



케이블댐퍼 감쇠성능의 수치해석적 연구

임성순¹

서울시립대학교 토목공학과 교수¹

Numerical Analysis Study on Damping Performance of Cable Damper

Yhim, Sung-Soon¹

¹Professor, Department of Civil Engineering, University of Seoul, Seoul, Korea

Abstract: Compared with a strong axial rigidity due to large initial tension, cable has a weak laterally flexural rigidity. A variety of dynamic loads such as traffic loads and wind loads etc. cause the cables to vibrate significantly and affect the mechanical properties and the performance of cables. Therefore, vibration reduction design is an urgent task to control the vibration of cable-supported bridges. Because a various kind of dampers have shown to reduce the amplitude and duration time of vibration of cable from measured data in field test, damper can be considered that it is effective device significantly to reduce the amplitude and duration time in vibration of cable. Vibration characteristics of cable can change according to manufacturing method and type of established form, and damper has been designed according to distribution of natural frequencies and vibration modes. In this study, numerical analysis is used to show the reduction effects of vibrations and present the design of damper for vibration reduction of cable.

Key Words: Vibration reduction effect, Damping ratio, Cable damper, Cable vibration

1. 서론

케이블은 휨강성이 작으므로 작은 횡하중에 의해 대변위를 나타내므로 케이블 구조의 안정성에 부정적인 영향을 나타낸다. 최근에 사장교와 같은 장대교에서 일련의 케이블 진동손상이 보고되거나 진동손상을 예측하여 케이블의 진동저감대책을 적극적으로 수용하고 있다. 대표적인 진동저감방법이 케이블댐퍼의 설치다. 케이블댐퍼는 교량구조물의 구조감쇠비보다 큰 감쇠효과를 나타낸다.

진동감쇠에 대한 국외연구는 Carne와 Kovacs (1980)의 연구결과가 대표적이다. Carne는 자유진동 해석을 통해 1번째 진동모드를 이용한 감쇠비에 대한 기본식을 제시하였다. 이 연구를 기초하여

Kovacs (1999)는 댐퍼의 최대 부가감쇠비와 감쇠계수를 제안하였다.

그 후 Krenk (2000)의 케이블 진동저감 곡선식이 널리 알려졌으며 현재도 이를 기초한 각종 진동저감 곡선식이 제안되고 있다. 댐퍼에 대한 국내연구는 Ahn, S. S. (2007)의 실물실험이 대표적이며 점성댐퍼와 고무댐퍼를 적용한 케이블의 유해진동 발생조건을 규명하였다. 최근 Kim, H. G. (2012)는 5개 장대교량의 케이블 진동과 감쇠에 대한 현장실험을 수행하고 이를 분석하여 케이블 진동저감효과와 댐퍼의 감쇠성능을 확인하였다.

본 연구는 케이블댐퍼를 설치한 케이블에 대하여 댐퍼제작이나 실제 공용 시 요구되는 감쇠효과와 진동손상을 감소시킬 수 있는 진동감쇠효과 등에 대한 진동성능분석을 연구목적으로 한다. 이를 위해

주요어: 진동감소효과, 감쇠비, 케이블댐퍼, 케이블진동

Corresponding author: Yhim, Sung-Soon

Department of Civil Engineering, University of Seoul, Siripdae-gil 13(Jeonnon-gong 90) Dongdaemun-gu, Seoul. 130-943, South Korea

Tel: +82-2-6490-2428, Fax: +82-2-6490-2424, E-mail: yhimss@uos.ac.kr

Received June 3, 2015 / Revised June 8, 2015 / Accepted June 10, 2015

여 케이블 댐퍼의 감쇠 케이블방정식을 유도하고 이를 전산화하여 진동감소효과를 분석하기로 한다.

2. 케이블 부재의 특성

2.1 케이블의 종류와 특성

Fig. 1과 같이 자중만 작용하는 케이블은 동일 연직면에 곡선모양의 처짐형상을 나타낸다. 케이블부재의 양단은 수평과 연직방향으로 지지되므로 보통 1차 부정정 구조를 나타낸다. 케이블 양단 수평반력은 동일한 수평력(thrust)으로 가정하며 케이블 인장력은 연직방향 지점반력과 수평력의 벡터 합으로 표현된다. 케이블 양단 지점을 잇는 직선을 현, 양단지점 사이 수평거리를 스패, 현의 중앙점에서 케이블 중앙점의 연직처짐을 새그라고 부른다. 특히, 스패에 대한 새그의 비율을 스패-새그비라고 부른다.

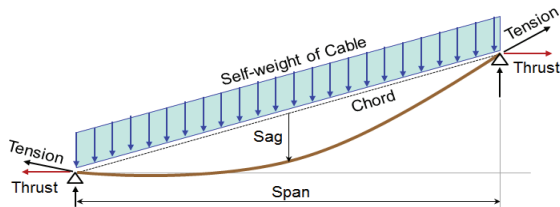


Fig. 1 Inclined Cable

양단 고저차가 없는 케이블은 새그량이 증가함에 따라 직선(taut)케이블, 낮은 케이블, 포물선케이블, 현수케이블, 탄성현수케이블로 구분한다. 직선케이블과 낮은 케이블은 새그량을 무시할 정도로 매우 작은 케이블이다. 포물선케이블은 새그량이 작고 현수케이블은 포물선케이블의 새그보다 큰 새그량이 크다. 직선, 포물선, 현수 케이블은 모두 강체운동에 의한 변위만을 고려한 케이블이다. 또, 스패에 대한 처짐의 곡률이 1차식이고 탄성적으로 변형한다면 이를 탄성현수케이블이라고 정의한다(Irvine 1992).

