각, 1994.