

Toggle 시스템을 이용한 구조물의 진동 제어 Vibration Control of Structure Using the Toggle System

황재승* 송진규** 강경수*** 윤태호****
Hwang, Jae Seung Song, Jin Gyu Kang, Kyung Soo Yun, Tae Ho

Abstract

The purpose of this study is to analyze the geometric nonlinearity of a toggle system and to evaluate the vibration control performance when the toggle system with a viscous damper 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 the geometric nonlinearity of toggle system using the linear viscous damper has little effect on the performance.

1. 서론

1.1 연구의 목적

구조물의 진동을 저감시키기 위하여 사용되는 제진장치는 진동원(바람 또는 지진)의 특성, 진동 저감의 주요목적(사용성개선, 안전성 확보등)에 부합하는 다양한 종류의 장치가 있으며, 제어 효과, 장치의 안정성뿐만 아니라 설치방법, 유지관리방법 및 조달비용등 경제성에 기초하여 선택, 사용되고 있다.

제진장치에 의하여 구조물에 전달되는 제어력은 크게 제진장치 질량의 관성력에 기인하는 경우(TMD, AMD, HMD등)와 장치 양 끝단에 작용하는 상대적인 물리량(변위, 속도, 가속도등)에 기인하는 경우(점성댐퍼, MR댐퍼, 마찰댐퍼 소성댐퍼등)로 구별할 수 있다. 후자의 경우는 장치자체를 곧바로 구조물에 설치할 수 없기 때문에 장치의 양단을 구조물의 층과 층사이에 고정, 접합시킬 수 있는 별도의 가새 시스템이 필수적으로 사용된다. 기존의 가새에 의하여 댐퍼 양 끝단에 전달되는 구조물의 상대변위는 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 상대변위가 증폭되어 제진장치 양끝단에 전달된다면 그

* 전남대 건축학부 전임강사
** 전남대 건축학부 조교수
*** 동명정보대학교 건축공학과 조교수
**** 창원대학교 건축공학과 조교수

증폭된 비율만큼 댐퍼의 용량을 줄이거나, 또는 같은 용량의 댐퍼에 의하여 더욱 큰 제어효율을 가지게 될 것이다.

이와같이 변위를 증폭하거나 역으로 감쇠시켜 힘이나 동력을 전달시키는 장치중의 하나가 toggle 이다. 토글 장치(toggle linkage)는 기계장치에 매우 광범위하게 사용되고 있으며, 메커니즘에 따라 분쇄기, 압축기, 충격완화장치 등으로 응용되고 있다.¹⁾

건축, 토목 구조물의 경우 Hibino(1989)²⁾을 비롯하여 최근 십 수년간 토글 메커니즘을 이용하여 구조물의 진동을 줄이기 위한 연구가 지속적으로 이루어졌으며, 근래의 Constantinou, M.C.(2001)의 연구에서는 toggle-brace-damper를 이용하여 지진하중을 받는 구조물의 진동을 줄이는 방법을 제시하고 있다.³⁾ 그러나 토글은 그 형상 및 구동방향에 따라 증폭되는 비율이 다르기 때문에, 선형 댐퍼일지라도 토글 메커니즘에 의한 기하학적 비선형성 때문에 구조물에 전달되는 최종적인 제어력 또한 비선형성을 가지게 된다.

본 연구에서는 기존의 연구에서 고려되지 않았거나 간과되었던 토글 시스템(토글 장치에 댐퍼가 통합된 시스템)의 기하학적 비선형성을 고찰하고, 토글 시스템에 의한 구조물의 진동제어성을 평가하고자 한다. 이를 통하여, 토글 시스템에 의한 증폭비율 및 비선형성을 초기 형상에 따라 정량적으로 평가하고, 토글의 최대 증폭가능길이(max. stroke)를 예측하여 토글 시스템을 설계 방안을 제시한다. 또한 수치해석을 통하여 기존의 대각가새시스템을 적용하였을때와 토글 시스템을 적용하였을 때의 댐퍼 용량 및 제어성을 비교하여 본 토글 시스템의 경제성과 효율성을 평가하고자 한다.