2.2 케이블의 진동특성

케이블은 단위길이당 질량이 적고 큰 축강성과 작은 휨강성을 가진 부재이다. 이러한 이유로 축방향 고유진동수는 크지만 휨방향 고유진동수는 매우 작은 값을 나타낸다. 또한, 축방향 동적하중이 작용하는 경우에도 축방향 진동응답보다 휨방향 진동응답이 지배적으로 나타내고 있다.

진동감쇠장치를 댐퍼라고 부르며 감쇠성능을 감쇠계수로 표현하고 있다. 교량의 동적응답은 강성과 질량뿐만 아니라 댐퍼의 감쇠성능과도 밀접한 연관

성을 지니고 있다.

2.3 케이블댐퍼의 종류와 특성

케이블 댐퍼는 점성댐퍼, 고무댐퍼, 마찰댐퍼를 널리 사용하고 있다. 점성댐퍼는 구조물자체가 가진 감쇠를 표현하는 기계적 댐퍼이며 별도의 유체를 이용하는 댐퍼이기도 한다. 마찰댐퍼는 케이블의 지점근처에 별도로 설치한 마찰력을 이용한 디스크형상의 댐퍼이다. 고무댐퍼는 고무제품을 적층시켜 제작한 댐퍼로서 대변형과 층간마찰로 진동효과를 감소시키는 댐퍼이다. 점성댐퍼는 유체와 피스톤 형태로 제작한 댐퍼로서 사용성이 좋다는 장점뿐만 아니라 수학적 표현이 용이하다는 장점을 지니고 있다. 반면에 마찰댐퍼와 고무댐퍼는 사용성이 제한적이고 비선형방정식으로 표현된다는 단점이 있으나 진동감쇠를 극대화할 수 있는 장점이 있다.

마찰댐퍼는 자동차의 디스크 브레이크와 같이 마찰력으로 두 요소 간의 상대 변위에 의한 에너지를 소산시키는 방식을 사용하고 있다(Kim, H. G. 2012, Ahn, S. S. 2009). 마찰댐퍼는 구조가 단순하며 효율이 상대적으로 높고 내구성도 다른 댐퍼와 비교하여 내구성도 좋아 진동저감효과가 높은 댐퍼이다. 마찰댐퍼는 전형적인 비선형댐퍼로서 케이블의 변위에 따라 댐퍼의 부가감쇠비가 달라진다. 일반적인 마찰패드의 마찰계수는 0.17~ 0.20의 범위를 나타낸다.

2.4 케이블의 기본방정식

일반적으로 케이블댐퍼는 교량구조물의 특성에 따라 주문 제작되므로 케이블댐퍼의 해석과 설계를 표준화하기 어렵고 진동감쇠효과를 정량적으로 표준화하여 나타내기 어렵다. 점성댐퍼는 선형방정식으로 표현되지만 고무댐퍼와 마찰댐퍼는 비선형방정식으로 표현된다. 점성댐퍼는 선형감쇠를 나타내므로 수식화가 쉬우나 신장률이 높은 고무댐퍼와 속도에 따라 방향이 바뀌는 마찰댐퍼는 비선형감쇠를 나타내므로 수식화가 그리 쉽지 않다. 기존 연구자들은 비선형성을 나타내는 점성감쇠 케이블방정식을 유도에 노력하였다.

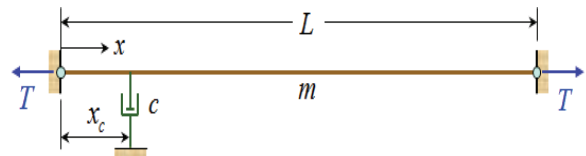


Fig. 2 Taut Cable with Damper

케이블 자체 감쇠를 무시하고 선형탄성 범위에 있는 직선케이블은 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 직선케이블의 운동방정식은 식(2.1)과 같은 편미분 방정식으로 표현한다. 식(2.1)에서 m 은 케이블의 단위길이당 질량, c 는 감쇠계수, T 는 케이블의 초기 정적인장력, δ 는 Dirac delta 함수, x 는 케이블 현을 따르는 좌표, x_c 는 댐퍼의 설치위치, t 는 시간, 그리고 v 는 정적평형 위치로부터 측정한 횡방향 동적변위이다.

$$m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + c \frac{\partial v}{\partial t} \delta(x-x_c) = T \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (2.1)$$

