

사장교 케이블 댐퍼시스템 개발과 검증실험

Development of Cable Damper System and Its Verification Test

서주원*

김남식**

서정인***

정운****

Juwon Seo

Namsik Kim

Jeongin Suh

Woon Jeong

Abstract

In order to lessen cable vibration, new cable damper system with high damping rubber was developed using the basis of the LRB design scheme. The analysis model of cable damper system incorporate voigt-kelvin damper model into the nonlinear cable analysis model. To achieve maximum damping capacity both reducing damper stiffness and developing high damping rubber were performed. As a result of verification test, the high damping rubber damper shows its effectiveness in improving cable damping capacity.

1. 서론

최근 국내에서도 케이블 교량이 많이 가설되면서 케이블의 진동문제 및 진동감소 방법에 대한 논의가 많이 진행되고 있다. 케이블에 작용하는 하중은 교통하중, 풍하중과 같은 상시하중에 의한 것으로 케이블 연단의 피로에 의한 파괴 뿐만 아니라 사용성과 교량 수명의 확보를 위하여 진동감소를 필요로 한다. 진동감소 방법으로 지금까지 사용된 방법은 케이블 보호용 튜브표면의 형상을 새롭게 설계하는 방법이 있다. 그런데 이 방법은 케이블의 풍우진동에 대한 대책의 하나로서 기존의 교량에 대해 적용이 곤란하고 풍우하중 이외의 진동에 대하여는 효과적이지 못한 소극적인 방법으로 볼 수 있다.[6]

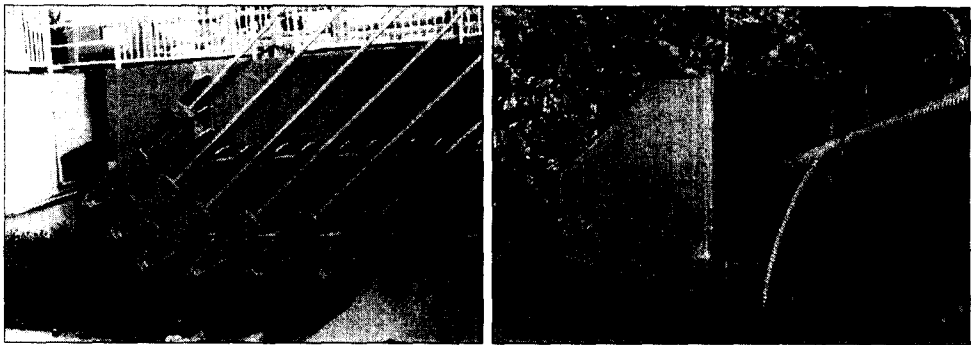


그림 1. 진도대교 케이블 정착구 및 임시 고무 패드

본 연구에서는 기존 케이블 교량의 진동을 감소시키기 위한 케이블 댐퍼를 개발하여

* 현대건설 기술연구소 선임연구원

** 현대건설 기술연구소 책임연구원

*** 우석대학교 조교수

**** 현대건설 기술연구소 연구원

현장적용을 위한 검증실험을 수행하였다. 강박스 사장교인 진도대교를 대상으로 하였는데 현재 진도대교는 그림 1에 나타난 바와 같이 케이블 정착구 연단에 임시로 고무패드를 끼운 상태로 사용되고 있다. 새로이 개발된 케이블 댐퍼는 임시 고무패드를 대체하여 설치됨으로써, 기존의 deviator로서의 역할인 케이블 정착구 연단에서의 휨피로 파괴에 대한 내구성을 증진시키는 기능뿐만 아니라, 추가적으로 케이블의 감쇠 성능을 증가시키는 목적으로 설계되었다.

케이블 댐퍼의 현장적용을 위하여 케이블 댐퍼 해석모델을 정립하고 댐퍼용량, 현장여건을 고려한 댐퍼 설치위치 등을 고려하여 예상 감쇠목표를 정하여 설계하였다. 현장적용에 앞서 댐퍼의 성능평가를 위해 정적실험과 모형 케이블 구조물을 이용한 실내 성능실험을 수행하였다.

2. 케이블 댐퍼 해석모델

케이블 댐퍼 시스템의 해석모델링을 위하여 그림 2에 양단 고정점을 연결한 케이블 구조물과 양단 고정점 으로부터 X_0 위치에 설치된 케이블 보여주고 있다. 케이블의 하단은 사장교 강박스 주형에 연결되고 상단은 주탑과 고정되어 있다. 댐퍼는 그림 1에 나타난 바와 같이 정착구 상단의 주형에 고정된다.

