

댐퍼도입에 의한 사장 케이블의 제진설계

Design to Control Vibration for Stay Cable with Damper

김현겸* · 황재웅** · 이명재*** · 서주원****

Kim, Hyeon Kyeom · Hwang, Jae Woong · Lee, Myeong Jae · Seo, Ju Won

Abstract

A cable element happens to vibration easily rather than other elements because a cable element has few rotational stiffness. Dynamic motion of stay cable is distinguished from vibration by wind and/or rain and excitation by support movement. Mostly a stay cable is vibrated by wind and/or rain except that when natural periods coincide between stiffening girder and stay cable. It happens to deterioration of serviceability and durability by vortex shedding, rainy-wind induced vibration, and galloping. Additional damping generated by installation of cable damper is well known good scheme against above phenomena. Researchers have lack of effort to develop the recommendations even if cable stayed bridges are designed and constructed in Korea. Therefore, development of the domestic recommendations should be achieved as soon as possible. This study suggests the consistent and systematic recommendations on vibration controlling design of stay cable by installation of damper. It gives readers two important methodologies that one evaluates required damping ratio, the other determines installing point considering efficiency.

Keywords : damper, efficiency, required damping, stay cable, vibration controlling design

요 지

사장 케이블은 휨강성이 미소하여 휨변형에 관한 고유감쇠비가 매우 작다. 따라서 케이블 부재는 다른 구조부재보다 진동 발생 가능성이 훨씬 높게 된다. 사장 케이블의 진동은 우수와 기류에 기인된 것과 지점운동에 기인된 것으로 대별된다. 특별히 보강형과 사장 케이블의 고유진동수 대역이 일치되는 경우를 제외하고 대부분은 우수와 기류에 기인된 진동이 발생된다. 이런 현상은 와류진동, 풍우진동, 깎로핑을 발생시키며 사장 케이블의 사용성과 내구성을 저하시킨다. 이에 대한 제어방안으로 추가감쇠비 부여(댐퍼도입)는 보편적이고 효과적인 것으로 알려져 있다. 하지만 국내는 케이블 지지교량이 활발하게 설계되고 시공됨에도 불구하고 주요 부재인 케이블의 동적설계에 관한 지침개발이 미진한 상황이다. 따라서 케이블 댐퍼도입에 관한 지침개발이 시급하다. 본 연구는 사장 케이블의 진동현상 중 댐퍼도입으로 효과적인 제어설계가 가능한 와류진동, 풍우진동, 깎로핑의 전체감쇠비 평가방법을 전개하여 풍현상에 따른 요구감쇠비 하한을 제시하고, 설치위치에 따른 유효계수가 고려된 추가감쇠비 상한과 최소설치위치를 제시하여 댐퍼도입에 의한 일관되고 체계적인 사장 케이블 제진설계 지침을 제안하고자 한다.

핵심용어 : 댐퍼, 사장 케이블, 요구감쇠비, 유효계수, 제진설계

1. 서 론

사장 케이블의 진동현상은 지점운동에 기인된 것과 우수와 기류에 기인된 것으로 대별된다. 특별히 사장 케이블과 보강형의 고유진동수 대역이 일치되는 경우에는 고유진동수 변화방법을 위한 Cross-Tie를 도입하여 제진계획을 수립할 수 있을 것이다. 하지만 보편적인 우수와 기류에 기인된 진동현상은 케이블 댐퍼를 도입하여 제진계획을 수립할 수 있을 것이다. 사장 케이블의 진동은 우수와 기류에

의해 와류진동, 풍우진동, 깎로핑이 주로 발생되며 이로 인한 사용성과 내구성의 저하는 케이블 댐퍼를 도입함으로써 일정부분 경감시킬 수 있게 된다. 따라서 상기한 풍현상에 관한 제어목표에 요구되는 감쇠비를 적합하게 결정하는 것이 필요하다.

미국의 PTI는 1993년에 사장 케이블에 관한 전반적인 형식을 갖춘 설계지침을 발행하였지만 진동제어에 관한 내용은 매우 개념적인 항목만 기재되어 있어 실제적인 설계지침으로의 기능은 수행할 수 없었다. 이후 수차례의 개정을 거

*정회원 · 교신저자 · (주)유신코퍼레이션 기술개발실 과장 · 공학박사 (E-mail : sand0514@yooshin.co.kr)

**정회원 · (주)유신코퍼레이션 기술개발실 사원 · 공학석사

***정회원 · (주)유신코퍼레이션 기술개발실 실장 · 공학박사

****현대건설(주) 기술개발원 차장 · 공학박사

처 2001년 LRFD 버전에서 사장 케이블의 진동에 영향을 미치는 풍현상의 언급과 더불어 제진설계에 관한 검토항목을 기술하였다. 그리고 프랑스의 SETRA는 2002년 지금까지의 경험과 이론을 근간으로 CIP Recommendations를 발간하였다. 여기에는 사장 케이블의 제진설계뿐만 아니라 풍현상, 케이블 제진댐퍼의 요건, 다양한 현상에 관한 지배미분방정식 등이 상세히 기술되어 있다. 한편 국내에는 내풍기술연구단이 주체가 되어 2006년에 케이블강교량설계지침을 제시하였다. 이것은 설계 요구사항들을 다양하게 제공하고 있지만 정량적인 판단이 난해한 부분들이 다수 존재하여 지속적인 개선을 수행 중에 있다. 이에 앞서 안상섭은 2002년에 서해대교를 대상으로 사장 케이블의 내풍검토 및 안정화에 관한 연구를 제시한 바가 있다. 이후 풍현상에 관한 검토방법 및 설계지침에 관한 주목할 만한 연구는 소개된 바가 없다.

