

# 사장교 케이블 진동감소용 납-전단 댐퍼의 설계

## Design of Lead-Shear Damper for Stay Cables

안 상 섭  
Ahn, Sang Sup

### 국문요약

본 논문에서는 지점근처에 납-전단 댐퍼(LSD)가 설치된 케이블의 동적 거동에 대해 다루었다. 이러한 동적 거동에 대한 파악은 케이블의 진동 감소 목적으로 댐퍼를 설계하는 경우 중요한 절차중의 하나이다. 납-전단 댐퍼와 같은 이력형 댐퍼의 실제 이력곡선에 기초하여 본 연구에서는 납-전단 댐퍼의 이력곡선을 완전 탄소성으로 가정하였다. 납-전단 댐퍼의 역학적 모델은 등가 켈빈 모델을 사용하였으며 케이블의 새그 효과를 고려하였다. 납-전단 댐퍼의 용량이라고 할 수 있는 항복력을 설계 변수로 선택하고 케이블에 최적의 감쇠효과를 부여하는 동역학적 관계에 대해 연구하였다. 또한 댐퍼가 케이블에 설치되는 지점과 케이블의 장력에 대한 댐퍼의 감쇠효과에 대해서도 연구하였다. 매개변수 해석결과 케이블의 기하학적 형상 및 댐퍼의 설치 조건에 따라 납-전단 댐퍼가 케이블에 부가하는 감쇠의 크기가 변함을 알 수 있었으며, 이때 최대의 감쇠성능을 발휘하는 최적 항복력이 존재한다는 것을 알았다.

**주요어** : 케이블, 댐퍼, 납-전단 댐퍼, 켈빈모델, 케이블진동

### 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 or hazardous vibration of stay cables. 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 represented by the 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.

**Key words** : cable, damper, lead-shear damper, Kelvin model, vibration of cable

## 1. 서 론

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 작아지고 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.<sup>(1)</sup> 따라서 최근 몇 년 전부터 사장교를 건설, 유지관리를 하고 있는 여러 나라에서 사장교 케이블의 진동 문제가 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 해결책의 하나로 케이블에 감쇠력을 증진시키는 방법을 들 수 있다. 케이블에 감쇠력을 증진시키는 방법으로는 스트랜드 피복, 그라우팅, 케이블 튜브등의 재질로 고감쇠 물질을 사용하는 방법<sup>(1)</sup>, 케이블 앵커근처에 감쇠장치를 설치하는 방법<sup>(2-4)</sup> 그리고 케이블 부재의 끝단을 능동제어하는 방법<sup>(5)</sup> 등을 들 수 있다. 특히 케이블 부재에 감쇠장치를 설치하여 부재에 감쇠를 증가

시키는 구조적인 방법은 경제적, 기술적 그리고 미관의 이유로 유해 진동에 대한 해결책으로 많이 선택되고 있다.

한편 교량의 면진 및 제진 목적으로 받침에 사용되고 있는 납-적층 고무 받침은 온도변화와 같은 외부환경에 영향을 덜 받고 내구성과 감쇠능력이 뛰어나다는 점에서 댐퍼로서의 기능면에서 강점이 있다. 실제로 납-적층 고무 받침을 응용한 납-전단 댐퍼를 이용하여 국내 고속도로 육교의 휨진동 제어를 한 예<sup>(6)</sup>가 있다. 내구성, 미세 변위에 대한 응답성 그리고 높은 감쇠능력등을 고려할 때 납-전단 댐퍼는 케이블의 상시 미동 및 유해 진동시 진동 감소장치로 사용될 때 큰 이점이 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 저감 능력 및 거동 특성을 파악한다. 그리고 케이블 진동감소용 납-전단 댐퍼를 설계하기 위한 기본적인 연구로 여러 가지 케이블에 다양한 납-전단 댐퍼를 설치하여 최대의 부가 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 작을

\* 정회원 · 한국도로공사 도로연구소 콘크리트구조연구실, 책임연구원  
(대표저자 : ahnss@freeway.co.kr)

