

사장 케이블 제진을 위한 고성능 감쇠 장치

High-Performance Damping Device for Suppressing Vibration of Stay Cable

정 형 조* 박 철 민** 장 지 은*** 박 규 식# 이 인 원##
Jung, Hyung Jo Park, Chul Min Jang, Ji Eun Park, Kyu Sik Lee, In Won

ABSTRACT

In this paper, the feasibility of the high-performance damping device vibration suppression of stay cables has been investigated. The proposed damping system consists of a linear viscous damper and a scissor-jack-type toggle linkage. Since the mechanism of the scissor-jack-type toggle linkage amplifies the relative displacement of the linear viscous damper, it is expected that the capacity of the viscous damper used in the scissor-jack-damper energy dissipation system can be reduced without the loss of the control performance. Numerical simulation results demonstrate the efficacy of the damping system employing the scissor-jack-type toggle linkage. Therefore, the proposed damping system could be considered as one of the promising candidates for suppressing vibration of stay cable.

1. 서 론

사장교는 풍부한 조형미, 경제적 설계, 합리적 가설 등 여러 가지 우수한 특성 때문에 20세기 중반 이래 현재까지 꾸준히 건설되고 있는 장대교량 형식이다. 우리나라도 1984년 진도대교와 돌산대교가 거의 동시에 완공된 이후, 올림픽대교, 서해대교, 영흥대교, 삼천포대교 등이 건설되어 공용 중이며, 현재도 다수의 장대교량이 사장교 형식으로 설계되거나 시공 중에 있다. 사장교는 케이블을 주부재로한 유연한 구조물이기 때문에 풍하중에 의한 진동으로 인해 내풍안정성에 문제가 야기될 수 있기 때문에 이에 대한 세심한 주의가 필요하다. 특히, 케이블은 교량에 전달되는 여러 하중을 장력에 의하여 주탑으로 전달시켜 주는 사장교의 주요 부재로써, 시공뿐만 아니라 건설 후 유지관리가 매우 중요하다. 그러나 교량의 장대화로 사장교에 사용된 케이블의 길이가 점차 길어짐으로써 여러 가지 기술적 문제가 야기되어 왔으며 이를 해결하기 위한 많은 연구가 수행되고 있다.

케이블은 유연하여 외부 하중으로 인하여 발생된 변형을 억제 할 수 없으며, 매우 낮은 감쇠비를 갖기 때문에 진동에너지를 소산시키지 못한다. 이는 케이블과 케이블 연결 부위의 수명을 감소시키거나 부식방지처리의 손상으로 인한 잠재적인 문제를 발생시킬 수 있으므로 케이블의 진동을 감소시키기 위한 다양한 방법이 시도되었다. 수 년전

* 정희원, 세종대학교 토목환경공학과 조교수

** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사과정

*** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 위촉연구원

한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사후연구원

정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 정교수

까지는 케이블의 진동을 감소시키기 위하여 부분적으로 케이블의 표면을 변화시키거나 수동형 감쇠 장치를 설치하는 방법 등이 사용되었으나, 케이블의 표면을 변화시키는 방법은 일정 영역의 진동수의 진동만을 억제 시키며, 수동형 감쇠 장치는 케이블의 길이가 길어짐에 따라 그 제어 능력이 현저히 떨어지는 한계점이 발견되었다.