본 연구는 관련된 풍현상 제어방법을 명확히 정의하고 이것을 준정적 평가방법으로 수행할 수 있도록 제안하며 이것을 이용한 진동현상별 추가감쇠비 평가방법을 제안하도록 한다. 더불어 댐퍼도입을 위한 설치위치와 최대로 가능한 추가감쇠비의 상한을 제시함으로써 궁극적으로 댐퍼도입에 의한 사장 케이블의 체계적인 설계지침을 제시하고자 한다.

2. 진동현상과 제진방안

사장 케이블의 진동은 발생현상에 따라 탁월풍속과 탁월모드의 대역이 상이하므로 관련된 현상학적 특성을 명확히 이해해야 적합한 제진설계가 가능할 것이다. 또한, 이러한 진동현상에 의해 불안정 우려가 있는 경우에는 공기역학적 안정화, 고유진동수 변화, 추가감쇠비 도입 등의 방법을 이용하여 발생원인에 적합한 제어계획을 수립해야 한다. 본 연구는 추가감쇠비 도입의 일환인 댐퍼에 의해 제어될 수 있는 진동현상에 국한하여 기술하도록 한다.

2.1 진동현상

사장 케이블은 설계단계부터 웨이크 갤로핑, 버페팅, 갤로핑, 풍우진동, 와류진동 등과 같은 동적 불안정 현상에 관한 검토를 수행해야 하며 각각의 현상학적 특성을 확인하여 적절한 제진방안을 계획해야 한다. 케이블에 추가감쇠비를 도입하는 방법은 와류진동, 풍우진동, 갤로핑에 효과적인 것으로 알려져 있다.

와류진동은 기류가 폭이 있는 물체와 만날 때 물체의 측면에서 교번으로 기류가 훑날리는 현상으로 기류를 방해하는 장애물에 주기적인 측방향 힘이 발생하게 된다. 이러한 현상은 주로 저풍속, 고차모드에서 발생하며 임의의 풍속에서 케이블의 고유진동수 중 하나를 진동시킨다. 일반적인 와류진동이 발생하는 와류생성 풍속은 식(1)과 같이 알려져 있다. 통상적으로 와류진동을 일으키는 기류의 에너지는 작기 때문에 위협하지 않는 것으로 보고되고 있다(CIP Recommendations on Cable Stays, 2002). 하지만 와류진동은 정착부의 2차 응력에 의한 내구성 저하 방지를 위하여 제어될 필요가 있다.

$$V_{vs} = \frac{N_{vs} D}{S_t} \quad (1)$$

V_{vs} : 와류생성 풍속
 N_{vs} : 와류생성 진동수
 S_t : Strouhal Number
 D : 단면외경

풍우진동은 케이블 외측표면의 상부와 하부에 발생된 물줄기(rivulet)에 의한 단면형상 변화로 발생하는 상향력과 하향력의 교번에 의한 진동현상이다. 이것은 자발공기력에 의한 기류에 직각방향으로 발생하는 갤로핑과 유사한 거동을 나타내지만 일정풍속을 상회하면 케이블 표면의 물줄기가 이탈되므로 발산되지는 않는다. 관찰결과에 따르면 이 현상은 기류가 케이블의 법선에 대해 30~80°로 입사되고 케이블을 인상시키는 방향으로 8~15 m/sec 정도의 풍속에서 발생하는 것으로 보고되고 있다. 주로 1.0~3.0 Hz 정도의 진동수를 갖는 케이블의 2차, 3차 모드에서 발현되는 특성을 나타내고 있다(CIP Recommendations on Cable Stays, 2002). 이것의 발생여부는 식(2)로 제시되는 무차원 상수인 Scruton Number가 일정한계를 상회하면 안정한 것으로 평가한다.

$$S_c = \frac{m \xi_{rw}}{\rho D^2} \quad (2)$$

m : 케이블 단위길이당 질량
 ξ_{rw} : 풍우진동을 제어하는 감쇠비
 ρ : 주변대기 공기밀도

갤로핑은 등속의 층류에서 공기역학적으로 불리한 형상을 갖는 케이블에 발생하는 공탄성 불안정 현상으로써 중강풍속에서 발생될 확률이 높으며 자발공기력에 의한 기류에 직각방향으로 발생하는 발산진동이다. 이론상 원형단면은 발생하지 않지만 사장교 케이블과 같이 경사가 있는 경우에는 기류방향으로 타원단면이므로 발생할 가능성이 있다. 발생여부는 식(3)으로 제시되는 임계풍속이 설계풍속에 미치지 못하면 불안정할 우려가 있는 것으로 평가한다. 설계풍속은 국가마다 실정에 맞는 기준을 제시하고 있다. 국내의 경우에는 사용성 설계풍속을 20 m/sec으로 정의하고 있다(대한토목학회, 2006).

$$V_c = c N_1 D \sqrt{S_c} \quad (3)$$

V_c : 갤로핑에 관한 임계풍속
 c : 경험적 상수(SETRA 35, PTI 40 추천)
 N_1 : 기본진동수
 S_c : Scruton Number

2.2 제진방안

와류진동에 따른 기본모드 최대진폭은 케이블 단면의 $S_t = 0.15$, 휨강성을 고려한 고유진동수, 축력과 등분포 횡하중을 받는 부재의 최대동적응답을 식(1)에 대입하면 식(4)가 전개된다.

