

회전관성댐퍼를 이용한 토글가새 시스템 개발 Toggle Bracing System Using the Rotational Inertia Damper

황재승* 이상현** 김준희*** 김장윤****
Hwang, Jae-Seung Lee, Sang-Hyun Kim, Joon-Hee Kim, Jang-Yun

Abstract

This study outlines the analysis of toggle system and the vibration control performance when the toggle-rotational inertia damper system was applied to a structure. Numerical analysis shows that the relative displacement of the structure can be amplified by amplification mechanism of the toggle system and the capacity of the damper can be reduced without the loss of vibration control performance. It is also observed that vibration control effects is caused by the increase of equivalent mass due to the rotational inertia of damper.

1. 서론

지진은 그 예측 불확실성과 사회, 경제적인 막대한 피해규모 때문에 재난대비를 위한 사회간접자본구축에 지속적으로 투자하고 있으며, 특히 구조물 붕괴 및 손상에 따른 인명, 재산피해를 최소화하기 위하여 세계각국에서는 구조물에 대한 내진 설계 기준을 제정, 시행하고 있다. 국내에서도 1988년 내진설계기준이 제정되어 시행되고 있으나 그 이전에 시공된 구조물이 많이 남아 있어 재난대비를 위한 적절한 내진보강이 요구되고 있는 실정이며, 고층 건물은 물론 중, 저층건물에 대한 내진 성능개선이 요구되고 있다.

반면, 고층건물의 경우에는 층고가 증가할수록 바람에 의한 영향이 급속히 증가하며, 이로부터 비롯되는 풍진동(wind-induced vibration)은 구조물 자체의 안전보다는 거주자의 주거환경을 크게 손상시켜 어지러움 증을 호소한다던가, 지속시간이 길어지게 되면 작업능률이 저하되어 정상적인 업무를 할 수가 없는 지경에 이르게 한다. 이러한 점을 감안하여 국제 표준화 기구(ISO6897)나 각국의 건축 기준^{1), 2)}에서는 바람에 의한 진동의 크기를 정량적으로 구분하여 각 진동의 크기와 사람이 느끼는 감지능력에 따라 구조물의 진동을 어느 한계이하로 제한하는 사용성(serviceability) 개선을 통하여 구조물의 내풍성능 향상을 유도하고 있다.

이러한 건물의 내진 내풍성능을 개선하기 위한 방법에는 건물의 강성을 증가시키는 기존의 고전적인 방법에서부터 제진장치를 설치하여 구조물의 진동 에너지를 소산시키는 인위적이고 적극적인 감쇠증가방법이 있다. 특히 지진이나 바람에 의한 구조물의 진동은 강성보다는 감쇠에 의하여 더욱 효과적으로 저감되는 특성

* 전남대 건축학부, 교수
** 서울대 대학원, 공학박사
*** 전남대 건축학부, 박사수료
**** 전남대 건축학부, 석사과정

을 가지고 있기 때문에 제진장치를 이용하여 구조물의 내진, 내풍성능을 향상시키는 방법이 증가하고 있는 추세이다.

제진장치는 장치의 역학적, 기계적인 작동에 의하여 발생하는 힘(제어력)이 구조물의 속도와 상호작용을 일으킴으로써 구조물의 에너지를 소산시키는 기계장치이다. 제진장치에 의하여 구조물에 전달되는 제어력은 크게 제진장치 질량에 의한 관성력에 기인하는 경우(TMD, AMD, HMD등)와 장치 양 끝단에 작용하는 상대적인 물리량(변위, 속도, 가속도등)에 기인하는 경우(점성댐퍼, MR댐퍼, 마찰댐퍼 등)로 구별할 수 있다. 상대적 물리량에 기반하는 제진장치는 장치자체를 곧바로 구조물에 설치할 수 없기 때문에 장치의 양단을 구조물의 층과 층사이에 고정, 안착시킬 수 있는 별도의 가새 시스템이 필수적으로 사용된다. 이러한 가새 시스템에서는 구조물의 진동에 의한 층과 층사이의 변위등이 최상층의 진동변위에 비하여 매우 작은 값을 가지기 때문에, 요구되는 적정 수준의 제어효과를 가지기 위해서는 댐퍼의 용량이 커지거나 다수의 댐퍼가 사용되어야 한다. 그러나 가새 시스템에 의하여 구조물의 상대변위등이 증폭되어 제진장치 양끝단에 전달된다면 그 증폭된 비율만큼 댐퍼의 용량을 줄이거나, 또는 그 비율만큼 같은 용량의 댐퍼에 의하여 더욱 큰 제어효율을 가지게 될 것이다.