이러한 소극적인 방법들을 대체하기 위하여 능동형 제어 장치를 설치하여 케이블의 진동을 매우 효과적으로 감쇠시키는 방법이 제안 되어졌으나, 능동형 제어 장치의 높은 전력 소모와 전원 에 대한 의존도 때문에 실제 적용성이 떨어진다. 최근 들어, 반능동형 감쇠 장치가 이러한 능동형 제어 장치의 단점을 보완하는 동시에 수동형 감쇠 장치와 능동형 제어 장치의 장점을 효과적으로 이용할 수 있다는 연구들이 발표되었다.⁽¹⁾ 하지만, 반능동형 제어 장치의 경우에도 여전히 설치 및 유지관리에 어려움이 있고 제어력을 계산하기 위해서는 계측기, 컴퓨터, 전력 공급 장치 등이 필요하기 때문에, 사장교 케이블의 제진에 적용하기에는 적절치 않다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 저자는 두가지 방향으로 연구를 수행하고 있다. 첫 번째는, 사장 케이블에 대한 제진 성능이 기존 감쇠 장치보다 우수한 수동형 감쇠 장치 또는 제진 시스템을 개발하는 것이고, 다른 하나는 유지관리가 용이하고 간편한 반능동형 감쇠 장치를 기반으로 하는 제진 시스템을 개발하는 것이다. 본 연구에서는 첫 번째 연구 방향에 대한 내용을 다루고 있고, 두 번째 연구 방향에 대한 내용은 다른 논문⁽²⁾에서 다룰 것이다.

수동형 감쇠 장치를 이용해 사장 케이블을 제진하는 경우 가장 커다란 한계 중의 하나가 감쇠 장치의 설치 위치가 케이블 하단부로 제한된다는 점이다. 이로 인해 설치된 감쇠 장치 위치에서의 케이블 변형 또는 감쇠 장치의 상대변위가 매우 작게 되어 커다란 용량의 감쇠 장치가 요구된다. 점성 유체 감쇠기와 같은 수동형 감쇠 장치는 제작시 고도의 정밀도를 요구하기 때문에 대용량일수록 제작이 어려울 뿐만 아니라 비용도 커진다. 따라서, 같은 성능을 발휘하더라도 보다 작은 용량의 감쇠 장치를 사용하는 것이 유리하다. 이를 위해, 본 연구에서는 기계장치에 매우 광범위하게 사용되고 있는 변위확대 방법인 토글 (toggle) 장치를 고려하였다. 건축 구조물의 경우, 1980년대 후반부터 층간 변위가 매우 작게 발생하는 강성이 큰 건물에 토글 장치를 이용하여 구조물의 진동을 줄이기 위한 연구가 지속적으로 이루어졌다.⁽³⁾⁻⁽⁵⁾ 국내에서도, 황계승 등⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾, 이상현 등⁽⁹⁾이 토글 시스템을 이용하여 건축 구조물의 성능을 개선하기 위한 연구를 수행하고 있다. 하지만, 사장 케이블과 같은 토목 구조물에 토글 시스템을 적용하는 연구는 거의 수행되고 있지 않다.

본 연구에서는 토글 장치에 대한 위와 같은 기존 연구 중에서, 장치의 형태 및 작동 원리를 살펴 볼 때 사장 케이블 제진 장치에 가장 적합한 것으로 판단된 Sigaher 등⁽⁵⁾이 제안한 가위-잭-감쇠기 (scissor-jack-damper) 형태의 토글 장치를 사장 케이블의 내풍 대책으로 적용하고자 한다. 이를 위해, 사장 케이블 구조물의 풍하중에 의한 거동 특성을 자세히 분석하여 가위-잭 형태 토글 장치의 적절한 설치 위치 및 형태를 제안하고, 이를 통해 얻을 수 있는 변위 증폭 효과를 파악하였다. 그리고 나서, 수치해석을 통해 기존 수동형 감쇠 장치와 제진 성능을 비교하여 제안된 수동형 감쇠 장치의 효용성을 검증하였다. 본 논문에서 제시된 연구 성과는 향후 수동형 스마트 감쇠 장치⁽²⁾와 가위-잭 형태 토글 장치를 결합하여 보다 성능이 우수한 사장 케이블 제진 시스템을 개발하기 위한 후속 연구의 기초자료로 활용될 것이다.

