

케이블 진동 저감을 위한 고성능 감쇠 장치의 제진성능 평가

Evaluation of Control Performance of High-Performance Damping Device for Suppressing Vibration of Stay Cable

박철민^{*} · 정형조^{**} · 정운^{***} · 이인원^{****}

Park, Chul Min · Jung, Hyung Jo · Jeong, Woon · Lee, In Won

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. 사장교는 케이블을 주부재로 한 유연한 구조물이기 때문에 풍하중에 의한 진동으로 인해 내풍 안정성에 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 이를 해결하는 것이 급선무이다.

케이블은 매우 유연하여 외부 하중으로 인하여 발생된 변형을 억제 할 수 없으며, 매우 낮은 감쇠비를 갖기 때문에 진동에너지를 소산시키지 못한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 저자는 두 가지 방향으로 연구를 수행하고 있다. 첫 번째는, 사장 케이블에 대한 제진 성능이 기존 감쇠 장치보다 우수한 수동형 감쇠 장치 또는 제진 시스템을 개발하는 것⁽¹⁾이고, 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 다루고 있다.

본 연구에서는 토글 장치에 대한 기존 연구 중에서, 장치의 형태 및 작동 원리를 살펴 볼 때 사장 케이블 제진 장치에 가장 적합한 것으로 판단된 Sigaher 등⁽³⁾이 제안한 가위-잭-감쇠기 (scissor-jack-damper) 형태의 토글 장치를 사장 케이블의 내풍 대책으로 적용하고자 한다. 따라서 실험을 통해 기존 수동형 감쇠 장치, passive-on MR 댐퍼 그리고 고성능 감쇠장치의 제진 성능을 비교하여 제안된 고성능 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. 고성능 감쇠 시스템과 사장 케이블 모델

2.1 케이블에 설치된 고성능 감쇠 시스템

지금까지의 토글 시스템은 모두 건축 구조물을 대상으로 연구되어져 왔다⁽⁴⁻⁶⁾. 각 토글 시스템의 개념과 거동 원리, 실제 적용 가능성 등을 검토한 결과, 가위-잭 형태의 토글 시스템이 사장 케이블에 적용하기 적합하다는 사실을 도출해냈다⁽¹⁾. 그림 1은 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. 따라서 다음과 같은 선형차원의 증폭계수를 가진다.

*한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사과정 · E-mail: paust@kaist.ac.kr - 발표자
 **정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 조교수 · 공학박사 · E-mail: hjung@sejong.ac.kr
 ***현대건설기술개발원 선임연구원 · E-mail: maskwj@hdec.co.kr
 ****정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 · 공학박사 · E-mail: iwlee@kaist.ac.kr

$$\alpha = 1/\tan\theta \tag{1}$$

이 경우의 증폭계수는, $\theta = 30^\circ, 25^\circ, 20^\circ$ 일 때 각각 $\alpha = 1.73, 2.14, 2.75$ 이다. 이때 각도 θ 는 케이블의 수직변위와 토글 시스템의 한 트러스 부재가 이루는 각이다.

실험에 사용된 반능동 감쇠기는 미국 Lord사에서 제작된 유변 유체 감쇠기(모델명:RD-1097-01)로써 케이블 하부 지지 점으로부터 3.12m(전체 케이블 길이의 7%) 떨어진 지점에 케이블과 수직으로 설치되었다. 감쇠기의 최대 감쇠력은 약 $\pm 100N$ 이고 최대 전압입력은 10V이다.