이와같이 변위를 증폭하거나 역으로 감소시켜 힘이나 동력을 전달시키는 장치중의 하나가 토글이다. 토글 장치(토글 linkage)는 기계장치에 매우 광범위하게 사용되고 있으며, 메커니즘에 따라 분쇄기, 압축기, 충격완화장치등으로 응용되고 있다.³⁾

건축, 토목 구조물의 경우 Hibino(1989)⁴⁾을 비롯하여 최근 수십년 간 토글 메커니즘을 이용하여 구조물의 진동을 줄이기 위한 연구가 지속적으로 이루어졌으며, 근래의 Constantinou, M.C.(2001)의 연구에서는 토글-brace-damper를 이용하여 지진하중을 받는 구조물의 진동을 줄이는 방법을 제시하고 있다.⁵⁾

그러나 토글은 그 형상 및 구동방향에 따라 증폭되는 비율이 다르기 때문에, 선형 댐퍼일지라도 토글 메커니즘에 의한 비선형성 때문에 구조물에 전달되는 최종적인 제어력 또한 비선형성을 가지게 된다.⁶⁾ 또한 토글 장치에 일반적으로 사용되는 선형점성 댐퍼외에 새롭게 개발된 제진장치등을 토글 장치에 적용하여 그 성능을 평가하는 것도 필요하다.

이와 같이 본 연구에서는 기존의 연구에서 토글 시스템에 일반적으로 사용되는 선형점성댐퍼 외에 새롭게 개발된 댐퍼를 사용하였을 때의 진동제어성능을 평가하고 그 적용가능성을 제시하고자 한다. 이를 위하여, 본 연구에서 제안하고자하는 회전관성-점성댐퍼의 특성을 기술하고 이 댐퍼가 토글 장치와 결합된 토글 시스템의 진동제어성능을 평가하였다.

토글 시스템의 진동제어성능을 평가하기 위하여 1층의 단자유도계 모델에 대하여 수치해석을 수행하였으며, 증폭 메커니즘을 적용할때와 적용하지 않았을 때의 댐퍼용량크기등을 비교하였다.

2. 토글의 증폭비율

양 끝단의 상대적인 물리량에 따라 제어력이 발생하는 제진장치를 구조물에 설치하기 위해 사용되는 가새 시스템으로는 Chevron 가새(Chevron brace)나 대각가새(Diagonal brace)등이 있다.

Chevron 가새는 구조물의 상대변위가 제진장치의 양끝단에 그대로 전달되는 반면에 대각가새의 경우에는 대각가새가 수평방향과 이루는 각도(θ)에 따라 달라진다. 이와 같이 제진장치에 전달되는 구조물의 상대변위는 같거나 작게된다. 구조물의 층 사이의 상대적인 변위는 구조물에 작용하는 외란의 진동수분포 및 크기에 따라 달라지나, 수 cm에서 수 mm에 지나지 않는다. 이와 같이 매우 작은 변위, 이에 비롯되는 속도의 크기에 따라 제어력이 결정되는 댐퍼를 이용하여 일정수준이상의 제어성능을 가지기 위해서는 댐퍼의 용량, 사용개수가 증가하여야 한다. 그러나 구조물의 상대변위가 증폭 메커니즘에 의하여 수배에서 수십 배가 커진다

면, 댐퍼의 용량은 그 역으로 그 증폭 비율만큼 작아질 수 있으며, 같은 용량의 댐퍼로 더욱 큰 제어효과를 가질 수 있어 경제적인 진동제어가 가능하다. 이와 같이 변위를 증폭하거나 감쇠시켜 동력이나 힘을 전달하는 장치중에 토글이 있다.

토글 장치는 두 개의 연결장치(link)가 일직선상에 놓이게 되면서 동력과 변위를 수직방향으로 전달하는 동력전달장치이다. (그림1)

토글에 의하여 증폭되는 비율은 그림 1로부터 구할 수 있다. 그림 1에서 B점을 구조물의 상대변위에 의하여 늘어나는 길이, A점의 변위가 댐퍼에 작용하는 상대변위라고 가정하면, 구조물의 상대변위(Δ)와 댐퍼양 끝단의 상대변위(Δ_1)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁶⁾

$$\left(\frac{\Delta}{2L} + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2 + \left(\frac{\Delta_1}{L} - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2 = 1 \quad (1)$$

그러나 구조물의 상대변위가 매우 작은 경우에는 구조물의 상대변위와 댐퍼의 상대변위에 대한 관계를 간단히 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta_1 = \frac{1}{2} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \Delta \quad (2)$$

식(2)는 식(1)의 원점에서의 접선을 나타내는 것이며, 토글의 사이각(θ)에 따라 증폭비율이 매우 커지는 것을 알 수 있다.

