

# 주퇴작용식 발사기구의 완충특성 해석

## Investigation of isolation system in recoil type weapon

김상균\*, 박영필\*\*, 양현석\*\*, 김효준\*\*\*, 최의중\*\*\*\*, 이성배\*\*\*\*, 류봉조\*\*\*\*\*

S. K. Kim, Y. P. Park, H. S. Yang, H.J. Kim, E.J. Choi, S. B. Lee, B.J. Ryu

Key Words : recoil system(주퇴방식), variable damper(가변댐퍼), impulse(충격량)

### ABSTRACT

In this study, the dynamic absorbing system for the shoulder-fired system with high-level-impact force has been investigated. For this purpose, firstly, mathematical model based on the short recoil system has been constructed. In order to design the dynamic absorbing system, parameter sensitivity analysis and parameter optimization process have been performed under constraints of moving displacement and transmitted force. In order to enhance the efficiency of energy dissipation, the stroke-dependent variable damping system has been analyzed. Finally, the performance of the designed dynamic absorbing system has been evaluated by simulation with respect to the benchmark system.

### 1. 서 론

충격력을 받는 구조물에서 충격 전달력 및 진동을 차단하거나 감소시키는 연구는 구조 설계에 있어 중요한 인자가 될 뿐만 아니라 충격이나 진동이 전달되는 2차 계의 안정성에도 주요한 문제가 되어왔다

화기의 성능향상 부분은 운동역학적으로 볼 때 불가피하게도 보다 큰 충격에너지를 발생시키게 되며, 이러한 충격 전달력으로 인하여 조준 안정성과 안전성에 심각한 영향을 주는 문제가 발생할 수 있으므로 성능향상으로 야기되는 충격력의 전달특성을 고려하여 지지부에 전달되는 충격에너지를 감소시킬 수 있는 완충방안에 대한 연구가 필요하다.

특히 개인화기의 경우, 시스템이 발생시키는 모든 충격을 인체가 지지해야 하므로 입력의 크기, 사거리, 폭발력 등 전체시스템의 성능에 대한 구속조건이 되므로 화기 성능 향상을 위해서는 충격 전달력의 저감에 대한 연구가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 고성능 개인 화기에 대한 기초 연구로서 저 충격 시스템의 구현을 목적으로 중대형 화기에 적용되는 주퇴(recoil) 방식을 작동 메카니즘으로 선정하고 이에 대한 시스템 모델을 기반으로 파라미터 감도 분석을 통해 주요 설계 파라미터를 선정하고, 최적화 과정을

통해 파라미터값을 결정하였으며, 제한조건 내에서 충격 전달력을 최소화할 수 있도록 가변형 댐퍼의 설계 방안을 제시하고 완충 특성을 해석하였다.

### 2. 대상 시스템의 모델링

#### 2.1 모델링

저 충격 시스템의 설계와 특성 해석을 위하여 주퇴 작동 메커니즘을 갖는 대상 시스템을 선정하고 Fig.1과 같이 모델링하였으며, 작동 메커니즘을 간략히 기술하면 다음과 같다.

격발에 의한 발사 압력이 입력되면 이 압력에 의해  $m_1$ 과  $m_2$  결합체가 주퇴하게 되고, 일정거리 이동 후  $m_1$ 은  $m_3$ 와 충돌하고  $m_2$ 는 계속 주퇴하게 된다. 이후  $m_2$ 는  $m_3$ 와 충돌한 후 복좌하여  $m_1$ 과 결합됨으로써 한 주기를 완료하게 된다. 따라서 지지부에 전달되는 충격력은  $m_1$ 과  $m_2$ 의 동적 거동에 의해 결정되게 된다. 이러한 대상 시스템의 작동 메커니즘을 기반으로 동특성 해석 및 저 충격 시스템 설계를 위하여 2.2 절에 각 단계별 작동 특성을 고려하여 운동 방정식을 기술하였다.

