

## 일축 진동형 금속제진장치 형상 최적설계

윤지훈<sup>1</sup> · 박지운<sup>2</sup> · 임윤묵<sup>2</sup> · 윤길호<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 융합국방학과, <sup>2</sup>연세대학교 토목환경공학과, <sup>3</sup>한양대학교 기계공학과

## Shape Optimization of Uniaxial Vibrating Metal Damper

Ji-Hoon Yoon<sup>1</sup>, Ji-Woon Park<sup>2</sup>, Yun-Mook Lim<sup>2</sup> and Gil-Ho Yoon<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Convergence Defense, Hanyang Univ, 04763, Korea

<sup>2</sup>School of Civil & Environmental Engineering, Yonsei Univ, 03722, Korea

<sup>3</sup>Department of Mechanical Engineering, Hanyang Univ., 04763, Korea

### Abstract

This study performs the structural analysis and the optimum design of a vibrating metal damper to absorb vibration energy. Unlike other dampers such as rubber bearing, friction or viscose dampers, the present vibrating metal damper utilizes the plastic deformation of a steel and its associated hysteresis phenomenon to reduce vibrations of structures. To optimize this vibrating metal damper, it is important to obtain plastic deformation through the damper. To achieve this, the shape optimization method is developed and applied to find out optimal envelopes of the metal damper. Depending on the parameterization scheme, some novel optimal shapes can be found.

**Keywords** : structural analysis, optimum design, damping system, ABAQUS

### 1. 서 론

다리(Bridge), 원자력 발전소, LNG 저장탱크 및 고층 빌딩 등의 건축 구조물은 풍하중이나 지진과 같은 동하중에 의해 구조적인 결함 발생 확률이 높다. 이런 동하중에 대해 안전성을 확보를 위해 내진설계 관련 기준이 1988년에 제정되었고 내진 설계 의무화 대상 구조물들의 수는 증가되어 왔다. 하지만 소규모 구조물(특히 2층 이하 건물, 500제곱미터 미만)에 대해서는 자원에 맞고 있고 노후화된 구조물들의 제진보강이 원활히 이루어지고 있지 않고 있기 때문에 기준 제정 이전에 지어진 구조물들과 소규모 건축 구조물의 경우 여전히 지진에 취약하다(Kim, 2013).

동하중에 의한 구조 결함 발생 문제를 해결을 위해 더 구체적이고 다양한 내진설계 및 제진보강 관련 기술들이 개발 및 사용된다. 내진성능 향상 기술들은 크게 구조물의 강도를 증가시키는 내진, 지진하중의 전달을 분리하는 면진, 그리고 지진

하중을 분산하여 제어하는 제진기술 등으로 나누어진다(Kim, 1995). 이 세 가지 종류의 기술들 중 구조물을 이루는 부재들의 강도를 향상시켜 지진 하중에도 무너지지 않게 하는 내진기술이 가장 일반적으로 사용되고 있다. 최근에는 큰 지진에 의한 과도한 변형이나 파괴의 피해를 방지하기 위한 면진이나 제진 기술 역시 여러 구조물에서 적극적으로 활용되고 있다. 이러한 제진/면진 장치는 지진 다발지역에 건설되는 교량을 비롯한 대형 구조물들에 주로 설치되며, 고무 베어링이나 마찰 진자, 혹은 유압 완충 등의 방법 등으로 지진하중을 감쇄한다.

면진 장치의 경우 상부구조를 지진으로 인한 하부구조의 진동으로부터 분리시킴으로써 거더와 교각(혹은 기둥)을 파괴로부터 보호하지만, 약한 수평 강성으로 인하여 큰 변위가 발생할 우려가 있다(Deng *et al.*, 2013). 이와 같은 측면에서 지진으로부터 전달되는 진동에너지를 소산하는 역할과 대규모 변형의 제어라는 두 가지 목적을 모두 달성하기 위해서는 내진이나 면진 장치가 아닌, 제진장치를 사용하는 것이 더 적합하다.

