

# 발사충격을 고려한 수동충격저감기의 위상최적설계

## Topology Optimization of Passive Shock Isolator with Application to Ballistic Shock

왕세명† · 임국희\*

Semyung Wang, Kookhee Lim

**Key Words :** Passive Shock Isolator (수동충격저감기), Topology Optimization(위상최적설계)

### ABSTRACT

Topology optimization of improved passive shock isolator by controlling its force-deflection relation is proposed. And the final design which is optimized using topology optimization is obtained using shape optimization. The proposed methods are applied to a numerical example using two dimensional-axisymmetric condition. And the performance of finally optimized design is verified through transient analysis using LS-DYNA. The ballistic shock isolator model is developed as a result of topology optimization. The optimized design has more improved shock absorbing capability comparing to the linear shock isolator by about 20%.

### 1. 서론

보통 충격 현상은 비교적 짧은 시간 동안에 가해지는 적당히 큰 진폭의 동적 가진이라고 말할 수 있다. 충격 문제는 기본적으로 천이 현상이므로 정상 상태의 거동을 보는 진동 문제와 구분하여 연구되어왔다. 물체에 충격이 가해지게 되면 가속도로 표현되는 과도한 충격력에 의해 일부 혹은 전체 부분의 응력이 항복값을 초과하여 제 기능을 잃게 된다. 전자제품의 낙하, 충돌과 제품 운송 과정 등에서 생기는 기계적인 충격과 추진제를 이용한 탄의 발사나 폭발을 이용한 인공위성의 분리 등의 의도하지 않은 충격들로부터 구조물을 보호하기 위해 여러 가지 충격 저감기가 개발되어 왔다. 최근에는 더욱 작은 공간에서 많은 양의 충격 저감 효과를 갖는 구조의 개발이 이루어지고 있다. 일반적인 충격 저감기는 시스템의 공진 주파수와 하중 저장 능력으로 특징지어진다. 이 두 가지 요소는 충격량 저감을 위해 공진 주파수를 줄이면 강성이 작아짐으로 인해 하중 저장 능력이 줄어들어 이를 보충하기 위해 충격 저감기의 크기를 늘려야 하기 때문에 서로 상충적이다. 충격 저감기의 하중 저장 요소로 주로 사용되는 선형 스프링이 대표적인 예이다. 하지만 하중 저장 요소로 softening 특성을 갖는 구조물을 사용하면 선형 스프링의 단점을 보완하고 충격 저감 능력을 향상시킬 수 있다. 하지만 충격 저감기가 가질 수

있는 최대 성능에 대한 연구는 많이 진행되었지만 최적 설계 기법을 이용하여 그것을 실현하는 것에 대한 연구는 미비한 상태이다.

본 논문에서는 일반적으로 사용되는 선형 특성을 갖는 충격 저감기의 성능을 향상시키기 위해 비선형 거동 특성을 부여하여 충격 저감 효과를 갖는 충격 저감기의 위상 최적 설계 기법을 제시하였다. 기본적으로 천이 현상으로 표현되는 충격 현상을 충격 저감기가 충격을 받는 시스템에서의 성능을 표현하는 힘-변위의 정적인 관계로써 표현하여 물리적인 시스템을 간단하게 표현하였다. 일반적으로 시간에 의존하는 거동에 대한 설계 민감도는 이산적으로 계산되는 각각의 시간마다 반복하여 민감도를 고려해야 하고 정식화 또한 매우 복잡하기 때문에 많은 시간이 요구된다. 반면 시스템의 목적함수를 정적 거동에서의 함수로 표현하면 보다 간단한 설계 민감도 식을 이용할 수 있어 최종 설계에 요구되는 시간을 줄일 수 있다. 거동 예측을 위한 정적 해석은 상용 유한 요소 코드인 ANSYS 를 이용하여 대변위 현상이 발생함을 감안한 기하비선형 효과를 고려하였다. Newton-Raphson 방법을 이용한 비선형 정적 시스템의 민감도를 고려하였고, softening 특성을 부여하기 위해 목표가 되는 힘-변위 관계를 이용하여 목적함수를 정의하였다. 위상 최적 설계의 목적함수는 complementary work 이 채택되었고

† 광주과학기술원 기전공학과  
E-mail : smwang@gist.ac.kr  
Tel : (062)970-2390, Fax : (062)970-2384

\* 광주과학기술원 기전공학과 대학원

제약함수는 최대하중에 대한 변위에 대한 함수가 사용되었다. 새로운 목적함수와 민감도의 계산 모델은 광주과학기술원 기전공학과 지능형 설계 연구실의 In-house 코드인 ANSTOP 에 탑재되었다. 본 논문에서 제시한 방법의 실제 연구에의 적용 가능성을 보기 위해 2 차원 축대칭 모델을 이용한 수치 예제를 제시하였다. 위의 모든 과정은 발사 충격 환경에 노출된 지능탄의 충격 저감기를 설계에 적용되었고 LS-DYNA 를 이용한 천이 해석을 통해 충격 저감 능력이 향상됨을 확인하였다

## 2. 충격저감기

### 2.1 충격

그림 1 과 같이 간단한 1 자유도의 지배방정식은 식 (1)과 같다.