$$Y_1 = \frac{9 \rho D^3 C_L}{4 m \delta_{vs}} \quad (4)$$

Y_1 : 기본모드에서 발현된 동적진폭

C_L : 양력계수
 $\delta_{v,s}$: 와류진동을 제어하는 감쇠비

임의의 진동현상에 대해 기본모드 최대진폭은 발생될 수 있는 가장 큰 값이다. 반면에 와류진동은 고차모드에서 발생되는 특성을 나타내고 있으므로 기본모드의 최대진폭을 이용한 검토는 절대적으로 안정적인 결과를 제시한다고 간주할 수 있다. 사장 케이블의 진동형상이 Sine 거동을 한다면 형상함수는 식(5)로 정의할 수 있다. 그리고 이것의 미분을 이용하면 정착부에서 발생하는 사장 케이블의 입사각을 산정할 수 있다.

$$w(x) = Y_1 \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (5)$$

L : 케이블 현길이

와류진동 발생에 따른 정착부의 2차 응력은 웨지 위치, 정착구 가이드 단부 위치로 구분하여 식(6)과 같이 유도되며 잔류응력의 제한을 두고 있다. 각각에 관한 응력저감계수 β_A , β_G 와 입사각 θ , 케이블 강재부분 탄성계수 E , 케이블 강재부분 인장응력 f_T 를 적용하면 정착구 위치별 2차 응력을 산정할 수 있다(CIP Recommendations on Cable Stays, 2002).

$$f_A = \beta_A (2\theta) \sqrt{E f_T} \leq 50 \text{MPa} \quad (6A)$$

$$f_G = \beta_G (2\theta) \sqrt{E f_T} \leq 250 \text{MPa} \quad (6B)$$

$$\beta_A = \frac{kl - \sinh(kl)}{2 + kl\{\exp(kl)\} - 2\cosh(kl) - \sinh(kl)}$$

$$\beta_G = \frac{kl\{\cosh(kl)\} - \sinh(kl)}{2 + kl\{\exp(kl)\} - 2\cosh(kl) - \sinh(kl)}$$

$k = \sqrt{T/EI}$: 케이블 휨에 관한 특성계수

l : 웨지에서 정착구 가이드 단부간 거리

상기한 식(4), 식(5)를 전개하여 식(6)에 대입정렬하면 식(7)이 유도된다. 이것은 와류진동에 의한 정착부 2차 응력이 최대허용일 때에 요구되는 감쇠비이다.

$$\delta_{v,s} = \max(\delta_{v,s,A}, \delta_{v,s,G}) \quad (7)$$

풍우진동의 발생원인을 상기해보면 이에 관한 안정성 문제는 케이블 표면상태가 중요한 인자임을 인지할 수 있을 것이다. 기존의 연구결과에 의하면, 물줄기 차단장치가 없는 때 근한 상태의 안정조건과 케이블 표면에 물줄기 차단장치가 도입된 상태의 안정조건은 식(8)로 평가된다(안상섭 외 3명, 2000).

$$S_c \geq 10 \quad (8A)$$

$$S_c \geq 4 \quad (8B)$$

앞선 식(2)와 안정조건 식(8)을 이용하면 풍우진동을 제어하는데 요구되는 감쇠비를 식(9)와 같이 역산할 수 있다.

$$\delta_{r,w} = 2\pi S_c \frac{\rho D^2}{m} \quad (9)$$

꺠로핑은 등속의 층류에서 원형단면이 아닌 경우에 한해 식(3)의 설계풍속이 임계풍속보다 크면 발생우려가 있으며 Glauert-Den Hartog는 영각 에서 케이블의 공력감쇠비가 음

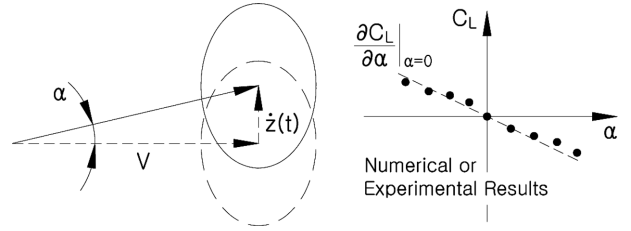


그림 1. 상대속도에 의한 영각과 양력계수 도함수

으로 전환되어 전체감쇠비(net damping)가 부의 값을 갖으면 꺠로핑이 발생됨을 제시하였다. 이것은 식(10)과 같은 운동방정식으로부터 몇몇 사항을 전개할 수 있도록 해준다(CIP Recommendations on Cable Stays, 2002, Simiu, Emil and Scanlan, Robert H., 1996).

$$m(\ddot{z} + 2\xi_i w_1 \dot{z} + w_1^2 z) = -\frac{1}{2} \rho V^2 D \left(\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \right) \frac{\dot{z}}{V} \quad (10)$$

ξ_i : 사장 케이블 고유감쇠비

w_1 : 사장 케이블 기본각진동수

V : 층류의 일정한속

C_D : 항력계수

운동방정식인 식(10)은 Glauert-Den Hartog의 제안에 따라 영각 $\alpha=0$ 에서 감쇠력과 전체감쇠비를 식(11)과 식(12)로 추출할 수 있다. 여기서 양력계수 도함수는 그림 1에서 보인 바와 같이 사장 케이블이 임의의 시간 t에서 $\dot{z}(t)$ 로 운동할 때 상대속도에 따른 영각별 양력계수들을 얻어 분석할 수 있다.

$$F_{D,g} = 2m\xi_i w_1 + \frac{1}{2} \rho V D \left(\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \right)_0 \quad (11)$$

$$\delta_{n,g} = \delta_i + \frac{\rho V D}{4mN_1} \left(\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \right)_0 \quad (12)$$

현수교 행어와 같이 단면이 원형인 경우에는 진동에 의한 영각 변화가 없는 한 $C_L=0$ 이므로 부감쇠는 발생되지 않을 것이다. 하지만 사장 케이블은 경사로 인해 타원단면이 되므로 꺠로핑에 관한 안정성 여부를 확인할 필요가 있다.