\* Corresponding author:

Tel: +82-2-2220-0451; E-mail: ghy@hanyang.ac.kr

Received June 22 2017; Revised July 20 2017;

Accepted August 9 2017

©2017 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

본 연구는 최적설계를 통하여 가장 경제적이며 제진목적에 가장 적합한 형상을 갖는 금속제진장치의 형상설계와 이를 이용한 제진장치 개념을 제시한다. 공학에서 최적설계란 엔지니어가 목적함수와 여러 제약조건들을 제시하면 이를 만족하면서 최상의 성능을 발휘하는 설계를 찾아내는 수학적 기법을 의미한다. 이 연구에서는 최적설계를 이용하여 초기 설계의 성능보다 성능이 좋은 설계를 찾아 내었다. 본 연구가 대상으로 삼고 있는 금속제진장치의 경우 수동적 제진(Passive damping) 방식으로 진동을 감소시키는데, 이 경우 제진장치는 해당 부재의 강성을 통하여 감쇠 능력을 발휘하지만 너무 높은 강성을 가질 경우 진동감쇠 대상인 상부 구조물에 오히려 더 큰 진동에너지가 전달될 가능성이 존재한다(Kelly, 1999). 그러므로 지진에 의한 상부 구조물의 큰 변위 발생을 저지하는 효율적인 수동 제진장치(Passive damping device)의 설계를 위해서는 적정 수준의 감쇠력을 유지하고 지진하중에 의한 에너지를 최대한 소산하는 것이 무엇보다 중요하다.

## 2. 금속제진장치의 제안 및 구조해석 모델링 구축

### 2.1 금속제진장치의 개념 제시

제진장치는 일반적으로 점성 제진장치(Viscous damper)와 자기 유동식 제진장치(Magnetorheological damper, i.e. MR damper)방식의 장치들이 가장 널리 쓰이고 있으나(Choi, *et al.*, 2007; Makris, *et al.*, 2004), 두 종류의 제진장치는 높은 가격, 낮은 내구성 그리고, 내부 점성 유체의 유실 가능성 등의 한계점들을 갖는다. 이에 반해 금속제진장치는 상대적으로 더 저렴한 비용, 우수한 내구성 및 설치의 편리성 등의 특징을 강점으로 가지고 있다.

Fig. 1의 금속제진장치는 우선 항복강도가 높은 구조물에 낮은 항복강도를 갖는 완충장치를 설치한다. 이후 지진이 발생하면 구조물을 지탱하는 주요 부재들에 앞서 금속제진장치가 Fig. 1(b)와 같이 하중을 받아 항복에 이르게 된다. 이 변형을 반복적으로 해서 금속제진장치는 진동 초기 단계에서의 에너지를 흡수하는 것으로 구조물의 파괴를 효과적으로 경감시킨다(Nakashima, *et al.*, 1996). 현재 금속제진장치로는 강철 전단 제진장치(Steel shear damper)나 불구속 버팀대(Unbounded braces)가 가장 대표적으로 사용되고 있다. 그러나 두 제진장치 모두 회복력이나 변형의 크기가 비교적 작은 건물들을 대상으로 설계되고 있다. 따라서 큰 규모의 구조물이나 교량을 위한 더 효과적인 설계의 금속제진장치가 필요하다.