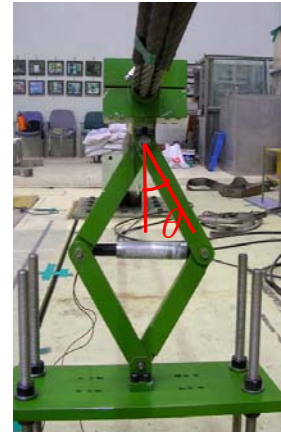


그림 1. 사장 케이블에 설치한 가위-잭 댐퍼시스템

2.2 케이블 모델

본 연구에서 대상으로 사용한 케이블은 PVC 피복을 갖는 고장력 케이블로서, 현대건설 기술연구소에 그림 2와 같이 설치되어있으며 케이블의 제원은 표 1과 같다. 실험을 실시할 때의 사장 케이블은 500kN의 초기장력이 도입되었으며, 새그비(Sag-to-span ratio)는 0.10%로 매우 작은 처짐을 갖는다. 따라서 대상 케이블의 모델을 그림 2와 같이 처짐을 갖지 않는 이상적인 사장 케이블과 유사하다고 가정하여, 식 (2)와 같은 지배 미분 방정식을 구성하였다.

$$m\ddot{v}(x, t) + \dot{c}v - Tv''(x, t) = F_s(t)\delta(x-x_s) + F_d(t)\delta(x-x_d) \tag{2}$$

여기서, $v(x, t)$ 는 케이블의 수직방향의 변위, $F_d(t)$ 는 가위-잭 감쇠기로부터 케이블에 전달되는 감쇠력, $F_s(t)$ 는 가진기로부터 케이블에 전달되는 가진력이다.



그림 2. 케이블 댐퍼

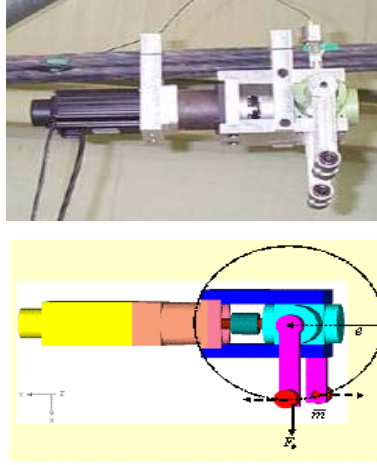


그림 3. 케이블 가진기

표 1. 케이블 제원

물성	기호	크기
케이블 길이	L	44.7m
길이당 질량	m	0.090kN/m
도입 장력	T	500kN
모달 감쇠비	ζ	$\zeta_1 = 0.0015$ $\zeta_{i \geq 2} = 0.0005$
자유진동수	ω_0	2.44Hz
설치 경사각	θ	8.37°

2.3 케이블 가진 시스템

케이블의 진동을 발생시키기 위하여 그림 3과 같이 김남식 등에 의해 개발된 가진 시스템을 사용하였다. 케이블 가진 시스템은 불평형 가진 추질량을 서로 반대방향으로 회전시켜 케이블의 수직방향으로 조화 가진력을 발생시키게 된다(그림 3).

3. 고성능 감쇠시스템의 케이블 진동제어 성능평가 실험

3.1 케이블 공진조화 실험

본 연구에서는 가위-잭 시스템의 케이블 진동제어 성능을 평가하기 위하여 케이블의 공진 조화 실험을 수행하였다. 사장 케이블에 설치된 가진 시스템을 이용하여 케이블의 1차 고유 진동수를 갖는 조화하중을 가하여 케이블의 공진을 유발한다. 일정시간동안 케이블을 가진하여 충분한 진폭을 확보한 후 가진 시스템을 멈추면 케이블은 주로 1차 모드로 자유진동하게 된다. 감쇠기의 성능을 비교하기 위하여 자유진동시 하단 지지 점으로부터 8.94m 지점의 자유진동 변위를 측정 한 후, Hilbert Transform을 이용한 케이블의 감쇠 추정기법으로 케이블의 변위에 대한 감쇠비 변화 그래프를 얻었다.