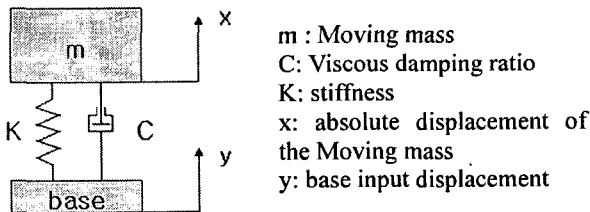


Fig. 1 Linear 1 DOF system under Shock Excitation

$$m\ddot{x} = c(\dot{y} - \dot{x}) + k(y - x) \quad (1)$$

상대변위를  $z = x - y$  를 이용하면 식(1)은 식(2)로 정의된다.

$$\ddot{z} + 2\xi\omega_n\dot{z} + \omega_n^2 z = -\ddot{y} \quad (2)$$

식 (2)에서  $\frac{c}{m} = 2\xi\omega_n, \frac{k}{m} = \omega_n^2$  이며  $\omega_n$  는 고유진동수,  $\xi$  는 감쇠계수이다. 그림 2 와 같은 충격 가진이 가해지면 그림 3 과 같은 시간의 응답과 그림 4 와 같은 SRS 로 나타낸다.

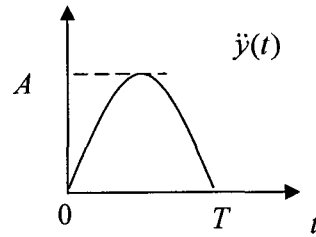


Fig. 2 Example of base excitation function

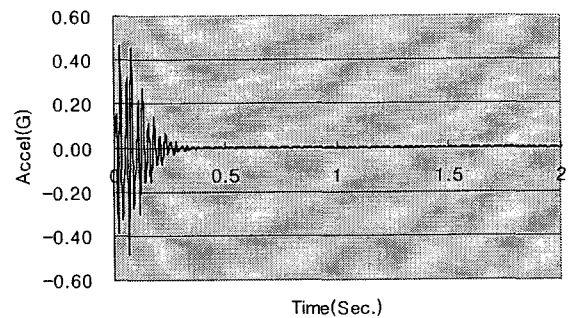


Fig. 3 Example of Shock Wave

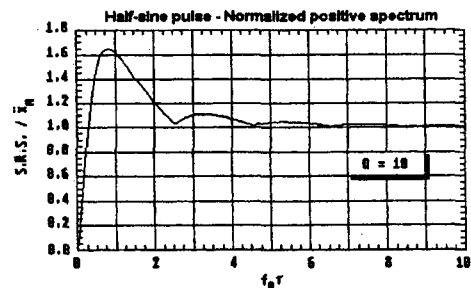


Fig. 4 Shock Response Spectrum

### 2.2 최적 충격저감 이론

그림 5 는 선형충격 감쇠기와 이론적으로 최적의 충격감쇠기를 나타낸다. 이때 최적 감쇠 가속도는 식 (3)과 같다.

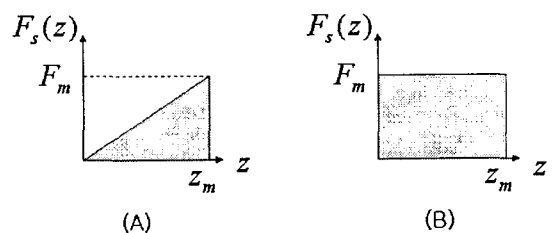


Fig. 5 Force-deflection curve for undamped isolator: (A) force-deflection curve of linear spring, (B) force – deflection curve of ideally optimized spring

$$z_m \ddot{x}_m = \frac{1}{2} \dot{y}_m^2 \quad (3)$$

식 (3)에서  $z_m$ 은 최대변위이고  $\dot{x}_m$ 은 최대가속도이다. 그림 5(B)는 이론적인 최적 충격감쇠이고 실질적으로는 그림 6 과 같이 강스프링과 약스프링이 있다.