2. 토글 시스템

2.1 토글 가새의 기구학적 특성

양끝단의 상대적인 물리량에 따라 제어력이 발생하는 제진장치를 구조물에 설치하기 위해서는 별도의 가새시스템이 필요하다. 일반적으로 사용되는 가새시스템으로는 그림 1에서 보는 바와 같이 쉐브론 가새(Chevron brace)나 대각가새(Diagonal brace)등이 있다.

쉐브론 가새는 구조물의 상대변위가 제진장치의 양끝단에 그대로 전달되는 반면에 대각가새의 경우에는 대각가새가 수평방향과 이루는 각도(ϕ)에 따라 달라진다. 즉 구조물 층사이의 상대변위를 Δ 라 하면, 쉐브론 가새의 상대변위($\Delta_c = \Delta$)와 대각가새의 상대변위($\Delta_d = \cos(\phi) \Delta$)는 구조물의 상대변위와 같거나 작다.

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 선형점성댐퍼를 이용하여 일정수준이상의 제어성능을 가지기 위해서는 댐퍼의 용량, 사용개수가 증가하여야 한다. 그러나 구조물의 상대변위가 증폭 메커니즘에 의하여 수배에서 수십배가 커진다면, 댐퍼의 용량은 그 역으로 작아질 수 있으며, 같은 용량의 댐퍼로 더욱 큰 제어효과를 가질 수 있어 경제적인 진동제어가 가능하다.

이와 같이 변위를 증폭하거나 감쇠시켜 동력이나 힘을 전달하는 장치로 토글이 사용되고 있다. 토글 장치는 그림 2에서 보는 바와 같이 두 개의 연결장치(link)가 일직선상에 놓이게 되면서 동력과 변위를 수직방향으로 전달하는 기본적인 형상을 가진다. 토글의 기계적인 장점은 그림에서와 같이 점 B에 대한 점A의 속도비(V_A/V_B)에 있다. 즉 각도 θ 가 180도에 근접하면서 속도비가 거의 무한대에 가까운 값이 되어 증폭비율이 매우 커진다는 것이다.¹⁾ 이러한 토글의 특성을 이용하여 구조물의 상대변위를 증폭시켜고, 이를 댐퍼의 양끝단에 전달하여 더욱 큰 진동제어성능을

발휘하게 된다.

토크에 의하여 증폭되는 비율은 그림 2로부터 구할 수 있다. 그림 2에서 B점을 구조물의 상대 변위(Δ)에 의하여 늘어나는 길이, A점의 수직변위 (Δ_1)가 댐퍼에 작용하는 상대변위라고 정의한다. 유도과정의 단순성을 위하여, 링크의 길이는 같다고 가정한다. 변형후의 변수는 prime으로 표현하였다. Δ 와 Δ_1 사이의 관계는 단순한 삼각공식을 이용하여 다음과 같은 비선형 방정식으로 쓸 수 있다.

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

식 (1)는 구조물의 상대변위비 $\Delta/2L$ 와 댐퍼 양끝단의 상대변위비 Δ_1/L 의 관계를 나타내는 것으로 중심이 $\left[-\sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]$ 인 단위원을 나타낸다. 이로부터 두 변수는 비선형관계임을 알 수 있다.

2.2 토크 가새의 비선형성

토크 가새에 의한 증폭비는 식 (1)에서 보는 바와 같이 구조물의 상대변위에 따라 달라진다. 이를 도식적인 방법으로 나타내면 그림 3과 같다. 그림 3의 곡선은 표 1과 같이 토크의 변수가 주어졌을 때 구조물의 상대변위와 댐퍼의 상대변위 관계식을 비선형에 대하여 나타낸 것이다. 가로축이 구조물의 상대변위이며 세로축이 댐퍼의 상대변위이다.

