

# 고 충격 시스템의 충격력 및 동적 거동 해석

## Dynamic behavior and impact analysis of high level impact system

박춘식\*, 박영필\*\*, 양현식\*\*, 김효준\*\*\*, 최의중\*\*\*\*, 이성배\*\*\*\*  
C. S. Park, Y. P. Park, H. S. Yang, H. J. Park, E. J. Choi, S. B. Lee

Key Words : high level impact (고충격), recoil system(주퇴방식)

### ABSTRACT

The structure of the human body has a limit to absorb the high-level-impact that occurs in shoulder-fired system. In other to solve this problem, short recoil system is applied to shoulder-fired system, and is verified experimentally, and then is performed analysis of parameters sensitivity, optimization of main part. According to the results, we developed A fundamental basis for buffering structure modeling that is operated by high level input in shoulder-fired system

주요기술용어 : recoil system(주퇴방식), damper(완충기), impulse(충격량)

### 1. 서 론

일반적으로 강력한 추진력을 이용하여 물체를 투사하는 형태의 발사기는 차량이나 지상의 시설물에 고정되어 발생하는 큰 충격을 지지 구조물이나 운반체가 흡수하도록 설계되는데 이에 비해 휴대용 발사기는 시스템이 발생시키는 모든 충격을 인체가 지지해야 한다는 점 때문에 제한사항이 많았다. 즉, 입력의 크기나 폭발력 등이 제한 되어 전체시스템의 성능을 좌우하게 된다. 그러므로 이러한 시스템의 발전을 위해서는 충격에 대한 문제가 우선적으로 연구되어야 한다. 이러한 측면에서 본 연구는 기존 발사기의 단점을 개선하기위해 휴대를 목적으로 하면서 기존보다 강력한 입력을 적용하는 특정시스템에 대하여 충격 전달력 및 동특성을 알아보려고 한다. 이 시스템은 대형발사기에 적용되는 recoil 방식을 적용한 휴대용 장치로서 그 적용 가능성과 효과를 알아보려고 한다. 또한 설계측면에서 내부 동적거동에 연구목적이 있을 때는 시스템내부의 각 파라미터 각각의 운동에 대한 세부적인 모델링이 필요하지만 본 연구에서는 외부로 발산되는 전달력을 궁극적인 연구 대상으로 하여 이에 영향을 미치는 요소들에 대한 모델링 만으로 시스템의 특성을 나타내었다.

시스템에 대한 모델링에 이어 실험을 통한 검증 후

- . 연세대학교 대학원
- .. 연세대학교
- ... 삼척대학교
- .... 국방과학연구소

시스템의 동적거동과 파라미터별 민감도를 분석하였고 제한조건 내에서 충격을 최소화할 수 있는 간략화 된 최적화 기법을 적용하였다

### 2. 대상계설정 및 모델링

#### 2.1 대상계의 모델링

시스템에 입력이 주어질때 충격력이 발생하는 메커니즘을 해석하기 위해 Fig.1 과 같은 작동 메커니즘을 갖는 대상계를 설정하여 간략히 도시하였다.

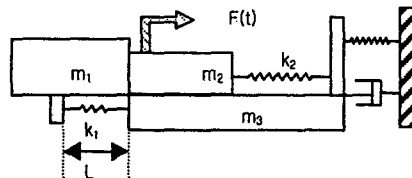


Fig1 Schematic Diagram of Model

초기에 강한 압력이 입력되어 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 복좌 하여  $m_1$  과 결합됨으로써 한 주기를 완료하게 된다. 그러므로 인체에 가해지는 충격은  $m_1$  과  $m_2$  에 의해 두 번 발생하는 것으로 예상할 수 있다. 이러한 대상계의 작동 메커니즘을 기반으로 그 동특성을 해석하기 위하여 아래와 같이 수

개의 단계로 구분하여 대상계를 모델링 하였다. 대상계를 구성하는 각 질량들은 강체로, 물체간 충돌과 결합, 인체는 스프링과 댐퍼의 작용으로 나타내었다. 각각의 운동에서 발생하는 마찰은 모두 무시하였으며 좌표축은 초기위치를 원점으로 지지부 방향을 양의 방향으로 설정하였다.