3. 회전관성-점성댐퍼 (Rotation inertia-viscous damper)

본 연구에서 제안하고, 그 성능을 평가하고자 하는 댐퍼는 회전관성-점성댐퍼이다. 이 댐퍼는 구조물의 상대변위에 의한 직선운동을 볼 스크류등을 통하여 회전운동으로 변환하였을 때, 댐퍼내 질량의 회전관성에 운동에너지가 저장되고, 댐퍼내의 점성물질에 의해 에너지가 소산된다고 가정하는 이상적인 댐퍼이다. 실리콘 오일과 같은 점성물질에 의한 감쇠력은 회전체의 각속도에 비례한다고 가정한다. 이와 같은 이상적인 댐퍼의 특성이 식 (3)에 나타나 있다. 식 (3,a)는 댐퍼의 회전관성에 의한 운동에너지를 나타내며, 식 (3,b)는 댐퍼의 회전 각속도에 비례하는 감쇠력을 나타낸다.

$$T_d = \frac{1}{2} I \dot{\omega}^2, \quad F_d = D \dot{\omega} \quad (3,a,b)$$

여기서, I 는 댐퍼의 회전관성모멘트, ω 는 댐퍼의 회전각, D는 댐퍼의 회전에 의한 감쇠계수로써 볼스틀류의 리드, 지름, 실리콘 오일의 점도, 댐퍼내 회전체와 댐퍼 외경의 간격등에 의하여 결정되는 계수이다.

본 댐퍼가 설치된 구조물의 운동방정식을 라그랑지 방법을 이용한다. 구조물과 댐퍼에 의한 운동에너지(T)와 위치에너지(V), 댐퍼에 의한 소산 에너지 변분량(δW)이 식 (4, a, b, c)에 각각 나타나 있다.

$$T = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} I \dot{\omega}^2 \quad (4,a)$$

$$V = \frac{1}{2} Kx^2 \quad (4, b)$$

$$\delta W = -F_d \delta w = -D \dot{\omega} \delta w \quad (4, c)$$

여기서, M, K는 1자유도계 모델의 질량과 강성을 나타내며, x 는 모델의 변위, δ 는 변분을 나타낸다. 변위 x와 회전각 ω는 독립된 변수가 아니라 다음과 같은 관계식에 의하여 상호 종속된 변수이다.

$$\omega = \frac{2\pi}{\rho} x \quad (5)$$

여기서, ρ는 볼스트류의 리드로 한바퀴 회전할 때 진행되는 직선거리이다. 식 (5)를 식 (4,a,c)에 대입하고 라그랑지 방법을 이용하여 구한 운동방정식이 식 (6)에 나타나 있다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -I \frac{4\pi^2}{\rho^2} \ddot{x} - D \frac{4\pi^2}{\rho} \dot{x} + F(t) \quad (6)$$

여기서, C는 구조물의 감쇠정수이며, F(t)는 외란이다. 댐퍼에 의한 제어력은 댐퍼의 감쇠정수뿐만아니라, 회전관성모멘트에서 기인하는 것을 볼 수 있다. 댐퍼에 의한 제어력(U_d)을 다시 써보면 식 (7)과 같다. 이것은 진동제어이론에 비추어 볼 때, slope-state feedback의 특수한 형태라고 할 수 있다.

$$U_d = -I \frac{4\pi^2}{\rho^2} \ddot{x} - D \frac{4\pi^2}{\rho} \dot{x} \quad (7)$$

4. 토글-회전관성-점성댐퍼의 제어성능

4.1 토글-회전관성-점성댐퍼의 제어력

회전관성댐퍼를 대각가새와 토글가새에 적용한 예가 그림 2(a,b)에 나타나 있다. 댐퍼의 양끝단에 전달되는 구조물의 상대변위는 대각가새와 토글가새에 있어 각각 다르게 나타난다. 이를 식(7)의 x값으로 나타내면 다음과 같다.