3. 설계지침

본 연구의 최종적인 목표인 댐퍼용량과 설치위치의 결정에 앞서 우수와 기류에 기인된 사장 케이블의 진동현상을 평가하기 위한 동적매개변수를 정량적으로 정의하는 것이 필요하다. 본 장에서는 최종적인 목표를 달성하는데 요구되는 입력자료의 정의와 적용방법, 그리고 댐퍼의 유효계수와 설치위치에 관한 특성을 반영한 설계지침을 제시한다.

3.1 정 · 동적 매개변수

사장 케이블에 관한 진동현상을 정량적으로 평가하기 위하여 이에 관한 정 · 동적매개변수를 명확하게 이해한 후 적절하게 도입해야 한다.

Reynolds Number는 유체에 관한 가장 기본적인 매개변수이며, 양력계수, 항력계수, 공력감쇠비 등을 결정할 때 사용되고 식(13)과 같이 표현된다.

표 1. Reynolds Number에 따른 항력계수

Reynolds Number 구간	C_D
$\approx 2 \times 10^5$ 이하, Subcritical Range	1.2
$\approx 2 \times 10^5 \sim \approx 1 \times 10^7$, Below Wind Tunnel Limit	0.3~1.2
$\approx 1 \times 10^7$ 이상, Hypercritical Range	0.7

표 2. 케이블 구성에 따른 고유감쇠비

분 류	고유감쇠비 (δ)
외부 Barrier가 없으며 개별 피복된 P.S.C.	0.9~1.2%
유연한 Stay Pipe로 구성된 P.W.C. 및 P.S.C.	0.6~1.8%
시멘트 그라우팅 Stay Pipe로 구성된 P.W.C. 및 P.S.C.	0.05~0.1%

$$R_e = \frac{VD}{\nu} \quad (13)$$

ν : 주변대기 동점성계수, 15×10^{-6} (m^2/s)

케이블 외경에 따라 다소 차이는 있겠지만 사용성 설계의 풍속대역은 대체로 Subcritical 범주(20 m/sec 이하)에 포함되므로 안정성 분석에서 항력계수는 1.2를 추천한다. 반면에 내풍설계의 풍속대역은 대체로 Hypercritical 범주(40 m/sec 이상)에 포함된다. 또한, Hypercritical 범주의 항력계수는 0.5~0.6 정도이나 공용 중 UV에 의한 단면손상과 그 주변의 이물질 퇴적에 따른 단면변화를 고려하여 0.7을 추천한다(CIP Recommendations on Cable Stays, 2002). 이것을 표 1에 구분하여 정리한다.

고유감쇠비는 케이블의 종류와 Barrier 형식에 따라 상이하게 나타나며 사실상 정량화하기에 어려운 변수들이 많아서 아직 평가식이 제시된 바는 없다. 다만, 서해대교 가설시 P.S.C.에 관한 간략식이 식(14)와 같이 제시되어 있지만 이것도 표 2의 범주에 속하는 값을 나타낸다(안상섭 외 3명, 2000).

$$\delta_i = 2\pi(0.24 - 6 \times 10^{-4}L)(\%) \quad (14)$$

L : 케이블 현길이(m)

공력감쇠비는 기류방향과 케이블 변위방향에 따라 내풍문제와 안정문제의 여부가 결정되므로 양력계수와 항력계수를 선택적으로 사용할 수 있다. 기류방향과 풍현상에 따른 케이블의 진동방향을 고려하여 동일방향인 경우에는 식(15)를 적용해야 하고, 직각방향인 경우에는 식(16)을 적용해야 한다(CIP Recommendations on Cable Stays, 2002).

$$\delta_a = \frac{\rho VDC_D}{2mN_n} \times 100(\%) \quad (15)$$

$$\delta_a = \frac{\rho VDC_L}{2mN_n} \times 100(\%) = \frac{\rho VDC_D}{4mN_n} \times 100(\%) \quad (16)$$

N_n : n 차 모드 고유진동수

사장 케이블은 충분한 장력이 도입되어 있으므로 팽팽한 스트링으로 간주하고 과도방정식을 전개하여 고유진동수를 추출한다. 이것은 쌍곡선형 편미분방정식의 형태이므로 공간적 부분과 시간적 부분으로 연계분리하여 고유값 문제를 풀면 식(17)과 같은 고유진동수를 얻게 된다.

$$N_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (17)$$

T : 완성계 장력(Rest Tension)

3.2 전체감쇠비

사장 케이블의 진동제어에 필요한 추가감쇠비는 전체감쇠비 개념을 도입하여 결정할 수 있다.