여기서, 대상 시스템을 구성하는 각 질량체들은 강체로, 물체간 충돌과 결합, 지지부는 스프링과 댐퍼 요소로 모델링하였고, 각각의 운동에서 발생하는 마찰은 무시하였으며 좌표축은 초기위치를 원점으로 지지

\* 연세대학교 대학원

E-mail : kskiy@lycos.co.kr

Tel : (02)2313-2824

\*\* 연세대학교 기계전자공학부

... 국립삼척대학교 기계공학과

.... 국방과학연구소

..... 한밭대학교 기계설계학과

부 방향을 양의 방향으로 설정하였다.

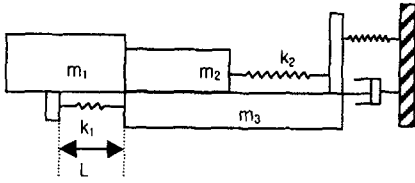


Fig. 1 Schematic Diagram of Recoil Type Model

## 2.2 운동 방정식

대상 모델의 작동 메커니즘 분석을 기반으로 동특성 해석을 위한 운동 방정식을 유도하여 각 작동 단계별로 간략히 정리하면 다음과 같다.

### (1) 1 단계

$m_1$ 과  $m_2$  결합체가  $K_2$ 와  $K_1$  의해  $m_3$ 에 에너지를 전달하는 단계로서 이때  $m_1, m_2$ 는 강한 스프링과 댐퍼에 의해 결합된 상태이다. 운동방정식은 다음의 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$M \cdot \ddot{X} + C \cdot \dot{X} + K \cdot X = F_{input} \quad (1)$$

$$\text{단, } M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} c_8 & -c_8 & 0 \\ -c_8 & c_8 & 0 \\ 0 & 0 & c_3 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} K_1 + K_8 & -K_8 & -K_1 \\ -K_8 & K_2 + K_8 & -K_2 \\ -K_1 & -K_2 & K_3 + K_1 + K_2 \end{bmatrix}$$

$m_1, m_2$ 의 결합 스프링/댐퍼의 값은 결합을 유지할 수 있는 충분히 큰 값이다.

### (2) 2 단계

$m_1$ 과  $m_2$  결합체가 일정거리 이동하면 풀림 작용이 발생하여  $m_2$ 는 계속 주퇴되며  $m_1$ 과  $m_3$ 의 충돌이 발생하여 힘의 전달이 이루어지게 된다. 즉 짧은 시간에 강한 스프링과 댐퍼 요소를 통해서  $m_1$ 의 에너지가  $m_3$ 으로 전달된다.

이때 운동방정식은 식(1)과 같고 각각의 행렬은 다

음과 같이 정의된다.

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} c_4 & 0 & -c_4 \\ 0 & 0 & 0 \\ -c_4 & 0 & c_3 + c_4 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} K_1 + K_4 & 0 & -K_1 - K_4 \\ 0 & K_2 & -K_2 \\ -K_1 - K_4 & -K_2 & K_3 + K_1 + K_2 + K_4 \end{bmatrix}$$

### (3) 3 단계

$m_1, m_2, m_3$ 가 결합 없이 각각 개별 운동을 하는 단계로서 3개의 강체 운동으로 가정할 수 있다. 이 때 운동방정식은 식(1)과 같고 각각의 행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} K_1 & 0 & -K_1 \\ 0 & K_2 & -K_2 \\ -K_1 & -K_2 & K_3 + K_1 + K_2 \end{bmatrix}$$

### (4) 4 단계

$m_2$ 가  $m_3$ 과 충돌하여 에너지를 전달하는 단계로서  $m_2$ 와  $m_3$ 의 충돌과  $m_1$ 의 개별 운동으로 가정할 수 있다. 이때 운동방정식은 식(1)과 같고 각각의 행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_6 & -C_6 \\ 0 & -C_6 & C_3 + C_6 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} K_1 & 0 & -K_1 \\ 0 & K_2 + K_6 & -K_2 - K_6 \\ -K_1 & -K_2 - K_6 & K_3 + K_1 + K_2 + K_6 \end{bmatrix}$$

### 3 장 저충격 전달 시스템의 설계

#### 3.1 파라미터 감도 분석

저 충격 전달 시스템을 설계하기 위하여 각각의 설계 파라미터들이 충격 전달력에 미치는 영향을 파악할 필요가 있다.