본 연구에서 제시하는 금속제진장치의 기본적인 구조는

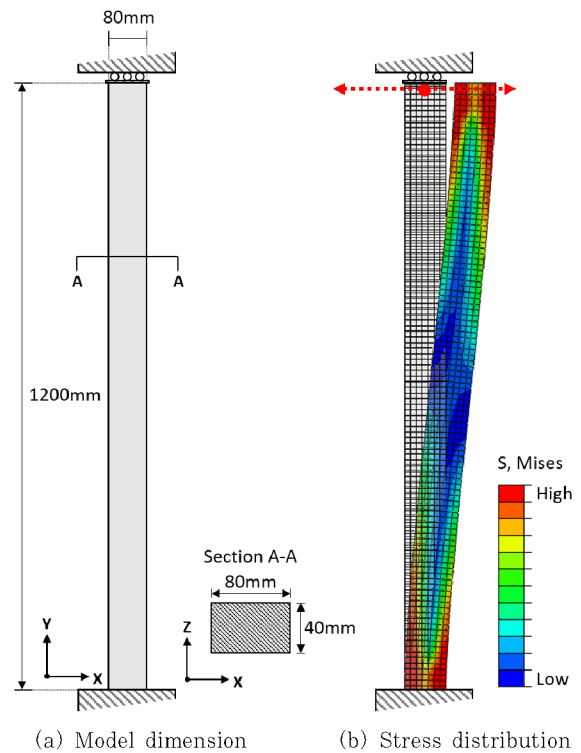


Fig. 1 Dimension and stress distribution of initial model.

Fig. 1과 같으며, 교량의 교각과 상부 구조물 사이에 설치되는 것을 목적으로 설계되었다. 구조물의 크기 및 최적화 이전의 기본 직사각형 형태는 일본 오다와라 시 고가교에 실제로 설치된 초고성능섬유강화콘크리트(PVA-ECC)를 사용하는 교량용 제진장치를 참고하여 제시하였다(Deng, *et al.*, 2014). 참고한 제진장치와 연구의 대상제진장치는 구조적으로 단순하여 설계 및 설치가 쉽다는 점과 다축 방향의 진동에너지를 모두 소산하는 것이 가능하다는 점에서 유사하다. 다만 에너지 소산을 위한 연성 재료로 금속을 사용함으로써 본 장치가 더 저렴하다. 또한 구하기 쉽고 물성치가 충분히 보장되는 금속재료의 사용을 통해 안정적인 운용 및 쉬운 유지보수가 이루어질 수 있다.

### 2.2 구조해석 모델링

본 연구에서는 1축 방향의 진동에 대응하는 형상 최적화만을 고려하였다. Fig. 1과 같이 제진장치의 양단은 수직방향으로는 모두 고정되어 있으며 장치의 상단에 수평방향으로 한 주기의 반복하중이 가해진다고 가정한다. 반복하중 조건은 부재 한쪽 끝단에 고정된 기준 지점에서 일정한 속도로 변위가 가해지는 과도상태 응답해석으로 주어졌으며 Fig. 2(a)의 변위하중을 이용하여 한주기의 반복하중 해석을 수행하였다. 재료는 완전 소성이 전제되었고 연강인 ASTM-a36 Steel을 참고하여 일반적인 물성치를 선정하였으며, 항복강도는 250MPa, 포아

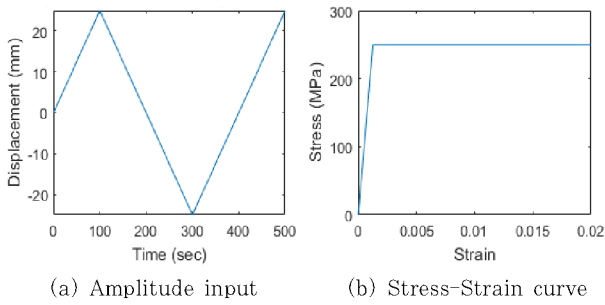


Fig. 2 Stress-Strain curve of assumed material and amplitude of the cyclic load condition.

송비 0.26, 탄성계수 값은 200GPa를 사용하였다. 재료에 관한 응력-변위 곡선은 Fig. 2(b)에서 확인할 수 있다. 상용 프로그램인 ABAQUS를 통하여 모델링 및 유한요소해석을 수행하였으며 Python script를 통하여 히스테리시스 루프를 결과 값으로 추출하였다.

