

# 사장교 케이블의 풍진동 해석을 통한 비선형 댐퍼의 성능 검증

## Performance Evaluation of a Nonlinear Cable Damper for Stay Cables Using Wind Vibration Analysis

김 상 범\* · 이 성 진\*\*  
Kim, Saang Bum · Lee, Sung Jin

---

### ABSTRACT

Wind induced vibration of a stay cable with a nonlinear friction damper is investigated. Stay cables are likely to vibrate under several wind-related environments, and cable dampers can be used to suppress the excessive vibrations of stay cables. Conventional design of cable dampers are based on the equivalent modal damping achieved by the cable damper. However, the equivalent modal damping achieved by nonlinear dampers are depend on the vibration characteristics like the amplitude of the vibration. In this paper, not only the achieved equivalent modal damping, but also the vibration levels under gust wind are analyzed through the time domain buffeting analysis. Numerical simulation results show the efficacy of a nonlinear friction damper for suppressing the excessive vibration of a stay cable.

**Keywords:** buffeting analysis, stay cables, cable damper, friction damper.

---

### 1. 서 론

케이블은 장력을 주로 받는 구조 부재로서, 구조적 효율성이 매우 뛰어나나, 낮은 감쇠비와 휨강성으로 인하여, 과도한 진동이 발생하기 쉽고, 발생한 진동이 오래 지속되는 특징이 있다. 사장교와 같은 장대 케이블 구조물의 케이블에서 발생할 수 있는 진동으로는, 바람에 의한 와류진동, 웨이크 깎로핑, 풍우진동, 버페팅 등과, 지점 가진에 의한 진동, 특히 장력 변화에 의한 파라메트릭 진동 등이 알려져 있으며, 케이블 댐퍼를 설치하여, 케이블의 감쇠비를 증가시킴으로써, 진동에너지를 소산시키고, 케이블의 과도한 진동을 억제시킬 수 있다. 일반적으로, 케이블 댐퍼의 성능은, 이렇게 증가된 등가 모드 감쇠비를 기준으로 평가하게 되나, 실제 댐퍼의 감쇠비는 비선형성을 갖게 되며, 특히, 마찰댐퍼와 같은 비선형 댐퍼의 경우에는, 진폭과 같은 진동의 특성에 따라 등가 모드 감쇠비가 변화하는 성질을 갖고 있다. 그러므로, 이 논문에서는, 케이블 댐퍼가 설치된 사장교 케이블의 풍진동 해석을 시간영역에서 수행함으로써, 비선형 마찰댐퍼의 성능을 검증하고자 한다.

---

\* 정회원 · 삼성물산(주) 건설부문 연구원 Email: saangbum.kim@samsung.com

\*\* 정회원 · 삼성물산(주) 건설부문 연구원 Email: jinilsj.lee@samsung.com

## 2. 케이블 댐퍼가 설치된 케이블의 동특성

케이블 댐퍼가 케이블의 끝단으로부터 중앙에 가깝게 설치될수록 케이블의 감쇠비가 커지게 되나, 시공과 유지관리 및 경관상의 이유로 인해, 설치 가능한 위치에는 제한이 있다. 또한, 케이블의 감쇠비는, 설치되는 댐퍼의 감쇠비에 의해 결정되는데, 선형 점성 댐퍼의, 설치 위치와 감쇠비에 대한, 케이블의 모드별 감쇠비를 다음 그림에 보였다. 많은 경우에, 두 번째 모드에 대해, 최적이 되도록 댐퍼를 설계하게 되나, 설계된 모드가 아닌 다른 모드들에 대해서는 감쇠비가 감소되며, 특히 첫 번째 모드에 대해서는 감쇠비가 80% 정도로 감소된다.

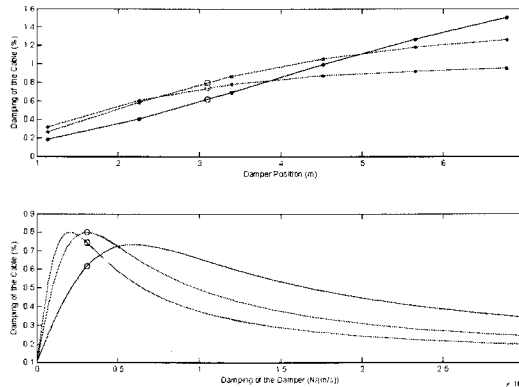


그림 1 선형 점성 댐퍼의, 설치 위치와 감쇠비에 대한, 케이블의 모드별 감쇠비  
(Blue: 1st, Green: 2nd, Red: 3rd)

선형 점성 댐퍼의 감쇠력이, 댐퍼 피스톤의 상대 속도에 비례함에 비해, 비선형 마찰 댐퍼의 감쇠력은, 댐퍼에 작용되는 외력이 마찰계수에 의한 최대 정지 마찰력보다 작은 경우에는, 작용되는 외력과 같은 크기의 반력으로 작용하며, 그렇지 않은 경우에는, 일정한 크기의 마찰력을 갖는다. 이와 같은 마찰댐퍼의 비선형 특성으로 인해, 마찰댐퍼가 설치된 케이블의 등가 감쇠비는, 케이블의 진동 상황에 따라 다르게 나타난다. 마찰댐퍼가 설치된 케이블의 자유진동을 수치모의 실험하여 다음 그림에 보였다.