그림 3에서 보는 바와 같이 비선형관계식은 항상 원점을 지나며, 구조물의 상대변위는 링크의 사이각 θ 에 의하여 다음 식(2,a)와 같이 양의 방향에 대하여 최대값 (Δ_{max})을 갖는다. 또한 이때의 댐퍼의 최대 상대변위는 (2, b)와 같다.

$$\Delta_{max} = 2L\left(1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right) \quad (2, a)$$

$$\Delta_{1max} = L \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2, b)$$

제진장치의 증폭비율은 구조물 상대변위의 방향에 따라 달라진다. 상대변위가 양수인 경우(토크가 늘어나는 경우)가 음수인 경우보다 급격하게 증가하며, 음수인 경우는 완만하게 증가하는 경향을 나타낸다. 그러므로 토크 시스템을 설계할 때는 구조물의 최대 허용상대변위(Δ_a)를 결정하고 이 상대변위가 식 (2, a)로 주어지는 값보다 작게 되도록 사이각과 링크의 길이를 조정하여야 한다. 즉

$$\Delta_a \leq \Delta_{max} \quad (3)$$

링크의 길이 L 은 층고등으로 주어지는 값이므로 식 (3)으로부터 사이각 θ 를 구하고, 식 (2,b)로부터 댐퍼의 최대증폭가능길이(max. stroke)를 구한다.

그러나 구조물의 허용 상대변위가 식(2,a)의 값에 비하여 매우 작은 경우에는 그림 3의 직선과 같이 근사시킴으로써 구조물의 상대변위에 대한 댐퍼의 상대변위를 예측할 수 있다. 그림 3의 직

선은 비선형방정식 식(1)의 원점에서의 접선으로, 이를 이용하여 구조물의 상대변위와 댐퍼의 상대변위에 대한 관계를 간단히 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta_1 = \frac{1}{2} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \Delta \quad (4)$$

식(4)을 이용하여 구조물의 상대변위로부터 댐퍼의 상대변위를 예측할 수 있으나, 그림에서 알 수 있는바와 같이 구조물의 상대변위가 양수인 경우에는 댐퍼의 상대변위를 과소평가하며, 역으로 음수인 경우에는 과대평가하는 것을 알 수 있다. 그러므로 정확한 증폭비율을 산정하기 위해서는 식(1)와 같이 토글의 비선형관계를 이용하여야 함을 알 수 있다. 식(4)는 구조물의 상대변위가 작은 경우, 근사식으로 사용가능하며, 또한 사이각 (θ)이 주어진 경우 증폭비율을 선형적으로 가늠할 수 있다는 장점이 있다.

그림 4는 1층의 단자유도 건물에 표 1과 같은 토글 시스템이 설치된 것을 나타낸 것으로 층고 (H)는 4.2 m로 가정하였다.

그림5, 6은 그림 4와 같은 구조물에 사인파를 가진하여 토글에 의한 증폭비의 비선형관계(식 (1))와 선형관계(식(4))의 차이를 수치시뮬레이션을 통하여 나타내는 것이다. 표 1에서, Case I은 구조물의 상대변위가 매우 작은 경우이며, Case II 는 구조물의 상대변위가 토글의 최대 허용상대 변위와 거의 같은 크기일 때를 나타낸다. 그림 5의 경우는, Case I의 경우로 비선형관계식이나 선형관계식에서 큰 차이가 나타나지 않는 것을 나타낸다. 그러나 그림 6은 Case II의 경우로 비선형 관계와 선형관계식에 있어서 그 예측결과가 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 그림 5(a)는 변위, 그림 5(b)는 속도를 나타내며, 그림 6도 마찬가지이다.

수치시뮬레이션 결과는 구조물의 상대변위가 토글의 최대 허용 상대변위와 그 크기가 유사한 경우에는 기하학적 비선형성에 의한 효과가 나타나는 것을 알 수 있다. 토글-댐퍼의 속도는 변위와 달리 방향과 관계없이 크기가 같은 것을 알 수 있다.

3. 토글-점성댐퍼의 성능

3.1 토글-점성댐퍼에 의한 운동방정식

본 절에서는 토글 시스템의 기하학적 비선형성이 진동제어성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 토글과 점성댐퍼가 결합된 시스템에서의 제어력에 대하여 기술하기로 한다.

점성댐퍼는 속도에만 비례하는 매우 이상적인 경우로 가정하였으며, 댐퍼내의 점성물질에 의한 감쇠력이 식 (5)에 나타나 있다.

$$F_d = D \dot{\Delta}_1 \quad (5)$$

여기서, D는 댐퍼의 감쇠정수이며, Δ_1 는 토글에 의한 증폭변위이다.

