

토글 가새-MR감쇠기 시스템의 제진성능평가

Performance evaluation of the toggle brace-MR damper system for vibration control

이 상 현 * 황재승 ** 민 경 원 *** 이 명 규 ****
Lee, Sang-Hyun, Hwang, Jae-Seung, Min, Kyung-Won, Lee, Myoung-Kyu,

ABSTRACT

In this paper, the performance of a toggle brace-MR damper system is evaluated for the control of the structure excited by earthquake load and the non-linearity of the toggle system is investigated. Considering that the control force of MR damper described by Bingham model is a function of velocity, velocity amplification factor by toggle brace system is calculated and the effect of toggle configuration on the amplification factor is also evaluated. Numerical results show that the control performance can be largely enhanced using toggle brace system especially for the case that the MR damper installed with conventional brace system such as Chevron and diagonal cannot provide enough control force under severe earthquake load.

1. 서 론

건물의 내진 및 내풍 성능을 개선하기 위한 방법에는 건물의 강성, 강도, 그리고 연성을 증가시키는 기존의 고전적인 방법에서부터 감쇠장치를 설치하여 구조물의 진동 에너지를 소산시키는 방법이 있다. 특히, 지진이나 바람에 의한 구조물의 진동은 강성보다는 감쇠에 의하여 더욱 효과적으로 저감되는 특성을 가지고 있기 때문에 감쇠장치를 이용하여 구조물의 내진 및 내풍 성능을 향상시키는 방법이 증가하고 있는 추세이다.

감쇠장치는 장치의 역학적, 기계적인 작동에 의하여 발생하는 힘(제어력)이 구조물의 속도와 상호작용을 일으킴으로써 구조물의 에너지를 소산시키는 기계장치이다. 감쇠장치는 크게 동조질량감쇠기, 동조액체감쇠기와 같이 부가 질량의 관성력을 이용하는 장치와, 점성 감쇠기, 마찰감쇠기, MR 감쇠기와 같이 장치의 양 끝 단에 발생하는 상대적인 변위, 속도, 그리고 가속도 등에 비례하는 감쇠력을 발생하는 장치로 구별할 수 있다 [1].

* 서울대학교 공학연구소 객원연구원

** 전남대학교 건축공학과 조교수

*** 단국대학교 건축대학 건축공학과 부교수

**** 단국대학교 건축대학 건축공학과 석사과정

구조물의 상대적 물리량에 기반하는 감쇠장치는 장치의 양단을 구조물의 층과 층 사이에 고정시킬 수 있는 별도의 가새 시스템이 필수적으로 사용된다. 그러나, 감쇠장치의 크기의 한계, 설치상의 제약조건으로 인하여 감쇠장치가 연결되는 지점은 구조물의 크기에 비하여 매우 작은 값을 가지며, 일반적으로 큰 강성을 가지는 건축 및 토목구조물의 경우 작은 지점간에 발생하는 변위, 속도, 가속도는 매우 작은 값을 가진다. 이러한 작은 크기의 물리량에 비례하는 감쇠력을 발생시키는 감쇠장치가 적정수준의 제어효과를 가지기 위해서는 감쇠장치의 용량이 커지거나 다수의 감쇠장치가 사용되어야 한다. 특히, 일반적인 가새 시스템인 대각형이나 웨브론 형태의 가새는 구조물의 층간 변위보다 작은 크기의 변위가 가새에 발생하기 때문에 이러한 문제는 더욱 심각해진다.

가새 시스템에 의하여 구조물의 상대변위 등이 증폭되어 감쇠장치 양 끝단에 전달된다면 그 증폭된 비율만큼 감쇠장치의 용량을 줄이거나, 또는 그 비율만큼 같은 용량의 댐퍼에 의하여 더욱 큰 제어효율을 가질 수 있다. 변위를 증폭하거나 역으로 감소시켜 힘을 전달하는 장치 중의 하나가 토글이다. 토글은 기계장치에 매우 광범위하게 사용되고 있으며, 작용 매커니즘에 따라 분쇄기, 압축기, 그리고 충격완화장치 등으로 응용되고 있다 [2]. 건축 및 토목 구조물의 경우 최근 수년간 토글 매커니즘을 이용하여 진동을 줄이기 위한 연구가 수행되었다. Constantinou 등은 선형 점성감쇠기에 상부, 하부, 그리고 역 토글 시스템을 적용하여 그 효과를 실험적으로 검증하였으며, 가새의 설치형상과 연결방법에 따른 증폭비의 변화를 알아보고 변형의 크기가 작은 경우에 사용할 수 있는 선형 증폭비 산정식을 제시하였다 [2]. Constantinou 등, 강성덕 등과 황재승 등은 토글 두 개가 결합된 가위(scissor) 형태의 가새 시스템을 사용하였다 [3-5]. 그리고 Gluck과 Ribakov는 구조물의 변위의 방향에 관계없이 항상 감쇠기와 연결된 케이블에 인장력이 걸리는 시스템을 제안하여, 일반적인 토글시스템에서 좌굴방지를 위해 가새의 크기가 과도하게 커지는 단점을 보완하였으며, 그 효과를 MR감쇠기를 사용하여 검증하였다 [6].