2. 토글 시스템을 이용한 고성능 감쇠 장치

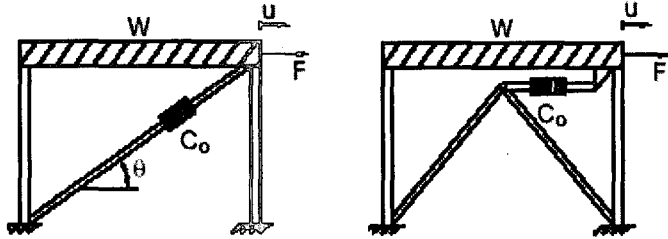
2.1 토글 시스템 소개

구조물 특히 건축 구조물의 내진 및 내풍 성능 개선을 위해 감쇠 장치를 설치하기 위해서는 추가적인 가새 시스템이 필요하다. 일반적으로 건축 구조물에 널리 사용되는 가새 시스템으로는 그림 1에서 보는 바와 같이 대각 가새 (diagonal brace)나 쉘브론 가새 (chevron brace) 등이 있다. 쉘브론 가새의 경우에는 구조물의 상대변위가 감쇠 장치의 양쪽 단부에 직접 전달되는 반면에, 대각 가새의 경우에는 대각 가새가 수평 방향과 이루는 각도에 따라 그 값이 달라진다. 즉, 쉘브론 가새의 상대변위와 대각 가새의 상대변위는 구조물의 상대변위와 같거나 오히려 작은데, 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

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

(1)

여기서 u_D 는 감쇠 장치의 상대변위이고, u 는 층간변위, 그리고, α 는 증폭계수이다. 웨브론 가새의 경우에는 $\alpha = 1.0$ 인 반면에, 대각 가새의 경우에는 $\alpha = \cos\theta$ 이다.



(a) 대각 가새

(b) 웨브론 가새

그림 1. 일반적인 감쇠 장치 설치 방법⁽⁵⁾

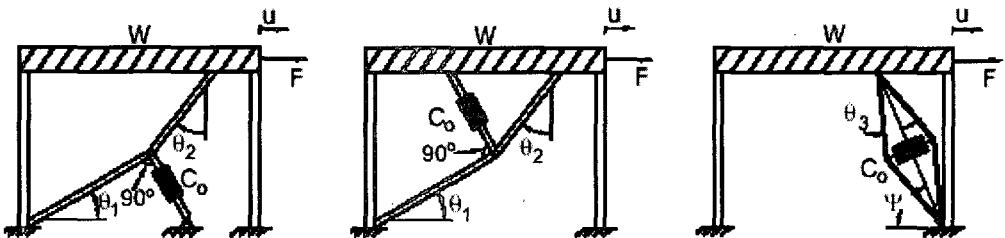
위와 같이, 일반적인 감쇠 장치 설치 방법으로는 강성이 큰 건축 구조물의 층간변위 u 가 매우 작기 때문에 감쇠 장치가 효과적으로 성능을 발휘하기 위해서는 장치의 용량이 커져야만 한다. 하지만, 변위확대 매커니즘인 토글 (toggle) 장치를 이용해서 감쇠 장치의 상대변위를 증폭시킨다면, 대용량의 감쇠 장치 대신 소용량의 감쇠 장치를 사용할 수 있기 때문에 경제적인 이점을 기대할 수 있다. 이를 위한 토글 장치로 아래 그림 2와 같은 다양한 형태를 고려하였다. 이러한 토글 장치에서는 감쇠 장치의 상대변위 u_D 와 층간변위 u 사이에 복잡한 비선형 관계가 있지만, 토글 장치의 회전이 작다고 고려하면 다음과 같이 간단한 형태의 변위에 대한 증폭계수를 얻는다.⁽⁵⁾

· 하부 토글 시스템의 경우, $\alpha = \sin\theta_2 / \cos(\theta_1 + \theta_2)$ (2a)

· 상부 토글 시스템의 경우, $\alpha = \sin\theta_2 / \cos(\theta_1 + \theta_2) + \sin\theta_1$ (2b)

· 가위-잭 토글 시스템의 경우, $\alpha = \cos\psi / \tan\theta_3$ (2c)

식 (2)에서 $\theta_1 = 31.9^\circ$, $\theta_2 = 43.2^\circ$, $\theta_3 = 9^\circ$, $\psi = 70^\circ$ 로 고려하면, 하부 토글의 증폭비 $\alpha = 2.66$, 상부 토글의 증폭비 $\alpha = 3.19$, 그리고 가위-잭의 증폭비 $\alpha = 2.16$ 으로 계산되며 모두 1보다 큰 값을 가짐을 알 수 있다.