Galerkin 방법을 적용할 때 변위 v 는 식(2.2a)와 같이 유한급수로 근사화할 수 있다. 여기서 n 은 자유도수, L 은 케이블 경간장, $\phi_i(x)$ 와 $b_i(t)$ 는 각각 i 번째 자유도에 대한 일반화변위함수와 일반화시간함수의 곱으로 나타낼 수 있다. 특히, 일반화변위함수는 식(2.2b)와 같이 수직성을 가진 함수이다. 이때, i 번째 자유도에 대한 무감쇠 고유진동수는 식(2.2c)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v(x,t) = \sum_{i=1}^n \phi_i(x) b_i(t) \quad (2.2a)$$

$$\phi_i(x) = \sin \frac{i\pi x}{L} \quad (2.2b)$$

$$\omega_i = \frac{i\pi}{L} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (2.2c)$$

변위함수 $\phi(x)$ 의 수직성을 이용하면 식(2.3a)와 같이 매트릭스방정식을 얻을 수 있다. 질량매트릭스 M , 감쇠매트릭스 C , 강성도매트릭스 K 는 각각 식(2.3b~d)와 같고 ω_1 은 식(2.3e)와 같은 기본고유진동수이다. 또한 δ_{ij} 는 Kronecker delta 함수이며 $(\cdot)' = d(\cdot)/(\omega_1 dt)$ 이다.

$$Mb'' + Cb' + Kb = 0 \quad (2.3a)$$

$$M_{ij} = \delta_{ij} \quad (2.3b)$$

$$C_{ij} = \frac{2c}{mL\omega_1} \sin \frac{i\pi x_c}{L} \sin \frac{j\pi x_c}{L} \quad (2.3c)$$

$$K_{ij} = i^2 \delta_{ij} \quad (2.3d)$$

$$\omega_1 = \frac{\pi}{L} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (2.3e)$$

2.5 새그 효과

자중에 의한 작은 새그가 있는 케이블은 Fig. 3과 같이 표현할 수 있다. 새그효과를 보이기 위한

작은 새그를 가진 케이블은 포물선으로 가정하였고 양단고저차에 의한 효과는 무시하였다. 일반적으로 스펜-새그비는 1:8이하일 때 케이블은 포물선으로 가정할 수 있다.

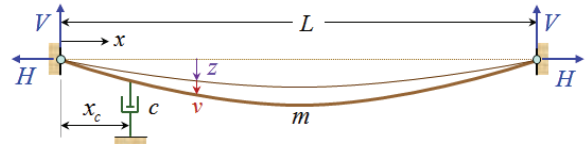


Fig. 3 Cable with Small Sag

낮은 새그를 가진 케이블의 운동방정식은 식(2.4a)와 같다(Irvine 1981). 여기서 H 는 초기정적인장력 T 의 수평성분으로 보통 수평력이라고 부른다. 무차원 새그변수 λ^2 는 식(2.4b)와 같고 사장케이블에서 λ^2 는 보통 1을 넘지 않는다(Gimsing 1983). 케이블의 정적 신장길이 유효길이 L_c 는 식(2.4c)와 같다. 또한, g 는 중력가속도, E 는 Young의 계수, A 는 단면적을 나타낸다.

$$H \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - H \frac{\lambda^2}{L^3} \int_0^L v dx = m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + c \frac{\partial v}{\partial t} \delta(x-x_c) \quad (2.4a)$$

$$\lambda^2 = \left(\frac{mgL}{H} \right)^2 \frac{LEA}{L_c H} \quad (2.4b)$$

$$L_c = L \left[1 + \frac{1}{8} \left(\frac{mgL}{H} \right)^2 \right] \quad (2.4c)$$

직선케이블과 동일한 해석방법을 적용하면 강성도 매트릭스의 성분은 식(2.5)와 같이 결정할 수 있다. 식(2.5)의 강성도 성분은 식(2.3d)와 유사한 형태이나 새그효과만큼의 차이를 나타낸다. 만일 새그를 무시하면 즉, λ^2 이 0이면 식(2.5)는 식(2.3d)와 일치한다. 새그가 작은 케이블에서 역대칭진동모드를 나타내는 짝수모드는 새그효과에 영향을 주지 않으며 특히 1번째 진동모드의 새그효과는 무시할 정도로 매우 작은 값을 나타낸다.

$$K_{ij} = i^2 \delta_{ij} + \frac{2\lambda^2}{\pi^4} \frac{[1 - (-1)^i][1 - (-1)^j]}{ij} \quad (2.5)$$

3. 케이블 댐퍼설계

3.1 개요

사장케이블의 케이블은 풍하중, 차량이동하중, 지진하중 등과 같은 동적하중에 의하여 공진뿐만 아니라 지속적인 진동이 발생하고 진동에 의한 피로현상이 가중되는 문제점을 야기하고 있다. 이러한

문제점을 감소시키기 위하여 유효길이를 감소시키고 고유진동수를 증가시키거나, 케이블댐퍼를 설치하여 진동을 감소시키는 다양한 시도가 진행되고 있다.

새그와 휨 효과를 무시하면 댐퍼를 설치한 케이블은 매우 간단한 형상을 보이더라도 해석시간은 매우 크다. 정확도를 위하여 자유도가 큰 수학적 모델을 이용할 때도 있다. 이러한 작업은 해당케이블에서 댐퍼의 적정크기 또는 위치를 찾을 때 반복연산을 계속하게 되고 다른 케이블에 대하여 고유치 해석을 수행하여야 한다. 이와 같이 각 케이블이 연계된 고유치 해석을 반복수행하는 연산과정은 긴 해석시간을 요구하게 된다.

