

# 하중-변위 관계를 고려한 충격저감기의 위상최적설계

## TOPOLOGY OPTIMIZATION OF PASSIVE SHOCK ISOLATOR CONSIDERING PRESCRIBED LOAD-DISPLACEMENT FUNCTIONS

국정환\*• 왕세명†  
Junghwan Kook, Semyung Wang

### 1. 서론

일반적인 충격저감기는 시스템의 공진 주파수와 하중 저장 능력으로 특징지어진다. 이 두 가지 요소는 충격 저감을 위해 공진 주파수를 줄이면 강성이 작아지고, 하중 저장 능력이 줄어들어 이를 보충하기 위해 충격저감기의 크기를 늘려야 하기 때문에 서로 상충적이다. 충격 하중 저장 요소로 주로 사용되는 충격저감기는 선형 스프링이 대표적인 예이다. 하지만 하중 저장 요소로 softening 특성을 갖는 구조물을 사용하면 선형 스프링의 단점을 보완하고 충격 저감 능력을 향상시킬 수 있다. 지금까지 충격저감기가 가질 수 있는 최대 성능에 대한 연구는 많이 진행되었지만, 최적화 기법을 이용한 연구는 미비한 상태이다.

접시 스프링은 상대적으로 작은 공간에서 많은 충격 저감을 능력을 가진다. 접시 스프링의 하중-변위 특성은 변형률 에너지를 흡수하는 양과 깊은 관련이 있다. 구조물이 충격을 받을 때, 하중-변위 관계가 softening 을 특성을 가지는 충격저감기에서 외부의 가진 에너지는 구조물에 전달되지 않고 많이 소실된다. 이상적인 충격저감기의 설계는 충격저감기의 변위와 상관없이 일정한 하중을 유지하게 된다. 하지만, 이러한 설계는 하중과 변위를 제어하는 능동 충격저감기 외에는 수동 충격저감기로서 구현하기는 어렵다.

본 논문에서는 일반적으로 사용되는 선형 특성을 갖는 충격저감기의 성능을 향상시키기 위해 비선형 거동을 가지는 접시 스프링을 설계 영역으로 하여 softening 하중-변위 관계를 가지는 충격저감기의 위상 최적 설계 기법을 제시하였다.

Softening 거동을 위한 유한요소 해석은 기하비선형 효과를 고려하였고, 상용 유한요소 코드인 ANSYS 를 이용하여 Newton-Raphson 방법으로 비

선형 정적 시스템의 유한요소 해석을 수행하였다. 보조변수법을(Adjoint Variable Method)를 이용하여 목적함수에 맞도록 설계 민감도 값을 유도하였다. softening 특성을 부여하기 위해 목표가 되는 하중-변위 관계를 이용하여 목적함수를 정의하였고, 유한요소 해석에 의한 하중-변위의 결과가 목표가 되는 하중-변위 곡선과 일치하도록 설계 변수를 업데이트 하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 충격저감기의 이론적 최적 성능

최적의 충격 흡수 능력을 가지는 충격저감기는 실제로 상당히 높은 비선형을 가지는 스프링으로 설계가 될 수 있다. 일반적인 비선형스프링의 특성은 hardening 과 softening 형태로 나눌 수가 있다.

Softening 특성을 가지는 스프링의 경우 하중-변위 관계가 변위가 증가함에 따라서 하중이 줄어드는 형태를 가지고 있고, 그림(1)의 (B)와 같은 특성을 가진다. 다시 말해, 하중-변위 관계가 softening 을 가지게 되면 충격저감기의 성능이 향상된다. 본 연구에서는 충격저감기의 하중-변위 관계를 softening 성격을 가지도록 설계하는데 목적이 있다.

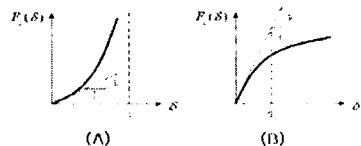


Fig. 1 Typical force-deflection curves for nonlinear spring: (A) hardening spring, (B) softening spring

#### 2.2 기하 비선형 유한요소법

비선형 유한 요소법의 계산인 Newton-Raphson 방법을 이용하여 구한 최종 비선형 평형방정식은

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

다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 P 는 residual out-of-balance 벡터이다.

$${}^T K \Delta u = P \quad (1)$$

보조변수법을 이용하여 기하 비선형을 고려한 민감도를 구하면 식(2)과 같다.