(a) 하부 토글 시스템

(b) 상부 토글 시스템

(c) 가위-잭 토글 시스템

그림 2. 다양한 토글 장치⁽⁵⁾

가위-잭 형태의 토글 시스템은 하부 및 상부 토글 시스템에 비해서 증폭비가 크진 않지만, 형태가 간결하고 거의 수직 형태로 설치되기 때문에 일반 건물에서 적용하는데 이점이 있다.

2.2 케이블 제진을 위한 토글 시스템 분석

앞 절에서 소개한 여러 가지 토글 시스템은 모두 건축 구조물을 대상으로 연구된 내용이다. 본 논문에서는 토글 시스템을 사장 케이블에 적용하려고 하기 때문에 그러한 용도에 적합한 장치를 먼저 선정해야 한다. 각 토글 시스템의 개념과 거동 원리, 실제 적용 가능성 등을 검토한 결과, 가위-잭 형태의 토글 시스템이 사장 케이블에 적용하기 적합하다는 사실을 도출해냈다.

그림 3은 사장 케이블에 가위-잭 형태 토글 시스템을 설치한 예를 보여주고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 가위-잭 토글 장치는 사장 케이블의 변위 u 에 의해 감쇠기의 상대변위 u_D 를 직접적으로 발생시킨다. 기존 증폭비에 관한 식 (2c)에서 구조물의 상대변위와 토글 장치가 이루는 각을 의미하는 $\psi = 0$ 이 되기 때문에 선형화된 증폭계수 α 도 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\alpha = 1/\tan\theta \quad (3)$$

이 경우의 증폭계수는, $\theta = 30^\circ$ 일 때 $\alpha = 1.73$ 이고, $\theta = 15^\circ$ 일 때 $\alpha = 3.73$ 이 된다. 감쇠기와 토글 장치가 결합된 제진 시스템에 의해 케이블에 가해지는 감쇠력 F_d 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁵⁾

$$F_d = C_0 \cdot \alpha^2 \cdot \dot{u} \quad (4)$$

여기서, C_0 는 선형 점성 감쇠기의 감쇠상수이고 \dot{u} 는 케이블의 속도이다. 식 (4)에서 알 수 있듯이, 가위-잭 형태 토글 시스템을 케이블 제진을 위해 사용할 경우에 토글 장치에 의해서 감쇠력이 크게 증가하기 때문에, 기존 선형 점성유체 감쇠기보다 용량이 훨씬 더 작은 감쇠기로도 똑같은 제진 성능을 얻을 수 있는 장점을 갖게 된다.

2.3 가위-잭 형태 토글 시스템을 설치한 케이블 모델

사장 케이블은 일반적으로 커다란 초기 장력을 도입하기 때문에 매우 작은 새그비 (sag-to-span ratio)를 갖는다. 따라서, 본 논문에서는 대상 케이블 모델이 그림 4와 같이 일정한 크기의 경사각을 갖지만 처짐이 없는 이상적인 사장 케이블로 고려하였고, 이러한 케이블 모델에 대한 지배 미분 방정식을 식(5)와 같이 구성하였다.

$$m\ddot{v}(x,t) + c\dot{v}(x,t) - Tv''(x,t) = f(x,t) + F_d(t)\delta(x - x_d) \quad (5)$$

여기서, $v(x,t)$ 는 케이블의 수직방향의 변위, $F_d(t)$ 는 감쇠기로부터 케이블에 전달되는 감쇠력, $f(x,t)$ 는 외부하중, x_d 는 케이블 하단부로부터 제진 장치까지의 거리, L 은 케이블의 길이, T 는 케이블의 장력, m 은 케이블의 길이당 질량, 그리고 c 는 케이블의 모달 감쇠비 (modal damping coefficient)이다.

