

토글-회전관성댐퍼를 이용한 구조물의 진동제어

Vibration Control of a Structure Using the Toggle-Rotational Inertia Damper

최락선 . 황 재 승
Choi Rak Sun, Hwang, Jae-Seung

: 키워드 : 토글, 진동제어, 회전관성-점성댐퍼, 등가질량

Keywords : Toggle, Vibration Control, Rotational Inertia-Viscous Damper, Equivalent Mass

ABSTRACT

This paper presents a new vibration control device by which the mass and damping of a structure is increased equivalently. The vibration control system, named toggle-rotational inertia-viscous damper, can be utilized effectively in applications of small structural drift. Numerical analysis shows that because the relative drift of a structure can be effectively amplified by the toggle system, the device has a great performance in the vibration control without the increase of the damper capacity and size. It is also observed that vibration control effects is caused by the increase of equivalent mass and damping due to the rotational inertia and damping of the device.

1. 서 론

1.1 연구의 목적

현재 초고층 건물에 다양한 제진장치가 개발되고 검증 단계를 거쳐 실제 구조물에 적용되지만, 이들 대부분의 제진장치는 구조물에 전달하는 제어력이 구조물의 속도와 상호작용을 일으켜 에너지가 소산됨으로서 진동이 줄어들게 한다. 이러한 제진장치의 특성은 구조물의 등가감쇠(equivalent damping)를 증가시킴으로써 에너지가 소산되는데 있다.

구조물의 에너지를 감쇠에 의하여 소산시키는 것은 경제적이고 효율적이기 때문에 구조물의 질량을 증가시키는 방법에 비하여 선호되었다. 물론, 바람의

의한 진동의 경우는 가속도가 질량에 반비례하므로 질량을 증가시킴으로써 가속도를 줄일 수 있다. 이것은 외부하중이 구조물의 관성력과 등가로 치환되면서 질량이 커지면 상대적으로 가속도가 작아지기 때문이다. 그러나 진동저감만을 위하여 구조물의 질량을 증가시키는 것은 구조설계의 측면에서나 경제적 측면에서 불합리하므로 질량증가에 의한 진동저감은 바람직하지 않다.

건축, 토목 구조물은 그 크기와 질량이 제어를 필요로하는 전기, 기계장치에 비하여 매우 크기 때문에 적정 수순 이상의 제어효과를 가지기 위해서는 제진장치의 크기 또한 그에 비례해서 커질 수밖에 없다. 특히 구조물의 진동 변위 등은 구조물형상에 비하여 극히 작은 값을 가지고, 또한 이로부터 비롯되는 응답에 기반하여 제어력을 구조물에 전달하기 때문에 제진장치의 용량이 커져야한다. 제진장치의 크기가 커지면, 제작 및 조달비용 문제 뿐 만아니라 시공과 유지관리에 불리하기 때문에 가능한 한 작은 크기의 제진장치가 요구된다.

본 연구에서는 구조물의 질량증가가 진동제어효과를 가지지만 그 불합리성 때문에 사용되지 못한점, 구조물의 응답이 작기 때문에 제진장치의 용량이 커

† 책임저자, 전남대학교 건축공학과 석사과정
E-mail : cklove111@nate.com
Tel : (062) 530-0250, Fax : (062) 530-0250

* 전남대학교 건축공학과 조교수
본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산 C04-01)에 의한 것임

지는 불리한 점을 해결하는 메커니즘을 제시하고자 한다.

연구방법은 가새시스템에 따른 제어성능을 수치 해석을 통해 비교하고, 토글, 회전관성댐퍼 모형을 제작하여 이론에 대해서 실험을 통해 증명해 보았다.

1.2 연구의 범위

바람에 의해 발생하는 진동의 경우는 구조물의 질량을 증가시킴으로써 진동이 저감된다. 그러나 지진과 같이 구조물 자체의 관성력이 하중으로 작용하는 경우에는 질량을 증가시키는 것이 더 불리할 수 있다. 이와 같은 이유로 바닥판의 질량을 증가시키는 것과 같이 구조물의 질량을 단순히 증가시키는 방법으로는 성능개선을 기대할 수 없기 때문에 외부하중과 무관하고 구조물의 가속도로만 표현되는 관성력이 필요하다.