Fig. 1 의 시스템 모델에서 주요 파라미터에 대한 감도 분석을 수행하였으며, 그 중 시스템 전체의 동특성에 가장 큰 영향을 미칠 뿐 아니라 가변성이 가장 큰 요소중의 하나인  $k_1$  에 대한 충격 전달력과 충격량에 대한 결과를 Fig. 2 ~ Fig. 3 에 각각 도시하였다.

Fig. 2 의 결과에서처럼,  $k_1$  이 증가함에 따라 1 차 전달력은 증가하고 2 차 전달력은 감소하는데 일정수준 이상부터는 2 차 전달력이 나타나지 않는다. 또한 Fig. 3 의 결과에서처럼 충격량 역시 불규칙한 파형으로 증가하지만 일정수준부터는 급격한 감소를 보이는데 이는  $k_1$  의 강성이 너무 커서  $m_1, m_2$  결합체가 분리되는 지점까지 주퇴하지 못했기 때문이다

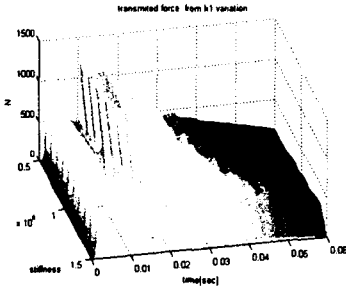


Fig. 2 Force responses w.r.t variation of  $k_1$

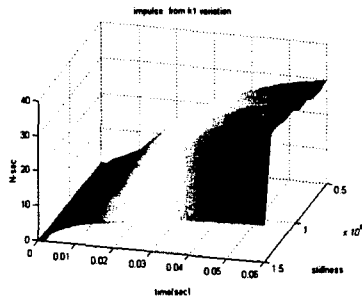


Fig. 3 Impulse responses w.r.t variation of  $k_1$

#### 3.2 파라미터의 최적화

3.1 절의 해석결과를 토대로, 대상소화기의 구조적 특성을 고려한 주퇴 시스템에 대한 세밀한 설계가 요구되므로 본 절에서는 저 충격 전달 시스템 설계목적

에 부합되면서 완충성능을 극대화 할 수 있도록 다음과 같은 파라미터 최적화 과정을 수행하였다.

시스템에 대한 최적화 목표는 실질적인 관심대상인  $m_1 + m_2$  와  $m_3$  간의 변위와 충격 전달력에 대하여 주퇴 시스템의 물성치를 최적화 하는 것으로 정의하였으며, 성능지수(Performance Index)를 다음 식 (2)와 같이 정의하였다.

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left[ \int_0^T (\ddot{X}_u^2 + \rho(X_s - X_u)^2) dt \right] \quad (2)$$

여기서,  $\rho$  : 가중치

$X_s$  :  $m_s(m_1 + m_2)$ 의 변위

$X_u$  :  $m_u(m_3)$ 의 변위

최적화 과정을 통하여 성능지수식을 최소화하는 주퇴 시스템 매개변수  $k_s, c_s$  는 다음의 편미분 방정식을 만족하도록

$$k_s^* : \frac{\partial J}{\partial k_s} = 0 \quad c_s^* : \frac{\partial J}{\partial c_s} = 0 \quad (3)$$

최적의 스프링상수  $k_s^*$  와 감쇠계수  $c_s^*$  를 다음의 식 (4), (5)와 같이 구할 수 있다.

$$k_s^* = \sqrt[3]{\frac{k_u m_s^2 \rho}{2}} \quad (4)$$

$$c_s^* = \sqrt{m_u \times \left\{ \frac{k_s^2}{k_u} + \left( \frac{m_s^2}{k_s} + \frac{m_s^2}{k_u} \right) \times \rho \right\}} \quad (5)$$