## 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 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$M \cdot \ddot{X} + C \cdot \dot{X} + K \cdot X = F_{input}$$

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

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

$m_1, m_2$  의 결합 스프링/댐퍼의 값은 결합을 유지할 수 있는 충분히 큰 값으로서 다음의  $K_8, c_8$  와 같다

$$K_8 = 3.5 \times 10^8 N/m, c_8 = 19863 N - sec/m$$

### (2) 2 단계

$m_1$  과  $m_2$  결합체가 일정거리 이동하면 풀림 작용이 발생하여  $m_2$  는 계속 주퇴하며  $m_1$  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 위와 같고 Matrix 식은 다음과 같

다.

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

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

$$K_4 = 1.75 \times 10^7 N/m, C_4 = 9792 N - sec/m$$

### (3) 3 단계

$m_1, m_2, m_3$  가 결합 없이 각각 개별 운동을 하는 단계로서 3 개의 강체 운동으로 가정할 수 있다. 이때 운동방정식은 위와 같고 Matrix 호 하면 다음과 같다.

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

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

### (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 위와 같고 Matrix 화 하면 다음과 같다.

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

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

### 3. 실험을 통한 검증

#### 3.1 실험장치

대상계와 유사한 작동 메커니즘과 충격을 가지는 시스템을 통하여 실제 발생되는 동특성을 측정 및 분석하여 동특성에 관한 실험자료를 확보하였고 시뮬레이션 결과와 비교함으로써 모델링에 대한 타당성을 검증하였다. 실험을 위한 장치의 구성은 다음의 Fig.2 와 같다.

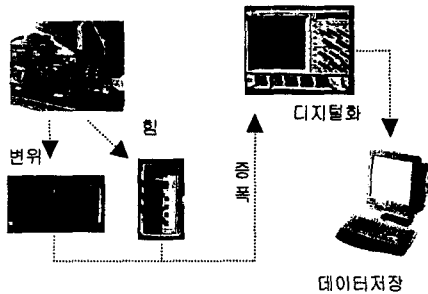


Fig2 Configuration of experimental setup

측정실험은 대상계에서 발생하는 충격과 변위를 압력 가스가 시스템 외부로 이탈하는 상대 시간에 따라 계측토록 구성하여 실험을 수행하였다.

Table1 Function of system Test Equipment

장 치	기 능
Oscilloscope	측정 신호 분석 및 저장
LVDT	$m_2$ 변위 측정
Force Transducer	충격력 측정
Force Transducer Amp	센서 신호 증폭

대상 모델에 대한 시뮬레이션을 수행하기 위한 각각의 파라미터 값은 Table2 에 정리하였다.

Table 2 Parameters of Model

기 호	단 위	값
$M_1$	Kg	0.35
$K_1$	N/m	$2.89 \times 10^6$
$C_2$	N-sec/m	1200
$M_2$	Kg	0.37
$K_2$	N/m	1050

#### 3.2 실험결과

실험에서 획득된 전달력, 변위, impulse 중에서 시스템의 특성비교가 용이한 impulse 를 비교하여 Fig.3 에 도시하였다.

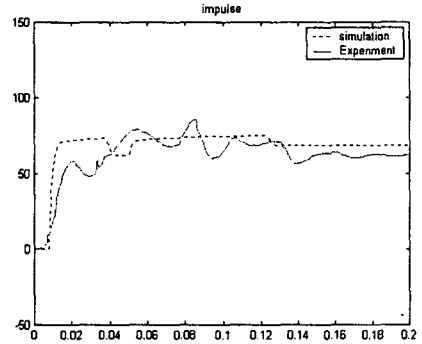


Fig3 Comparison of impulse

위의 실험결과에서와 같이 실험과 시뮬레이션 모두 기준시점, 즉 비사체가 장치를 이탈한 후에 각 질량의 거동이 발생함을 알 수 있다. 이는 입력이 2mse 정도의 짧은 시간 내에 완료되기 때문이다. 그리고 두 값이 전체적인 크기나 형태는 유사하지만 주기나 세부 형태가 상이함을 알 수 있다. 이는 실험장치에 사용된 발사기와 연구 대상계의 작동 메커니즘이 몇 가지 차이점 때문이다. 하지만 이런 세부적인 결과의 상이함에도 불구하고 전체적인 동특성 측면을 고려한다면 impulse 의 크기나 형태를 비교함으로써 적용된 모델링기법이 대상계에 사용될 수 있음을 알 수 있다.