### 3. 제진장치의 형상 최적화

#### 3.1 형상 최적설계 정식화

교량용 금속제진장치의 재료사용의 효율화 및 성능 향상을 위하여 장치의 형상 최적화를 진행하였다. 진동감쇠장치, 제진 장치의 구조 최적화에 관해서는 이미 몇몇 선행연구가 이루어진 바 있는데, 이들 모두 J-형 금속 제진장치나 강철 전단 제진장치, 혹은 버팀대 부재 등 대다수 기존 제진장치의 개선을 목적으로

하고 있다(Kim, 1995; Nagai, *et al.*, 2004; Ohsaki and Nakajima, 2012; Lee and Yu, 2017). 이 중 강철전단패널 제진장치(Steel shear panel damper)의 형상 최적화에 관한 연구의 경우 ABAQUS를 통한 유한요소해석이나 Python을 통한 데이터 분석 및 자체 최적화 알고리즘을 이용하는 단면 최적화 등 본 연구와 방법론적으로 상당히 유사하지만, 최적화 목표를 부재의 잔류 변형을 최소화하는데 두는 해당 연구와 달리 본 연구는 제진장치로 인한 총 감쇠 에너지량의 최대화를 우선적인 목표로 삼는다는 점에서 차이점을 갖는다. 본 연구는 단축 진동조건에서 진동에너지 소산의 최대화를 위한 제진 장치의 형상 최적화를 수행하였다.

$$\begin{aligned} & \text{Max}_{x,y} \quad E(x,y) \\ & \text{Subject to } V(x,y) \leq V^0 \\ & \quad \quad \quad -30 \leq x \leq 30, 300 \leq y \leq 900 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, 히스테리시스로 인한 에너지 소산은 E로 나타냈으며 형상을 결정하는 Control point의  $x$  및  $y$  좌표 벡터는 각각  $x$ ,  $y$ 이다. 부피와 허용 부피는 각각  $V$ 와  $V^0$ 이다.

#### 3.2 형상 설계변수 설정

제진장치의 형상을 그리는데 ABAQUS의 스플라인 기능을 사용하였고, Control Point를 조정 변수로 삼아 이를 변경하면서 최적설계를 진행하였다. 이와 같은 최적 설계를 수행함