본 연구에서는 구조물 층간상대가속도로 표현되는 회전관성댐퍼를 이용하여 구조물의 질량증가를 구현하고자 한다. 회전관성을 가지는 댐퍼를 층간에 설치함으로써 구조물의 층간 상대가속도와 댐퍼의 회전관성모멘트 곱으로 표현하여 이것이 등가적으로 구조물의 질량으로 나타나게 한다.

구조물의 진동크기가 상대적으로 작기 때문에 비롯되는 제진장치의 크기증가 문제는 증폭메커니즘의 하나인 토글(toggle)을 이용하여 해결한다. 토글은 변위를 증폭하거나 역으로 감쇠시켜 힘이나 동력을 전달시키는 장치의 하나로 기계장치에 매우 광범위하게 사용되고 있으며, 메커니즘에 따라 분쇄기, 압축기, 충격완화장치등으로 응용되고 있다.³⁾

이상과 같이 본 논문에서는 회전관성과 점성을 가지는 댐퍼를 토글 가새에 연결하여 구조물의 질량을 증가시킴과 동시에 토글의 증폭메커니즘으로 그 효율을 배가시킨 토글-회전관성-점성댐퍼(toggle-rotational inertia-viscous-damper)를 제시하며 이 댐퍼를 구조물에 적용하였을 때의 진동 제어성능을 평가하고 그 적용가능성을 제시하고자 한다.

이를 위하여, 토글에 의한 증폭비율 및 기하학적 비선형성을 초기 형상에 따라 정량적으로 평가하는 것을 다루었으며, 회전관성-점성댐퍼의 등가 질량과 감쇠가 구조물의 진동제어성능에 미치는 영향을 평가하였다. 수치해석을 통한 결과를 검증하기 위하여 토글 및 회전관성댐퍼를 제작하여 실험을 진행하였다.

2. 가새 시스템의 증폭비율

2.1 가새 시스템에 따른 증폭비율

제진장치를 구조물에 설치하기 위해서는 별도의 가새시스템이 필요하다. 일반적으로 사용되는 가새시스템으로는 쉐브론(Chevron)가새나 대각가새(Diagonal brace)등이 있다.

쉐브론가새는 구조물의 상대변위가 제진장치의 양끝단에 그대로 전달되는 반면에 대각가새의 경우에는 대각가새가 수평방향과 이루는 각도(ϕ)에 따라 달라진다.

$$\Delta_c = \Delta \tag{1,a}$$

$$\Delta_d = \cos(\theta)\Delta \tag{1,b}$$

토글에 의하여 증폭되는 비율은 그림 1과 같이 토글시스템이 설치되었을 경우 구조물의 상대변위(Δ)와 댐퍼양 끝단의 상대변위(Δ_1)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

식(2)은 토글의 사이각(θ)에 따라 증폭비율이 매우 커지는 것을 알 수 있다. 다음 그림 1은 토글시스템을 구조물에 적용한 것을 나타낸다. 링크의 길이는 3m이며, 사이각(θ)은 165°이다.