본 연구에서는 기존의 가새 시스템에서 고려되지 않았거나 간과되었던 토글 시스템의 기하학적 비선형성을 고찰하고, 토글 시스템을 이용하여 설치된 MR감쇠기의 구조물의 진동제어 성능을 평가하고자 한다. 감쇠장치의 변위가 구조물의 변위의 선형함수가 아니라 비선형함수인 경우에는 변위증폭비와 속도증폭비는 다르며, 일반적인 감쇠장치의 감쇠력이 속도의 함수인 점을 고려하면 이러한 비선형성은 반드시 고찰되어야 한다. MR감쇠기의 감쇠력은 Bingham모형을 사용하였으며, Lagrange 방정식을 이용하여 토글에 의해 증폭된 MR감쇠기의 감쇠력을 계산하였다. 기존의 대각가새시스템과 웨브론가새시스템을 사용하여 MR 감쇠기가 설치된 경우와 토글 시스템을 적용하였을 때의 제어성능을 비교하여 토글 시스템의 효율성을 평가하였다.

2. 토글 시스템

2.1 기존의 개발된 토글 시스템

대표적인 토글 시스템은 다음과 같이 크게 두 가지 형태로 나눌 수 있다. 그림 1(a),(b),(c)의 토글 시스템 1은 Constantinou 등에 의해 연구된 시스템으로 양단이 모두 힌지인 두 개의 가새를 구조물의 층간에 설치하고, 두 가새의 연결부 혹은 그 근처와 구조물의 상부 혹은 하단부에 감쇠기를 연결한 형상을 가진다. 그림 1.(d)의 토글 시스템 2는 Constantinou등, 강성덕 등, 그리고 황재승 등에 의해 연구된 시스템으로 양단이 힌지인 4개의 가새를 가위 형태로 연결하고 가새접합부 사이에 감쇠기를 설치한 형태이다.

