

## 사장교 케이블 진동감소용 납-전단 댐퍼의 설계

### Design of Lead-Shear Damper for Stay Cables

안 상 섭<sup>1)</sup>

Ahn, Sang Sup

---

#### ABSTRACT

This paper presents the dynamic behavior of stay cable with Lead-Shear damper (LSD) near the support. This kind of research about the dynamic behavior of LSD is essential to design LSD in order to mitigate the ambient vibration of stay cable. The hysteresis curve of LSD was assumed to be perfect elasto-plastic behavior based on the real hysteretic behavior of such lead-based dampers. Mechanical model of LSD was equivalent Kelvin model and sag effect of stay cable was considered. Yielding force (also referred as size) of LSD was selected as a design parameter. Effects of tension of stay cable and installation point of LSD were studied. It was found that optimal size of LSD exists for each case of stay cable.

---

#### 1. 서론

사장교의 장경간화에 따른 사장교 케이블 길이의 증가와 효과적인 응력 재분배를 위해 케이블 수량이 증가되고 그에 따라 케이블 부재당 소요 단면적이 줄어들어 케이블 부재의 휨강성은 더욱더 적어지고 있다. 케이블 부재를 구성하는 스트랜드 자체의 감쇠력도 작고 케이블 부재는 동적 장력에 의한 변형에너지보다 초기장력에 의한 변형에너지가 훨씬 커서 케이블 부재 자체로는 감쇠비가 0.1%~0.2% 정도로 적을 수밖에 없다.(Yamaguchi 등, 1995) 따라서 최근 몇 년 전부터 사장교를 건설, 유지관리를 하고 있는 여러 나라에서 사장교 케이블의 진동문제가 심각하게 대두되고 있다. 사장교 케이블의 진동 원인은 크게 풍진동, 풍-우진동 그리고 데크나 주탑의 운동에 의한 진동을 들 수 있다.

이러한 케이블 부재의 진동문제에 대한 해결책으로는 케이블에 감쇠력을 증진시키는 방법을 들 수 있다. 케이블에 감쇠력을 증진시키는 방법으로는 스트랜드 피복, 그라우팅, 케이블 튜브등의 재질로 고감쇠 물질을 사용하는 방법 (Yamaguchi 등, 1995), 케이블 앵커근처에 감쇠장치를 설치하는 방법 (Pacheco 등, 1993, Takano 등, 1997, Xu 등, 1998) 그리고 케이블 부재의 끝단을 능동제어하는 방법 (Achkire 등, 1996)등을 들 수 있다. 특히 케이블 부재에 감쇠장치를 설치하는 방법은 경제적, 기술적인 이유로 유해 진동에 대한 해결책으로 많이 선택되고 있다. 더구나 감쇠 장치 중에서도 이력형 댐퍼의 한 종류인 납-전단 댐퍼는 온도변화와 같은 외부환경에 영향을 덜 받고 내구성과 감쇠 능력이 뛰어나다는 점에서 케이블의 진동 감소장치로 사

---

1) 한국도로공사 도로연구소 콘크리트구조연구실 책임연구원, 정회원

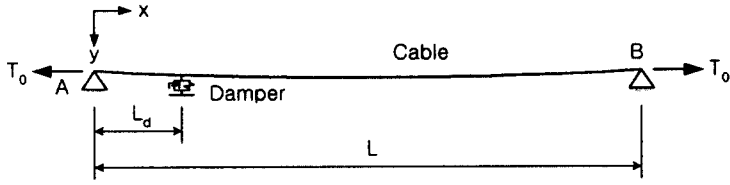


그림 1. 케이블-댐퍼 시스템

용될 때 큰 장점이 있다.

본 연구에서는 사장교 케이블과 같이 새그가 비교적 적은 케이블의 진동 감소 목적으로 납-전단 댐퍼를 사용한다. 납-전단 댐퍼 및 케이블의 해석을 위한 모델링 방법을 제시하고 납-전단 댐퍼의 진동 감소 능력 및 거동 특성 파악한다. 케이블 진동감소용 납-전단 댐퍼를 설계하기 위한 기본적인 연구로 여러 가지 케이블에 다양한 납전단을 설치하여 최적의 감쇠효과를 나타내는 조건을 살펴본다.