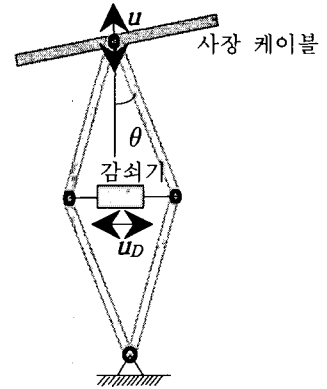


그림 3. 사장 케이블을 위한 가위-잭 형태 토글 시스템

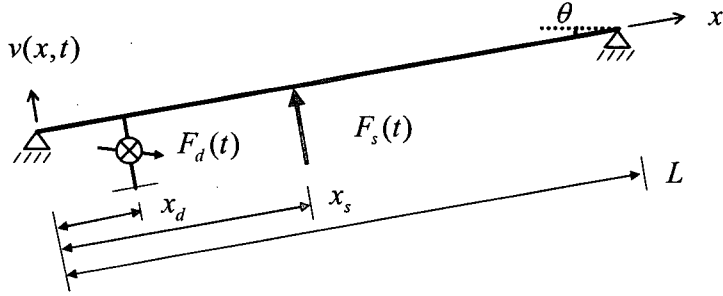


그림 4. 제진 시스템이 설치된 케이블 모델

케이블 모델의 수직방향에 대한 변위 형상이 유한한 수의 진동 모드로 표현할 수 있다고 가정하고 식(6)와 같은 형상함수와 Galerkin Method를 이용하여 식(5)로부터 식(7)과 같은 행렬로 이루어진 지배방정식을 산출하였다.⁽¹⁾

$$\phi_{j+1}(x) = \sin \pi jx$$

$$\phi_1(x) = \begin{cases} x/x_d & 0 \leq x \leq x_d \\ (L-x)/(L-x_d) & x_d \leq x \leq L \end{cases} \quad (6)$$

$$M\ddot{q}(t) + C\dot{q}(t) + Kq(t) = F(t) + \phi_d F_d(t) \quad (7)$$

여기서, M 은 질량행렬, C 는 감쇠행렬, K 는 강성 행렬, F 는 하중 벡터, 그리고 ϕ_d 는 감쇠력 벡터이다.

3. 수치해석

가위-잭 토글 장치가 결합된 수동형 감쇠 장치의 케이블 제진 성능을 검증하기 위하여 Christenson⁽¹⁰⁾이 수행한 실험과 동일한 케이블 모델을 대상으로 수치해석을 수행하였다. 케이블 모델의 제원은 표 1에 나타낸 바와 같다.

표 1. 케이블 제원

항목	제원	항목	제원
케이블 길이 L	12.65 m	모달 감쇠비 ζ	$\zeta_1 = 0.0015$
			$\zeta_2 = 0.003$
			$\zeta_3 = 0.005$
			$\zeta_{j \geq 4} = 0.0005$
길이당 질량 m	0.747 kg/m	자유진동수 ω_0	2.89 Hz
도입 장력 T	2172 N	설치 경사각 θ	20.53 °

케이블 제진을 위해 고려한 제진 장치는 일반적인 선형 점성 감쇠기와 본 논문에서 제안된 가위-잭 토글 장치를 이용한 제진 시스템이다. 두 경우 모두 전체 케이블 길이의 2%인 위치 (즉, $x_d/L = 0.02$)에 제진 시스템을 설치하는 것으로 고려하였다.