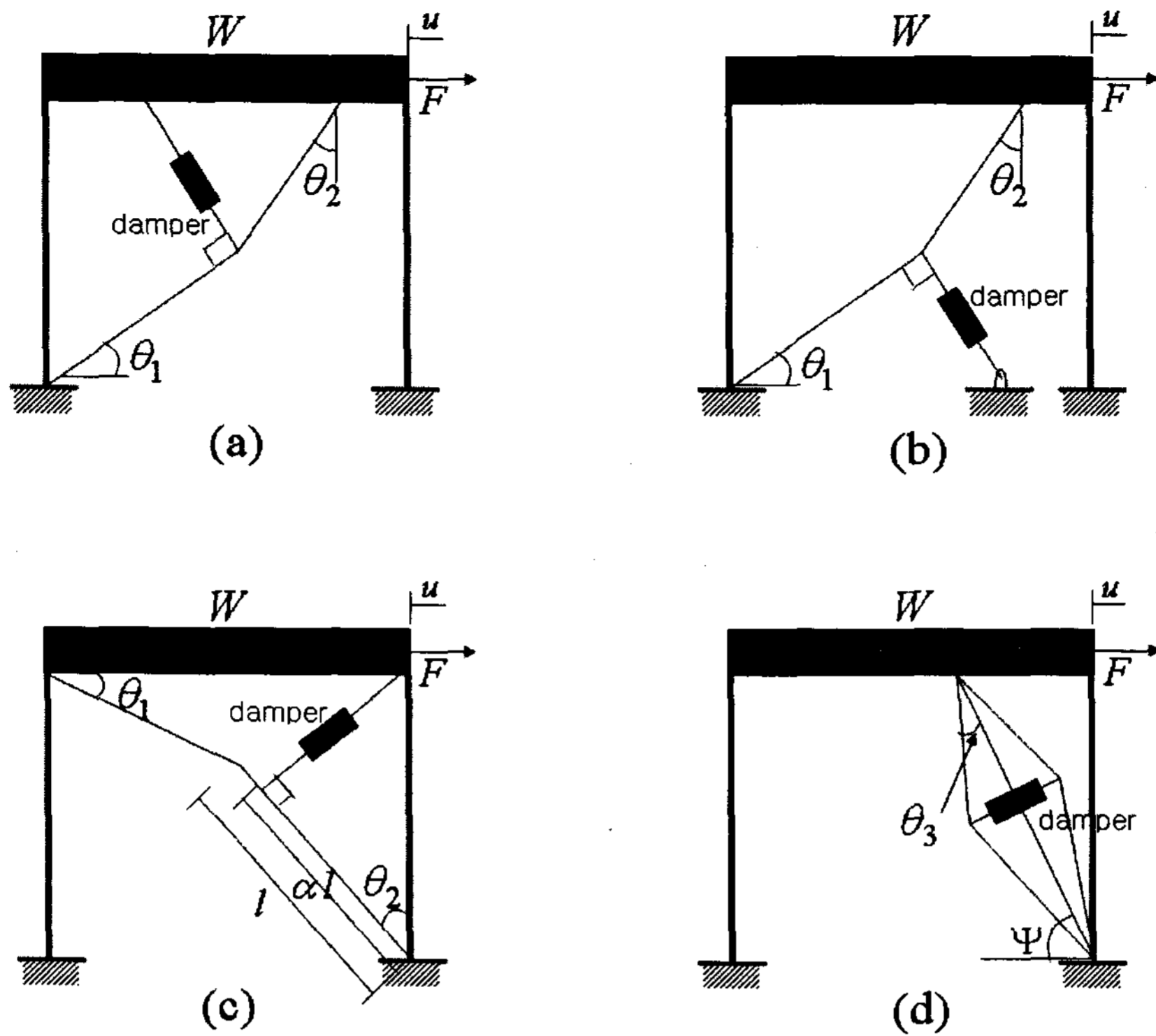


그림 1. 토글 시스템 1 (Constantinou)-(a),(b),(c); 토글시스템 2-(d)

(a)상부 토글, (b) 하부 토글, (c)역 토글 시스템, (d)가위-잭(scissor-jack) 토글 시스템

2.2 증폭 계수

감쇠기가 설치된 층의 층간 변위와 감쇠기의 양단에 발생하는 변위의 관계는 다음과 같은 관계식으로 표현될 수 있다.

$$u_D = a_d \cdot u \quad (1)$$

여기서, u 는 구조물의 층간 변위, u_D 는 감쇠기의 양단에 발생하는 변위 f 는 증폭계수를 나타낸다. 변위 증폭계수 a_d 는 일반적으로 층간 변위, 그리고 가새 시스템의 형상에 따라 결정되는 비선형 함수이다.

감쇠장치의 감쇠력이 속도의 함수인 경우에는 다음과 같이 (1)식의 양단을 시간에 대하여 미분하여 감쇠장치에 발생하는 속도를 구해야 한다.

$$u_D = a_d \cdot \dot{u} + \frac{da_d}{du} \dot{u}u = \left(a_d + \frac{da_d}{du} u \right) \dot{u} = a_v \cdot \dot{u} \quad (2)$$

증폭계수가 층간변위의 함수가 아닌 경우에는 다음과 같이 각 응답의 증폭비가 모두 동일해진다.

$$\frac{u_D}{u} = \frac{\dot{u}_D}{\dot{u}} = a_o \quad (3)$$

증폭계수가 층간변위의 함수인 경우에도 변형의 크기가 작다면 (3)식과 같이 증폭계수가 일정하

다고 가정할 수 있다. 다음 4식은 Contanitnou 등에 의해 얻어진 일반적인 웨브론, 대각가새시스템과 토글 시스템의 층간변위에 대한 감쇠기 변위의 선형 증폭비를 보여준다.

$$a_o = \cos \theta ; \text{ 대각가새} \quad (4-a)$$

$$a_o = 1 ; \text{ 웨브론가새} \quad (4-b)$$

$$a_o = \sin \theta_1 + \sin \theta_2 / \cos (\theta_1 + \theta_2); \text{ 상부토글} \quad (4-c)$$

$$a_o = \sin \theta_2 / \cos (\theta_1 + \theta_2); ; \text{ 하부토글} \quad (4-d)$$

$$a_o = -\cos \theta_2 + a \cos \theta_1 / \cos (\theta_1 + \theta_2); \text{ 역토글} \quad (4-e)$$

$$a_o = \cos \psi \tan \frac{\theta_3}{2}; \text{ 가위-잭 토글} \quad (4-f)$$

여기서, θ 는 대각가새가 바닥면과 이루는 각도이다.