## 2. 케이블-댐퍼 시스템 모델

그림 1에는 감쇠장치가 설치된 케이블이 그려져 있다. 케이블의 단위 길이당 질량은  $m$ , 축방향 강성은  $EA$ , 그리고  $T_0$ 는 초기장력의  $x$  방향성분으로 케이블의 새그비가 작은 경우 케이블 길이에 대해 일정하다고 가정할 수 있다. 감쇠장치는 지점  $A$ 로부터  $L_d$  위치에 설치되며, 감쇠력은  $F_d$  이다. 시간  $t$ 일 때 지점  $A$ 에서  $x$  만큼 떨어진 점에서 동적 변위의  $x$  방향성분을  $u(x, t)$ ,  $y$  방향 성분을  $v(x, t)$ 라 한다. 케이블의 운동시 면의 진동은 선형이론하에서 단진자운동으로 간주할 수 있고 이에 의한 동적 장력의 증가치는 무시할 만하므로 본 연구에서는 정적 평형상태에서의 케이블 평면내의 운동만 고려한다. 또한 케이블의 경사효과는 케이블 자중에만 나타나므로 여기서는 케이블 자중을  $q_y = mg \cos \theta$  로 나타내어 케이블의 경사효과를 고려한다. 여기서  $\theta$ 는 케이블 코드가 수평과 이루는 경사각이다. 이와 같은 조건하에서 케이블의 운동방정식은 다음과 같다.

$$[(T_0 + T)u' + T]' = m\ddot{u} + c\dot{u} \quad (1)$$

$$[(T_0 + T)v' + Ty']' + F = m\ddot{v} + c\dot{v} + F_d \quad (2)$$

여기서  $'$ 은  $\partial/\partial x$ 를  $\dot{\phantom{x}}$ 는  $\partial/\partial t$ 를 나타낸다.  $c$ 는 케이블 자체의 감쇠계수,  $T(=EA\varepsilon)$ 는 케이블의 운동에 의한 부가장력을 나타내며  $t$ 와  $x$ 에 대한 함수이다.  $\varepsilon$ 은 동적 변위에 의한 변형도로 비선형 항을 무시한다.

사장교에 사용되는 케이블은 사용상태에서 새그비가 보통 1/200 정도로 매우 평평하고 단면 강성에 비해 도입되어 있는 정적 장력이 적다. 이제 축방향에 대해 케이블이 유사정적 거동을 한다고 가정하여 감쇠와 관성효과를 무시하면 식 (1)로부터 동적 부가장력  $T$ 는 케이블 길이에 대해 일정한 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 즉  $T = EA\varepsilon$ 와 케이블의 양단 고정의 경계조건을 고려하여 포물선 케이블의 동적 장력은 다음과 같이 구해진다.

$$T(t) = \frac{EA}{L} \frac{q_y}{T_0} \int_0^L v dx \quad (3)$$

식 (2)의 동적 변위( $v$ )를 일반화 좌표  $q_i(t)$ 와 모드형상  $\phi_i(x)$ 의 중첩으로 나타내고 Galerkin의 방법을 적용하면 다음과 같은 모드별 방정식을 얻을 수 있다.

$$M\ddot{Q} + C\dot{Q} + (K_I + K_E)Q + F_D = F \quad (4)$$

여기서  $M = [M_{ij}] = \frac{mL}{2} \delta_{ij}$ ,  $C = [C_{ij}] = \frac{cL}{2} \delta_{ij}$ ,  $K_I = [K_{I,ij}] = \frac{i^2 \pi^2 T_0}{2L} \delta_{ij}$ ,