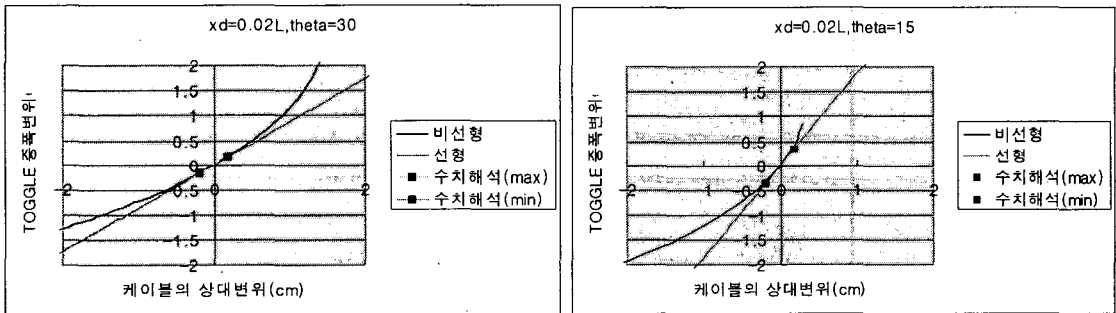
사장 케이블에 대한 외부 하중은 다음 식과 같이 고려하였다.⁽¹⁾

$$f(x, t) = W(t)\sin\pi(x/L) \quad (8)$$

여기서, $W(t)$ 는 가우시안 백색 잡음 (Gaussian white noise)이라 가정하여 사장 케이블을 가진시켰다.

3.1 가위-잭 토글 시스템의 비선형성 검토

먼저, 제안된 가위-잭 토글 시스템의 증폭계수를 식 (3)을 이용하여 선형적으로 계산하는 것이 타당한 지에 대하여 검토하였다. 황재승 등⁽⁶⁾이 기술한 바와 같이, 구조물의 변위 u 와 감쇠장치의 상대변위 u_D 는 비선형 관계를 갖고 있기 때문에 엄밀한 의미에서 증폭계수도 식 (3)과 같은 상수 형태로 표현할 수 없다. 가위-잭 형태 토글 시스템이 늘어나는 경우 (즉, 그림 3에서 케이블이 위쪽으로 이동하는 경우) 감쇠장치의 상대변위가 급격하게 감소하기 때문에 증폭계수는 큰 값을 갖게 되고, 그 반대의 경우 (즉, 그림 3에서 케이블이 아래쪽으로 이동하는 경우) 감쇠장치의 상대변위가 완만하게 증가하기 때문에 증폭계수는 상대적으로 작은 값을 갖는다. 케이블의 상대변위와 토글 장치의 상대변위에 대한 이와 같은 비선형 관계를 그림 5에 나타내었다. 두가지 경우 ($\theta = 30^\circ, 15^\circ$)에 대해서 증폭계수를 선형으로 고려한 수치해석을 수행한 결과, 케이블의 최대 상대변위가 발생하는 구간까지의 토글 증폭변위는 선형으로 근사화한 경우와 비선형으로 고려한 경우가 그다지 차이가 나지 않음을 알 수 있었다. 즉, 본 수치해석의 경우에는 구조물의 상대변위와 제진 시스템의 상대변위의 관계를 선형으로 근사화하여 고려해도 해석 결과에 큰 차이가 없다.