와류진동에 관한 전체감쇠비는 식(7)을 이용하여 설계에 관한 식(18)로 제시한다. 다만, 와류진동은 발산진동이 아니므로 공력감쇠비를 반영하여 평가한다. 이것은 제1모드에서 발현될 때의 전체감쇠비를 평가한다.

$$\delta_{n,vs} = \delta_i + \delta_a + (-)\beta_{vs}\delta_{vs} \quad (18)$$

$\delta_{n,vs}$: 와류진동에 관한 전체감쇠비

β_{vs} : 와류진동에 관한 안전율

풍우진동에 관한 전체감쇠비는 식(9)를 이용하여 설계에 관한 식(19)로 제시한다. 이 현상은 발산진동은 아니지만 공탄성 불안정을 보이므로 공력감쇠비는 제외하고 평가한다. 이것은 제2모드에 관한 전체감쇠비를 평가한다.

$$\delta_{n,rw} = \delta_i + (-)\beta_{rw}\delta_{rw} \quad (19)$$

$\delta_{n,rw}$: 풍우진동에 관한 전체감쇠비

β_{rw} : 풍우진동에 관한 안전율

갯로핑에 관한 전체감쇠비는 식(12)를 이용하여 설계에 관한 식(20)으로 제시한다. 이 현상도 풍우진동과 마찬가지로 공탄성 불안정을 나타내므로 공력감쇠비는 제외하고 평가한다. 이것은 제1모드에 관한 전체감쇠비를 평가한다. 갯로핑 발현에 관한 감쇠비는 영각 $\alpha=0$ 에서 양력계수의 도함수가 상황에 따라 양수, 음수가 결정되므로 부호에 관한 조정은 요구되지 않는다.

$$\delta_{n,g} = \delta_i + \beta_g\delta_g \quad (20)$$

$\delta_{n,g}$: 갯로핑에 관한 전체감쇠비

β_g : 갯로핑에 관한 안전율

진동현상별 안전율은 이론이나 전산유체해석을 수행하여 얻어진 값과 풍동실험이나 관찰결과를 통한 값의 차이로 정의될 수 있다. 현재로써는 각각을 1.0으로 정의하고 추후 점진적으로 사례분석을 통해 개선하도록 한다.

3.3 유효계수와 설치위치

사장 케이블 제진에 요구되는 추가감쇠비는 전체감쇠비가 음수일 때의 값이다. 본 연구는 이 값을 요구감쇠비로 정의하고 양수로 표현한다.

케이블 댐퍼를 이용한 제진은 추가감쇠비의 상한과 요구감쇠비의 하한을 만족하는 범위에서 가능하다. 하한은 앞서 고찰한 풍현상에 의한 값이고 상한은 식(21)과 같이 설치위치에 의해 발현되는 값이다. 반면에 케이블 댐퍼에 의해 부여되는 감쇠비는 이것이 케이블에 설치되었을 때 발현될 수 있는 값이며 효율(efficiency)을 고려하여 그 값을 산정할 수 있다. 즉, 케이블 댐퍼에 의해 부여가능한 감쇠비는 댐퍼 자

체의 감쇠비보다 작은 값이 된다. 본 연구는 상기한 효율을 유효계수로 정의하며 이것은 다음에 설명할 손실들의 곱이다.

사장 케이블이 팽팽한 스트링처럼 거동한다는 전제하에서 설치위치에 따른 이론적인 추가감쇠비의 상한은 식(21)로 평가된다(CIP Recommendations on Cable Stays, 2002). 보다 정확히 표현하면 이론적인 상한은 Wave Number와 정착점~설치위치간 거리(a)의 곱이다(Krenk, S. and Høgsberg, J.R., 2005).

$$\delta_{theory} = \frac{\pi}{L} a \times 100(\%) \quad (21)$$

δ_{theory} : 추가감쇠비의 이론적인 상한

유효계수를 구성하는 주요한 손실은 다음과 같다. 첫째, 새그효과에 의한 추가감쇠비의 손실(α_1)으로써 식(17)에 의한 고유진동수를 보정해주는 것이며 이것은 새그효과가 탁월한 기본모드에서만 고려한다. 둘째, 댐퍼를 지지하는 부재의 강성효과를 고려하는 손실(α_2)이다. 셋째, 댐퍼의 고유한 손실(α_3)으로써 기계적인 특성을 실험적으로 제시한 값이다. 본 연구에서 제시한 손실(α_3)은 제진재료별 보편적인 값이므로 댐퍼의 고유한 손실은 댐퍼 개발사의 실험적인 분석을 통해 제시된 값을 사용하는 것이 바람직하다.

풍현상별 주요한 발현 풍속대역과 진동대역을 고려하면 와류진동과 깎로핑은 제1모드를 이용하여 분석하는 것이 적합하고 풍우진동은 제2모드를 이용하여 분석하는 것이 적합하다. 따라서 와류진동, 깎로핑의 경우에는 식(22), 풍우진동의 경우에는 식(23)을 적용하는 것이 타당하다.

$$\delta_{design} = \phi_{basic} \delta_{theory} \quad (22)$$

$$\delta_{design} = \phi_{other} \delta_{theory} \quad (23)$$

- δ_{design} : 추가감쇠비의 설계적인 상한
- ϕ_{basic} : 제1모드 유효계수
- ϕ_{other} : 제1모드 이외의 유효계수

설치위치를 조정하여 제진범위의 상한을 식(21)을 이용하여 변화시킬 수 있다. 참고적으로 설치위치 최소값(a_{min})은 앞서 고찰한 풍현상에 의한 요구감쇠비의 하한을 이용하여 산정할 수 있다. 이것도 제1모드와 제2모드에 따라 유효계수는 다르게 적용해야 하며 식(24)로 표현된다.

$$a_{min} = \frac{1}{\phi_i} \frac{L}{\pi} \delta_{req} \quad (24)$$

$\delta_{req} = -\delta_{n,i}$: 요구감쇠비의 하한

표 3. 댐퍼형식별 손실계수

댐퍼형식	고무형식	유압형식	마찰형식
α_3	0.3~0.4	0.5~0.7	0.8~0.9

새그효과에 의한 추가감쇠비의 손실로 정의된 식(25)와 같이 새그효과와 더불어 댐퍼의 설치거리에 따라 변화된다. 이것은 사장 케이블마다 다른 값을 갖는다(Krenk, S. and Høgsberg, J.R., 2005).