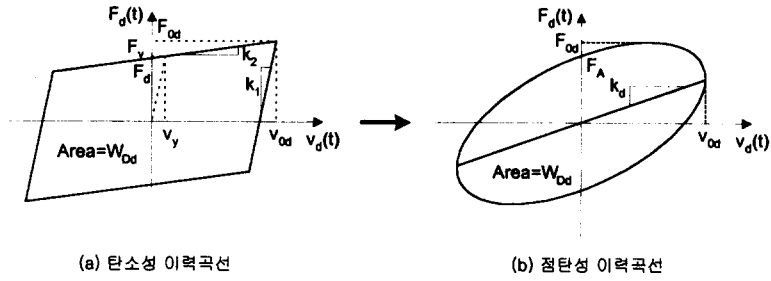


그림 2. 납-전단 댐퍼 이력곡선의 이상화

$K_E = [K_{E,ij}] = \frac{\lambda^2 T_0}{\pi^2 L} \frac{[1 - (-1)^i][1 - (-1)^j]}{ij}$ ,  $F_D = \{F_{Dk}\} = F_d(t) \sin i\pi \frac{x_d}{L}$ ,  $F = \int_0^L F(x, t) \phi_i(x) dx$  이며  $Q = \{q_1, q_2, q_3, \dots\}^T$ 이다. 또한  $\lambda^2 = (q_j L)^2 (EA/T_0^2)$ 이다.  $K_1$  그리고  $K_E$ 는 각각 케이블의 초기장력(현수선 거동)과 탄성변형에 의한 강성성분이다. 벡터  $F$ 는 케이블의 분포하중에 의한 외력벡터이며  $F_D$ 는 감쇠 장치에 의해 발생하는 힘이다.

본 연구에서는  $\phi_i(x)$ 로 댐퍼가 설치되지 않은 양단 고정 케이블의 모드형상을 사용하였다. 실제로  $x=L_d$  지점에 감쇠장치가 설치되어 있는 경우 모드형상은 본 연구에서와 같이 정현파의 형태가 아니지만 댐퍼의 변형에너지에 대한 케이블의 변형에너지 비가 1%~2% 정도로(Thiele, 1996) 아주 작은 값이므로 댐퍼에 의한 케이블 모드형상 변화는 무시한다.

### 3. 납-전단 댐퍼 모델

납-전단 댐퍼는 이력형 댐퍼로서 그림 2(a)와 같은 Hysteresis 거동을 보인다. 이러한 이력형 댐퍼는 Bilinear 모델등으로 가정하여 비선형 해석을 할 수 있으나 본 논문에서는 계산상의 편의를 위해 감쇠장치의 이력 곡선을 그림 2(b)와 같이 강성을 가지는 타원형 이력으로 치환하고 등가 Kelvin 모델을 사용한다. 즉 감쇠 장치의 감쇠력은 다음과 같이 표현된다(Reinhorn 등, 1995).

$$F_d = k_d v_d + c_d \dot{v}_d \quad (5)$$

여기서  $k_d$ ,  $c_d$ 는 각각 감쇠장치의 탄성계수와 감쇠계수를 나타낸다. 일반적으로 납-전단 댐퍼는 사용상태에서 완전 탄소성 거동을 보이도록 설계할 수 있으며 항복 변위가 아주 작은 특성을 보인다. 따라서 본 논문에서는 납-전단 댐퍼의 이력곡선을 완전 탄소성( $k_2=0$ )으로 가정한다. 이 경우 댐퍼의 강성과 감쇠는 다음과 같이 표현된다.

$$k_d = \frac{F_y}{v_{0d}} \quad (6)$$

$$c_d = \frac{4F_y(v_{0d} - v_y)}{\pi \Omega v_{0d}^2} \quad (7)$$

여기서  $\Omega$ 는 감쇠 장치의 가진 진동수,  $F_y$ ,  $v_{0d}$ 는 각각 납-전단 댐퍼의 항복력과 변위를 나타내며  $v_y$ 는 납-전단 댐퍼의 항복 변위를 말한다. 식 (6)과 (7)을 보면 댐퍼의 강성과 감쇠는 변위의 함수가 된다. 일반적으로 댐퍼의 설계시 가해지는 변위의 범위는 정해져 있고 실제로 댐퍼가 역할을 하는 상시진동의 상태는 정상상태응답을 나타내므로 댐퍼의 강성과 감쇠가 변위와 무관하다고 가정할 수 있다. 이러한 가정에 의하여 식 (4)의  $F_D$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_D = K_D Q + C_D \dot{Q} \quad (8)$$

여기서

$$K_D = [K_{D,\ddot{v}}] = k_d \sin i\pi \frac{x_d}{L} \sin j\pi \frac{x_d}{L} \quad (9)$$

$$C_D = [C_{D,\ddot{v}}] = c_d \sin i\pi \frac{x_d}{L} \sin j\pi \frac{x_d}{L} \quad (10)$$

이다.