2.3 상부 토글 시스템

그림 1.(a)에 보여지는 기존의 상부 토글시스템은 감쇠기의 축과 하나의 가새가 직각의 각도를 가진다. 이러한 형상을 가지는 경우 수식적으로 쉽게 증폭비가 얻어질 수 있는 장점을 가지지만, 실제 적용의 경우 여러 가지 이유에 의하여 직각과는 다른 각도로 설치될 수도 있다. 본 절에서는 이러한 점을 고려하여, 감쇠기가 구조물의 상부보와 연결되는 위치에 따른 증폭비의 변화를 알아보았다. 특히, 기하학적 비선형성을 고려하여 구한 변위증폭비, 속도증폭비와 기존의 연구에서 제시된 선형증폭비와의 비교를 수행하기로 한다.

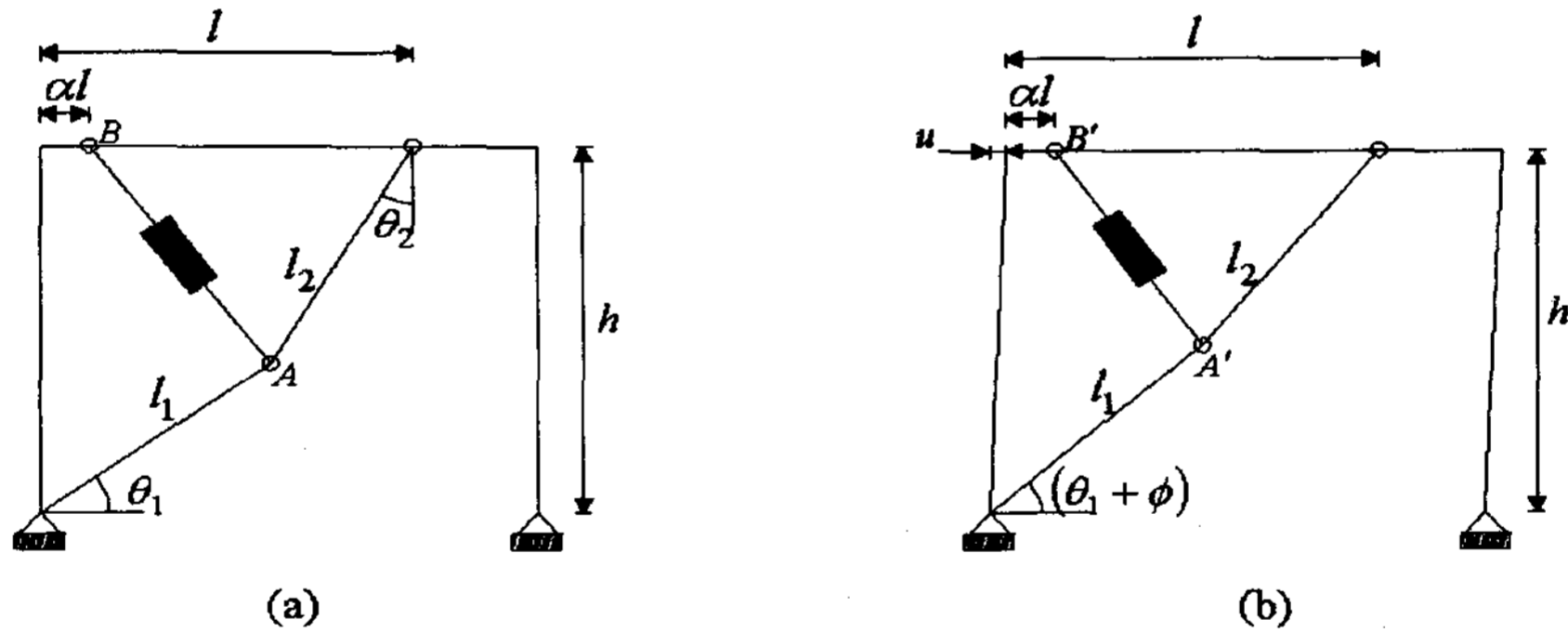


그림 2. 상부 토글 시스템; (a)변형 전 (b)변형 후

그림 2는 본 연구에서 사용한 상부 토글 시스템의 형상을 보여준다. 그림에서 l_1 과 l_2 는 가새의 길이이고, l 은 상부보에 연결된 가새와 골조단부 사이의 길이이며, α 는 감쇠기와 상부보의 접합부의 위치를 l 에 대한 비율로 나타내는 변수이다.