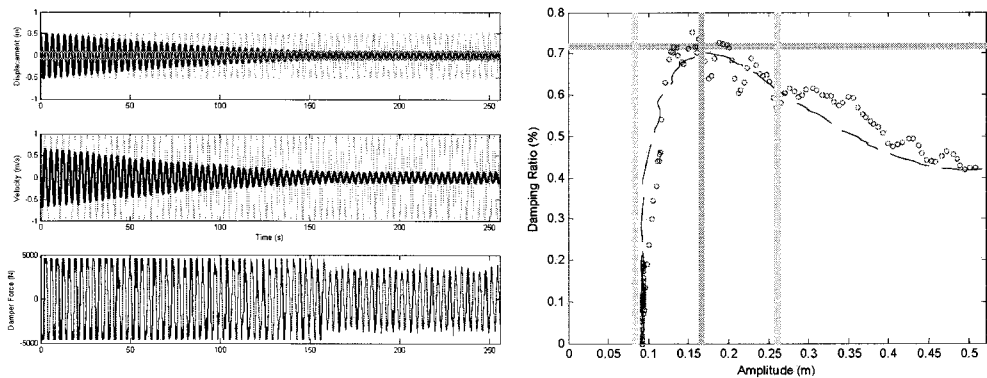


그림 2 Free Vibration and Estimated Equivalent Damping Ratio vs Amplitude

케이블의 초기변위는, 케이블 길이의 2/1600 (= 0.5213 m)로 설정하였으며, 마찰댐퍼가 설치되지 않은 케이블의 경우에, 자체 감쇠비가 매우 작으므로, 초기 진동이 거의 감소하지 않으나 (그림에서 가는 파란선), 마찰댐퍼가 설치된 경우에는, 초기 진동이 급속히 감소되는 것을 알 수 있다 (그림에서 굵은 검은선). 자유진동의 초기에는, 최대 마찰력이 작용되며, 150 s 이후에서는, 최대 정지 마찰력 보다 적은 마찰력이 작용된다. 이때 케이블의 진폭은 케이블 길이의 1/5000 (= 0.0834 m) 이하로서, 임계진폭 이하의 작은 진동에서는 마찰댐퍼에 의한 감쇠 효과가 거의 없고, 케이블 자체의 낮은 감쇠비로 인해, 작은 여진이 상당히 오랜 시간 지속됨을 확인할 수 있다. 그러나 많은 경우에, 사장교의 시방기준은, 최대 진폭이 케이블 길이의 1/1600 (= 0.2607 m) 이하를 만족시키면 충분하며, 자유진동에 있어서는 이 기준을 만족시킨다. 케이블 길이의 1/5000 (= 0.0834 m) 에서 마찰댐퍼가 작동하기 시작하며, 등가감쇠비가 급격히 증가한다. 최대 등가감쇠비는, 마찰댐퍼의 설계시 사용된대로, 케이블 길이의 1/2500 (= 0.1668 m) 에서 얻어지며, 시방기준인 케이블 길이의 1/1600 (= 0.2607 m) 에서 0.6106 %의 등가 감쇠비를 얻게 된다. 수치해석을 통해 구해진 결과는 실규모 케이블에 대한 Mock-up Test결과와 전체적으로 같은 경향을 보인다.

### 3. 비선형 마찰 댐퍼가 설치된 케이블의 풍진동 해석

이론과 실험에서 나타난 바와 같이, 마찰댐퍼의 등가감쇠비는 진폭에 대해 급격한 변화를 갖게 된다. 일반적으로, 사장교 케이블의 진동에 대한 기준에서는, 주탑의 탐정부에서 20 m/s 의 바람이 부는 경우에, 케이블의 최대 진폭이 케이블 길이의 1/1600 을 넘지 못하도록 하고 있다. 여기서는, 탐정부의 풍속 20 m/s 인 경우에 대하여 Buffeting 해석을 수행하였다.

수치해석에 사용된 Gust Wind는, 다음과 같은 Karman 파워 스펙트럼을 갖도록 생성하였다.