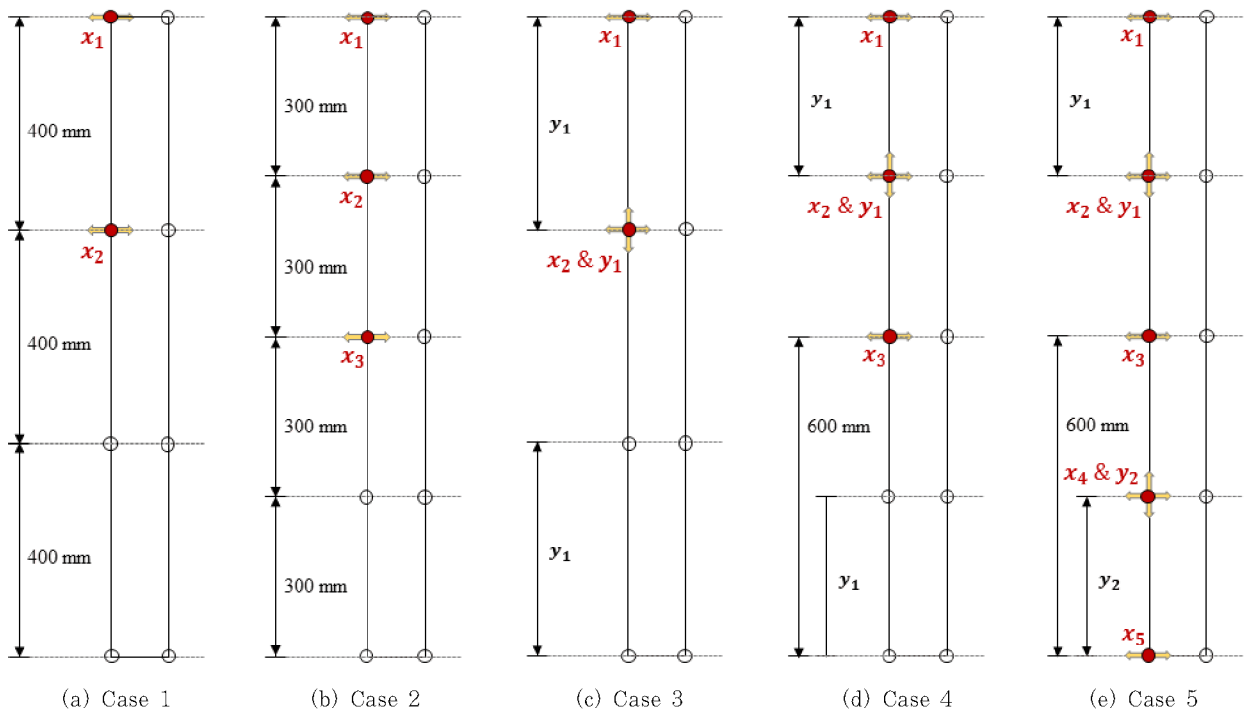


Fig. 3 Specification of optimization parameters for each of four cases.

에 있어 가장 큰 걸림들은 최적 설계의 값을 찾을 수 있는지 여부에 관한 문제로, 이 연구에서는 점차적으로 변수를 증가시키며 그 가능성을 판단하고 다음 단계로 발전시키고자 하였다. 따라서 본 연구에서는 변수의 점차적 증가에 따른 형상의 변화 및 설계 변수의 영향을 살펴보기 위해서 아래 5개의 경우를 고려하였다.

Case 1에서는 Fig 3(a)의  $x_1, x_2$ 가 각각 스플라인의  $x$  좌표를 의미하며 식 (1)에서처럼 -30~30의 범위에서 움직인다.

Case 2는 Fig 3(b)의  $x_1, x_2, x_3$ 가 각각 스플라인의  $x$  좌표를 뜻하며 식 (1)에서처럼 -30~30의 범위에서 움직인다.

Case 3는 Fig 3(c)의  $x_1, x_2$ 는 각각 스플라인의  $x$  지점을 뜻하며,  $y_1$ 은  $x_1$ 과  $x_2$  사이의 거리이다. 식 (1)과 같이  $x_1, x_2$ 는 -30~30,  $y_1$ 은 300~450의 범위에서 움직인다.

Case 4에서  $x_1, x_2, x_3$ 는 각각 스플라인의  $x$  지점을 뜻하며,  $y_1$ 은  $x_1$ 과  $x_2$  사이의 거리이다. 식 (1)과 같이  $x_1, x_2, x_3$ 는 -30~30,  $y_2$ 은 300~450의 범위에서 움직인다.

Case 5에서  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$ 는 각각 스플라인의  $x$  지점을 뜻한다.  $y_1$ 은  $x_1$ 과  $x_2$  사이의 거리이고,  $y_2$ 는  $x_4$ 과  $x_5$  사이의 거리이다. 식 (1)과 같이  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$ 는 -30~30의 범위에서 움직인다.  $y_1$ 은 300~500의 범위에서 움직이며,  $y_2$ 는 700~900의 범위에서 움직인다.

최적화에는 SQP 알고리즘을 이용하며 각 변수를 Python script에서 지정하고 해석한 뒤, 결과 그래프를 얻어낸다. 변수를 변경 후 재해석하고 결과 그래프를 얻어낸 뒤 기존에 얻은 그래프와 비교하여 목적함수로 지정한 최대 그래프 면적을 얻을 때까지 제약조건에 맞게 변수를 변경하면서 최적 값을 찾게 된다.