수평변위 u 에 대한 감쇠장치의 변위 u_d 와 그에 따른 변위증폭비는 다음과 같다.

$$u_d = |A'B' - AB| \quad (5)$$

$$a_d = u_d / u \quad (6)$$

절점 A,B, A', B'의 위치 다음과 같다.

$$A = (l_1 \cos \theta_1, l_1 \sin \theta_1), \quad B = (\alpha l, h) \quad (7-a)$$

$$A' = (l_1 \cos(\theta_1 + \phi), l_1 \sin(\theta_1 + \phi)), B' = (\alpha l + u, h) \quad (7-b)$$

l 과 골조높이 h 는 가새길이와 가새설치각도 θ_1 과 θ_2 를 이용하여 표현할 수 있다.

$$l = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 \quad (8-a)$$

$$h = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 \quad (8-b)$$

골조에 변위 u 가 발생하여도 가새길이 l_1 과 l_2 는 바뀌지 않을 조건은 다음과 같다.

$$(l + u - l_1 \cos(\theta_1 + \phi))^2 + (h - l_1 \sin(\theta_1 + \phi))^2 = l_2^2 \quad (9)$$

(9)식을 풀면 ϕ 를 구할 수 있다.

$$\phi = \sin^{-1} \left[\frac{h^2 + l^2 + (l + u)^2 - l_2^2}{2l_1 \sqrt{(l_1 + l_2)^2 - h^2}} \right] - \theta_1 - \tan^{-1} \left(\frac{l + u}{h} \right) \quad (10)$$

토글 시스템의 두 가새가 일 직선이 되는 경우에는 토글시스템의 가새가 강성체로 작용하게 되므로 층간변위는 다음과 같은 제한조건을 만족해야 한다.

$$u_{\max} = \sqrt{(l_1 + l_2)^2 - h^2} - l \quad (11)$$

그림 3은 $h=4.5\text{m}$, $l_1=3.0\text{m}$, $\theta_1=31.9^\circ$ 과 $\theta_2=43.2^\circ$ 인 경우에 α 와 골조변위 u 의 크기에 따른 속도 증폭비를 보여준다. $\alpha=0$ 일 때 최대값을 가지고 α 가 증가함에 따라 증폭비가 점차적으로 감소함을 알 수 있다. 이것은 현재의 기하형상에서는 감쇠기를 가새와 보와 기둥의 접합부에 연결하는 것이 가장 효율적임을 의미한다. α 가 약 0.8이상인 위치에서는 증폭비가 1보다 작아져 토글시스템이 의도한 대로 속도를 증폭시키지 못함을 알 수 있다. 변위의 크기가 양의 방향으로 증가할수록 증폭비는 커지는 경향을 보인다.

그림 4는 가새와 감쇠기가 직각을 이루는 경우에 변위의 크기에 따른 변위증폭비, 속도증폭비, 그리고 (4-c)식에 의해 주어진 선형증폭비를 보여준다. 그림 5에서 변위는 (11)식에 의해 주어진 최대변위 제한치에 의해 정규화 하였다. 예측한 바와 같이 선형증폭비는 변위의 크기에 관계없이 일정한 반면에 변위증폭비와 속도증폭비는 변위가 양의 방향으로 증가할수록 선형증폭비보다 커지고, 변위가 음의 방향으로 증가할수록 작아지는 경향을 보이며, 속도증폭비의 변화가 변위증폭비보다 큼을 알 수 있다.