식 (6)과 (7)에서 보듯이 댐퍼의 강성과 감쇠가 댐퍼의 변위의 함수가 되므로 외부하중에 의한 케이블의 정상상태 응답을 얻기 위해서는 댐퍼의 변위에 대한 반복계산이 필요하다. 즉 주어진 크기와 진동수를 갖는 외부하중에 의해 발생하는 댐퍼 설치부 케이블 응답을 가지고 댐퍼의 강성과 감쇠를 계산하고 그것에 의한 새로운 케이블-댐퍼 시스템의 정상상태 응답으로부터 다시 댐퍼 설치부 케이블 응답을 구해 이전단계의 값과 비교하게 된다. 이 응답의 차이가 허용치 이내가 되면 주어진 크기와 진동수를 갖는 외부하중에 대한 케이블-댐퍼 시스템의 정상상태 응답계산이 끝나게 된다.

#### 4. 적용예

표 1과 같은 재원을 갖는 케이블에 대해 댐퍼의 항복력에 따른 케이블 가운데 점의 동적응답 및 시스템의 감쇠비를 구하여 보았다. 댐퍼는 케이블 지점으로부터 0.8 m 지점 ( $L_d/L=0.04$ )에 설치되었으며 댐퍼에 의한 응답 감소 정도를 비교하기 위해 케이블 자체의 모달 감쇠비는 첫 번째 모드에 대해 0.15%로 가정하였다. 동하중은 0.005kN/m 크기의 등분포 하중이며 댐퍼의 항복변위는 0.0005m로 가정하였다.

댐퍼의 항복력  $F_y$ 에 따른 케이블 가운데 점의 주파수 응답이 첫 번째 모드에 대해 그림 3에 그려져 있다. 댐퍼의 항복력이 0인 것은 댐퍼가 설치되지 않은 것으로 댐퍼의 항복력이 커짐에 따라 공진 진동수의 전이와 공진시 응답이 줄다가 다시 늘어나는 양상을 보인다. 그림 4는 댐퍼의 항복력에 따른 케이블 가운데 점의 최대변위 (공진변위)를 그려놓은 것으로 그림으로부터 댐퍼 항복력에 대해 최적 값이 존재한다는 것을 알 수 있다. 이것은 Pacheco 등(1993)의 연구 결과와 일치하는 내용으로 이는 댐퍼의 감쇠계수가 적을 경우는 시스템에 충분한 감쇠효과를 줄 수 없으며 최적값 이상의 과도한 감쇠계수를 가진 댐퍼는 강성이 따라서 커지므로 댐퍼의 설치점은 또 다른 고정점이 되어 케이블은 유효길이가 줄어든 다른 시스템으로 전환이 되며 이때 댐퍼의 감쇠효과는 감소하게 되기 때문이다.

그림 3과 4를 참조하면 표 1과 같은 케이블에 대한 남-전단 댐퍼의 최적 항복력은 대략 0.8kN 정도가 됨을 알 수 있다. 이때 케이블 가운데 점의 동적변위는 7.4cm이며 이는 댐퍼를 설치하지 않았을 때 변위 (57.7cm)의 13% 수준이다. 그리고 댐퍼에 의한 부가 감쇠비는 케이블 자체의 감쇠비 0.15%를 고려하면 그림 5로부터 대략 1.12%-0.15%=0.97% 정도가 된다.

댐퍼의 설치위치 및 케이블 장력에 따른 댐퍼의 최적 용량 및 최대 감쇠비를 알아보기 위해 댐퍼의 설치위치 ( $L_d/L = 0.03, 0.04, 0.05, 0.06$ )와 케이블의 장력 ( $T15 = 147.2$  kN,  $T20 = 196.2$  kN,  $T25 = 245.3$  kN,  $T30 = 294.3$  kN)을 바꾸어 보았다. 그림 6과 7에 그에 따른 최적 댐퍼 용량 및 최적 감쇠비가 그려져 있다. 그림 6으로부터 댐퍼 설치위치가 증가함에 따라 최적 댐퍼 용량은 급격히 감소하다가 그 감소추세가 둔화된다. 그와 달리 최적 감쇠비는 댐퍼 설치 위치가 앵커에서 멀어짐에 따라 직선적으로 증가한다. 이것은 그림