$$\frac{d\psi}{db} = \frac{\partial \psi}{\partial b} - \lambda^T \frac{\partial P}{\partial b} \quad (2)$$

설계 변수  $\eta$  의 관계와, 변위를 목적함수로 하는 위상 최적화의 설계 민감도는 다음과 같다.

$$\frac{d\psi}{d\eta_i} = \frac{P}{\eta_i} (\lambda^T F) \quad (3)$$

### 2.3 최적화 문제의 성립

최적화 과정에서 유한요소 해석의 결과가 원하는 하중-변위 곡선과 일치하게 되면 목적함수를 만족하는 충격저감기를 설계할 수 있다. 목적함수는 몇 개의 선택된 점에서 미리 규정된 변위와의 차이를 제공하는 값이 최소가 되도록 하였다. 목적함수와 구속조건은 식(4)과 같다.

$$\text{Min. } \psi = \sum_{i=1}^3 (d_{i,\text{lim}} - d_i)^2 \quad (4)$$

$$\text{s.t. } \int_{\Omega} \eta d\Omega \leq \beta V_0$$

$$0 < \eta_{\text{min}} \leq \eta_i \leq 1$$

여기서  $V_0$  는 체적,  $d_i$  는  $F_i$  에 의해 발생된 변위, 그리고  $d_{i,\text{lim}}$  충격저감기의 성능을 향상 시킬 수 있도록 미리 규정된 변위이다.

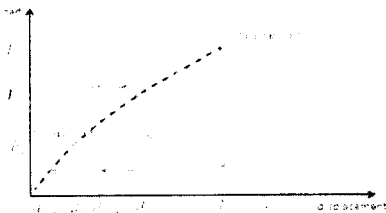


Fig. 3 The prescribed load-displacement curve with target points. The objection function is reduced the gap between the target point and the evaluated point.

하중-변위를 고려한 충격저감기의 최적설계를 위한 목적함수에 대한 민감도는 다음과 같다.

$$\frac{\partial \psi}{\partial \eta} = \sum_{i=1}^3 2(d_{i,\text{lim}} - d_i) \frac{\partial d_i}{\partial \eta} \quad (5)$$

$$= \sum_{i=1}^3 2(d_{i,\text{lim}} - d_i) \left( -\frac{P}{\eta} (\lambda^T F) \right)$$

### 2.4 충격저감기의 위상최적화

그림 4 는 충격저감기의 위상최적화를 위한 접시스프링을 기반으로 한 설계영역을 보여주고 있다. 위상최적화를 통해 얻고자 하는 하중-변위 곡선과 초기 하중-변위 곡선은 그림 5 의 ■ 와 \*와 이다. 초기 하중-변위 곡선은 위상최적화 과정 중에 원하는 형태의 하중-변위 곡선과 근접하게 되면 위상최적화가 완료되도록 하였다.

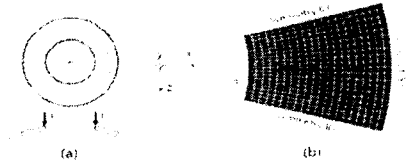


Fig. 4 (a) Boundary condition, (b) Design domain for shock isolator; 1 of 12 model.

그림 5 는 하중-변위 곡선을 고려한 위상최적화의 결과이다. 설계하고자 하는 하중-변위 곡선을 가지는 충격저감기를 위상 최적화를 통해서 설계할 수 있다.

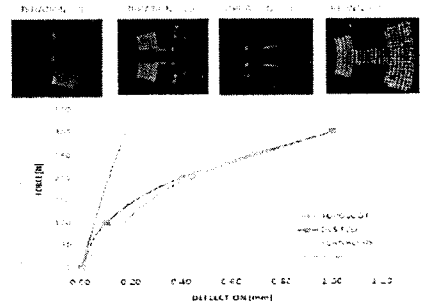


Fig. 5 Topology Optimization result and reanalysis result

## 3. 결 론

접시 스프링을 기반으로 충격저감능력을 향상 시키는 미리 규정된 하중-변위 곡선을 만족하도록 충격저감기의 위상 최적화 설계를 제안하였다. 비선형 설계 민감도를 보조변수법으로 구하고, 기하 비선형 해석을 통하여 목적함수를 만족하는 충격저감기 설계 설계에 적용하였다.