### 3.3 형상 해석결과

Case별 형상 최적화 및 FEM 해석을 수행한 결과는 Fig. 5과 Table. 1에 정리되어 있다. Case별 반복계산 횟수는

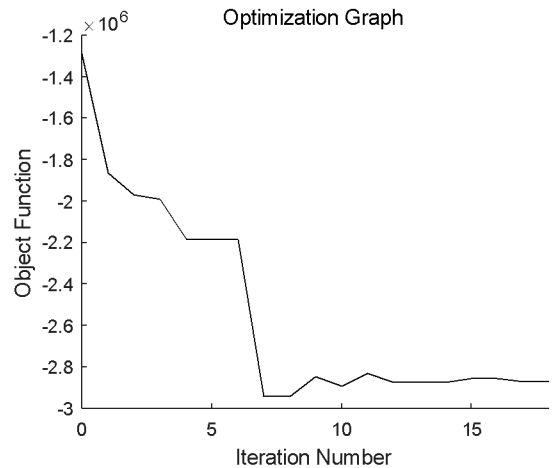


Fig. 4 Optimization history curve of Case 5.

20회 정도되며, 대표적으로 Case 5에 대한 목적함수의 변화는 Fig. 4에 명시되어 있다. 횡진동에너지 소산량 측면에서 각 Case 모두 Initial model 대비 50~70% 정도의 성능향상을 보이고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 상당한 량의 증가라고 볼 수 있으며, 이에 따라 시공 및 가공비용의 증가에도 본 결과와 같이 형상 최적화를 거친 금속 제진장치를 사용하는 것이 결론적으로 경제적인 측면에서 더 유리하다.

최적화 형상 면에서 Fig. 5의 (a), (c)와 (b), (d)를 비교해 보면, Case 1과 Case 3의 경우와 같이 수평방향 변수가 2개 일 경우 단순하게 중앙부로 갈수록 단면이 좁아지는 모양으로 수렴되지만 Case 2와 Case 4의 경우 상하단부와 중앙부의 단면 감소 정도가 다르며 결과적으로 모래시계 형태의 형상을 갖게 되는 것을 확인할 수 있다. 수평방향 변수가 증가할수록, 즉 형상이 모래시계 형태로 나타날수록 스트레스는 더 부재 전체로 퍼지는 경향이 드러났으며 그에 따라 진동소산에너지, Hysteresis loop의 면적 또한 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 반면 수직방향 변수의 유무는 상대적으로 수평방향 변수의 개수 조건에 비하여 Hysteresis loop의 면적 증가에 더 적은 영향을 미친다. 한편, Fig. 5의 (e)를 보면 Case 5의 경우는 대칭 조건 없이 수평방향으로의 변수와 수직방향으로의 변수의 위치를

Table 1 optimization results(Initial hysteresis loop area: 1.412kNm)

	Case 1		Case 2		Case 3		Case 4		Case 5	
Optimal values(mm)	$x_1$	29.85	$x_1$	19.72	$x_1$	29.73	$x_1$	17.10	$x_1$	19.48
	$x_2$	-10.85	$x_2$	2.24	$x_2$	-13.59	$x_2$	1.34	$x_2$	-13.97
			$x_3$	-22.20	$y_1$	449.76	$x_3$	-23.22	$x_3$	-26.08
							$y_1$	323.79	$x_4$	-8.08
									$x_5$	18.54
									$y_1$	473.62
									$y_2$	788.48
Hysteresis loop area(kNm)	2.105		2.426		2.239		2.434		2.450	
Improvement	49.08(%)		71.81(%)		58.57(%)		72.38(%)		73.51(%)	