$$\alpha_1 = \frac{\{\tan(\beta_0 L/2) - \beta_0 a/2\}}{\tan^2(\beta_0 L/2) + 12/(\lambda^2 \beta_0 L/2)^2} \quad (25)$$

$$\beta_0 = \frac{\pi}{L} \sqrt{1 + \frac{8\lambda^2}{\pi^4}} : \text{Wave Number with Sag}$$

댐퍼를 지지하는 부재의 강성을 고려한 손실로 정의된 α_2 는 고정된 정착부로부터 얻은 손실 α_2 과 독립적인 분석이 요구된다. 즉, 사장 케이블과 댐퍼의 특성 및 종류와 무관하다. 예로써 서해대교와 같이 추가적인 연장파이프가 있는 구조에는 이 효과가 반영되어야 하지만 인천대교와 같이 복부에 직접적으로 연결된 구조에는 이 효과가 미소하다. 하지만 설계에서는 어떠한 경우라도 95%를 기본으로 사용하기를 추천한다.

댐퍼형식별로 댐퍼의 고유한 손실로 정의된 α_2 는 VSLI와 FIC의 자료들을 근거로 표 3으로 정리한다(TR Freyssinet International, 2007, TR VSL International, 2007).

4. 설계분석

우수와 기류에 의한 사장 케이블 진동현상의 현실성 있는 분석을 위하여 공용 중인 사장교를 대상으로 분석을 수행한다. 그림 2는 분석에 사용될 대상교량의 종평면도이다. 케이블 번호는 측경간 앵커 케이블부터 폐합세그먼트 근처의 케이블 순서로 정의한다. 분석을 위한 몇 가지 매개변수들은 케이블강교량설계지침을 기준으로 하고 정의되지 않은 사항들은 기타 참고문헌을 차용한다. 적용된 정·동적 매개변수를 표 4로 정리한다. 이와 함께 사장 케이블의 기본제원은 표 5로 정리한다.

케이블 댐퍼를 이용하여 효과적인 제어가 가능한 현상들의 전체감쇠비를 표 6에 정리한다. 본 연구의 목적은 전체감쇠비가 음이 되면 케이블 댐퍼를 이용하여 이것이 양이 되도록 하는 것이다. 즉, 전체감쇠비가 양이면 요구감쇠비가

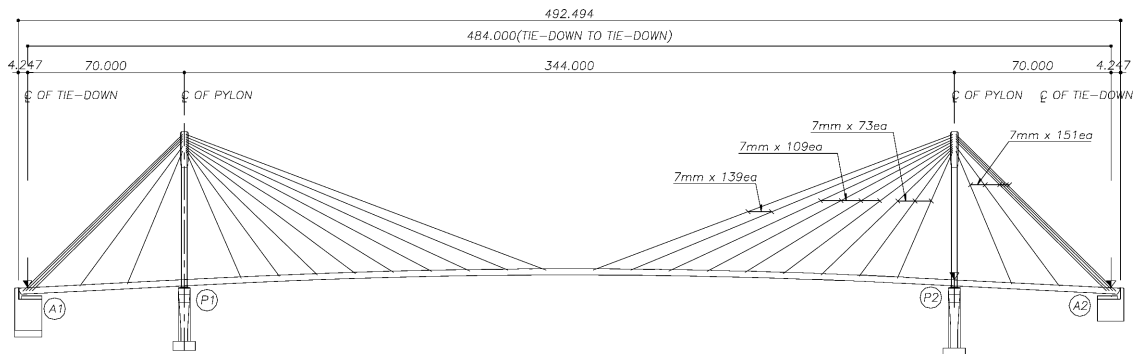


그림 2. 설계분석 대상교량 종평면도

표 4. 정·동 매개변수

매개변수	추천값
Strouhal Number, S_r	0.15
Scruton Number, S_c	10
주변대기 공기밀도, ρ (kg/m ³)	1.25
양력계수, C_L	0.7
항력계수, C_D	1.2
양력계수 도함수, $C_L' _0$	-3.2
댐퍼 지지부재 손실계수, α_2	0.95
고무형식 손실계수, α_3	0.35
유압형식 손실계수, α_3	0.60
마찰형식 손실계수, α_3	0.85

표 5. 사장 케이블 기본제원

케이블	L(m)	mg(kN/m)	D(m)	T(kN)	θ (deg.)
C01	101.539	0.467	0.108	2473	44.286
C02	100.730	0.467	0.108	2336	44.370
C03	98.820	0.467	0.108	2612	44.576
C04	97.142	0.467	0.108	2477	44.669
C05	78.609	0.467	0.108	2907	53.493
C06	64.948	0.467	0.108	2895	67.135
C07	62.409	0.227	0.078	575	66.376
C08	71.402	0.227	0.078	712	53.714
C09	82.980	0.227	0.078	828	44.189
C10	96.306	0.340	0.095	1078	37.168
C11	110.741	0.340	0.095	1233	31.955
C12	125.886	0.340	0.095	1377	28.008
C13	141.473	0.340	0.095	1532	24.964
C14	157.255	0.431	0.106	1815	22.583
C15	172.147	0.431	0.106	2159	20.819