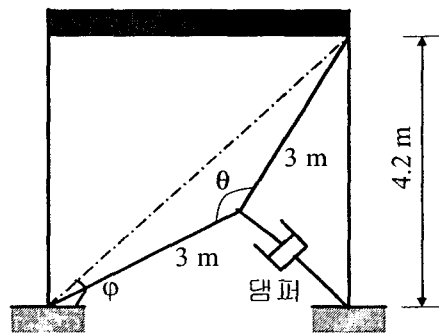


그림 1. 토글 시스템 적용

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

3.1 회전관성-점성댐퍼에 의한 제어력

본 연구에서 제안하고, 그 성능을 평가하고자 하는 댐퍼는 회전관성-점성댐퍼이다. 이 댐퍼는 구조물의 상대변위에 의한 직선운동을 볼 스크류 등을 통하여 회전운동으로 변환하였을 때, 댐퍼 내 질량의 회전관성에 운동에너지가 저장되고, 댐퍼내의 점성물질에 의해 에너지가 소산된다고 가정하는 이상적인 댐퍼이다. 실리콘 오일과 같은 점성물질에 의한 감쇠력은 회전체의 각속도에 비례한다고 가정한다. 이러한 이상적인 댐퍼가 구조물에 적용되었을 때 운동에너지(T)와 위치에너지(V), 댐퍼에 의한 소산 에너지 변분량(δW)이 식 (3, a,b,c)에 각각 나타나 있다.

$$T = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} I \dot{\omega}^2 \quad (3,a)$$

$$V = \frac{1}{2} K x^2 \quad (3,b)$$

$$\delta W = -F_d \delta w = -D \dot{\omega} \delta w \quad (3,c)$$

여기서, M, K는 1자유도계 모델의 질량과 강성을 나타내며, x는 모델의 변위, δ 는 변분을 나타낸다. 또한 I는 댐퍼의 회전관성모멘트, ω 는 댐퍼의 회전각, D는 댐퍼의 회전에 의한 감쇠계수로서 볼스트류의 리드, 지름, 실리콘 오일의 점도, 댐퍼내 회전체와 댐퍼 외경의 간격등에 의하여 결정되는 계수이다. 변위 x와 회전각 ω 는 독립된 변수가 아니라 다음과 같은 관계식에 의하여 상호종속된 변수이다.

$$\omega = \frac{2\pi}{p} x \quad (4)$$

여기서, p는 볼스트류의 리드로 한바퀴 회전할 때 진행되는 직선거리이다. 라그랑지 방법을 이용하여 구한 운동방정식이 식 (5)에 나타나 있다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -I \frac{4\pi^2}{p^2} \ddot{x} - D \frac{4\pi^2}{p^2} \dot{x} + F(t) \quad (5)$$

여기서, C는 구조물의 감쇠정수이며, F(t)는 외란이다. 댐퍼에 의한 제어력은 댐퍼의 감쇠정수 뿐만 아니라, 회전관성모멘트에서 기인하는 것을 볼 수 있다. 댐퍼에 의한 제어력(U_d)을 다시 써보면 식 (6)과 같다. 이것은 진동제어이론에 비추어 볼 때, slope-state feedback의 특수한 형태라고 할 수 있다.

$$U_d = -I \frac{4\pi^2}{p^2} \ddot{x} - D \frac{4\pi^2}{p^2} \dot{x} \quad (6)$$

댐퍼에 의한 제어력이 통합된 운동방정식은 (5)식 우편항을 좌편으로 이동하여 정리하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\left(M + I \frac{4\pi^2}{p^2} \right) \ddot{x} + \left(C + D \frac{4\pi^2}{p^2} \right) \dot{x} + Kx = F(t) \quad (7)$$

3.2 토글-회전관성-점성댐퍼의 제어력

회전관성댐퍼를 토글가새에 적용했을 구조물의 상대변위(Δ)와 댐퍼 양끝단의 상대변위(x)의 관계가 t식 (8)에 나타나 있다.

$$x = f(\cos(\phi)) \cdot \Delta \quad (8)$$

여기서, Δ , ϕ 는 각각 구조물의 상대변위와 대각가새의 지표면에 대한 기울기이며, 함수 f는 Δ_1 과 Δ 의 관계를 나타내는 함수이다. 토글가새에 의한 비선형성을 나타내는 함수 f에 의하여 제진장치 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.

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

3.3 토글-회전관성-점성댐퍼의 진동제어성능

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 $\phi=45^\circ$ 로 가정한다. 비교를 위한 대각가새의 경사각은 45° 로 하였다.