### 4. 파라미터별 감도분석

위에서 검증한 모델의 설계 값은 유사화기의 값을 적용했거나 경험적으로 가용 할 것으로 판단된 값을 적용 하였다. 이런 추정 값에서 최적의 설계를 도출하기 위하여 각각의 요소들이 전달력에 미치는 영향을 알고 제한 조건 내에서 최적의 값들을 찾고자 한다. 설정한 모델에서는  $m_1, m_2, k_1, k_2$  의 전달력과 impulse 에 대한 영향을 다음의 Fig4 ~ Fig11 에 도시하였다.

#### 4.1 $k_1$ 에 따른 감도특성

$k_1$ 은 시스템전체의 동특성에 가장 큰 영향을 미칠 뿐 아니라 가변성이 가장 큰 요소중의 하나이다. Fig4 에서  $k_1$ 이 증가함에 따라 1 차 전달력은 증가하고 2 차 전달력은 감소하는데 일정수준 이상부터는 2 차 전달력이 나타나지 않는다. Fig5 에서 impulse 역

시 불규칙한 파형으로 증가하지만 일정수준부터는 급격한 감소를 보이는데 이는  $k_1$ 의 강성이 너무 커서  $m_1, m_2$  결합체가 분리되는 지점까지 주파하지 못했기 때문이다

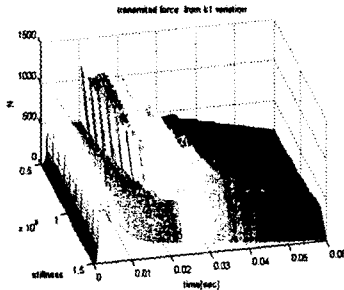


Fig4 force shape from variation of  $k_1$

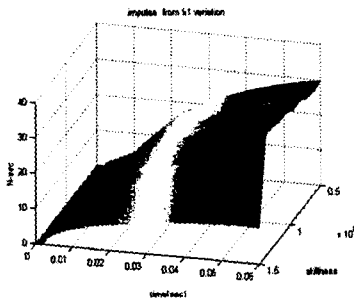


Fig5 impulse shape from variation of  $k_1$

#### 4.2 $k_2$ 에 따른 특성

Fig6에서와 같이  $k_2$ 의 증가는 1,2차 전달력이나 전체주기에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. Fig7에서 impulse 역시  $k_2$ 의 증가에 큰 변화가 없다. 즉,  $k_2$ 의 변화로는 시스템 전달력의 크기나 주기를 제어하기 곤란함을 알 수 있다.

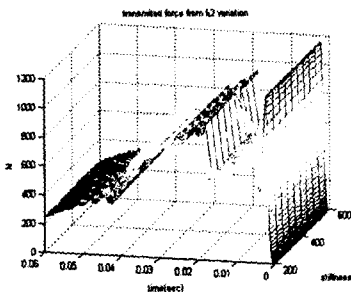
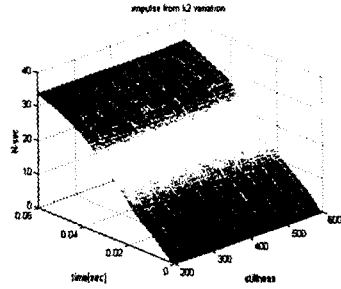


Fig6 force shape from variation of  $k_2$

Fig7 impulse shape from variation of  $k_2$



#### 4.3 $m_1$ 에 따른 감도특성

Fig8에서  $m_1$ 의 증가는 일정수준까지 1차 전달력의 작은 증가와 2차 전달력의 감소를 유발하는데 그 이후에는 2차 전달력이 나타나지 않는다. Fig9의 impulse에서도 유사한데 이는 4.1과 동일한 원인으로 분석된다.