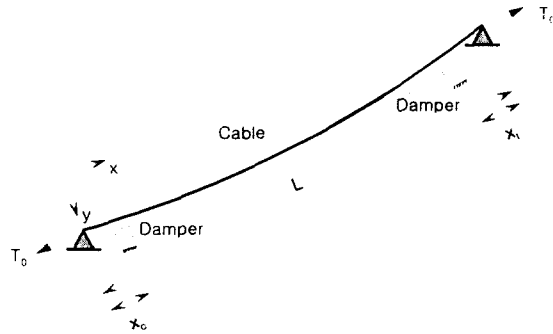


그림 2. 케이블-댐퍼 시스템 (양단 고정 댐퍼)

케이블의 현 길이는 L , 케이블의 경사각은 θ , 단위 길이당 질량은 m , 축방향 강성은 EA , 그리고 T_0 는 상, 하단 지점에서 현 방향 장력 성분이다. 시간 t 일 때 하단 지점에서 케이블 길이 방향으로 x 만큼 떨어진 지점에서 현의 수직 방향 변위성분을 $v(x, t)$ 로 할 경우 케이블의 운동방정식은 식(1)로 나타낼 수 있다.[4]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[T_0 \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{EA}{L} \left(\frac{dy}{dx} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \left(\int_0^x \left[\frac{dy}{dx} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] dx \right) \right] = m\ddot{v} + c\dot{v} \quad (1)$$

댐퍼의 강성을 k_D , 감쇠를 c_D 라 할 때, 케이블-댐퍼 시스템의 비선형 운동방정식은 댐퍼가 케이블 평면 내에 설치되므로 중력방향의 운동에만 유효하다는 점을 고려하면 케이블의 운동방정식에 다음과 같이 댐퍼의 영향을 추가하여 구할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[T_0 \frac{\partial v}{\partial x} + \left(\frac{dy}{dx} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \left(\int_0^x \left[\frac{dy}{dx} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] dx \right) \right] = m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + c \frac{\partial v}{\partial t} + \left(c_D \frac{\partial v}{\partial t} + k_D \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) \delta(x - x_c) \quad (2)$$

여기서 δ 는 Dirac delta를 나타내며 케이블-댐퍼 시스템의 해석모델을 구하기 위하여 케이블 구조에 Kelvin[3] 댐퍼 모델이 연직방향으로 거동하는 경우를 모델링 하였다. 댐퍼는 케이블 구조에 부가강성 및 감쇠를 추가하는 기능을 하는 것으로 보며 연직 방향으로 거동하는 것으로 가정하였다. 시간 t 에서 케이블의 운동은 무한개 자유진동 모드와 지점 운동의 선형 중첩으로 생각할 수 있다.

$$v(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} q_n(t)\phi_n(x) \quad (3)$$

$$\phi_n(x) = \sin n\pi \frac{x}{L} \quad (4)$$

$$\int_0^L \phi_m(x)\phi_n(x)dx = \frac{L}{2} \delta_{mn} \quad (5)$$

$\phi_n(x)$ 는 n 번째 일반화된 좌표이며 양단 고정인 케이블의 비감쇠 자유진동 모드와 같으며 $\phi_m(x)$ 을 가중(Weighting) 함수로 하여 Galerkin의 방법을 적용하고 2차 이상의 비선형 항을 제거하면 다음과 같은 케이블 운동방정식을 구할 수 있다.

$$M\ddot{Q} + C\dot{Q} + K_c Q = F - F_D \quad (6)$$

여기서 $M = \frac{mL}{2}[\delta_{ij}] \quad (7)$

$$C = \frac{cL}{2}[\delta_{ij}] \quad (8)$$

$$K_c = \left[\frac{i^2 \pi^2 T_0}{2L} \delta_{ij} \right] + \left[\frac{EAx^2 (1-(-1))^i (1-(-1))^j}{\pi^2 L} \right] \quad (9)$$

$$F = \int_0^L F(x,t)\phi dx \quad (10)$$

$$F_D = k_D \left[\sin i\pi \frac{x_c}{L} \sin j\pi \frac{x_c}{L} \right] Q + c_D \left[\sin i\pi \frac{x_c}{L} \sin j\pi \frac{x_c}{L} \right] \dot{Q} \quad (11)$$

$$x = \frac{mg \cos \theta L}{T_0} \quad (12)$$

케이블의 연직응답은 다음식으로 구할 수 있다.

$$v(x,t) = Q^T \cdot \Phi \quad \text{여기서 } \Phi = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n\} \quad (13)$$

3. 케이블 댐퍼제작 및 특성실험

3.1 케이블 댐퍼 설계

고감쇠 고무를 이용하여 유효강성과 감쇠비를 케이블 감쇠비가 극대화 되도록 고무의 전단탄성계수 및 최대변위를 조절하여 댐퍼를 설계하였다. 그림 3은 케이블 댐퍼의 상세도를 나타내고 있다. 케이블-댐퍼 시스템이 가능한 최대의 감쇠능력을 갖기 위해서는 댐퍼 자체의 감쇠능력을 최대화하며, 큰 전단변형을 유도하기 위하여 충분히 유연한 강성을 갖도록 설계하여야 한다. 이러한 목적에 적합한 고감쇠 고무를 적용하여 최대한 큰 전단변형을 유도하기 위하여 댐퍼의 형상을 결정하였다.