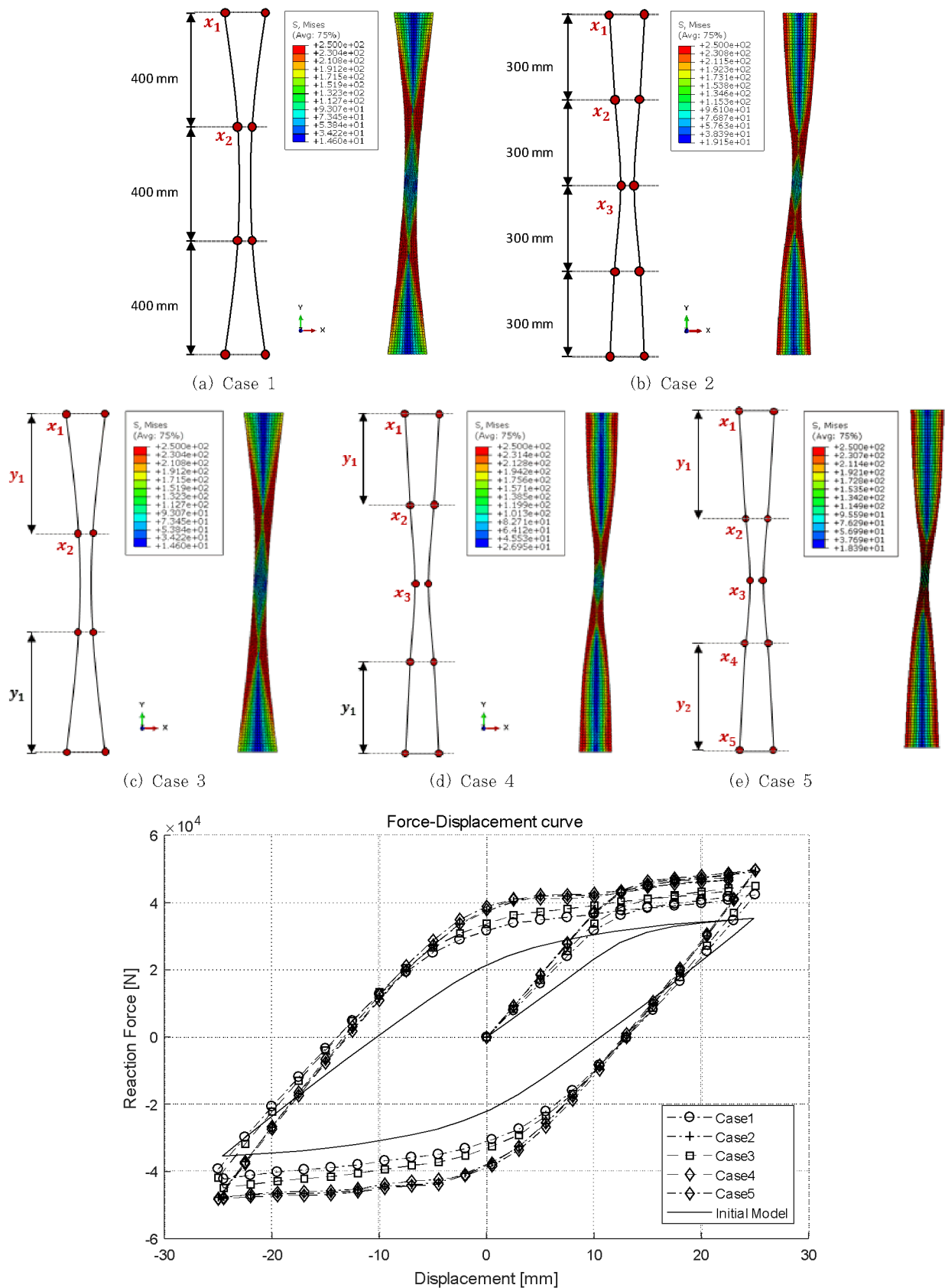


Fig. 5 Location of horizontal variables, shape and stress distribution of optimized models and force-displacement curve