외력으로 사용된 지진 이력은 El-centro 1940NS 이다. 표 2는 각각 해석결과를 정리한 것으로 구조물의 성능과 댐퍼의 거동을 나타낸다. 표2에서 보는 바와 같이 구조물의 성능은 토글가새를 쓰

는 경우가 대각가새를 쓰는 경우보다 큰 것을 알 수 있으며, 볼 스크류의 리드(ρ)가 감소할수록 구조물의 등가 질량이 증가하여 제어효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

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_0		1.49 Hz
		ω_0		9.3697 radian
	감쇠비	ξ_0		1.14 %
댐퍼	충고	H	4.2 m	
	회전 관성	I	0.02 kg m ²	
볼스크류	감쇠 정수	D	0.083 N sec m	
	리드	ρ	0.02m, 0.015 m	
대각가새	경사각	ϕ	45°	

표 2. 구조물의 진동제어성능

단위 : 변위(cm) 속도(cm/sec)

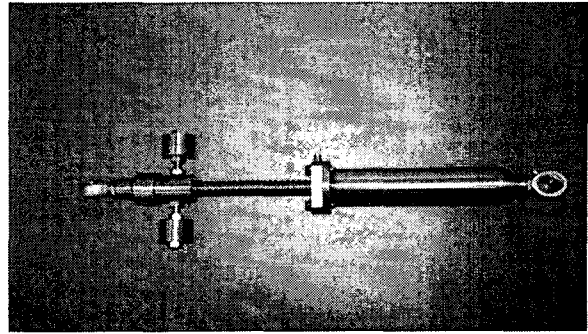
구분	변수	리드 (ρ ,cm)	값	제어율 (%)
비제어시	최대변위	-	10.7	-
	최대속도	-	97.3	-
대각가새 시스템 적용	최대변위	2	8.5	20.6 %
	최대속도	1.5	8.0	25.1 %
선형가정 토글 시스템 적용	최대변위	2	76.3	21.6 %
	최대속도	1.5	69.5	28.6 %
비선형 토글 시스템 적용	최대변위	2	6.5	38.3 %
	최대속도	1.5	5.2	51.5 %
비선형 토글 시스템 적용	최대변위	2	59.9	38.5 %
	최대속도	1.5	50.9	47.7 %
비선형 토글 시스템 적용	최대변위	2	5.4	49.3 %
	최대속도	1.5	4.2	60.3 %
비선형 토글 시스템 적용	최대변위	2	44.7	54.0 %
	최대속도	1.5	33.9	65.1 %

4. 토글 회전 관성댐퍼 모형 제작

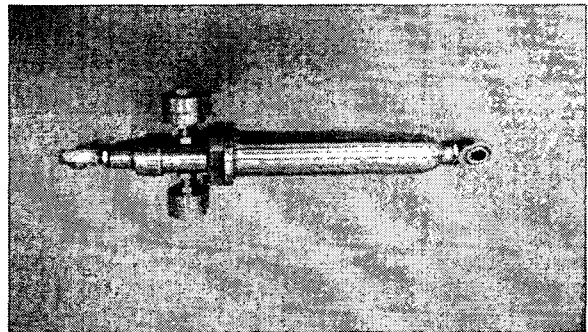
4.1 토글 회전 관성댐퍼 제작

순수한 회전관성에 의한 진동제어효과를 분석하기 위해 점성을 배제한 댐퍼를 제작하였고, 회전관성만을 고려했을 경우의 진동성능을 실험을 통해 검증해 보았다. 회전관성을 크게 하기 위해 댐퍼의 팔길이에 질량을 추가할 수 있도록 하였다. 추가된 질량에 의해 구조물의 질량을 증가시킬 수 있게 제작하였

다. lead 길이는 2cm로 댐퍼를 제작하였다.



(a) 최대행정거리를 가지는 경우



(b) 최대회전관성을 가지는 경우

그림 2 완성된 댐퍼 형상

5. 성능 실험

5.1 실험 구조물의 동적특성

단자유도건물에 토글을 이용하여 회전관성댐퍼를 연결하여, 실험을 진행하였다. 성능검증을 위한 구조물의 동적특성은 표3과 같다.