기본설계에서 지루한 반복계산을 피하기 위하여 특정케이블에서 요구되는 추가감쇠비를 산정할 필요가 있다. 이를 위하여 먼저 측정모드에서 요구되는 추가감쇠력에 대하여 댐퍼의 적절한 크기 또는 위치를 선택할 필요가 있다. 그 다음에 주어진 댐퍼 크기와 위치에 대하여 여러 모드에 대한 추가감쇠를 추정할 수 있어야 한다. 이를 위하여 기존연구자들은 케이블댐퍼의 설치위치결정을 위한 도표나 설계곡선을 제시하여 왔으며 이를 케이블 댐퍼의 이상적인 설계곡선이라고 부른다.

3.2 케이블댐퍼의 설계방법

Fig. 4(a)와 같은 케이블모델에서 감쇠계수 0과 ∞ 인 진동수-동적응답을 도시하면 Fig. 4(c)와 같은 곡선식으로 나타낼 수 있다. 진동수-동적응답곡선은 진동수 ω_1 과 $\omega_1/[1-(x_c/L)]$ 에서 공진현상을 나타낸다. 여기서, ω_1 은 무감쇠 고유진동수이며 $\omega_1/[1-(x_c/L)]$ 는 유효길이 $L[1-(x_c/L)]$ 인 케이블의 고유진동수이다. Fig. 5(c)에서 2개의 동적응답곡선의 교점에 대응하는 감쇠계수를 적정 감쇠계수 c_{opt} 라고 부른다. 여기서 x_c 는 댐퍼설치위치를 나타내며 일반적으로 케이블길이의 2%미만을 사용하고 있다.

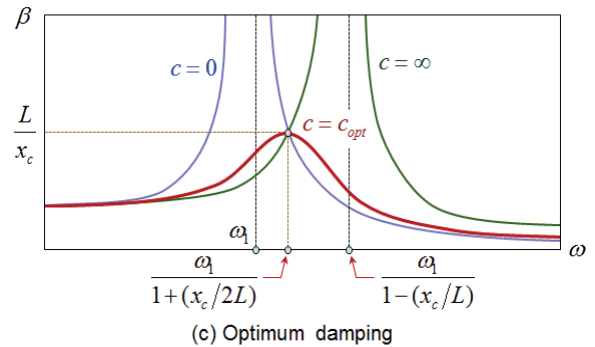
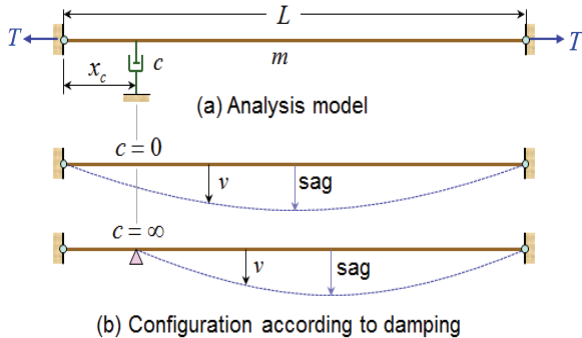


Fig. 4 Design of Optimum Damping

진동수-동적응답곡선의 교점인 적정 감쇠계수는 최소 동적응답을 나타내므로 댐퍼는 적정 감쇠계수로 설계하게 된다. 적정 감쇠계수는 케이블 설계에 요구되는 감쇠계수이므로 요구 감쇠계수라고도 부른다. 기본고유진동수를 이용하여 요구 감쇠계수를 무차원량으로 나타내면 이를 요구 감쇠비라고 부른다. 국내외 설계기준도 적정 감쇠비를 설계목표치로 설정하고 있으며 적정 감쇠비에 안전계수를 고려하여 설계 감쇠비를 설정하고 있다. 또, 케이블자체가 지니고 있는 기계적 감쇠비는 매우 작고 댐퍼설치에 따라 추가적으로 발생하는 감쇠비를 부가감쇠비라고 부른다.

3.3 기존 적정 감쇠비

무감쇠 $c=0$ 일 때 동적응답을 β_0 , 무한감쇠 $c=\infty$ 일 때 동적응답을 β_∞ 라고 표현하고 동적응답 β_0 와 β_∞ 는 식(3.1a,b)와 같이 표현하였다 (Kovacs 1999). Fig.5(c)에서 2개의 응답곡선의 교점은 ω_1 와 $\omega_1/[1-(x_c/L)]$ 사이에 존재하게 된다. 두 곡선의 교점은 식(3.1a)와 같이 나타낼 수 있으며 x_c/L 의 값이 작다고 가정하고 식(3.1b)과 같은 근사식을 제시하였다.