본 논문에 대한 토의를 2001년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

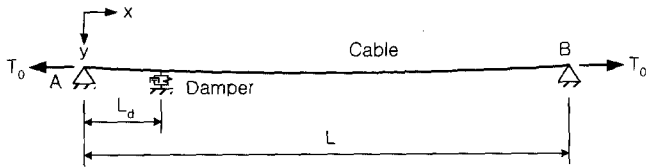


그림 1 케이블-댐퍼 시스템

경우 경사 케이블이라도 케이블 길이에 대해 일정하다고 가정할 수 있다. 감쇠장치는 지점 A로부터  $L_d$  위치에 설치되며, 장치에 나타나는 감쇠력은  $F_d(t)$ 이다. 시간  $t$ 일 때 지점 A에서  $x$  만큼 떨어진 점에서 동적 변위의  $x$  방향성분을  $u(x, t)$ ,  $y$  방향 성분을  $v(x, t)$ 라 한다. 케이블의 운동시 면외 진동은 선형이론 하에서 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 케이블의 경사각으로 두 지점을 연결하는 직선이 수평과 이루는 각으로 정의된다. 이와 같은 조건하에서 케이블의 운동방정식은 다음과 같다.<sup>(9)</sup>

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

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

여기서 '은  $\partial/\partial x$ 를 '는  $\partial/\partial t$ 를 나타낸다.  $c$ 는 케이블 자체의 점성 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 팽팽하고 단면 강성에 비해 도입되어 있는 정적 장력의 크기가 작다. 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  $T = EA\varepsilon$ 과 케이블의 양단 고정 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 (3)을 (2)에 대입하고 동적 장력  $T$ 는 정적 장력  $T_0$ 에 비해 작아서 무시하며 케이블의 정적 평형상태에서 형상이 포물선이라고 가정하면 케이블-댐퍼 시스템의 다음과 같은 선형화된 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$m\ddot{v} + c\dot{v} - T_0 v'' + \lambda^2 \frac{T_0}{L^3} \int_0^L v dx + F_d = F \quad (4)$$

여기서  $\lambda^2 = (q_y L)^2 (EA/T_0^3)$ 이다.  $\lambda^2$ 은 케이블의 새그 정

도를 나타내는 척도이며 사장교 케이블의 경우 시공 단계에서 최대 1까지의 값을 가지는 경우가 있지만 완공 후에는 일반적으로 1/10 이하의 값을 가진다.<sup>(12)</sup>

본 연구에서는 일반적인 모달 해석 방법과 같이 식 (4)의 동적 변위( $v$ )를 일반화 좌표  $q_j(t)$ 와 모드형상  $\phi_j(x)$ 의 중첩으로 나타낸다. 한편  $\phi_j(x)$ 는 댐퍼가 설치되지 않은 양단 고정 케이블의 모드형상으로 본 연구에서는 다음과 같이 가정한다.

$$\phi_j(x) = \sin j\pi \frac{x}{L} \quad (5)$$

사장교 케이블과 같이 새그가 크지 않은 케이블은 복합모드 현상<sup>(10)</sup>이 발생하지 않으므로 모드형상으로 정현파 형태를 사용할 수 있다.

식 (5)와  $q_j(t)$ 의 선형 중첩식을 식 (4)에 대입하고  $\phi_i(x)$  ( $i=1, 2, 3, \dots$ )를 가중함수로 하여 다음과 같은 직교성을 이용한 Galerkin의 방법을 적용한다.

$$\int_0^L \phi_i(x) \phi_j(x) dx = \frac{L}{2} \delta_{ij} \quad (6)$$

여기서  $\delta_{ij}$ 은 Kronecker delta이며 비선형 항을 무시하면 다음과 같은 모드별 방정식을 얻을 수 있다.<sup>(11)</sup>

$$M\ddot{Q} + C\dot{Q} + (K_I + K_E)Q + F_D = F \quad (7)$$

여기서

$$M = \frac{mL}{2} [\delta_{ij}], \quad C = \frac{cL}{2} [\delta_{ij}], \quad K_I = \frac{\pi^2 T_0}{2L} [i^2 \delta_{ij}],$$

$$K_E = \frac{\lambda^2 T_0}{\pi^2 L} \left[ \frac{(1 - (-1)^i)(1 - (-1)^j)}{ij} \right],$$