3.2 수동 MR 감쇠기의 케이블 진동제어 성능 비교평가

수동 MR 감쇠기의 성능을 고성능 감쇠 시스템의 제어 성능과 비교하기 위하여 수동 MR 감쇠기의 진동 제어 성능을 측정하였다. 수동형으로 사용된 MR 감쇠기는 0V부터 9.5V사이의 전압 값이 제어하는 동안 일정하게 주어지며 감쇠기의 감쇠비는 일정하게 유지된다. 그림 4에서 알 수 있듯이, 제어 하지 않은 경우 0.1% 미만이었던 케이블의 감쇠비가 수동 MR 감쇠기를 사용했을 경우 진폭이 5~6mm 일 때 최대 1.5%까지 증가 되었으며 케이블의 진폭이 작아질수록 감쇠비는 더욱 증가된다는 것을 알 수 있다. 또한 수동 MR 감쇠기 중 MR 감쇠기의 전압 입력이 9.5V로 주어진 경우가 다른 수동 MR 감쇠기보다도 좋은 성능을 보였다

3.3 고성능 감쇠 시스템의 케이블 진동제어 성능 비교평가

수동 MR 감쇠기에 가위-잭 토크 시스템을 구성한 후 각도 $\theta = 30^\circ, 25^\circ, 20^\circ$ 에 따라, MR 감쇠기의 전압을 0V 와 9.5V까지 변화시켜서 실험을 수행하여 그 결과를 그림 4와 같이 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 전압이 클수록 케이블과 MR 댐퍼의 강한 비선형성으로 인하여 감쇠비가 큰 폭으로 증가되는 것을 확인할 수 있다.