$$\omega = \omega_1 \sqrt{\frac{2}{2-(x_c/L)^2}} \tag{3.1a}$$

$$\omega \approx \omega_1 \left(1 + \frac{x_c}{2L}\right) \tag{3.1b}$$

무감쇠 동적응답의 공진진동수 ω_1 에서 동적확대계수는 식(3.2a)와 같이 근사화할 수 있다. 점성감쇠를 가진 단 하나의 모드로 가정하면 감쇠비는 식(3.2b)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta_{opt} \approx \frac{L}{x_c} \tag{3.2a}$$

$$\xi_{\max} \approx \frac{1}{2\beta_{opt}} = \frac{x_c}{2L} \quad (3.2b)$$

여타의 댐퍼에 대한 동적응답해석에서 Kovacs는 적정감쇠비 c_{opt} 를 식(3.3)과 같이 제시하였다.

$$c_{opt} \approx \frac{m^2\omega_1}{2\pi x_c} \quad (3.3a)$$

$$\frac{c_{opt}}{mL\omega_1} \approx \frac{L}{2\pi x_c} \quad (3.3b)$$

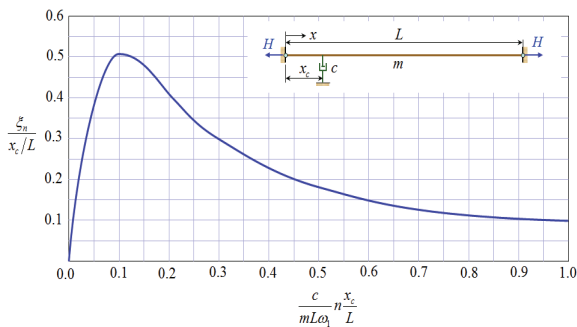
L 을 L/i 로, 진동수 ω_1 를 $i\omega_1$ 로 대체시킨 고차모드를 가정하고 임의의 i 번째 진동모드에 따른 최대감쇠비와 무차원감쇠계수를 식(3.4)와 같이 나타내었다. 이때 최대감쇠비는 몇 번째 모드인가와 무관하다.

$$\xi_{i,\max} \approx \frac{x_c}{2L} \quad (3.4a)$$

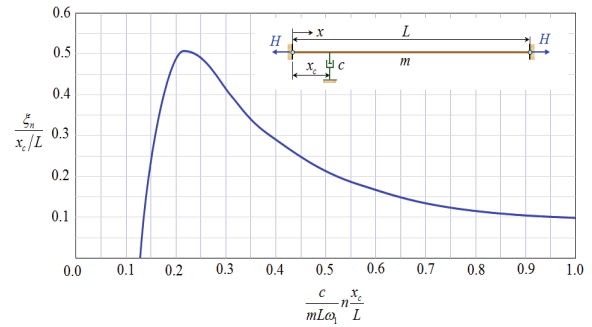
$$\frac{c_{opt,i}}{mL\omega_1} \approx \frac{L}{2\pi x_c} \quad (3.4b)$$

3.4 시스템 매트릭스의 특성

일반적인 실무설계 범위에서 강 케이블은 감쇠계수가 작은 값을 가지며 이에 따라 비비례감쇠특성은 감소하여 비대각항을 무시할 수 있게 된다. 그러므로 모드별 감쇠비는 식(3.5a)과 같이 근사화시킬 수 있다. 또 정현함수를 인수로 대체하면 식(3.5b)와 같이 간단히 표현할 수 있다.



(a) Viscous Damper



(b) Friction Damper

Fig. 5 Damping Curve(Kovacs 1999)

$$\xi_i = \left(\frac{c}{mL\omega_{oi}} \right) \left(\frac{1}{i} \right) \sin^2 \frac{\pi i x_c}{L} \quad (3.5a)$$

$$\xi_i = \pi^2 \left(\frac{c}{mL\omega_{oi}} \right) i \left(\frac{x_c}{L} \right)^2 \quad (3.5b)$$

수평축과 수직축을 각각 무차원량으로 표현하여 도시하면 식(3.5a)는 직선식으로 표현된다. 그러나 유한요소법을 적용하여 요소수를 증가시키면 감쇠곡선은 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다. 감쇠곡선식은 각 진동모드별로 구분하여 정리하여도 무차원량으로 표현한 곡선을 동일한 형상을 나타낸다. 일반적으로 점성댐퍼는 원점을 기준하여 곡선식을 나타내지만 마찰댐퍼는 특정변위가 발생한 이후에 비로소 감쇠성능이 발생하므로 원점에서 감쇠성능만큼 이격된 점을 기준하여 감쇠곡선이 발생한다.

4. 수치해석결과 및 분석

본 연구는 케이블댐퍼를 설치한 케이블의 감쇠성능분석을 연구목적으로 한다. 이를 위하여 먼저 기존연구의 케이블자료를 이용하여 본 연구의 수치해석법의 타당성과 해석결과의 적정성을 확인하고자 한다. 수치해석법은 실무에서 널리 사용하는 유한요소법이며 하나의 요소를 2, 3, 4, 5점을 사용하는 고차요소를 사용하였다. 특히 본 연구는 Galerkin방법을 기초한 유한요소이론을 사용하였고 이 방법은 이미 알려진 이론이므로 자세히 언급하지 않기로 한다.