$$F_D = F_d(t) \left\{ \sin i\pi \frac{L_d}{L} \right\}, \quad F = \int_0^L F(x, t) \phi_i(x) dx,$$

$$Q = \{q_1, q_2, q_3, \dots\}^T$$

이다. 또한 [ ]는 색인  $i, j$ 로 이루어진 행렬 그리고 { }는 색인  $i$ 로 이루어진 열 벡터를 말한다.  $K_I$  그리고  $K_E$ 는 각각 케이블의 초기장력(현수선 거동)과 탄성변형에 의한 강성성분이다. 벡터  $F$ 는 케이블의 분포하중에 의한 외력 벡터이며  $F_D$ 는 감쇠 장치에 의해 발생하는 모드별 힘 벡터이다. 위의 식에서 보듯이 탄성변형에 의한 케이블의 강성 행렬은 모드별로 완전히 분리되지는 않으며 짝수 모드에서는 값이 0이 된다는 것을 알 수 있다. 이것은 케이블의 동적 변위가 작을 경우 비대칭 모드에서 케이블에는 탄성 변형이 발생되지 않는다는 것을 의미한다.

본 연구의 케이블 모델은 기존의 연구<sup>(2),(4)</sup>와는 달리 케이블의 새그 효과와 경사 효과를 고려하여 사장교 케이블에 적용성을 높였으며 케이블-댐퍼 시스템을 모달 해석함으로써 해석적인 주파수 응답 함수를 구하여 설계 단계에서 유용하게 이용될 수 있도록 하였다.

### 3. 납-전단 댐퍼 모델

납-전단 댐퍼의 이력 거동 특징을 보면 그림 2(a)와 같이 bilinear 이력 모델로 근사시킬 수 있으며 이 모델에 의한 댐퍼력을 식 (7)의  $F_d(t)$ 로 사용하여 케이블-댐퍼 시스템의 시간 영역 비선형 해석을 할 수 있다. 하지만 본 논문에서는 계산상의 편의 및 케이블-댐퍼 시스템의 주파수 응답 함수를 쉽게 구할 수 있도록 감쇠장치의 이력 곡선을 그림 2(b)와 같이 강성을 가지는 타원형 이력(점탄성 이력)으로 치환하고 등가 Kelvin 모델을 사용한다. 즉 감쇠 장치의 감쇠력은 다음과 같이 표현된다.<sup>(8)</sup>

$$F_d(t) = k_{eq} v_d(t) + c_{eq} \dot{v}_d(t) \quad (8)$$

여기서  $k_{eq}$ ,  $c_{eq}$ 는 각각 감쇠장치의 등가 탄성 계수와 등가 점성 감쇠 계수를 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 bilinear 이력곡선을 완전 탄소성( $k_2=0$ )으로 가정한다. 점탄성 이력 곡선에서 댐퍼의 등가 강성은 최대 변위점에 대한 강성을 사용하지만 보수적인 해석을 위해 댐퍼의 강성이 좀더 크게 평가되는 bilinear 이력곡선의 유효 강성을 댐퍼의 강성으로 한다. 또한 등가 점성 감쇠 계수는 bilinear 이력과 에너지 소산량이 같도록 하여 정한다. 따라서 댐퍼의 등가 탄성 계수와 등가 점성 감쇠 계수는 다음과 같이 표현된다.

$$k_{eq} = \frac{F_y}{v_d} \quad (9)$$

$$c_{eq} = \frac{4F_y(v_d - v_y)}{\pi \Omega v_d^2} \quad (10)$$

여기서  $\Omega$ 는 감쇠 장치의 진동수로 본 연구에서는 케이블-댐퍼 시스템의 정상 상태 응답에 대해 댐퍼를 설계하므로 외부하중의 가진 진동수가 된다.  $F_y$ 와  $v_y$ 는 각각 납-전단 댐퍼의 항복력과 항복변위를 나타내며  $v_d$ 는 납-전단 댐퍼의 변위를 말한다.