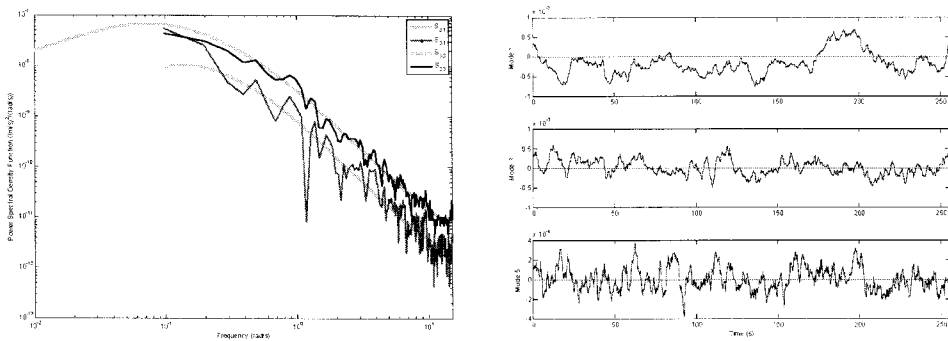
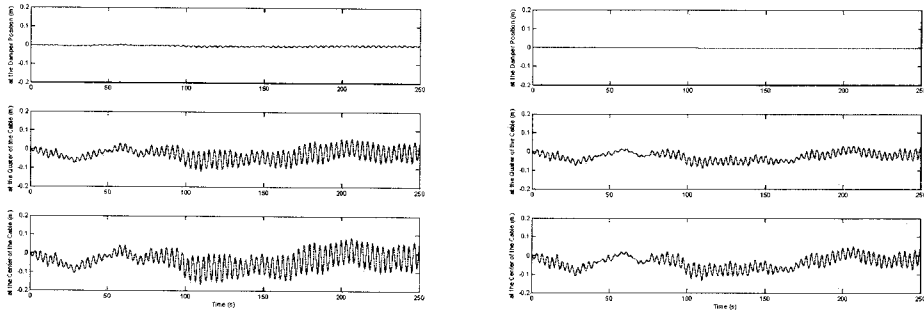


그림 3 Artificially Generated Wind Loads

댐퍼가 설치되지 않은 케이블의 진동과 마찰댐퍼가 설치된 케이블의 진동은 다음 그림과 같다. 마찰댐퍼를 설치함으로써, 케이블 중앙에서의 최대 진폭이 0.1681 m에서 0.1312 m로 22% 감소하였음을 알 수 있다. 또한 진동의 발생초기에는 진동감소효과가 미미하였으나, 진동이 어느 정도 진행되어 댐퍼의 감쇠력이 증가됨에 따라, 진동을 저감 효과가 커지는 것을 알 수 있다. 댐퍼에 작용되는 외력이 최대 정지 마찰력을 넘어서고, 댐퍼의 피스톤이 움직이는 구간에서는, 일정한 크기의 한계를 갖는 감쇠력이 작용됨을 알 수 있다.



(a) w/o Friction Damper (b) with Friction Damper

그림 4 Gust Wind Load를 받는 케이블의 진동

#### 4. 결 론

마찰댐퍼가 설치된 사장교 케이블의 풍진동에 대하여 연구하였다. 자유진동해석을 통하여, 케이블 진폭에 대하여 비선형 특성을 갖는 등가감쇠비를 확인하였으며, 마찰댐퍼의 작동 임계 변위, 최대 감쇠비, 설계 최대 변위 감쇠비, 및 마찰력의 관계를 확인하였다. Gust Wind에 대한 버페팅 해석을 수행하였으며, 마찰댐퍼를 사용함으로써 케이블의 진동을 효과적으로 감소 시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한 설계된 진폭 이하에서는 댐퍼의 효과가 거의 없음을 알 수 있다. 실제 케이블의 과도한 진동은 풍우진동이나, 파라메트릭 진동으로 알려져 있으며, 이에 대한 검토가 추가로 필요하다고 판단된다.

#### 감사의 글

이 연구에 많은 자문과 도움을 주신, 한국도로공사의 안상섭 박사님께 감사드립니다.

#### 참고문헌

안상섭 (2002) 사장교 케이블의 진동 검토 및 대책, **대한토목학회 논문집**, 22(3a), pp.663~678.  
 Main, J.A. and Jones, N.P. (2002). Free Vibrations of Taut Cable with Attached Damper II: Nonlinear Damper, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 128(10), pp1072~1081.  
 RWDI (2006). *Wind Climate Analysis Incheon Bridge*  
 Samsung Research Institute of Technology (2007). *Design of Cable Dampers for Cable Stayed Bridge*  
 VSL (2006). *VSL Stay Cable System*