표 6. 현상별 전체감쇠비 및 요구감쇠비 하한

케이블	$\delta_{n,us}$ (%)	$\delta_{n,rw}$ (%)	$\delta_{n,g}$ (%)	δ_{req} (%)
C01	1.498	-0.799	-1.402	1.402
C02	1.509	-0.796	-1.451	1.451
C03	1.488	-0.789	-1.257	1.257
C04	1.498	-0.783	-1.274	1.274
C05	1.474	-0.713	-0.593	0.713
C06	1.477	-0.661	-0.231	0.661
C07	1.768	-0.796	-2.067	2.067
C08	1.748	-0.830	-2.194	2.194
C09	1.745	-0.873	-2.505	2.505
C10	1.701	-0.898	-2.595	2.595
C11	1.689	-0.952	-2.930	2.930
C12	1.678	-1.009	-3.291	3.291
C13	1.662	-1.068	-3.633	3.633
C14	1.612	-1.095	-3.754	3.754
C15	1.558	-1.151	-3.827	3.827

음이므로 요구가 없음을 뜻하는 것이다. 이것은 식(18), (19), (20)을 이용하여 산정된 값들이다. 와류진동과 갤로핑

표 7. 이론감쇠비 및 유효계수

케이블	a(m)	δ_{theory} (%)	α_1	ϕ_{basic}	ϕ_{other}
C01	3.106	9.610	0.990	0.94	0.95
C02	3.053	9.522	0.988	0.94	0.95
C03	3.031	9.636	0.992	0.94	0.95
C04	3.035	9.815	0.991	0.94	0.95
C05	1.769	7.070	0.997	0.95	0.95
C06	1.533	7.415	0.999	0.95	0.95
C07	1.524	7.672	0.989	0.94	0.95
C08	1.728	7.603	0.983	0.93	0.95
C09	1.999	7.568	0.979	0.93	0.95
C10	2.323	7.578	0.948	0.90	0.95
C11	2.665	7.560	0.948	0.90	0.95
C12	3.020	7.537	0.948	0.90	0.95
C13	3.387	7.521	0.949	0.90	0.95
C14	3.799	7.590	0.922	0.88	0.95
C15	4.162	7.595	0.942	0.89	0.95

표 8. 추가감쇠비의 설계적인 상한

케이블	지배현상	적용된 댐퍼형식	ϕ_i	δ_{design} (%)
C01	갤로핑	고무형식	0.329	3.162
C02	갤로핑	고무형식	0.329	3.128
C03	갤로핑	고무형식	0.330	3.178
C04	갤로핑	고무형식	0.329	3.233
C05	풍우진동	고무형식	0.333	2.351
C06	풍우진동	고무형식	0.333	2.466
C07	갤로핑	고무형식	0.329	2.522
C08	갤로핑	고무형식	0.327	2.486
C09	갤로핑	유압형식	0.558	4.223
C10	갤로핑	유압형식	0.540	4.094
C11	갤로핑	유압형식	0.540	4.084
C12	갤로핑	유압형식	0.540	4.071
C13	갤로핑	유압형식	0.541	4.069
C14	갤로핑	유압형식	0.525	3.987
C15	갤로핑	유압형식	0.537	4.078

은 제1모드에 의한 검토이고 풍우진동은 제2모드에 의한 검토이다.

표 6의 결과를 이용하여 지배적인 풍현상을 분석하고 요구감쇠비의 하한을 산정한다. 이것을 그림 3으로 표현한다. 반면에 추가감쇠비 상한은 설치위치와 댐퍼형식별 유효계수에 의해 결정된다. 사장 케이블의 가이드파이프 단부에 댐퍼를 설치할 경우 이론적인 감쇠비 상한을 식(21)로 구하고 을 식(25)로 구해 표 7에 정리한다.

지배적인 풍현상에 따라 유효계수는 식(22)와 식(23)을 선택적으로 적용할 수 있다. 이것으로부터 식(24)를 이용하면 가이드파이프의 길이가 충분한지를 확인할 수 있다. 적용된 댐퍼형식을 표 8로 정의하였을 때 지배적인 풍현상을 고려하면 최종적인 유효계수를 산정할 수 있게 된다. 이것은 실제로 부여될 수 있는 설계적인 상한의 감쇠비를 제공

표 9. 댐퍼 고유감쇠와 부여가능한 추가감쇠비

케이블	적용된 댐퍼형식	δ_{damp} (%)	ϕ	$\delta_{feasible}$ (%)
C01	고무형식	5.0	0.329	1.645
C02	고무형식	5.0	0.329	1.643
C03	고무형식	5.0	0.330	1.649
C04	고무형식	5.0	0.329	1.647
C05	고무형식	5.0	0.333	1.663
C06	고무형식	5.0	0.333	1.663
C07	고무형식	7.5	0.329	2.466
C08	고무형식	7.5	0.327	2.452
C09	유압형식	5.0	0.558	2.790
C10	유압형식	5.0	0.540	2.701
C11	유압형식	7.5	0.540	4.052
C12	유압형식	7.5	0.540	4.051
C13	유압형식	7.5	0.541	4.058
C14	유압형식	7.5	0.525	3.940
C15	유압형식	7.5	0.537	4.027