표 3 실험 구조물의 동적특성

구분	항목	기호	값	
구조물	질량	M	19 ki	
	강성	K	64.81 N/m	
	감쇠	C	1.05 Nsec/m	
	진동수	f_0		0.92 Hz
		ω_0		5.78 radian
	감쇠비	ξ_0		1.5 %
볼 스크류	충고	H	50 cm	
	리드	ρ	2cm	

5.2 회전관성댐퍼 성능실험

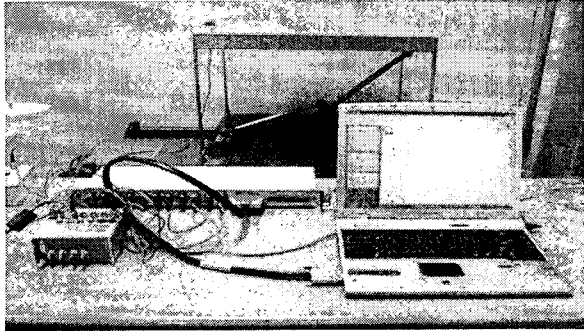


그림 3. 구조물 사진 및 계측 모습

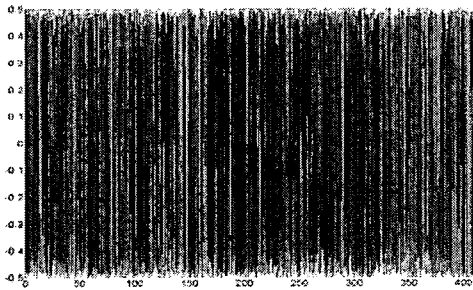


그림 4. 가진데이터

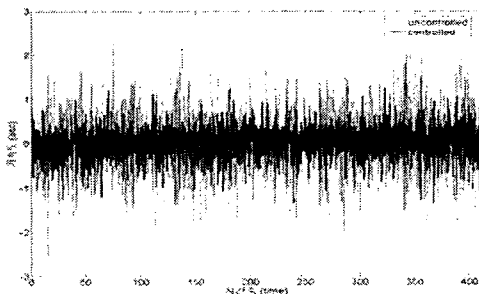


그림 5 비제어시와 제어시 비교데이터

실험은 Labview를 통해 백색잡음을 가진하여 구조물에 설치한 가속도 응답 데이터를 계측하였다. 가속도 응답이 약 30%정도 저감되는 것을 알 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 토글 가새에 회전관성-점성댐퍼를 결합한 제진장치의 수치해석을 통한 결과데이터와 실험을 통해 얻어진 회전관성댐퍼에 토글 가새를 결합한 결론은 다음과 같다.

- 1) 토글 가새 시스템은 기존의 대각 가새 시스템에 비하여 구조물의 상대변위를 증폭하는 메커니즘에 의하여 더욱 효율적인 제진이 가능하다.
- 2) 해석결과에 의하면, 회전관성-점성댐퍼는 볼 스크류의 리드에 따라 등가질량이 증가함으로써 제진효과가 나타나는 것을 알 수 있다.
- 3) 토글 가새에 적용했을 때의 댐퍼용량은 대각가새 댐퍼 적용시의 댐퍼 용량에 비하여 상당량 저감되는 것을 알 수 있다
- 4) 제작한 회전관성댐퍼를 이용한 진동실험에서 비제어시에 비해 약 30%이상 절감되는 것을 볼 수 있었다.

후 기

수치해석을 통해 토글 시스템을 이용한 회전관성 댐퍼의 예측하고, 실험을 통해 검증하였다. 회전관성댐퍼에 점성, 또는 마찰을 이용한 댐퍼의 개발이 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- (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) 황재승, 송진규, 강경수, 윤태호,(2003), "Toggle 시스템을 이용한 구조물의 진동제어", 한국지진공학회 학술 발표대회 논문집, Vol. 7, No.1, pp. 491-498