본 댐퍼가 설치된 구조물의 운동방정식은 라그랑지 방법을 이용하여 구한다. 구조물의 운동에너지(T)와 위치에너지(V), 댐퍼에 의한 소산 에너지 변분량을 이용하여 구한 운동방정식이 식 (6)에 나타나 있다. 단, 가새가 가지는 운동, 위치에너지는 무시하였다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -D\dot{\Delta}_1 + F(t) \quad (6)$$

여기서, M, C, K는 각각, 구조물의 질량, 감쇠, 강성이며, F(t)는 외란이다. 댐퍼에 의한 제어력은 토글 댐퍼의 상대변위 Δ_1 와 구조물의 변위 x [$\Delta = x \cos(\varphi)$]의 관계를 식(1)로부터 구한 후 양변을 시간에 대하여 미분하면 토글에 의한 상대속도는 다음 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\Delta}_1 = \frac{\left(\frac{x \cos \varphi}{2L} + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right) \frac{\cos \varphi}{2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{x \cos \varphi}{2L} + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right)^2}} \dot{x} \quad (7)$$

3.2 토글-점성댐퍼의 제어성능

토글-점성댐퍼의 진동제어성능을 평가하기 위하여 그림 1b와 그림 4와 같이 구조물에 대각가새를 적용한 경우와 토글 시스템을 적용한 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다. 토글, 댐퍼 및 구조물의 사양은 각각 표1, 표 2와 같다. 층고(H)는 4.2 m로 가정하며 토글의 경사각, 대각가새의 경사각은 $\varphi = 45^\circ$ 로 가정한다. 댐퍼의 감쇠정수는 대각가새가 적용된 경우 등가감쇠비가 3%가 되도록 설계한 것이다.

구조물에 작용하는 하중은 El-Centro 1940NS를 사용하였으며 토글의 비선형성을 고찰하기 위하여 그 크기를 1.5배 증폭하여 사용하였다.

그림 7은 대각가새에 적용한 경우, 선형으로 가정한 토글 시스템에 적용한 경우(식 (4)), 비선형성을 고려한 토글 시스템에 적용한 경우(식(1))의 변위를 비제어시의 변위와 시간대역일부를 나타내어 비교한 것이다. 그림 (7,a)는 대각가새와 비선형 토글에 의한 제어효과를 비교한 것으로 예측된바와 같이 같은 용량의 댐퍼를 사용하나 제어효과는 토글을 사용하는 경우가 더 효과적인 것을 알 수 있다. 그림 (7.b)는 비선형 토글과 선형가정 토글을 비교한 것으로 제어효과측면에서는 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 이것은 토글의 상대속도가 증폭되는 비율이 변위에 비하여 작기 때문인 것으로 판단된다.

표3은 그림 7과 같이 가새시스템의 종류에 따른 제어성능을 나타낸 것으로 대각가새의 경우 약 26%의 제어효과를 가지는 반면 토글의 경우는 40%이상의 제어효과를 가지는 것을 알 수 있으며 비선형 토글의 경우가 미소하지만 제어성능이 개선된 것을 알 수 있다. 표 4는 가새시스템에 따른 댐퍼의 상대변위 상대속도, 제어력등을 나타낸다. 같은 용량의 댐퍼를 사용하더라도 구조물에 전달되는 제어력은 큰 차이를 나타내는 것을 알 수 있다. 이러한 제어력의 차이에 의하여 제어효과가 표3에서와 같이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 표 4의 제어력을 비교하여 볼 때, 대각가새를 이용하여 토글 시스템과 같은 제어성능을 가지기 위해서는 댐퍼의 용량이 3배 정도 커져야하는 것을 알 수 있다. 또한 선형으로 가정한 토글의 경우가 비선형 토글에 비하여 차이는 미미하지만 상대변위와 달리 상대속도가 더 큰 것을 알 수 있다. 제어력의 경우 큰 차이 없어 표 3과 같은 제어성능을 가지는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 토글 시스템의 기하학적 비선형성과 구조물에 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.

선형점성댐퍼를 사용하는 토글 시스템 경우 기하학적 비선형성은 제어성능에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으나, 선형점성댐퍼가 아닌 마찰댐퍼, 관성댐퍼, 소성댐퍼등 변위나 가속도에 의하여 제어력을 발휘하는 댐퍼를 사용하는 경우의 제진성능에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

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 사료된다.