만약 댐퍼의 강성과 감쇠 계수가 변위와 무관하게 항상 일정하다면 식 (8)은 케이블의 운동방정식인 식 (4)에 다음과 같은 형태로 포함이 된다.

$$F_d(t) = (k_{eq} v(t) + c_{eq} \dot{v}(t)) \delta(x - L_d) \quad (11)$$

이 식에  $v(t)$ 의 선형 중첩식을 대입하고 식 (7)의  $F_D$ 를 이용하면 케이블-댐퍼 시스템의 운동방정식에서 댐퍼에 의한 부분은 다음과 같다.

$$F_D = K_D Q + C_D \dot{Q} \quad (12)$$

여기서

$$K_D = k_{eq} \left[ \sin i\pi \frac{L_d}{L} \sin j\pi \frac{L_d}{L} \right] \quad (13)$$

$$C_D = c_{eq} \left[ \sin i\pi \frac{L_d}{L} \sin j\pi \frac{L_d}{L} \right] \quad (14)$$

이다.

식 (13)과 (14)의 유도시 댐퍼의 강성과 감쇠 계수를 변위에 무관하다고 가정하였으나 식 (9)와 (10)을 보면 실제로 그렇지 않다. 따라서 외부하중에 의한 케이블의 정상상태 응답의 크기를 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 응답의 크기가 계산된다.

케이블-댐퍼 시스템의 모달 해석시 식 (13)과 (14)에서 보듯이 댐퍼에 의한 강성 행렬과 감쇠 행렬이 시스템을 비비례 감쇠 시스템으로 만들기 때문에 기본적으로 복소 고유치 해석이 필요하다. 복소 고유치 해석시 일정 개수 이상의 모드를 고려하면 댐퍼의 크기에 대한 시스템의 부가 감쇠비 변화의 비선형성을 충분히 나타낼 수 있다. Pacheco<sup>(2)</sup>의 연구 결과 및 본 논문의 수치해석상의 경험으로는 100모드 정도를 고려하면 충분히 수렴된 결과를 얻을 수 있다. 또한 모드

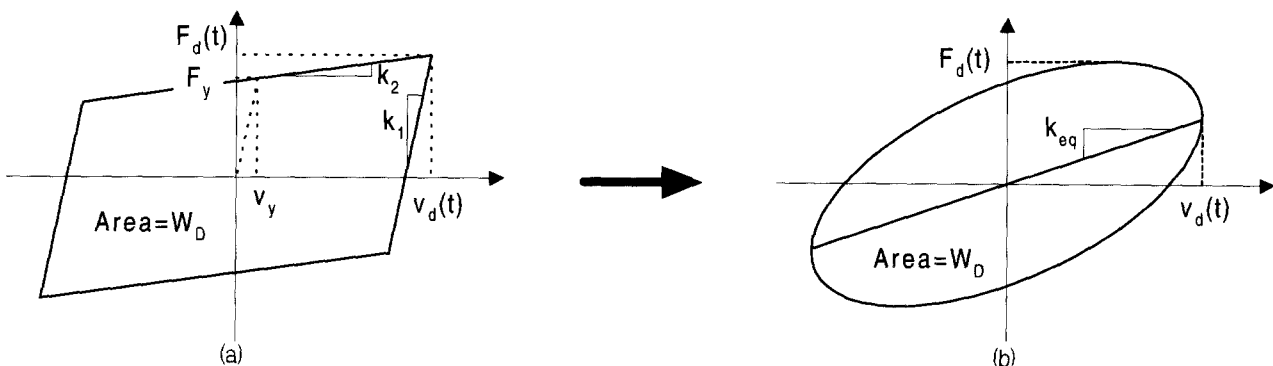


그림 2 납-전단 댐퍼 이력 곡선의 모델링

중첩시는 케이블의 중요 모드가 저차 모드에서 모두 나타나므로 15개 모드까지를 중첩하여 결과를 산출한다.