#### 3.3 가변형 완충기의 설계

일반적으로 내부 오일의 유동 저항을 이용해 충격시의 대상체 운동에너지를 열로 발산시키는 고정된 면적을 갖는 일반적인 완충기의 경우, 충격 초기 전달력의 피크가 발생하게 된다. 따라서 본 시스템의 적용특성을 고려하여 완충 기간중 부드러운 완충특성을 갖도록 하는 완충 시스템을 구현하기 위하여 완충기 피스톤의 운동에 따라 내부 오일의 유출면적을 변화시킴으로써 감쇠력을 변화시킬 수 있는 가변 오일 댐퍼를 고려하였다.

피스톤에 의한 유체적의 변화량과 유출구(escape hole)에 의한 유출 유량이 같다는 연속방정식에 의해 다음의 식을 표현할 수 있다.

$$v \times S_p = w \times q_y \times \mu \quad (6)$$

여기서  $v$  는 피스톤의 속도(m/s),  $S_p$  는 피스톤

면적( $m^2$ ),  $w$ 는 유출속도 (m/s),  $q_y$ 는 피스톤 밑에 있는 유출구의 전체 면적( $m^2$ ) 그리고  $\mu$ 는 유출상수이다.

유출속도는 다음의 식(7)과 같이 표현된다.

$$w = \sqrt{\frac{2p}{\gamma}} \quad (7)$$

여기서  $p$ 는 실린더내의 오일 압력( $N/m^2$ )이고  $\gamma$ 는 오일 밀도  $kg/m^3$ 이다

식(7)을 식(6)에 대입하여 압력에 대한 식으로 변환하면 식(8)와 같이 된다.

$$p = \frac{\gamma}{2\mu^2} \times S_p^2 \times \left(\frac{v}{q_y}\right)^2 \quad (8)$$

그러므로 완충력(retarding force)은 다음의 식(9)으로 나타낼 수 있다.

$$F = p \times S_p = \frac{\gamma}{2\mu^2} \times S_p^3 \times \left(\frac{v}{q_y}\right)^2 \quad (9)$$

자유낙하 하는 충격을 완충하는 경우로 가정하면 피스톤의 속도는 식(10)과 같이 나타낼 수 있으므로

$$v = \sqrt{2g_n \times y} \quad (10)$$

식(10)을 식(9)에 대입하면 다음의 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{\gamma \times g_n}{2\mu^2} \times S_p^3 \times \frac{y}{q_y^2} \quad (11)$$

따라서 완충력을 완충변위에 대하여 일정하게 유지하려고 한다면 완충력  $F$ 는 상수가 되므로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$y = const \times q_y^2 \quad (12)$$

식(12)로부터 완충변위와 유출면적, 두 변수사이의 관계가 2 차함수 형태로 나타내질 수 있으며, 실린더내의 각각의 유출구의 위치는 이 관계식을 따라 설계할 수 있다.

식(10)-(12)와는 달리 일반적인 충격입력의 경우, 완충 변위에 대한 유출면적 선도가 설계변수가 되므로 Fig. 4 와 같이 주된 시스템의 작동변위를 고려하여 오일의 유출면적 선도를 설계하였다.

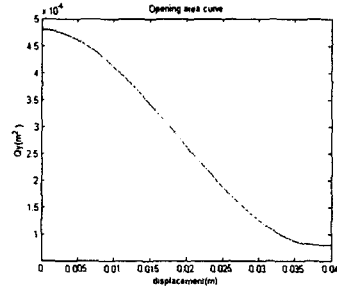


Fig. 4 Opening area curve

#### 4 장 저충격 시스템의 특성 해석

초기 대상 시스템에 대한 실험 및 시뮬레이션 결과를 Fig. 5 에 비교하여 각각 도시하였다. 실험용 화기는 설계 대상 시스템과 유사한 작동 메커니즘 및 충격을 가지는 장비를 적용하였다. Fig. 5 의 결과에서처럼, 시뮬레이션 결과는 실험 결과와 전체적인 개형 및 크기를 재현하고 있으며, 세부 형태에서 상이함이 발생되는데 이는 실험장치에 사용된 발사기와 연구 대상 시스템의 내부 요소 일부의 차이점에 기인한다. Fig. 1 의 대상 시스템을 기반으로 3.1, 3.2 절의 파라미터 감도 해석과 최적화 과정을 통하여 결정된 설계 파라미터를 적용한 충격 전달 특성 해석 결과를 Fig. 6 에 도시하였는데, Fig. 5 의 결과 대비 충격 저감 효과를 비교하여 확인할 수 있다.