표 1. 토글 사양과 가진입력특성

	Case I	Case II
링크 길이 (L)	3 m	3 m
사이각 (θ)	165°	165°
최대 허용상대변위 (식 2,a)	5.13 cm	5.13 cm
최대 증폭가능길이 (식 2,b)	39.16 cm	39.16 cm
사인파 주기(T)	2 sec (0.5Hz)	2 sec (0.5Hz)
사인파 진폭(A)	1.00 cm	5.00cm
최대허용상대변위에 대한 사인파 진폭비율	19.5 %	97.5 %

표 2. 1자유도계 구조물과 댐퍼의 동적특성

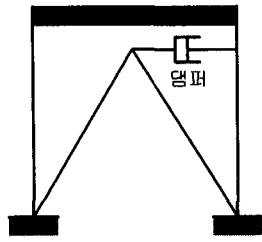
구분	항목	기호	값	
구조물	질량	M	1.458 e4 kg	
	강성	K	1.28 e6 N/m	
	감쇠	C	3.11 e3 Nsec/m	
	진동수	f_0		1.49 Hz
		w_0		9.3697 radian
	감쇠비	ξ_0		1.14 %
댐퍼	충고	H	4.2 m	
	감쇠 계수	D	11.66 e3 Nsec/ m	
토글	경사각	ϕ	45°	
	사이각	θ	165°	

표 3. 가새형식에 따른 진동제어성능

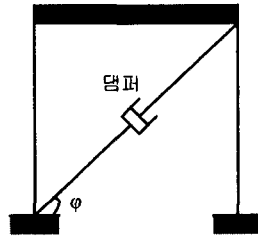
구분	변수	값	제어율 (%)	
구조물	비 제어시	최대변위(cm)	16.02	-
		최대속도(cm/sec)	146.97	-
	대각가새 시스템 적용	최대변위(cm)	11.80	26.4%
		최대속도(cm/sec)	106.14	27.3%
	선형가정 토글 시스템 적용	최대변위(cm)	9.07	43.4%
		최대속도(cm/sec)	81.9	43.9%
	비선형 토글 시스템 적용	최대변위(cm)	8.94	44.2%
		최대속도(cm/sec)	79.07	45.8%

표 4. 가새시스템에 따른 댐퍼의 응답 및 제어력

구분	변수	값	대각가새 시스템에 대한 비율	선형가정 토글 시스템에 대한 비율
대각가새 시스템	상대변위 (cm)	8.34	100%	34%
	상대속도(cm/sec)	75.05	100%	34%
	제어력 (kN)	8.75	100%	34%
선형가정 토글 시스템	상대변위(cm)	24.37	229%	100%
	상대속도(cm/sec)	220.00	293%	100%
	제어력 (kN)	25.66	293%	100%
비선형 토글 시스템	상대변위 (cm)	26.66	320%	109%
	상대속도(cm/sec)	204.81	273%	93%
	제어력 (kN)	23.89	273%	93%