4.1 해석모델과 고유진동수분포

케이블의 해석모델은 축력을 고려한 비선형트러스요소, 사장케이블 해석을 위한 Enrst의 등가트러스요소, 현수케이블 해석을 위한 탄성현수케이블 요소 등을 사용할 수도 있다. 그러나 이 방법들은 모두 케이

블 부재 양단을 잇는 단일요소를 사용하므로 케이블 진동형상을 추정하기 어려운 단점이 있다. 본 연구는 케이블 중앙부분의 진동형상을 추적하기 위하여 케이블 부재를 여러 개의 요소로 이상화하였다.

Table 1. Natural Frequencies by Numerical Analysis

Mode no	exact sol	present study			
		6-L2	6-Q3	6-C4	6-Q5
1	2.006	2.020	2.006	2.006	2.006
2	4.012	4.197	4.015	4.012	4.012
3	6.018	6.637	6.042	6.018	6.018
4	8.024	9.385	8.112	8.027	8.024
5	10.03	12.04	10.27	10.04	10.03

해석방법의 타당성 검증을 위한 해석모델은 수평면 투영길이 $L=20ft$, 단위길이당 무게 $\gamma=0.5lb/ft$, 초기긴장력은 $T=100lb$, 양단고저차가 0인 케이블을 선택하였다. 기존연구결과와 비교를 위하여 기존연구에 사용한 단위를 그대로 적용하였다.

동일한 요소수에 대한 수치해석결과, 고유진동수는 Table 1과 같다. 여기서 L2는 2절점 1차 선형요소, Q3은 3절점 2차 요소, C4는 4절점 3차 요소, Q5는 5절점 4차 요소를 나타낸다.

요소수가 동일한 경우, 저차요소를 사용한 해석결과와 비교하여 고차요소를 적용한 해석결과가 정해에 수렴함을 알 수 있다. 만일 L2요소의 요소수를 증가시켜 Q5와 동일한 자유도가 되었을 때 L2요소의 해석결과, 고유진동수는 각각 2.007, 4.024, 6.056, 8.117, 10.21를 나타내므로 여전히 고차요소 사용이 수렴도가 높음을 알 수 있다. 고차요소는 적은 수의 요소만으로 수렴도가 높다는 장점이 있으나 댐퍼설치위치를 고정되고 시스템의 전체 자유도수로 케이블을 표현할 수 있으므로 선형요소를 사용하기로 한다.

4.2 케이블의 설계감쇠곡선

감쇠곡선식을 결정하기 위한 해석모델을 이용하여 케이블 진동의 저감효과를 분석하였다. 이때 케이블 설치위치 $x_c/L=0.02$ 를 사용하였고 하나의 요소가 2절점으로 구성된 선형요소 20개를 사용하였다. 댐퍼설치위치는 일정하다고 가정하기로 한다. 기존감쇠곡선과 같이 수평축과 수직축을 무차원량으로 표시하고 본 연구의 수치해석결과를 도시하면 Fig. 6과 같다.

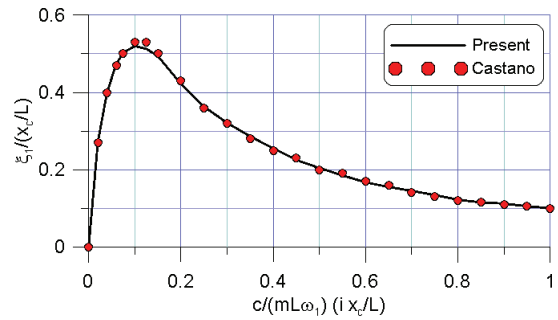


Fig. 6 Damping Curve ($x_c/L=0.02$)

기존연구결과(Caetano, E. S.)와 최대값은 적은 차이를 나타내지만 감쇠곡선식 형상은 유사한 형태를 나타낸다. 수평축 무차원 감쇠계수는 실제로 케이블 중앙점의 연직처짐의 무차원량을 나타낸다. 감쇠계수의 증가에 따라 감쇠비는 급진적인 증가를 보이다가 점진적인 감소곡선을 나타내는 감쇠특성을 보이고 있다. 일반적으로 감쇠계수는 고유진동수와 고유진동모드에 따른 함수로 나타내며 감쇠비도 고유진동수와 고유진동모드의 함수로 표현된다. Fig. 6은 진동모드별로 구분하여 작성한 그림으로서 각 모드별로 유사한 형태를 나타낸다. 즉, 감쇠곡선은 모드와 무관하게 적용할 수 있는 특성을 지니고 있다.

실제 케이블댐퍼설치는 감쇠곡선식을 적용하고 있으며 다양한 연구결과가 소개되고 있다. 본 연구목적은 감쇠곡선의 타당성 분석이 아니라 진동감쇠효과를 보이기 위함이다. 그러므로 감쇠곡선식에 대한 자세한 설명은 피하고 제조사에서 제공하는 댐퍼설치조건이나 기존 연구결과만을 이용하면 실무에서 케이블 댐퍼설치 조건은 충분할 것으로 판단되므로 더 이상 설명하지 않기로 한다.