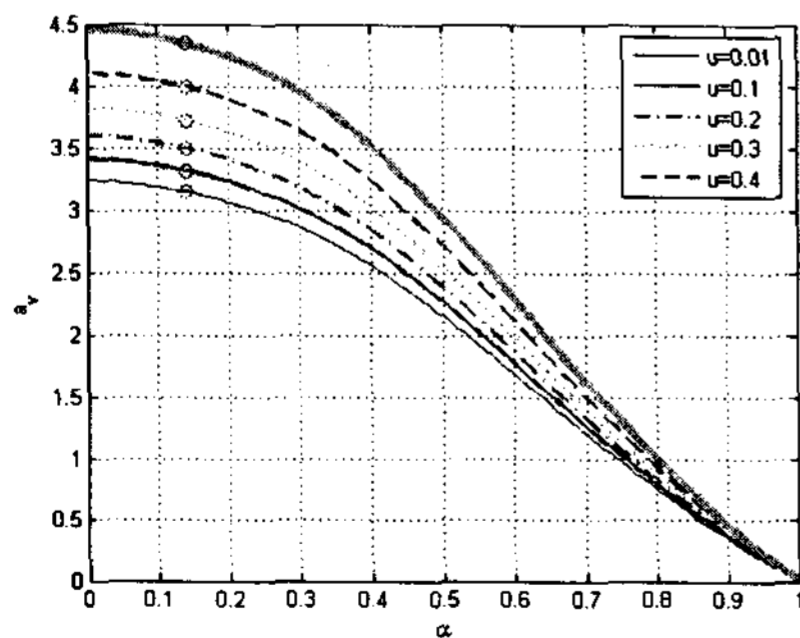


그림 3. 속도증폭비

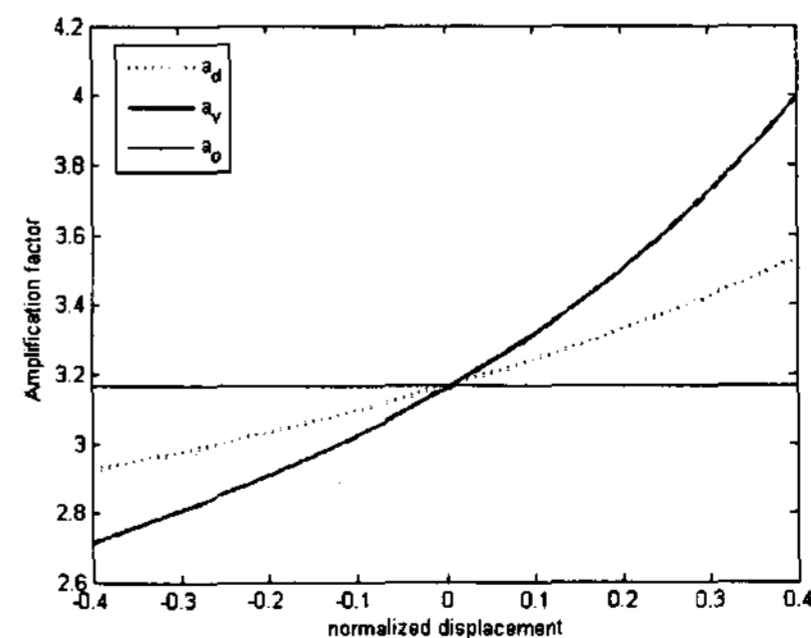


그림 4. 증폭비

2.4 토글시스템을 이용하여 설치된 MR감쇠기 감쇠력

MR 감쇠기에 의한 제어력은 다음과 같은 Bingham 모델을 사용하여 마찰력과 선형점성력의 조

함으로 표현될 수 있다.

$$F'_{MR} = f_y \operatorname{sgn}(\dot{u}_D) + C_o \dot{u}_D \quad (12)$$

(12)식에 의한 MR감쇠기 감쇠력에 의한 소산에너지는 다음과 같다.

$$D = f_y \operatorname{sgn}(\dot{u}_D) \dot{u}_D + \frac{1}{2} C_o \dot{u}_D^2 \quad (13)$$

(13)식에 (2)식을 대입하면 다음과 같다.

$$D = f_y \operatorname{sgn}(a_v \dot{u}) a_v \dot{u} + \frac{1}{2} C_o a_v^2 \dot{u}^2 = a_v f_y \operatorname{sgn}(\dot{u}) \dot{u} + \frac{1}{2} a_v^2 C_o \dot{u}^2 \quad (14)$$

Lagrange 등식을 이용하여 수평방향의 속도에 대한 MR감쇠기 감쇠력을 구할 수 있다 [12].

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{u}} = a_v f_y \operatorname{sgn}(\dot{u}) + C_o a_v^2 \dot{u} \quad (15)$$

(15)식으로부터 토글시스템이 웨브론 형태의 가새와 비교하여 마찰력은 α_v 배, 선형점성력은 α_v^2 배 증폭시킴을 알 수 있다.

3. 수치해석

제안된 토글 시스템의 유효성을 검증하기 위하여 3층 전단건물의 1층에 MR 감쇠기를 웨브론 가새, 대각가새, 그리고 상부 토글시스템을 이용하여 설치하고 응답제어효과를 살펴보았다. 3층 전단건물은 $m_i=10\text{ton}$, $k_i=9,800\text{kN/m}$, $c_i=14.07\text{kN} \cdot \text{s/m}$ ($i=1,2,3$)의 동일한 각 층 물적 특성을 가진다. $h=4.0\text{m}$ 이고, 대각가새의 설치각도는 31.9° 이고, 토글 시스템은 $l_1=4.0\text{m}$, $\theta_1=31.9^\circ$, $\theta_2=43.2^\circ$, 그리고 $\alpha=0$ 으로 설정하였다. 하중은 El Centro 지진하중을 사용하였으며, MR감쇠기의 감쇠력과 토글 시스템의 거동이 비선형인 점을 고려하여 하중의 최대 가속도가 0.1g, 0.3g, 1g가 되도록 크기를 조정하였다. MR 감쇠기는 $f_y=10\text{kN}$, $C_o=703.5 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 를 가진다. 제어효과의 비교를 위해 다음 성능지수를 사용하였다.