$$\text{대각가새의 경우 : } x = \cos(\varphi) \Delta \quad (8.a)$$

$$\text{토글가새의 경우 : } x = f(\cos(\varphi) \cdot \Delta) \quad (8.b)$$

여기서, Δ, φ는 각각 구조물의 상대변위와 대각가새의 지표면에 대한 기울기이며, 함수 f는 식(1)또는 (2)에서 Δ₁ 과 Δ의 관계를 나타내는 함수이다. 토글가새에 의한 비선형성을 나타내는 함수 f에 의하여 제 진장차 양단에 전달되는 속도, 가속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{x} = \frac{df}{d\Delta} \frac{d\Delta}{dt} = \frac{df}{d\Delta} \dot{\Delta} \quad (9.a)$$

$$\ddot{x} = \frac{d}{dt}(\dot{x}) = \left(\frac{d^2f}{d\Delta^2}\right) \dot{\Delta}^2 + \frac{df}{d\Delta} \ddot{\Delta} \quad (9.b)$$

그러므로 토글가새에 의한 회전관성-점성댐퍼가새의 제어력은 구조물의 상대변위 Δ 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_d = -I \frac{4\pi^2}{\rho^2} \left[\left(\frac{d^2f}{d\Delta^2}\right) \dot{\Delta}^2 + \frac{df}{d\Delta} \ddot{\Delta} \right] - D \frac{4\pi^2}{\rho^2} \left[\frac{df}{d\Delta} \dot{\Delta} \right] \quad (10)$$

4.2 댐퍼의 제진성능

본 연구에서 제안한 토글-댐퍼시스템의 제진성능을 평가하기 위한 구조물, 댐퍼, 토글의 사양이 표1에 나타나 있다. 1층 구조물의 층고(H)는 4.2 m로 가정하며 토글의 경사각 $\varphi=45^\circ$ 로 가정한다. 비교를 위한 대각가새의 경사각은 45° 로 하였으며, 이 경사각을 감쇠정수 D를 보정(D_m)하는데 사용하였다.

외력으로 사용된 지진 이력은 El-centro 1940NS 이다. 그림 3은 대각가새, 토글가새를 사용한 경우와 비제어시의 구조물변위를 비교한 것이며, 그림 4는 대각가새의 토글가새의 변위를 나타낸다. 표 3은 해석결과를 정리하여 나타낸 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 토글 시스템에 회전관성-점성댐퍼를 적용하였을때의 제진성능을 수치해석을 통하여 평가하였다. 토글 가새시스템은 기존의 대각가새시스템에 비하여 구조물의 상대변위를 증폭하는 메커니즘에 의하여 더욱 효율적인 제진이 가능하며 증폭비율에 따라 대각가새에 사용되는 댐퍼에 비하여 용량이 작은 댐퍼로 같은 제어성능을 가질 수 있음을 보였다.

해석결과를 보면, 회전관성-점성댐퍼는 매우 작은 회전관성만으로도 구조물 질량의 20-30%에 해당하는 등가의 질량이 증가함으로써 제진효과가 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 토글가새에 적용했을 때의 댐퍼 용량은 대각가새댐퍼 적용시의 댐퍼 용량에 비하여 50% 저감되어도 같은 제어효과를 가지는 것을 알 수 있다.

토글 시스템은 건축구조물뿐만 아니라 교량이나 바닥판의 진동제어에 응용될 수 있다. 이를 위해서는 토글의 다양한 형상에 대한 제진성능과 적용가능성에 대한 연구가 이루어져야 하며, 실험을 통한 제진성능검증이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. ISO 6987(1984), Guidelines for the evaluation of the response of occupants of fixed structures, especially buildings and off-shore structures, to low-frequency horizontal motion(0.063-1Hz).
2. 일본건축학회(1991), Guidelines for the evaluation of habitability to building vibration.
3. Neil Sclater, Nicholas P. Chirois. Mechanisms and Mechanical Devices Source Book(2001). pp. 211-212. 3rd Edition, McGraw-Hill.

4. Hibino, H., Kawamura, S., Hisano, M., Yamada, M., Kawamura, H., and Morita, H., (1989), A Study on response Control System on Structures Utilizing Damping Amplifier, Taisei Technical research Journal, Vol. 22(Nov.), 155-162.
5. Constantinou, M.C., P. Tsopelas, W. Hammel, and Ani N. Sigaher (2001), Toggle-Brace-Damper Seismic Energy Dissipation System, Journal of Structural Engineering, ASCE, 127(2), 105-112.
6. 황재승, 송진규, 강경수, 윤태호, (2003), "Toggle 시스템을 이용한 구조물의 진동제어", 한국지진공학회 학술발표대회 논문집, Vol. 7, No.1, pp. 491-498.