(a) 웨브론 가새



(b) 대각가새

그림 1. 가새 형상

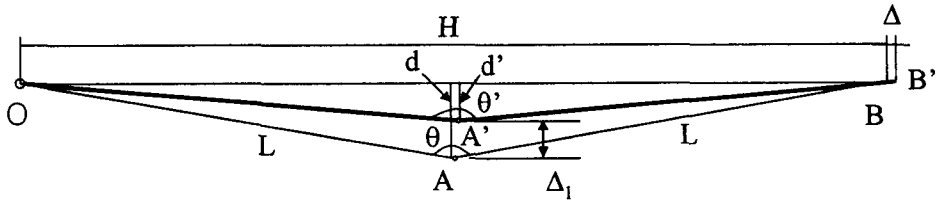


그림 2. 토글의 형상

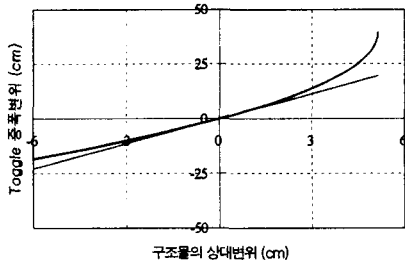


그림 3. 토글 증폭의 비선형성

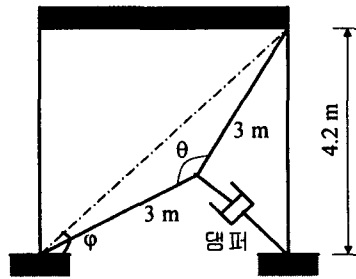
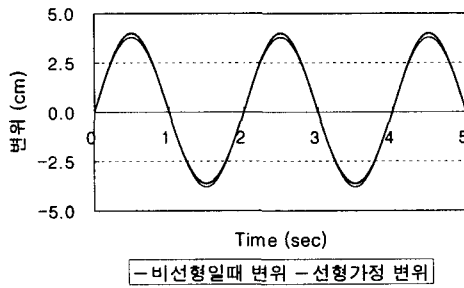
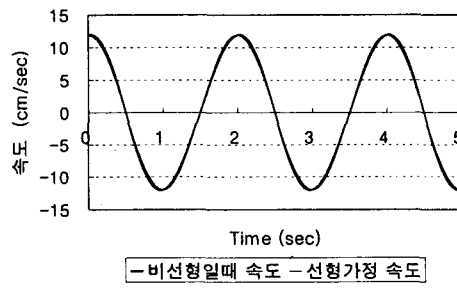


그림 4. 토글 시스템 적용

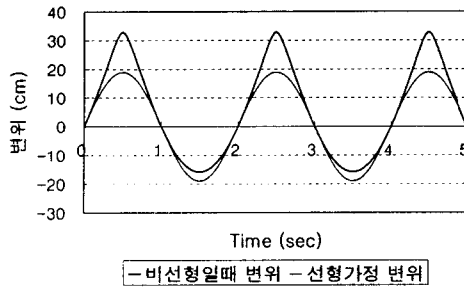


(a) 변위 증폭 시간이력

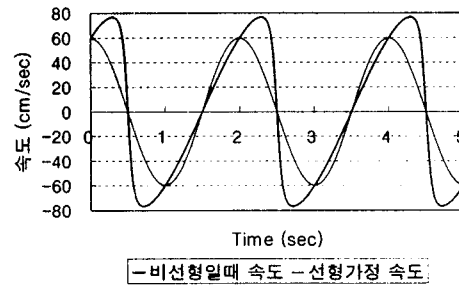


(b) 속도 증폭 시간이력

그림 5. Case 1 일때의 입력 출력관계

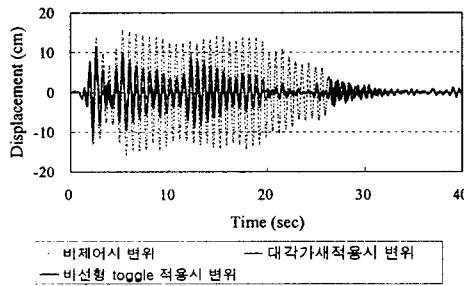


(a) 변위 증폭 시간이력

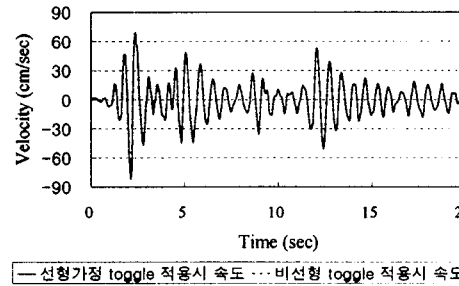


(b) 속도 증폭 시간이력

그림 6. Case II 일때의 입력 출력관계



(a) 비선형 토글과 대각가새 비교



(b) 비선형 토글 과 선형가정 토글 비교

그림 7. 토글 시스템에 의한 제진성능 : 구조물의 변위

참고문헌

1. Neil Sclater, Nicholas P. Chirois. Mechanisms and Mechanical Devices Source Book(2001). pp. 211-212. 3rd Edition, McGraw-Hill.
2. 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.
3. Constantinou, M..C., P. Tsopelas, W. Hammel, and Ani N. Sigaher(2001), 토글-Brace-Damp er Seismic Energy Dissipation System, Journal of Structural Engineering ,ASCE, 127(2), 105-112.