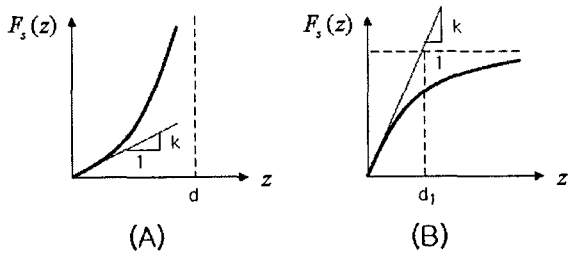


Fig. 6 Typical force-deflection curves for nonlinear spring:  
(A) hardening spring, (B) softening spring

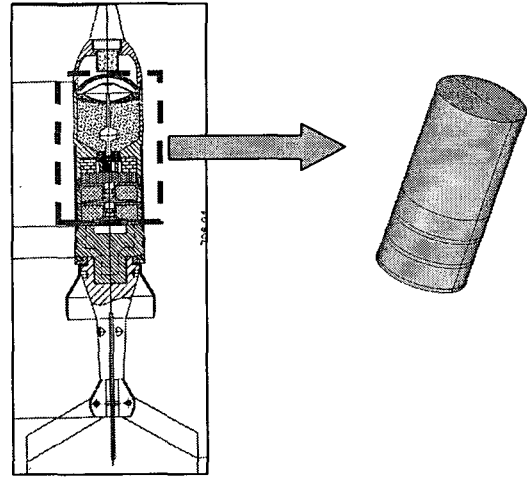


Fig. 7 The location of the submunition

### 3. 수동충격저감기의 위상최적설계

#### 3.1 기하비선형 설계민감도

기하비선형 정적시스템의 변분식은 식(4)와 같으며 1차변분식은 식 (5)와 같다. 보조변수법을 이용하여 함수  ${}^{t+\Delta t} \psi_r = \int_{\Omega} g({}^{t+\Delta t} \mathbf{z}, u + \tau \delta u)^p d\Omega_r$  의 설계민감도는 식 (6)이다.

$$a_{u+\tau \delta u}({}^{t+\Delta t} \mathbf{z}, {}_0 \bar{\mathbf{z}}) = \ell_{u+\tau \delta u}({}_0 \bar{\mathbf{z}}) \quad \text{for all } {}_0 \bar{\mathbf{z}} \in {}_0 Z \quad (4)$$

$$a_u'({}_0 \mathbf{z}; {}_0 \mathbf{z}', {}_0 \bar{\mathbf{z}}) = \ell'_{\delta u}({}_0 \bar{\mathbf{z}}) - a'_{\delta u}({}_0 \mathbf{z}, {}_0 \bar{\mathbf{z}}) \quad \text{for all } {}_0 \bar{\mathbf{z}} \in {}_0 Z \quad (5)$$

$$\delta \psi_r' = \int_{\Omega} g_u \delta u^0 d\Omega_r + \ell'_{\delta u}({}_0 \lambda) - a'_{\delta u}({}_0 \mathbf{z}, {}_0 \lambda) \quad (6)$$

#### 3.2 발사충격저감기의 최적설계

본 절에서는 그림 7 과 같은 스마트탄에서 충격저감을 위하여 그림 8 과 같이 1 자유도의 모델로 고려하였다. 이때 측정된 발사충격 가속도와 속도의 시간 변화는 각각 그림 9 와 그림 10 이다. 그림 11 과 같은 half-sine 의 충격으로 간략화하여 목적함수를 그림 12 와 같이 최적화 문제를 그림 13 과 같이 약스프링으로 위상최적설계를 수행하여 그림 14 의 결과를 얻었다.

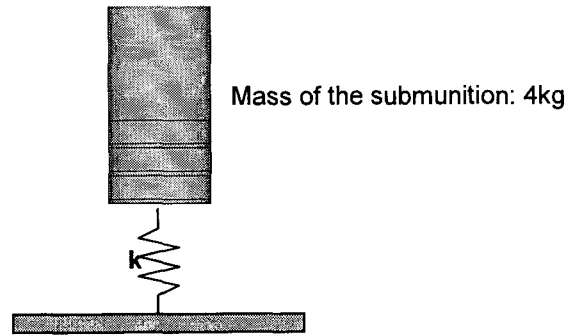
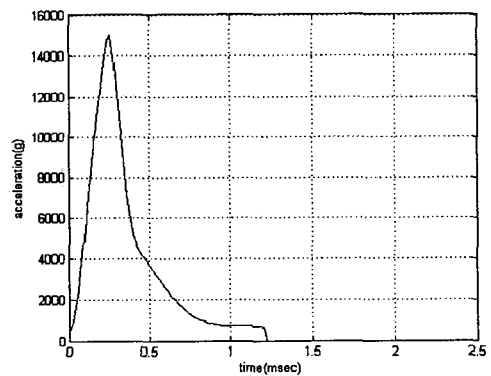


Fig. 8 1DOF model of the submunition



9 Shock input profile

Fig.