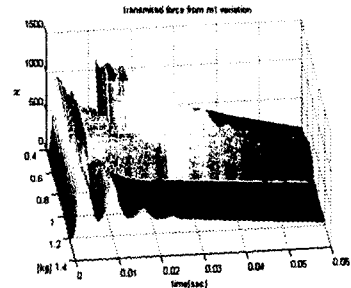


Fig8 force shape from variation of  $m_1$

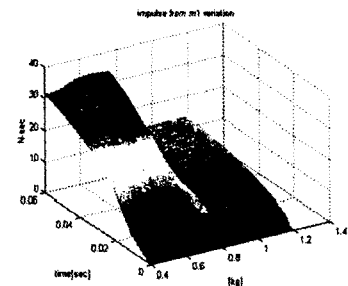
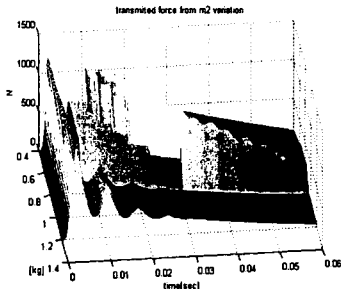


Fig9 impulse shape from variation of  $m_1$

#### 4.4 $m_2$ 에 따른 감도특성

4.3의 결과와 같이 Fig10 전달력과 Fig11 impulse 모두  $m_2$ 의 증가는 일정수준까지 1차 전달

력의 소폭증가와 2 차 전달력의 감소 및 주기의 연장을 유발하는데 그 이후에는 2 차 전달력이 나타나지 않는다



. Fig10 force shape from variation of  $m_2$

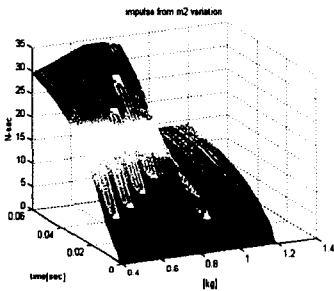


Fig11 impulse shape from variation of  $m_2$

### 5. 완충시스템의 최적화

4 장의 해석결과에서처럼  $k_1$  은 대상소화기의 구조적 특성으로 인하여 전체 시스템에 가장 큰 영향을 미치므로 작동특성을 고려한 세밀한 설계가 요구된다.

따라서 본 절에서는  $k_1$ 의 위치에 damper 기능을 추가할 때 설계목적에 부합되면서 완충성능을 극대화할 수 있도록 다음과 같은 과정을 수행하여 파라미터 값을 결정하였다.

Fig.1 의 대상시스템을 기준으로 하여  $c_3$  가 작다고 가정하고 주어진 입력  $F_i$  를 강도(intensity)  $\Xi$  를 갖는 백색잡음으로 가정하면,

$$E[\dot{F}_i(t) \dot{F}_i(t + \tau)] = \Xi \delta(t - \tau)$$

와 같이 되며, 모든  $t \geq 0$  에 대하여  $E[\dot{F}_i(t)] = 0$  이라 가정한다.

이 시스템에 대한 성능지수는 실질적인 관심대상인  $m_1 + m_2$  와  $m_3$  간의 deflection 과, 전달력에 대하여  $m_1$  완충시스템의 물성치를 최적화 하는 것으로 정의한다. 따라서 성능지수(Performance Index)를

다음과 같이 정의한다.

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

여기서  $\rho$  는 가중치이며 2 장의 운동방정식으로 부터  $\underline{X} = [X_s, \dot{X}_s, X_u, \dot{X}_u]^T$  인 상태벡터에 대하여  $X_s$  :  $m_1 + m_2$  의 변위,  $X_u$  :  $m_3$  의 변위인 상태 변수의 형태로 표현하면,

$$P.I = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left[ \int_0^T (\dot{X}_4^2 + \rho(X_1 - X_3)^2) dt \right]$$

위 식으로부터

$$\dot{x}_4^2 + \rho(x_1 - x_3)^2 = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]$$

$$\begin{bmatrix} \frac{k_s^2}{M_u^2} + \rho & \frac{k_s c_s}{M_u^2} & \frac{k_s(k_s + k_u)}{M_u^2} & \frac{k_s c_s}{M_u^2} \\ \frac{k_s c_s}{M_u^2} & \frac{c_s^2}{M_u^2} & -\frac{c_s(k_s + k_u)}{M_u^2} & -\frac{c_s^2}{M_u^2} \\ k_s(k_s + k_u) & -c_s(k_s + k_u) & (k_s + k_u)^2 + \rho & c_s(k_s + k_u) \\ \frac{k_s c_s}{M_u^2} & -\frac{c_s^2}{M_u^2} & \frac{c_s(k_s + k_u)}{M_u^2} & \frac{c_s^2}{M_u^2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = X^T Q X$$

가 된다. 여기서 Q 는 대칭(symmetric) 이며 양의 행렬(positive definite matrix) 이다.