표 1. 케이블 재원

길이 (m)	장력 (kN)	단위중량 (kN/m)	단면적 (m <sup>2</sup> )	탄성계수 (kN/m <sup>2</sup> )
20	147.2	0.0968	$1.05 \times 10^{-3}$	$1.89 \times 10^8$

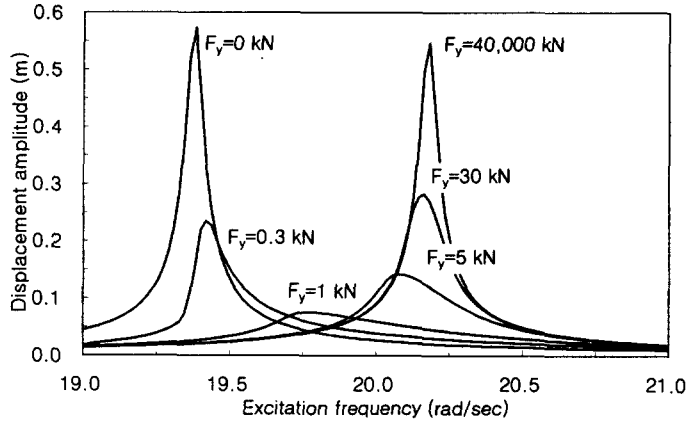


그림 3. 댐퍼종류에 따른 주파수응답

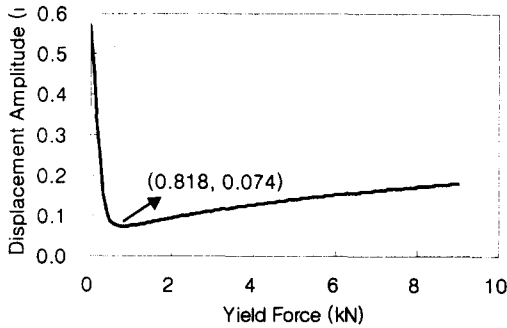


그림 4. 댐퍼 항복력에 따른 최대응답

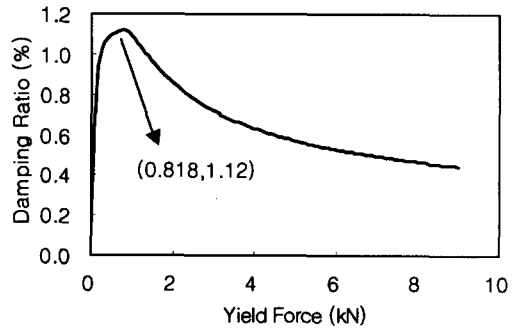


그림 5. 댐퍼 항복력에 따른 시스템 감쇠비

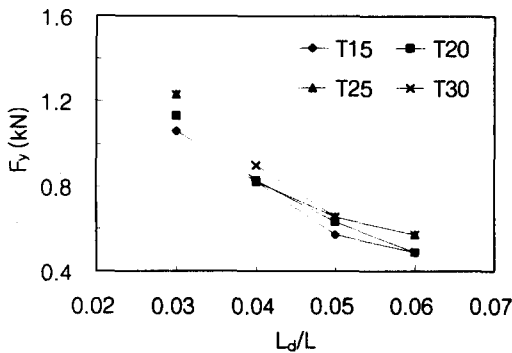


그림 6. 댐퍼 설치위치에 따른 최적 댐퍼용량

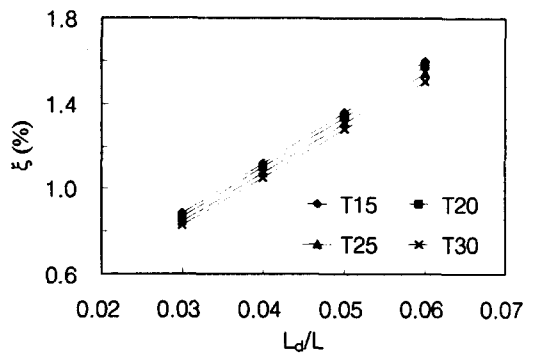


그림 7. 댐퍼 설치위치에 따른 최적 감쇠비

4와 5에서도 확인할 수 있는 것으로 댐퍼의 용량은 최적점을 기준으로 최적 용량보다 적은 부분이 용량대비 효과가 더 크게 나타난다는 사실을 나타낸다. 따라서 과다 설계한 댐퍼는 경제적인 측면에서 과소설계한 댐퍼보다 잇점이 없음을 알 수 있다.