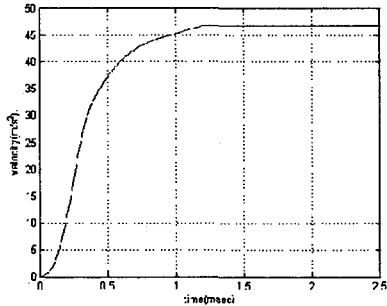


Fig. 10 Velocity change of the smart bomb

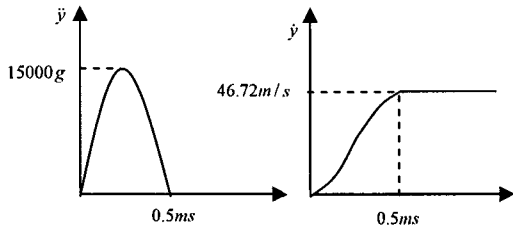


Fig. 11 Equivalent half-sine pulse and its velocity change

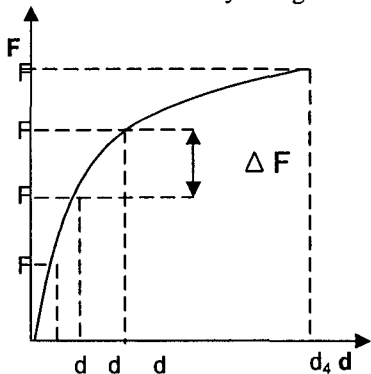


Fig. 12 Objective function - complementary work

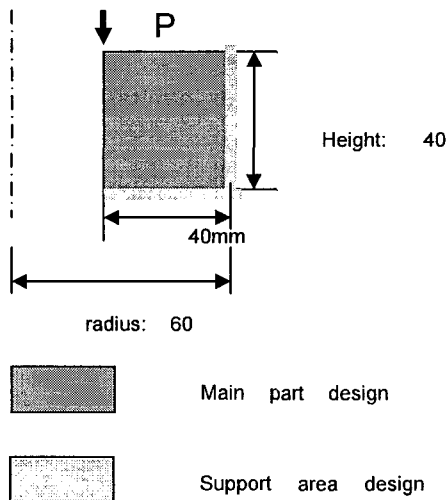


Fig. 13 Modified design domain

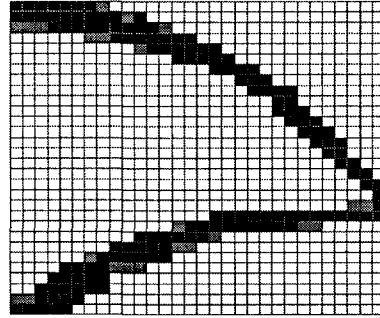


Fig. 14 Final result of the topology optimization

재해석을 통하여 선형충격저감기와 비선형충격저감기를 그림 15 과 같이 비교한 결과 20%의 저감 효과를 확인하였다.

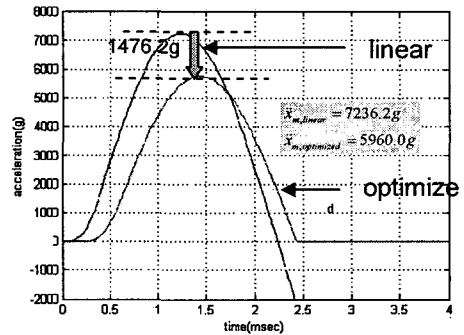


Fig. 15 Comparison of the acceleration responses between the linear shock isolator and optimized shock isolator

#### 4. 결론

발사충격과 같이 큰 충격의 저감을 위하여 수동 발사충격의 위상최적설계를 수행하였다. 충격가진을 half-sine 으로 간략화 하였고, 비선형 설계민감도를 보조변수법으로 구하였으며 스마트탄의 간략 모델에 적용하여 선형충격저감기에 비해 20%의 충격 저감 효과를 얻었다.

#### 후 기

이 연구는 최적설계 신기술 연구센터와 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

(1) Biot M.A., 'Theory of elastic systems vibrating under transient impulse, with an application to earthquake-proof buildings', Proceedings fo the National Academy of Science, 19, no 2, 1933, p. 262~268

(2) Snowdon, J. C., 'Isolation from mechanical shock with a mounting system having nonlinear dual-phase damping', 41st Shock and vibration Bulletin, 1970, p. 21~45

(3) M.S. Hundal, 'Response of shock isolators with linear and quadratic damping', Journal of Sound and Vibration, 76, 1981, p. 273~281

(4) C.M. Harris and R.E. Newton, 'Shock and Vibration Handbook', New York: McGraw-Hill, 1976

(5) Runling Pan, Jin Jian, 'Design of an optimal shock-damping isolator with application to casters', Journal of Sound and Vibration, 2004

(6) T.E. Bruns, D.A. Totorelli, 'Topology optimization of structures of nonlinear elastic structures and compliant mechanisms', Comput. Methods Appl. Mech. Eng. vol. 190, p. 3443~3459, 2001