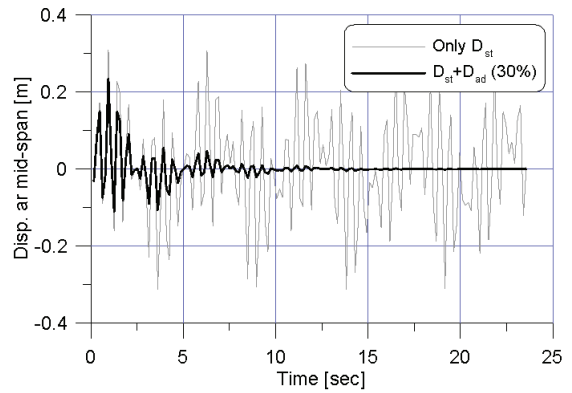
4.3 케이블의 진동감소효과

케이블 중앙점의 연직방향 변위응답을 시간결과에 따라 도시하면 Fig. 7과 같다. 진수한 케이블해석모델에 대하여 케이블장력을 100lb일 때 댐퍼를 미설치한 경우와 부가감쇠비가 10, 20,30%인 진폭감소분포를 나타내었다. 작용하중은 케이블의 우측지점을 상하운동으로 정현함수로 모사하여 부가감쇠비 증가에 따른 진동현상을 분석하였다. 그림(a)는 케이블의 구조감쇠 즉 0.02%일 때 시간에 따른 진동형상을 나타낸 그림이다. 그림(b), (c), (d)는 댐퍼를 미설치한 경우로서 각각 부가감쇠비가 10, 20, 30%일 때 케이블 중앙점의 진동이력을 나타낸 그림이다.

보통 진동현상 발생기간을 지속시간(duration time)이라고 정의하며 진폭이 감소하여 안정화되는 시간을 안정화시간(setting time)이라고 정의한다. 일반적으로 구조감쇠만을 고려하는 구조물의 진동안정화시간은

고유주기의 4배 즉, $4T$ 를 적용하고 있다. 반면에 댐퍼를 적용하는 경우 구조감쇠보다 큰 감쇠비를 나타내고 급격히 진폭이 감소하므로 진동안정화시간을 명확히 정의하기 어렵다.

편의상 초기의 최대진폭이 1/10로 감소되는 시간은 진동안정화시간이라고 정의하자. 구조감쇠만 고려하는 경우 주어진 시간범위에서 진폭이 낮아지는 시간을 결정할 수 없다. 즉, 25초 동안 진동안정화시간이 나타나지 않는다는 의미이다. 반면에 10, 20, 30% 부가감쇠를 적용하면 진동안정화시간은 각각 약 10.05, 2.98, 1.28초로 급격히 감소함을 알 수 있다.



(d) Added Damping (30%)

Fig. 7 Vibration History at mid-span

5. 요약 및 결론

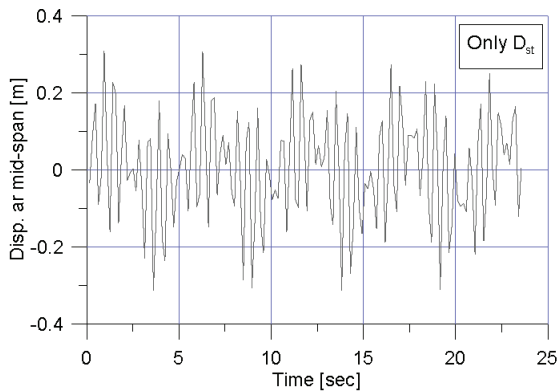
일반적으로 케이블댐퍼는 적정 감쇠비를 결정하고 이를 기초로 주문제작한 댐퍼를 설치하게 된다. 적정 감쇠비 결정을 위한 기존연구들은 모두 케이블의 고유진동수와 고유진동모드만을 이용하고 진동감쇠효과에 대한 언급은 없다. 그 이유는 댐퍼설치 전에 케이블의 진폭변화를 예측하기 어렵기 때문이며 댐퍼설치 후 진동감쇠효과조차 진동모드에 해당하는 케이블 설치위치에 인위적인 가력으로 진폭을 추정하고 있기 때문이다.

그러므로 본 연구는 케이블의 고유진동수와 고유진동모드, 진동감쇠특성, 진동지속시간, 진동 안정화시간 등을 수치해석적 방법으로 검증하기로 한다. 이러한 연구범위 내에서 수치해석법에 의한 케이블 진동성능 효과를 분석한 결과, 다음과 같이 요약할 수 있다.

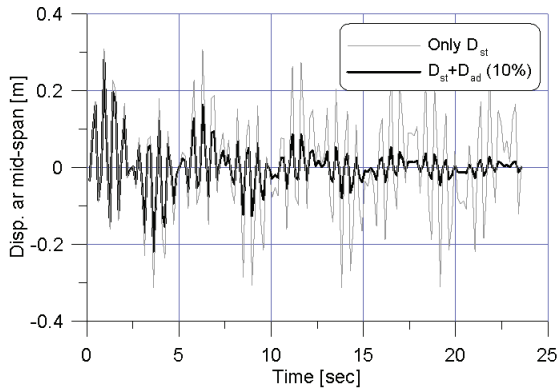
(1) 고유진동수와 고유진동모드는 저차의 요소보다 고차요소를 적용할 경우 높은 수렴도를 나타낼 수 있다. 비선형성을 고려하는 기존 요소의 적용보다 양단의 초기긴장력만으로 케이블의 진동 특성치를 쉽게 결정할 수 있다.