(a) $\theta = 30^\circ$ 인 경우

(b) $\theta = 15^\circ$ 인 경우

그림 5. 가위-잭 토글 시스템의 증폭변위

3.2 제안된 제진 시스템과 선형 점성 감쇠기와의 제진 성능 비교 평가

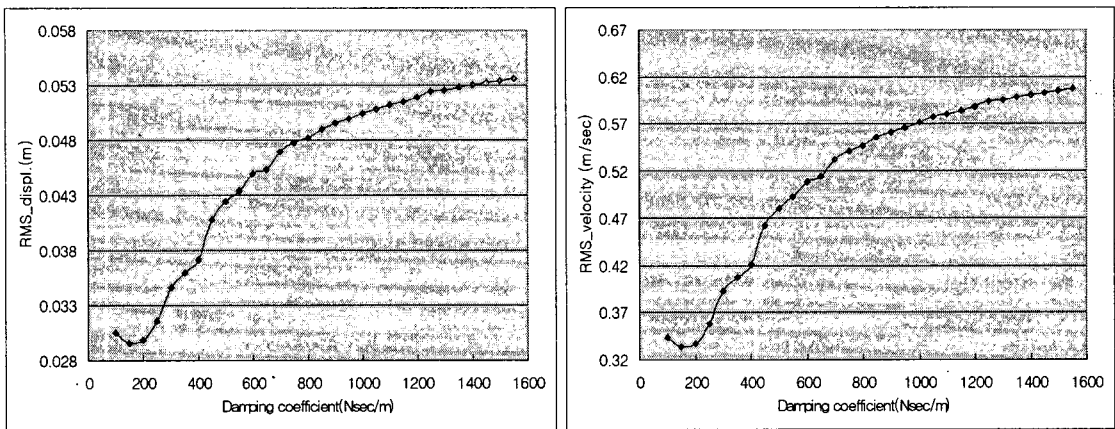
제안된 제진 시스템의 성능을 기존의 점성 감쇠기를 이용한 제진 시스템의 경우와 비교하기 위하여, 감쇠력과 속도가 선형 비례하는 이상적인 선형 점성 감쇠기를 고려하였으며, 이 경우에 감쇠력은 다음 식을 통해 계산할 수 있다.

$$F_d(t) = C_0 v(x_d, t) \quad (9)$$

선형 점성 감쇠기를 사장 케이블에 설치한 후, 감쇠기의 감쇠상수 C_0 를 변화시키면서 수치해석을 수행하여 케이블 중앙 지점에서의 최대 변위, 케이블 전 영역에서의 RMS 변위 및 속도를 추정한 결과 최적의 성능을 발휘하는 감쇠 상수 값이 존재함⁽¹¹⁾을 확인할 수 있었으며, 그 값은 $C_{0, \text{optimal}} = 650 N \cdot \text{sec}/m$ 이다.⁽²⁾

선형 점성 감쇠기에 가위-잭 토글 시스템이 결합된 제안된 제진 시스템의 경우에도, 감쇠기의 감쇠 상수

값을 변화시켜 가며 수치해석을 수행하여 그 결과를 그림 6과 같이 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 이 경우에도 최적의 감쇠상수 값이 존재하고, 그 값은 $200N \cdot sec/m$ 부근이다.



(a) 케이블 전체 영역에서의 RMS 변위

(b) 케이블 전체 영역에서의 RMS 속도

그림 6. 제안된 제진 시스템 설치 시, 감쇠상수 변화에 따른 구조물 응답의 변화

이상과 같은 수치해석 결과는, 이론적으로 얻어진 결과와 일치한다. 즉, 식 (4)와 같이 제안된 제진 시스템의 감쇠력은 케이블의 속도와 선형 비례하기 때문에, 제안된 제진 시스템의 계수값인 $C_{0,proposed}\alpha^2$ 와 기존 선형 점성유체 감쇠기의 $C_{0,viscous}$ 는 같은 값을 갖는다. 따라서, 제안된 제진 시스템의 최적의 감쇠상수 값 $C_{0,proposed} = C_{0,viscous}/\alpha^2$ 이 된다. 이러한 관계식에 따르면, 위의 수치 예제에서 제안된 제진 시스템의 최적의 감쇠상수 값은 $C_{0,proposed} = 650/1.73^2 = 217N \cdot sec/m$ 이다. 이렇게 최적의 감쇠상수 값을 가질 때, 제안된 제진 시스템의 제진 성능은 이론적으로 선형 점성 감쇠기를 고려한 경우와 동일하며, 수치해석을 통해서도 거의 동일한 성능을 보임을 확인할 수 있었다.

제안된 제진 시스템에서 토글 가새의 각도 θ 를 조절함에 따라 증폭계수를 다양하게 변화시킬 수 있기 때문에, 설계 과정에서 사용자가 원하는 용량의 감쇠기를 설치할 수 있도록 고려할 수 있다. 하지만, 증폭계수가 커지는 만큼 토글 가새에 가해지는 압축력도 커지기 때문에 토글 가새의 좌굴 방지에 대한 검토가 필요하다.