상하방향으로 위치시켜 최적화를 진행하였다. 이 경우 상하 대칭조건을 가진 Case 4의 경우와 동일한 시간이력곡선을 얻을 수 있었으며, 최적형상 역시 대칭적으로 형성되는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구를 통하여 동일한 구속조건과 동일 양의 재료 사용 조건 하에 1축 방향 진동 하중에 대한 제진장치의 진동에너지 흡수량이 형상의 변화에 따라 초기 모델 대비 최대 73% 가량으로 증가하는 것을 파악하였다. 동일한 재질로 일정 부피를 유지하면서 설계한다고 가정했을 때, 상대적으로 제시된 부재의 중앙부 단면에 비해 양단부의 단면이 증가할수록 결과에 보다 더 큰 영향을 미친다는 점이 확인되었다. 도출된 결과를 이용하면 1축 방향으로 진동하는 구조물의 제진 효과를 최대 1.7 배가량 확대할 수 있을 것으로 기대된다. 현재는 1개축방향에 대해서만 연구가 진행되었지만 추후 연구에서는 2개축방향 혹은 그 이상의 조건에 대응한 최적설계가 진행될 계획이다. 또한 현재의 단순한 형상이 아니라 더 복잡한 형상의 금속제진장치에 관해서도 같은 과정을 통하여 제진효과를 최대화하는 최적화 형상을 찾아낼 수 있다.

#### 감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 첨단사이언스·교육허브개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2014M3C1A6038855).

#### References

Choi, K.M., Jung, H.J., Cho, S.W., Lee, I.W. (2007) Application of Smart Passive Damping System using MR Damper to Highway Bridge Structure, *J. Mech.*

*Sci. & Tech.*, 21(6), pp.870~874.  
 Deng, K., Pan, P., Sun, J., Liu, J., Xue, Y. (2014) Shape Optimization Design of Steel Shear Panel Dampers, *J. Construct. Steel Res.*, 99, pp.187~193.  
 Deng, K., Pan, P., Wang, C. (2013) Development of Crawler Steel Damper for Bridges, *J. Construct. Steel Res.*, 85, pp.140~150.  
 Kelly, J.M. (1999) The Role of Damping in Seismic Isolation, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 28(1), pp.3~20.  
 Kim, D.H. (1995) Development Status of Seismic Isolation Technology for Structures Considering Earthquakes, *Noise & Vib. Eng.*, 5(1), pp.11~20.  
 Kim, E.S. (2013) Field Survey about Seismic Retrofit of Existing Building in San Francisco, *Korea Ist. Struct. Maint. & Insp.*, 17(4), pp.68~73.  
 Lee, S.H., Yu, E.J. (2017) Model Updating of a RC Frame Building using Response Surface Method and Multiobjective Optimization, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 30(1), pp.39~46.  
 Makris, N., Zhang, J. (2004) Seismic Response Analysis of a Highway Overcrossing Equipped with Elastomeric Bearings and Fluid Dampers, *J. Struct. Eng.*, 130(6), pp.830~845.  
 Nagai, S., Kaneko, T., Kanda, T., Maruta, M. (2004) Structural Capacity of Reinforced PVA-ECC Dampers. In 6th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes (1227-1236).  
 Nakashima, M., Saburi, K., Tsuji, B. (1996) Energy Input and Dissipation behaviour of Structures with Hysteretic Dampers, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 25(5), pp.483~496.  
 Ohsaki, M., Nakajima, T. (2012) Optimization of Link Member of Eccentrically Braced Frames for Maximum Energy Dissipation, *J. Construct. Steel Res.*, 75, pp.38~44.

#### 요 지

본 연구는 진동에너지를 흡수하기 위한 진동 금속 댐퍼의 구조 해석과 최적 설계를 수행한다. 고무 베어링, 마찰 또는 점성 댐퍼와 같은 다른 댐퍼와는 달리 이 금속제진장은 금속의 소성 변형과 그에 따른 히스테리시스 현상을 이용하여 구조물의 진동을 감소시킨다. 이 금속제진장치를 최적화 하려면 댐퍼를 통해 소성 변형을 얻는 것이 중요하다. 금속제진장치의 최적화된 형상을 찾기 위해 형상 최적화 방법을 적용하였다. 또한 매개 변수화 체계에 따라 일부 최적의 모양을 찾을 수 있다.

**핵심용어** : 구조해석, 최적설계, 금속제진장치