4. 적용 예

표 1과 같은 제원을 갖는 케이블에 대해 댐퍼의 항복력에 따른 케이블 가운데 점의 동적 응답의 크기 및 시스템의 등가 감쇠비를 구하여 보았다. 댐퍼는 케이블 지지점으로부터 0.8m 지점( $L_d/L=0.04$ )에 설치되었으며 댐퍼의 항복력 크기에 따른 시스템의 부가 감쇠비 및 응답 감소 정도를 비교할 목적으로 케이블 자체의 모달 감쇠비는 첫 번째 모드에 대해 0.15%로 가정하였다. 이것은 7연선을 사용한 그라우팅되지 않은 사장교 케이블의 감쇠비가 0.1%에서 0.2%정도가 되므로 그 중간값을 사용한 것이다. 동하중은 0.005kN/m 크기의 등분포 하중이며 댐퍼의 항복변위는 0.5mm로 가정하였다. 댐퍼 변위에 대해 허용 오차는 0.01mm로 하여 반복계산을 수행하였다.

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 진동수가 점점 커지며 공진 응답의 크기는 줄다가 다시 늘어나는 양상을 보인다. 댐퍼에 의해 케이블에 부가되는 감쇠비는 댐퍼 설치위치가 제한되므로 이상적인 댐퍼라도 2%를 넘지 못할 만큼 크지 않다.<sup>(2)</sup> 따라서 댐퍼의 항복력 증가에 따른 케이블 공진 진동수의 전이 는 댐퍼의 강성 증가에 기인한다고 볼 수 있다.

그림 4는 댐퍼의 항복력에 따른 케이블 가운데 점의 최대 변위 (공진변위)를 그려놓은 것으로 그림으로부터 댐퍼 항복력에 대해 최적값이 존재한다는 것을 알 수 있다. 이것은 Pacheco 등<sup>(2)</sup>의 연구 결과와 일치하는 내용으로 이는 댐퍼의 감쇠값이 적을 경우는 시스템에 충분한 부가 감쇠효과를

줄 수 없으며 최적 항복력 이상의 과도한 항복력을 가진 댐퍼는 강성이 그에 따라 커지므로 댐퍼의 설치점은 또 다른 고정점이 되어 케이블은 지지점 사이의 길이가 줄어든 다른 시스템으로 전환이 되며 이때 댐퍼에 의한 감쇠효과는 감소하게 된다. 본 연구에서는 주어진 하중 하에서 케이블 가운데 점의 응답의 크기를 최소화하는 댐퍼의 항복력을 최적 항복력으로 정의하였다. 이때 댐퍼에 의해 케이블에 부가되는 감쇠비가 최대임을 그림 5에서 확인할 수 있다.

그림 3에서 5를 참조하면 표 1과 같은 케이블에 대한 납-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 감쇠비를 0.15%로 가정하였으므로 그림 5로부터  $1.12\% - 0.15\% = 0.97\%$ 가 된다. Pacheco<sup>(2)</sup>의 연구 결과에 따르면 강성이 없는 이상적인 점성 댐퍼를 본 예제의 케이블과 같은 위치에 설치하였을 경우 댐퍼에 의한 최대 부가 감쇠비는  $0.04 \times 0.52 \times 100 = 2.1\%$ 가 된다. 하지만 모든 댐퍼에는 강성이 존재하므로 이 강성에 의해 실제 부가 감쇠비는 감소하게 된다. 강성에 의한 부가 감쇠비의 감소량은 댐퍼의 설치 위치에 따라 달라 지므로 부가 감쇠비가 변위에 따라 달라지는 납-전단 댐퍼와 가진 진동수에 따라 달라지는 점성형 댐퍼를 직접적으로 비교하기는 힘들지만 케이블에 사용되는 댐퍼의 부가 감쇠 성능에 대한 정성적인 참고가 될 수 있다.

댐퍼의 설치위치 및 케이블 장력에 따른 댐퍼의 최적 항복력 및 최대 감쇠비를 알아보기 위해 댐퍼의 설치위치 ( $L_d/L=0.03, 0.04, 0.05, 0.06$ )와 케이블의 장력 ( $T_{15}=147.2\text{kN}, T_{20}=196.2\text{kN}, T_{25}=245.3\text{kN}, T_{30}=294.3\text{kN}$ )을 바꾸어 보았다. 그림 6과 7에 그에 따른 최적 댐퍼 항복력 및 최대 감쇠비가 그려져 있다.