표 1. 1자유도계 구조물과 댐퍼의 동적특성

구분	항목	기호	값
구조물	질량	M	1.458 E4 kg
	강성	K	1.28 E6 N/m
	감쇠	C	3.11 E3 Nsec/m
	진동수	f_o	1.49 Hz
		w_o	9.3697 radian
	감쇠비	ξ_o	1.14 %
댐퍼	총고	H	4.2 m
	회전 관성	I	0.02 kg m ²
	감쇠 정수	D	0.083 N sec m
	보정 감쇠정수	D_m $D/\cos(\varphi)$	0.1174 N sec m
볼스크류	리드	ρ	0.02 m
토글가새	링크길이	L	3.0m
	사이각	θ	165 °
대각가새	경사각	φ	45 °

표 2. 해석결과

구분	변수	최대 값	비고
구조물 변위	비제어시	10.7 cm	-
	대각가새 적용	8.5 cm	제어율 : 20%
	Toggle 가새 적용	5.4 cm	제어율 : 50%
제어력	대각가새 적용	11.4 kN	대각가새에 대한 제어력비율 : 100 %
	Toggle 가새 적용	26.3 kN	대각가새에 대한 제어력비율 : 230 %
가새 변위	대각가새 적용	6.0 cm	대각가새에 대한 변위비율 : 100%
	Toggle 가새 적용	14.5 cm	대각가새에 대한 변위비율 : 240%

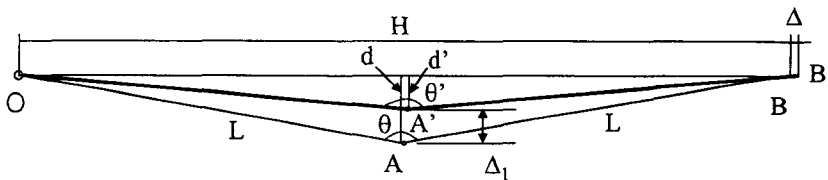


그림 1. 토글의 형상

(a) 대각가새 적용 (b) Toggle 가새 적용
 그림 2. 토글 시스템 적용

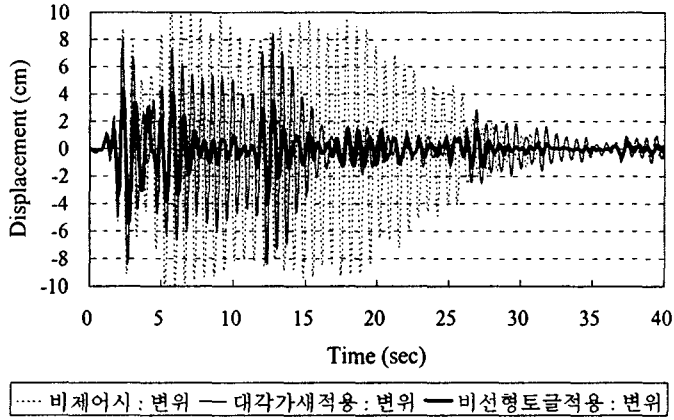


그림 3. 가새시스템에 따른 제어성능비교

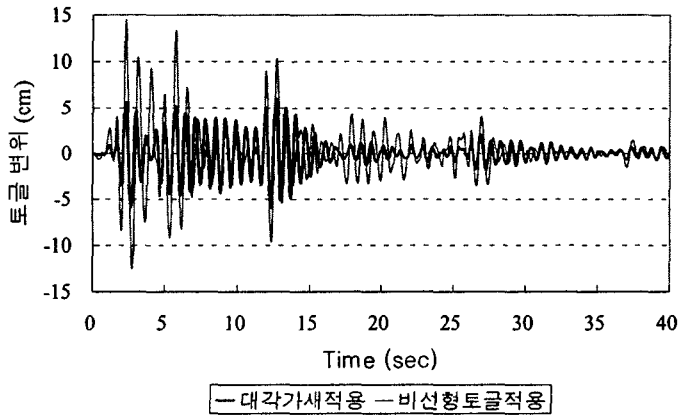


그림 4. 가새시스템에 따른 댐퍼의 상대변위비교