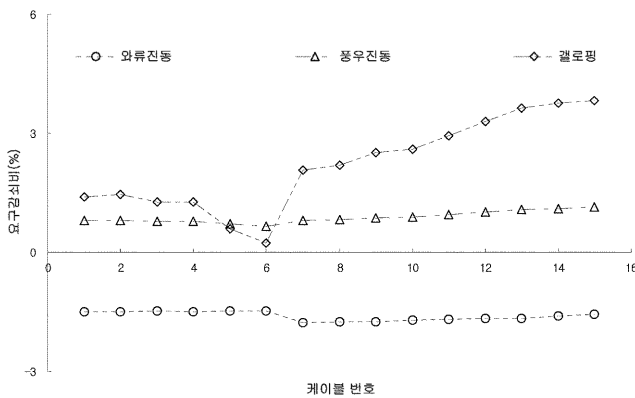


그림 3. 지배적인 풍현상 분석

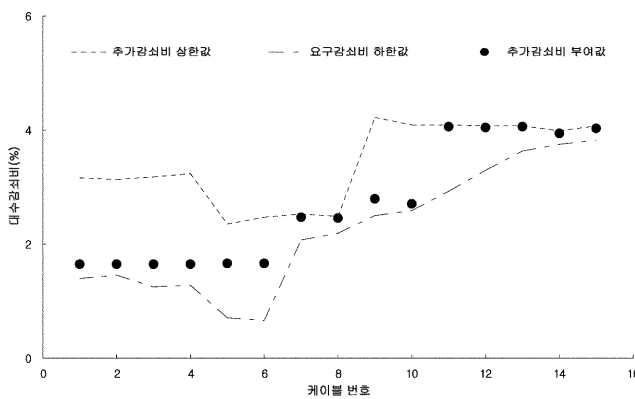


그림 4. 부여가능한 추가감쇠비 영역분석

하게 된다. 표 6의 δ_{req} 와 표 8의 δ_{design} 는 각각 그림 4의 추가감쇠비 상한과 요구감쇠비 하한을 나타낸다. 이것은 다음과 같은 두 가지 사항을 설명한다. 설치되는 케이블 댐퍼의 발현성능은 반드시 δ_{req} 를 상회해야 하고 δ_{design} 이상은 기대할 수 없음을 의미하는 것이다. 만약 설치거리 부족으로 δ_{req} 가 δ_{design} 을 상회한다면 외부댐퍼(External Damper) 등으로 제진계획을 수정해야 할 것이다. 표 9는 실제로 적용하게 될 케이블 댐퍼의 선정과정으로써 부여

가능한 감쇠비($\delta_{feasible}$)는 δ_{req} 와 δ_{design} 간의 값이어야 한다. 최종적으로 설계자는 상기한 조건들을 만족하는 댐퍼형식과 댐퍼자체의 고유한 감쇠비(δ_{damp})를 합리적으로 계획해야 한다.

5. 결 론

본 연구는 사장 케이블 동적설계 중에서 댐퍼도입에 관한 설계지침을 제안하였다. 본 연구의 목적을 달성하기 위해 순차적으로 다음과 같은 두 가지 방법론을 정립하였다.

첫째 댐퍼도입에 의하여 효과적으로 제어되는 와류진동, 풍우진동, 깎로핑을 이해하고 이것을 사전에 차단하기 위해 요구되는 감쇠비 평가방법을 정립함으로써 케이블의 진동원인을 정량적으로 평가할 수 있도록 하였다. 둘째 유효계수 개념을 도입하여 댐퍼용량 및 설치위치의 결정방법을 정립함으로써 설치 후 발현성능을 정량적으로 예측할 수 있도록 하였다.

더불어 국내의 설계지침, 해외기업 기술정보, 이론서적으로부터 댐퍼도입에 의한 케이블 제진설계에서 요구되는 정·동적 매개변수들을 추출하여 체계적으로 정리하였다. 이것은 하나하나가 연구항목일 정도이므로 지속적인 개선이 필요한 사항들이다. 결론적으로 본 연구는 댐퍼도입에 의한 사장 케이블의 제진설계에 관한 개념적인 구성체계를 제시함으로써 세부항목 연구결과로 개정사항이 발생되더라도 전체를 통합한 기반을 제공한 것에 중요한 의미가 있다고 볼 수 있다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 지역기술혁신사업의 연구비지원(05 지역특성B05-01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

대한토목학회(2006) **케이블강교량설계지침**.
 안상섭(2002) 사장교 케이블의 진동 검토 및 대책, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제22권 제3A호, pp. 663-678.
 안상섭(2003) 점탄성 댐퍼가 설치된 케이블의 동적 특성-I. 켈빈모델, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제23권 제4A호, pp. 695-702.
 안상섭 외 3명(2000) **교량진동 감소장치에 관한 연구**, 한국도로공사 도로연구소.
 이해성 외 3명(2007) **케이블의 동적해석을 위한 가상일 원리의 정식화**, 교량설계핵심기술연구단, TRS 007.
 CIP Recommendations on Cable Stays (2002), SETRA.
 Faires, Douglas and Burden, Richard L. (1993) *Numerical Methods*, PWS Publishing Company.
 Gimsing, Niels J. (2000) *Cable Supported Bridges*, John Wiley & Sons, Inc.
 Irvine, H.M. (1981) *Cable Structures*, The MIT Press.
 Krenk, S. and Høgsberg, J.R. (2005) *Damping of Cables by a Transverse Force*, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 131, No. 10.
 Recommendations for Stay Cable Design, Testing and Installation (1993), PTI.
 Recommendations for Stay Cable Design, Testing and Installation

(2001), PTI.
Simiu, Emil and Scanlan, Robert H. (1996) *Wind Effects on Structures*, John Wiley & Sons, Inc.
Technical Report on *Internal & External Dampers Efficiency Estimation* (2007) Freyssinet International.

Technical Report on *Preliminary Design Report for GENSUI HDR Dampers* (2007) VSL International.
Technical Report on *Stay Cable Vibrations* (2005) VSL International.

(접수일: 2007.5.29/심사일: 2007.7.25/심사완료일: 2007.12.3)