그림 6으로부터 댐퍼 설치위치의 증가에 따른 최적 댐퍼 항복력은 선형관계가 아님을 알 수 있다. 즉 설치위치가 증가함에 따라 최적 댐퍼 항복력은 감소추세가 둔화된다. 그와 달리 최대 감쇠비는 댐퍼 설치위치가 지점에서 멀어짐에 따라 선형 비례 관계로 증가한다.

댐퍼 설치위치가 고정된 경우 케이블 장력이 증가함에 따라

표 1 케이블 제원

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

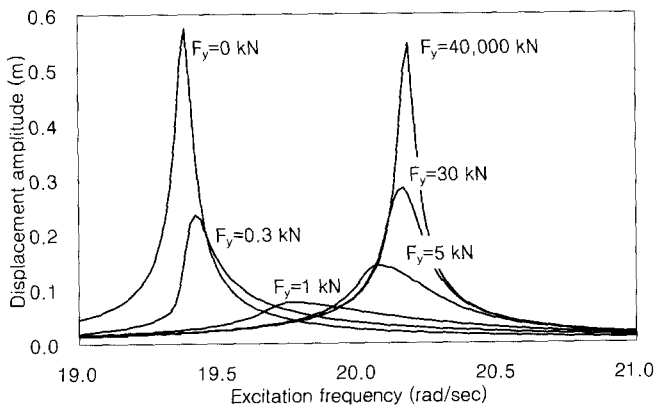


그림 3 댐퍼종류에 따른 주파수응답

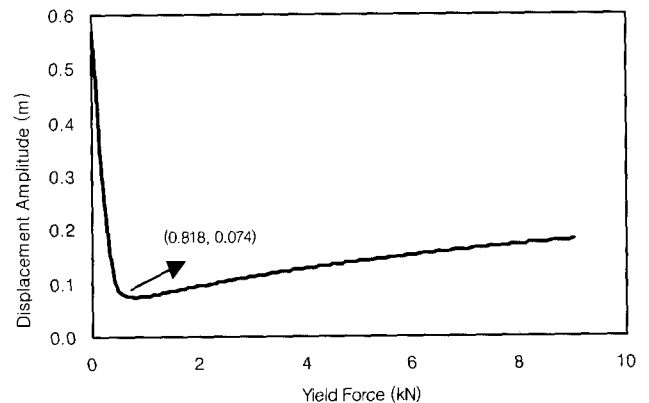


그림 4 댐퍼 항복력에 따른 공진 응답

댐퍼에 의해 얻을 수 있는 최대 부가 감쇠비는 감소하며 최대 부가 감쇠비를 제공하는 댐퍼의 항복력은 증가한다는 사실을 그림 6과 7에서 확인할 수 있다. 이것은 납-전단 댐퍼가 이력형 댐퍼여서 시스템의 응답크기와 밀접한 관계를 가지기 때문으로 판단된다. 즉 같은 크기의 하중에 대해 케이블-댐퍼 시스템의 동적 응답량은 케이블의 장력증가에 따라 감소하기 때문에 댐퍼에 의한 최대 부가 감쇠비는 감소하며 장력증가에 따른 댐퍼 방향으로의 케이블 장력의 분력이 커지기 때문에 최대 부가 감쇠비를 제공하는 댐퍼의 항복력은 증가하게 된다.

외부 하중 크기에 대해 케이블에 최대 부가 감쇠비를 제공하는 댐퍼의 항복력 크기를 표 1에 나타난 케이블에 대해 그림 8에 그렸다. 외부 하중 크기에 따라 댐퍼의 최적 항복력은 달라지며 하중크기에 거의 비례하여 증가하는 양상을 보인다. 이것은 본 연구에서 제안한 케이블 모델이 선형 모델이며 댐퍼가 변위에 따른 비선형 거동 특성을 거의 보이지 않기 때문이라 생각된다.

5. 결 론

케이블-댐퍼 시스템의 상시미동 및 유해 진동을 감소시키기 위한 댐퍼로 납-전단 댐퍼를 선택하여 납-전단 댐퍼를 설계하기 위한 케이블-댐퍼 시스템의 동적 거동에 대해 연구하였다.