$$J_1 = \max_{i=1, \dots, n} \{ \max(d_i(t)) \} / d_o^{\max}, \quad J_2 = \max_{i=1, \dots, n} \{ \max(a_i(t)) \} / a_o^{\max} \quad (16-a)$$

$$J_3 = \max_{i=1, \dots, n} \{ \sigma_{di} \} / \sigma_{do}^{\max}, \quad J_4 = \max_{i=1, \dots, n} \{ \sigma_{di} \} / \sigma_{ao}^{\max} \quad (16-b)$$

다음 표 1은 각 시스템의 성능 지수를 보여준다. 선형 토글은 토글 시스템에 의한 증폭계수를 일정하게 설정하고 해석한 경우이며, 비선형 토글은 시간에 따라 변하는 비선형 속도 증폭계수를 사용하여 해석한 경우이다. 표 1로부터 가진 하중의 크기에 따라 MR감쇠기와 토글 시스템의 성능지수가 크게 좌우됨을 알 수 있다. 가진의 크기가 작은 경우에는 모든 시스템의 응답이 크게 줄어들었으며, 토글 시스템과 일반 가새 시스템의 성능차이는 크지 않다. 이 사실은 가진 하중의 크기가 작아 일반 가새 시스템에 의한 제어력의 크기로도 충분한 제어가 가능했으며, 토글 시스템에 의해 증폭된 제어력이 더 이상의 응답감소효과를 가져오지 못했음을 의미한다. 가진 하중의 크기가 증가함에 따라 일반적인 가새 시스템에 비하여 토글 시스템의 제어효과가 훨씬 우수해지며, 선형 토글과 비선형 토글의 차이도 증가한다. 선형 토글과 비선형 토글의 성능이 크게 차이가 나지 않은 이유는 그림 4에서 확인할 수 있듯이 구조물의 변위가 양수인 경우에는 선형 토글이 제어력을 과소평가하고 음수인 경우에는 과대평가하여 그 효과가 서로 상쇄되었기 때문이다. 따라서, 초기설계단계에서는 선형 토글 시스템을 사용하여도 큰 오차는 없을 것으로 판단된다. 그림 5는 지

진하중의 크기가 0.3g인 경우의 각 시스템에 의해 발생한 (15)식의 MR 감쇠기 제어력을 보여준다. 그림 5로부터 MR 감쇠기 제어력이 크게 증폭되어 수평방향의 거동에 영향을 줄 수 있다.

표 1. 성능지수

PGA		J ₁	J ₂	J ₃	J ₄
0.1g	쉐브론	0.308	0.415	0.147	0.193
	대각가새	0.349	0.488	0.182	0.211
	선형 토글	0.295	0.416	0.165	0.225
	비선형 토글	0.343	0.477	0.210	0.289
0.3g	쉐브론	0.614	0.647	0.361	0.367
	대각가새	0.702	0.716	0.440	0.443
	선형 토글	0.269	0.343	0.139	0.182
	비선형 토글	0.260	0.359	0.148	0.199
1g	쉐브론	0.847	0.814	0.625	0.625
	대각가새	0.890	0.866	0.701	0.701
	선형 토글	0.450	0.511	0.252	0.262
	비선형 토글	0.432	0.479	0.239	0.252