시스템이 선형이고 입력이 백색잡음 이므로 시간평균(time average)은 조화평균(ensemble average)와 같다. 따라서 성능지수는

$$\begin{aligned} P.I &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left[ \int_0^T X^T Q X dt \right] \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \{ E [X^T Q X] dt \} \\ &= \text{Trace} \{ Q E [X^T X] \} \\ &= \text{Trace} \{ Q \Sigma \} \end{aligned}$$

가 되며 여기서  $\Sigma$  는 다음과 같은 공분산 행렬(covariance matrix)이다.

$$\Sigma = E[X^T X] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} & \sigma_{14} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} & \sigma_{24} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} & \sigma_{34} \\ \sigma_{41} & \sigma_{42} & \sigma_{43} & \sigma_{44} \end{bmatrix}$$

주어진 계의 상태방정식에 대한 공분산 전파 방정식

(covariance propagation eq'n)은 다음을 만족한다.

$$A \Sigma + \Sigma A^T + B \Xi B^T = 0$$

앞에서 다룬 A, B 에 대한 정의와 윗 식들을 이용하면 성능지수 PI 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P.I = \text{Trace} \{ Q \Sigma \}$$

$$= \frac{k_s^2}{2c_s k_u m_s^2} + \frac{c_s}{2m_u m_s^2} + \left( \frac{1}{2c_s k_u} + \frac{1}{2c_s k_u} \right) \times \rho$$

이와 같은 성능지수식을 최소화하는 완충기시스템 매개변수  $k_s$ ,  $c_s$  는 다음의 편미분 방정식으로부터 구할 수 있다.

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

성능지수식과 위식으로부터 최적의 스프링상수  $k_s^*$  와 감쇠계수  $c_s^*$  는 다음과 같이 구해진다.

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

$$c_s^* = \sqrt[3]{m_u \times \left\{ \frac{k_s^2}{k_u} + \left( \frac{m_s^2}{k_s} + \frac{m_s^2}{k_u} \right) \times \rho \right\}}$$

가중치  $\rho$  값에 대한 완충 변위와 충격 전달력의 변화를 살펴보면 다음의 Fig.12로 나타낼 수 있다.

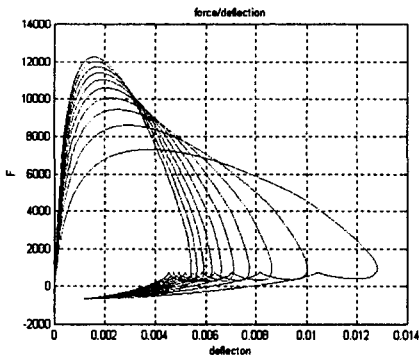


Fig12 Deflection - Transmitted Force

이때  $m_1 + m_2$  의 상대변위는 일정변위를 확보해야 하며 impulse 는 일정수준 이하로 감소시키는 것을 목표사양으로 하여 다음과 같은 스프링상수와 감쇠계수 쌍을 결정하였다.

$$k_s^* = 1.17 \times 10^5 \text{ N/m}$$

$$c_s^* = 1.56 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s/m}$$

## 6. 결 론

본 연구는 고강도의 입력으로 작동하는 휴대용 발사 장치의 완충구조 설계의 과정으로서 대형 발사기에 사용되는 단주퇴방식이 적용된 휴대용 발사기의 모델링을 수행하였고 유사시스템을 이용한 실험을 통하여 검증을 하였다. 또한 설정된 입력이 주어질 경우 충격특성에 영향을 미치는 요소들에 대한 고찰을 통하여 차후 충격 저감 설계를 위한 기반을 조성하였는데 그 세부 내용은 다음과 같다.

- (1) 고충격 발사기의 매카니즘 분석을 토대로 충격력 해석을 위한 시스템 모델링기법을 제시하였다.
- (2) 실험장치를 통한 실질 충격력 측정실험을 수행하여 해석결과를 검증하였다.
- (3) 고충격 시스템의 설계 파라미터에 대한 전달력 특성에 대한 감도해석을 수행하였다.
- (4) 시스템에서 발생한 충격력을 저감 시키기 위한 주요 파라미터 값의 최적화를 수행하였다.

## 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