납-전단 댐퍼의 규격을 댐퍼의 항복력으로 정의하고 댐퍼의 설치 조건 및 케이블 종류에 따른 항복력의 변화를 살펴 보았다. 댐퍼의 항복력은 주어진 케이블에 대해 최적의 값이 존재함을 알 수 있으며 최대의 부가 감쇠비를 제공하는 항복력을 가진 납-전단 댐퍼에 의해 케이블의 응답은 상당히 줄어들고 케이블에 부가되는 감쇠비도 케이블 자체의 감쇠비에 비해 상당함을 알 수 있었다. 납-전단 댐퍼의 최적 항복력은 케이블 시스템의 제원에 따라 차이가 많이 남을 알 수 있었으며 정확한 부가 감쇠비의 산정을 위해서는 수치해석이 동반되어야 한다.

주어진 케이블 시스템에 대해 최대의 부가 감쇠비를 나타내는 댐퍼의 항복력은 외부하중의 크기, 댐퍼의 설치위치, 케이블 장력등에 따라 달라짐을 알았다. 따라서 최적의 댐퍼를 설계하기 위해서는 댐퍼의 사용상태에서 케이블이 받는 외부하중의 크기나 케이블의 한계 진동 변위크기 그리고 목표 감쇠비의 결정이 선행되어야 한다.

수치해석 결과, 케이블의 장력, 외부하중 크기 및 댐퍼의 설치위치 그리고 그에 따른 최적 댐퍼 항복력 및 최대 부가 감쇠비 등은 비교적 단순한 상호 관계를 나타냄을 알 수 있다. 따라서 적절히 도입된 좌표축을 사용한다면 케이블-댐퍼 시스템의 여러 가지 변수에 상관이 없는 단일한 설계곡선을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 제안한 납-전단 댐퍼의 모델링 방법 및 케이블의 응답을 구하는 방법의 검증은 위해서는 실험연구가 있