또한 3.3 절에서 설계한 가변형 완충기를 적용한 결과를 Fig. 7 에 도시하였는데, 결과에서처럼 충격 전달력의 감소 효과를 확인할 수 있으며, 본 연구의 결과와 방법들은 다른 구조의 작동방식을 갖는 발사기구의 충격특성 해석과 완충기 설계를 위한 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

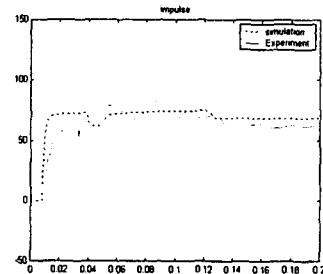


Fig. 5 Comparison of impulse

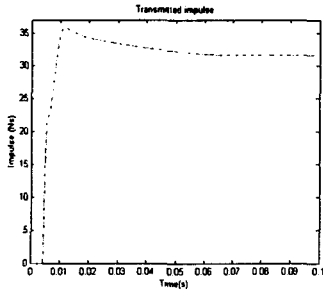


Fig. 6 Impulse using optimized parameters

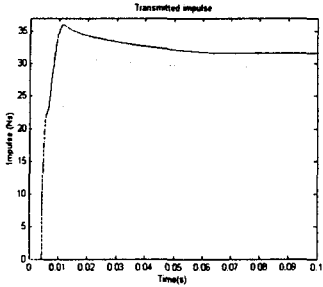


Fig. 7 Comparison of impulses  
(solid :using optimized parameters,  
dot: using optimized damper )

## 5. 결 론

본 연구에서는 고성능, 저 충격 시스템에 대한 기초 연구로서, 중대형 화기에 적용되는 주퇴(recoil) 방식을 작동 매카니즘으로 선정하고 이에 대한 시스템 모델을 기반으로 파라미터 감도 분석을 통해 주요 설계 파라미터를 선정하였으며, 주퇴 시스템의 최적화 과정을 수행하여 설계 파라미터값을 결정하였다. 또한 지지부의 특성을 고려하여 제한조건 내에서 충격 전달력을 저감시킬 수 있도록 가변형 댐퍼의 설계 방안을 제시하였으며 이를 적용하여 완충 특성을 해석하였다. 본 연구의 결과로부터 다른 구조의 작동방식을 갖는 발사기구의 충격특성 해석과 완충기 설계를 위한 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

본연구는 국방과학연구소의 지원(UD000036CD)을 받아 수행되었음.

## 참고문헌

1. PAUL E. EHLE, ALBERT E. RAHE, "Theory and Application of Mathematical Modeling of Shoulder-Fired Weapons", 1972
2. Headquarters, U.S. Army Materiel Command " Engineering Design Handbook-automatic weapons"
3. Suaesh Goyal, "Shock Protection of Portable Electronic Products: Shock Response Spectrum, Damage Boundary Approach, and Beyond", Shock and Vibration Vol. 4 No.3, 1997,pp. 169-191
4. Boris G.Korenev, "Dynamic Vibration Absorbers", John Wiley & sons
5. Cynil M. Harris, "Shock and Vibration Handbook", McGRAW-HILL
6. ISO standards handbook, "Acoustics, Vibration and Shock", International Organization for standarization
7. 박춘식, 박영필, 양현석, 김효준, 최의중, 이성배, "고 충격 시스템의 충격력 및 동적 거동 해석", 한국소음진동 공학회 추계학술발표회 논문집, 2001, pp. 597~602.