댐퍼 설치위치가 고정된 경우 케이블 장력이 증가함에 따라 최적 댐퍼에 의한 얻을 수 있는 최대 감쇠비

는 감소한다. 이것은 납-전단 댐퍼가 이력형 댐퍼이므로 시스템의 응답크기와 밀접한 관계를 가지기 때문이다. 즉 같은 크기의 하중에 대해 케이블-댐퍼 시스템의 동적 응답량은 케이블의 장력증가에 따라 감소하기 때문이다.

## 5. 결 론

케이블-댐퍼 시스템의 상시미동을 감소시키기 위한 외부댐퍼로 납-전단 댐퍼를 선택하여 납-전단 댐퍼를 설계하기 위한 케이블-댐퍼 시스템의 동적 거동에 대해 연구하였다.

납-전단 댐퍼의 표준적인 규격을 나타내는 항복력은 주어진 케이블에 대해 최적의 값이 존재함을 알 수 있으며 최적으로 설계된 납-전단 댐퍼에 의해 케이블의 응답은 상당히 줄어들고 케이블에 부가되는 감쇠비도 케이블 자체의 감쇠비에 비해 상당함을 알 수 있었다. 납-전단 댐퍼의 최적 용량은 케이블 시스템의 제원에 따라 차이가 많이 남을 알 수 있었으며 정확한 부가 감쇠비의 산정을 위해서는 수치해석이 동반되어야 한다.

본 연구에서 제안한 납-전단 댐퍼의 모델링 방법 및 케이블의 응답을 구하는 방법의 검증은 위해서는 실험연구가 있어야 할 것으로 판단된다. 또한 실험결과 및 연구에 기초하여 변위에 따라 부가되는 감쇠량이 상당히 변하는 납-전단 댐퍼를 간편하게 설계하기 위해서는 최대의 부가 감쇠비와 댐퍼의 용량과의 실용식 산정이 필요하다.

## 참고문헌

1. Yamaguchi, H. and Adhikari, R.(1995), "Energy-based Evaluation of Modal Damping in Structural Cables with and without Damping Treatment," Journal of Sound and Vibration, Vol. 181, No. 1, pp.71-83.
2. Pacheco, B.M., Fujino, Y. and Sulekh, A.(1993), "Estimation Curve for Modal Damping in Stay Cables with Viscous Damper," Journal of Structural Engineering, Vol. 119, No. 6, pp.1961-1979.
3. Takano, H., Ogasawara, M., Ito, N., Shimosato, T., Takeda, K., Murakami, T.(1997), "Vibrational Damper for Cables of the Tsurumi Tsubasa Bridge," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 69-71, pp.807-818.
4. Xu, Y.L., Yu, Z. and Ko, J.M.(1998), "Forced Vibration Studies of Sagged Cables with Oil Damper using a Hybrid Method," Engineering Structures, Vol. 20, No. 8, pp.692-705.
5. Achkire, Y. and Preumont, A.(1996), "Active Damping of Cable Structures," Third International Conference on Motion and Vibration Control, Chiba, September, 1-6, pp.75-80.
6. Thiele, K. (1996), "Full-Scale Investigations of Cable Vibrations on Cable Stayed Bridges and Development of a Cable Damper using Viscoelastic Material," MS. Dissertation, The University of Western Ontario, London, Ontario.
7. Reinhorn, A.M. Li, C. and Constantinou, M.C.(1995), "Experimental and Analytical Investigation of Seismic Retrofit of Structures with Supplemental Damping : Part 1 - Fluid Viscous Damping Devices," National Center for Earthquake Engineering Research, Technical Report NCEER-95-0001