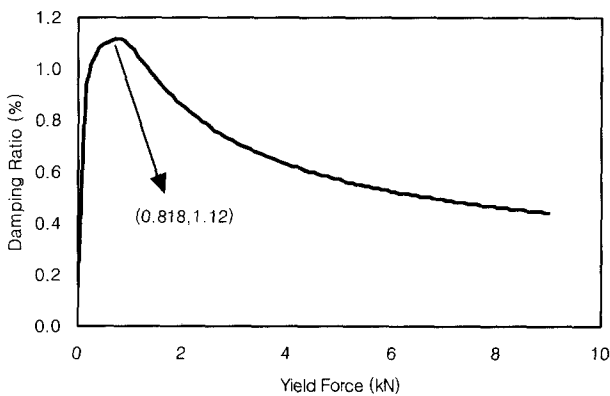


그림 5 댐퍼 항복력에 따른 시스템 감쇠비

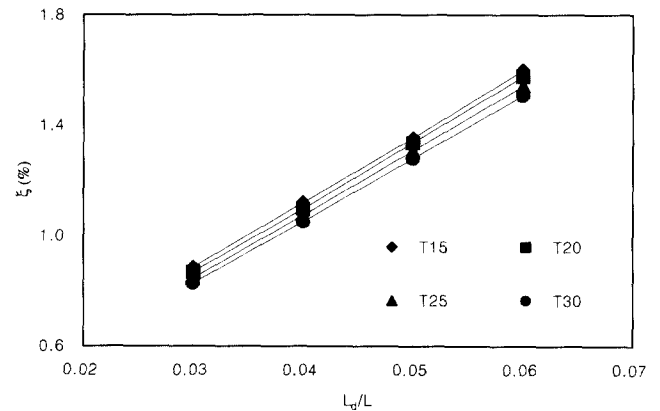


그림 7 댐퍼 설치위치에 따른 최대 감쇠비

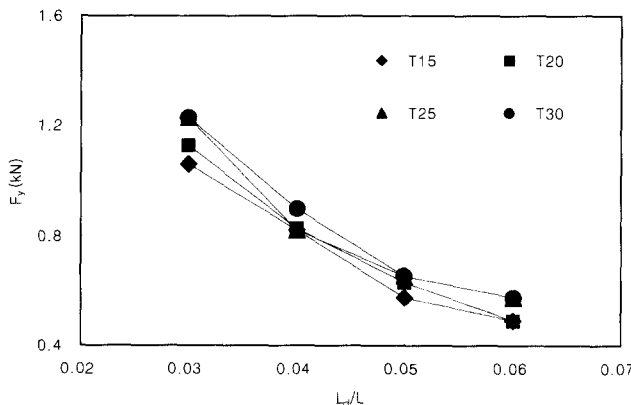


그림 6 댐퍼 설치위치에 따른 최적 댐퍼 항복력

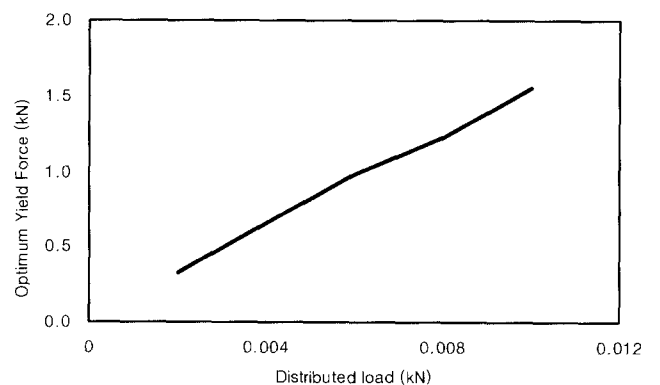


그림 8 외부하중 크기에 따른 최적 댐퍼 항복력

어야 할 것으로 판단된다. 또한 실험결과 및 연구에 기초하여 변위에 따라 부가되는 감쇠량이 상당히 변하는 납-전단 댐퍼를 간편하게 설계하기 위해서는 최대 부가 감쇠비와 댐퍼 항복력과의 실용식 산정이 필요하다. 납-전단 댐퍼가 설치된 케이블 시스템의 동적 거동은 비교적 단순하므로 실용식 산정에는 어려움이 없다고 생각된다.

### 참 고 문 헌

1. Yamaguchi, H. and Adhikari, R., "Energy-based evaluation of modal damping in structural cables with and without damping treatment," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 181, No. 1, 1995, pp. 71-83.
2. Pacheco, B. M., Fujino, Y., and Sulekh, A., "Estimation curve for modal damping in stay cables with viscous damper," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 119, No. 6, 1993, pp. 1961-1979.
3. Takano, H., Ogasawara, M., Ito, N., Shimosato, T., Takeda, K., and Murakami, T., "Vibrational damper for cables of the Tsurumi Tsubasa bridge," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 69, No. 71, 1997, pp. 807-818.
4. Xu, Y. L., Yu, Z., and Ko, J. M., "Forced vibration studies of sagged cables with oil damper using a hybrid method," *Engineering Structures*, Vol. 20, No. 8, 1998, pp. 692-705.
5. Achkire, Y. and Preumont, A., "Active damping of cable structures," *Third International Conference on Motion and Vibration Control*, Chiba, 1996. 9, pp. 75-80.
6. 권순덕, 이일근, "차량하중에 의한 진동을 완화하는 수동 제어장치의 실교 적용", 대한토목학회 논문집, 제20권, 제2-A호, 2000, pp. 265-272.
7. Thiele, K., "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, 1996.
8. Reinhorn, A. M., Li, C., and Constantinou, M. C., "Experimental and analytical investigation of seismic retrofit of structures with supplemental damping : part 1 - fluid viscous damping devices," *Technical Report*, NCEER-95-0001, National Center for Earthquake Engineering Research, 1995.
9. Irvine, M., *Cable Structures*, MIT Press, 1981.
10. Triantafyllou, M. S., "The dynamics of taut inclined cables," *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, Vol. 37, No. 3, 1984, pp. 421-440.
11. 안상섭, 조민지, "교량 진동 감소 장치에 관한 연구", 한국도로공사 도로연구소 연구보고서, 도로연 00-30, 2000.
12. Gimsing, N. J., *Cable Supported Bridges : Concept and Design*, John Wiley & Sons, 2nd Edition, 1983.