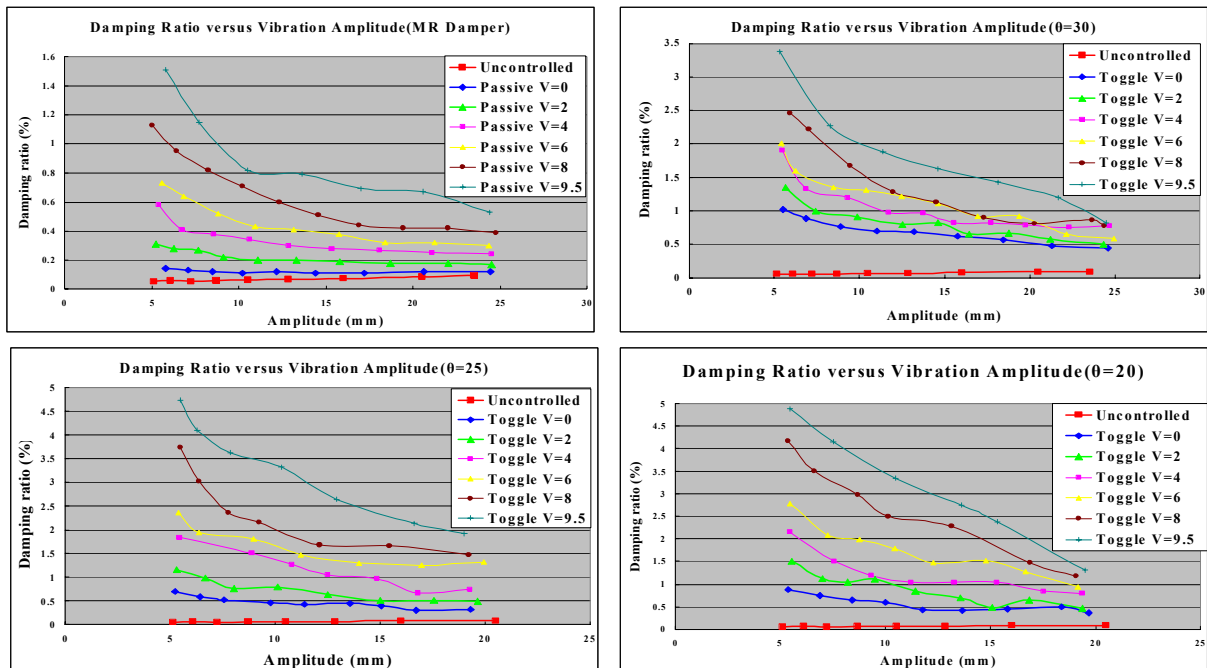


그림 4. 수동 MR 감쇠기와 고성능 감쇠 시스템을 적용했을 때의 케이블의 감쇠비

3.4 고성능 감쇠 시스템과 선형 점성 감쇠기 성능 비교평가

비교분석을 위하여, 성능실험에 사용된 점성유체댐퍼는 Kayaba사의 제품으로 최대하중 50kN, 스트로크는 ± 50 mm, 허용주파수는 0.2~0.5Hz, 한계속도 1m/sec이며 감쇠력이 속도비례 성능을 가진 감쇠기이다. 점성유체댐퍼와 고성능 감쇠시스템($\theta = 20^\circ$)의 감쇠비를 비교분석한 결과 표 2와 같다.

표 2. 선형과 고성능 감쇠 시스템의 성능 비교분석

변위범위 [mm]	감쇠시스템	선형 점성 감쇠기	고성능 감쇠 시스템
5~7		4.47	4.88
7~9		5.48	4.15

비교분석 결과 변위범위 5~7mm에서는 고성능 감쇠 시스템이 더 좋은 성능을 보이며, 7~9mm에서는 선형 점성 감쇠기의 성능이 더 좋다. 그러나 MR댐퍼의 최대용량이 100N에 불과한 것을 볼 때 매우 뛰어난 성능임을 확인 할 수 있으며, 큰 용량의 선형댐퍼를 제작하는 비용을 고려할 때 경제성 또한 확보할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 사장 케이블의 진동을 효과적으로 감쇠시키기 위하여 제안된 고성능 감쇠 시스템을 사용하여 실제 구현하고 케이블에 적용하여 그 성능을 비교 분석하였다. 고성능 감쇠 시스템의 성능 평가 지표로서 케이블의 비선형성을 고려할 수 있도록 Hilbert Transform을 사용하여 얻은 케이블의 진폭에 따른 등가 점성 감쇠비를 사용하였다. 그 결과 가위-잭 토글 시스템은 하부 지지 점으로부터 8.94m 떨어진 지점의 케이블의 진폭이 약 5~6mm 일 때, 케이블의 등가 점성 감쇠비를 최대 4.88%까지 증가시켰으며, 제어하지 않은 경우 0.1% 미만의 등가 점성 감쇠비에 비해서 매우 큰 감쇠비를 보여주었다. 또한 선형 점성 감쇠기와 성능 비교한 결과 비교할만한 좋은 성능이며, 댐퍼 용량의 한계를 뛰어넘는 우수한 결과를 보여주고 있다. 따라서 본 연구에서는 고성능 감쇠 시스템인 가위-잭 토글 시스템이 제어능력과 경제성면에서 모두 우수한 케이블 진동 제어장치임을 실험을 통하여 입증하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 · 한국과학재단 지정 “스마트 사회기반시설 연구센터”에서 연구비 지원으로 수행된 것으로 연구비 지원에 감사드립니다.

본 연구는 케이알 콘소시업에서 제공된 선형점성댐퍼 결과를 이용하였으므로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 정형조, 박철민, 장지은, 박규식, 이인원, “사장케이블 제진을 위한 고성능 감쇠장치,” 한국전산구조공학회 2005년도 봄 학술발표회 논문집, 2005.
2. 정형조, 조상원, 장지은, 이인원, “스마트 수동 감쇠 시스템을 이용한 사장 케이블의 진동제어,” 한국전산구조공학회 2005년도 봄 학술발표회 논문집, 2005.
3. Sigaher, A. N., and Constantinou, M. C., “Scissor-Jack-Damper Energy Dissipation System,” Earthquake Spectra, 19(1), 133-158, 2003.
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. 황재승, 송진규, 강경수, 윤태호, “Toggle 시스템을 이용한 구조물의 진동제어,” 한국지진공학회 2003년도 춘계학술대회 논문집, 491-498, 2003.
6. 이상현, 황재승, 민경원, 이명규, “토글 가새-MR 감쇠기 시스템의 제진성능평가,” 한국지진공학회 2005년도 학술대회 논문집, 421-428, 2005.