(2) 댐퍼의 설치위치가 고정되었을 때 20개의 선형요소를 사용하여 감쇠계수 증가에 따른 감쇠비를 계산한 결과 기존의 진동감쇠곡선과 유사한 형상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히 각 모드들을 분리한 감쇠곡선식들이 거의 일치하는 형상을 나타내므로 첫 번째 고유진동모드만으로도 충분히 감쇠곡선식을 나타낼 수 있다.

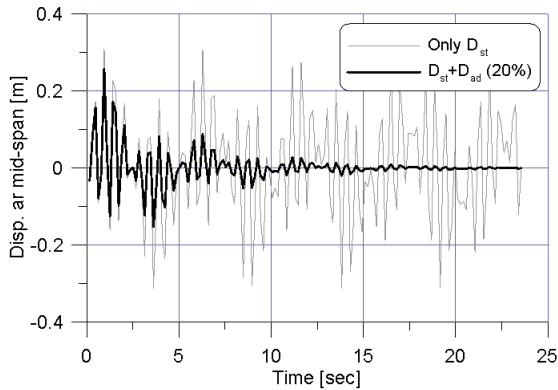
(3) 댐퍼의 용량 증가에 따라 케이블 진폭은 급격히 감소하며 진동지속시간이 급속도로 감소하는 것



(a) Only structural damping(0.02%)



(b) Added Damping (10%)



(c) Added Damping (20%)

을 알 수 있다. 그러므로 케이블 진동감소는 댐퍼설치로 진동저감효과를 충분히 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 또한 진동지속시간의 감소와 함께 진동 안정화시간(setting time)이 급격히 감소함으로서 진동은 짧은 시간에 제어됨을 알 수 있다.

이상과 같은 결과를 보면 케이블의 진동은 댐퍼 설치만으로 충분히 진동을 제어할 수 있음을 알 수 있다. 진동제어를 위한 댐퍼의 부가감쇠비는 주로 20~30%정도가 되도록 제작하므로 진동감쇠효과는 급속도로 감소함을 알 수 있다.

본 연구는 케이블의 댐퍼설치로 인한 진동감쇠 성능 변화를 나타낸 것이므로 정확한 제원과 현장계측자료를 분석하여야 진동감소를 명확히 확인할 수 있을 것이다. 또, 제조사에서 사용하는 프로그램에 의한 해석결과와 제시한 감소효율은 사전 자료조사와 댐퍼설치 후 검증실험으로 확인할 필요가 있다. 최근에 소개되는 신소재 재료들을 교량구조물에 활용하기 위하여 노력하고 있다. 아직은 부분적인 적용이지만 향후 케이블부재도 합성재료 사용을 예상할 수 있다. 저중량, 고강도 합성재료로 구성된 케이블은 고유진동수와 고유진동모드의 분포도 매우 상이할 것으로 예상된다. 이러한 케이블부재의 진동감쇠성능분석은 향후과제이다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 서울시립대학교 연구년교수 연구비에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Ahn, S. S. et al. (2009), "The VSL Friction Dampers for stay cables Dynamic Stability on Incheon Bridge," KEC, *International Commemorative Symposium for the Incheon Bridge*, pp. 318-326.
- Burnett, D. S. (1987), *Finite Element Analysis: from Concepts to Applications*, Addison-Wesley pub. co.
- Caetano, E. S. (2007), *Cable Vibrations in Cable-Stayed Bridges*, IABSE.
- Gimsing, N. J. and Georgakis, C. T. (2012), *Cable Supported Bridges: Concept and Design*, 3rd. ed., John Wiley & Sons, Ltd.
- Irvine, H. M. (1992), "Cable Structures," Dover Publications.
- Kim, H. G. and Yhim, S. S. (2012), "Vibration Reduction Effects of Stay Cable due to Friction Damper," *Journal of KSMI*, Vol. 14, No. 4, pp

54-61, (in Korean).

- Korea Expressway Corporation (2007), *Vibration Examination of Cable of Cable-stayed Bridge and Design for Vibration Control*, KEC, Highway & Transportation Technology Institute.
- Kovacs, I., Strommen, E., and Hjorth-Hanse, E. (1999), "Damping Devices Against Cable Oscillations on Sunningesund Bridge," *Third International Symposium on Cable Dynamics*, pp. 145-150.
- KSCE (2006), Design Guide for Cable Steel-Bridge.
- Noh, M. H. and Lee, S. Y. (2012), "Tension Force Identification of Cable Structures using Various Analytic Methods," *J. Korea Soc. Adv. Comp. Struc.*, Vol.3. No.3, pp38-46, Sept. (in Korean)
- Yhim, S. S., Kong, M.S., and An, C. H. (2008), "A Study on Determination of Cable-Tension using Unstrained-Length-Modification Method," *Journal of KSMI*, Vol. 12, No. 2, pp. 113-120. (in Korean).