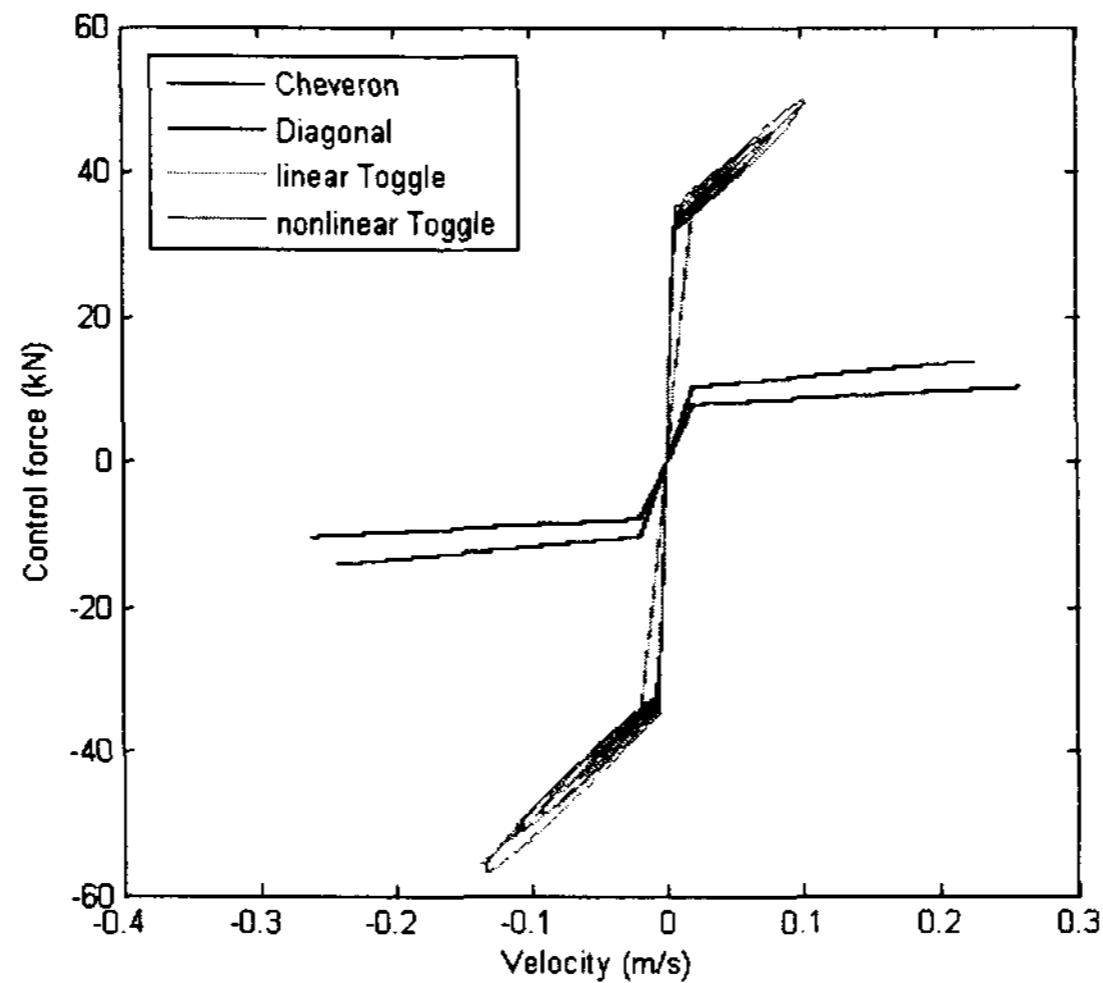


그림 5. MR 감쇠기 제어력

4. 결 론

본 연구에서는 토글 시스템을 사용하여 설치된 MR 감쇠기의 지진응답제어성능을 검토하였다. 기존의 개발된 상부 토글 시스템에서 감쇠기가 연결위치에 따른 응답증폭비의 변화를 알아본 결과 증폭비는 특정 위치에서 최대값을 가지는 것을 확인하였다. 그리고, 속도증폭비는 응답의 크기에 따라 변하는 비선형 특성을 가지고 있으며 MR 감쇠기의 제어력이 속도의 함수인 점을 고려할 때 이러한 비선형 속도증폭비가 MR감쇠기-토글 시스템의 설계에 고려되어야 함을 확인하였다. 수치해석 결과는 MR 감쇠기의 제어력이 가진 하중의 크기에 비하여 작아 기존의 가새 시스템으로는 충분한 제어성능을 확보할 수 없는 경우에, 토글 시스템을 사용하여 유효한 제어력의 크기를

중폭시킴으로써 제어성을 크게 향상 시킬 수 있음을 보여준다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-11584-0)지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Housner GW, Bergman LA, Caughey TK, Chassiakos AG, Claus RO, Masri SF, Skelton RE, Soong TT, Spencer BF Jr., Yao JTP, "Special issue structural control: past, present, and future", *Journal of Engineering Mechanics* Vol.123, 1997, pp.897-971.
2. Constantinou MC, Tsopelas P, Hammel W, Sigaher AN, Toggle-Brace-Damper seismic energy dissipation system, *Journal of Structural Engineering ASCE*, Vol.127, 2001, pp.105-112.
3. Constantinou MC, Dargush GF, Lee GC, Reinhorn AM, Whittaker AS, "Analysis and design of buildings with added energy dissipation systems", mceer.buffalo.edu/publications/resaccom/0001/rpa_pdfs/10Lee-ketter-2.pdf
4. 강성덕, 홍성목, 황재승, 주석준, 박지훈, 이상현, "준능동제어장치를 이용한 구조물의 진동제어", *대한건축학회 학술발표논문집*, Vol.17, 1997, pp.413-416.
5. 황재승, 이상현, 송진규, 홍성목, "토글-회전관성댐퍼를 이용한 구조물의 성능개선", *대한건축학회 학술발표논문집*, Vol.23, 2003, pp.47-50.
6. Gluck J., Ribakov Y, "Active viscous damping system with amplifying braces for control of MDOF structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.31, 2002, pp.1735-1751.