4. 결론

본 연구에서는 풍하중에 의한 사장 케이블의 진동을 효과적으로 저감시키기 위하여 가위-책 형태의 토글 장치를 이용한 고성능 감쇠 장치를 제안하였다. 기존에 건물에만 고려되던 가위-책 토글 장치의 매커니즘이 사장 케이블 진동을 저감시키는데 적합하다는 것을 보인 후, 선형 점성 감쇠기와 토글 장치를 결합한 제진 시스템을 케이블 모델에 설치하고 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과, 가위-책 토글 장치에 의해 감쇠기의 상대변위가 증폭되어 보다 작은 용량의 선형 점성 감쇠기를 이용해서 기존 수동형 제진 시스템과 동일한 성능을 얻을 수 있음을 확인하였다. 점성 감쇠기는 정밀도를 요구하는 제작과정 등의 이유로 대용량일수록 제작도 어렵고 가격도 비싸기 때문에, 작은 용량의 감쇠기를 사용할 수 있는 점은 중요한 장점 중의 하나이다. 반면에, 기존 수동형 제진 시스템에 비해 가위-책 토글 장치가 부수적으로 필요하기 때문에 이에 따른 추가 비용 문제와 토글 장치를 이루는 트러스 부재의 좌굴방지 문제 등을 고려해야만 한다.

본 논문에서는 가위-책 토글 장치와 선형 점성 감쇠기를 결합하였지만, 후속 연구에서는 수동형 스마트 감쇠

장치와 결합하여 보다 성능이 우수한 사장 케이블 제진 시스템을 개발하고자 한다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 우수연구센터인 "스마트 사회기반시설 연구센터" 및 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술 연구개발 사업 (03산학연 C103A2000010-03A0200-01010)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Johnson, E. A., Baker, G. A., Spencer, Jr., B. F., and Fujino, Y., "Semiactive Damping of Stay Cables Neglecting Sag," *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 2002.
2. 정형조, 조상원, 장지은, 이인원, "스마트 수동 감쇠 시스템을 이용한 사장 케이블의 진동제어," 한국전산구조공학회 2005년도 봄 학술발표회 논문집, 2005.
3. Constantinou, M. C., Dargush, G. F., Lee, G. C., Reinhorn, A. M., and Whittaker, A. S., "Analysis and Design of Buildings with Added Energy Dissipation Systems," <http://mceer.buffalo.edu/publications/resaccom/0001/rpa_pdfs/10Lee-ketter-2.pdf>
4. Constantinou, M. C., Tsopelas, P., Hammel, W., and Sigaher, A. N., "Toggle-Brace-Damper Seismic Energy Dissipation Systems," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 127(2), 105-112, 2001.
5. Sigaher, A. N., and Constantinou, M. C., "Scissor-Jack-Damper Energy Dissipation System," *Earthquake Spectra*, 19(1), 133-158, 2003.
6. 황재승, 송진규, 강경수, 윤태호, "Toggle 시스템을 이용한 구조물의 진동제어," 한국지진공학회 2003년도 춘계학술대회 논문집, 491-498, 2003.
7. 황재승, 이상현, 김준희, 김장윤, "회전관성댐퍼를 이용한 토글가새 시스템 개발," 한국전산구조공학회 2003년도 봄 학술발표회 논문집, 348-354, 2003.
8. 황재승, 이상현, 송진규, 홍성목, "토글-회전관성댐퍼를 이용한 구조물의 성능개선," 대한건축학회 학술발표논문집, 23(1), 47-50, 2003.
9. 이상현, 황재승, 민경원, 이명규, "토글 가새-MR 감쇠기 시스템의 제진성능평가," 한국지진공학회 2005년도 학술대회 논문집, 421-428, 2005.
10. Christenson, R. E., "Semiactive Control of Civil Structures for Natural Hazard Mitigation: Analytical and Experimental Studies," Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering and Geological Sciences, University of Notre Dame, Indiana, USA, 2001.
11. Pacheco, B. M., Fujino, Y., and Sulekh, A., "Estimation Curve for Modal Damping in Stay Cables with Viscous Damper," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 119(6), 1993.