먼저 댐퍼가 설치된 위치에서의 설계변위를 가정하며, 적용된 고무의 전단탄성계수 (Shear Modulus)는 반복적인 계산을 통해서 결정되었다. 설계변위와 전단탄성계수로부터 상온상태를 기준으로 댐퍼의 유효강성 및 등가 감쇠계수를 표 1과 같이 구하였다.

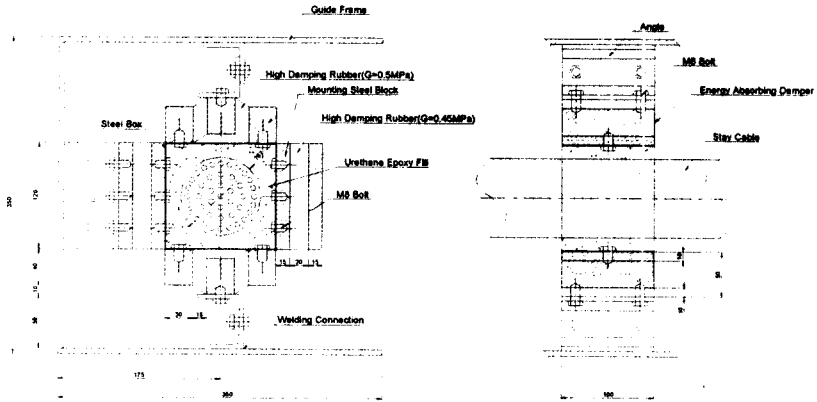


그림 3. 고감쇠 고무를 이용한 케이블 댐퍼

표 1. 케이블 댐퍼의 제원 및 동적특성값

	상하부 Bearing	Guide Bearing
고무의 전단탄성계수	$G = 0.5MPa$	$G = 0.45MPa$
고무의 단면적	$A_s = 40 \times 100 = 4 \times 10^3 mm^2$	$A_s = 120 \times 100 = 1.2 \times 10^4 mm^2$
댐퍼의 설계변위	$d_i = 10mm$	$d_i = 10mm$
고무층의 개수	$n = 4$	$n = 2$
각 고무층의 높이	$t_i = 15mm$	$t_i = 20mm$
유효강성	$K_{eff1} = \frac{n \cdot G \cdot A_s}{t_i} = 0.533MN / m$	$K_{eff2} = \frac{n \cdot G \cdot A_s}{t_i} = 0.54MN / m$
등가감쇠비	$\xi_{eq1} = 12\%$	$\xi_{eq2} = 12\%$
등가감쇠계수	$EDC_1 = 40.212kN \cdot mm$	$EDC_2 = 40.715kN \cdot mm$

케이블 댐퍼는 상하부와 좌우에 대칭으로 고감쇠 고무댐퍼로 구성되며 전체 댐퍼 시스템의 특성은 다음과 같다.

표 2. Cable-Damper System의 특성값

유효강성	$K_{eff} = K_{eff1} + K_{eff2} = 1.073MN / m$
등가감쇠계수	$EDC = EDC_1 + EDC_2 = 80.927kN \cdot mm$
케이블에 작용하는 최대하중	$F_{cable} = K_{eff} \cdot d_i = 10.733kN$

3.2 케이블 댐퍼의 재료특성 검증실험

설계된 케이블 댐퍼 시스템의 재료특성을 평가하기 위하여 실험을 수행하였다. 그림 4는 실험 setup 및 2Hz 가진 주파수-5mm의 변위에 대한 케이블 댐퍼 시스템의 응답을 나타내고 있다. 실험결과 설계치와 비교하여 $K_{cr} = 1.54kN/mm$, $\xi_{eq} = 10.75\%$ 로 유효강성은 다소 큰 결과를 보였으나, 유효 감쇠비는 설계치에 상당히 접근한 것으로 나타났다.

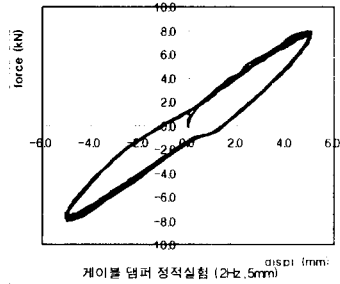
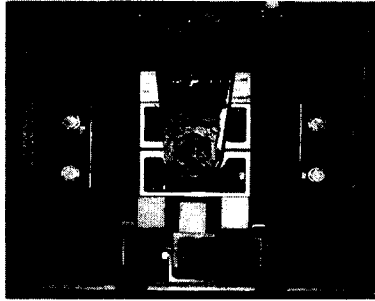


그림 4. 케이블댐퍼의 특성실험 결과

3.3 케이블 댐퍼의 동적특성 성능평가실험

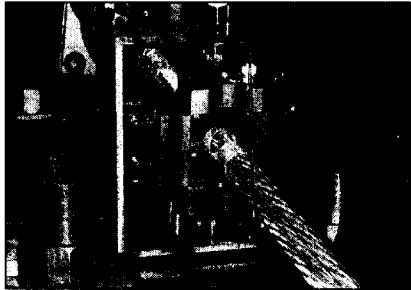
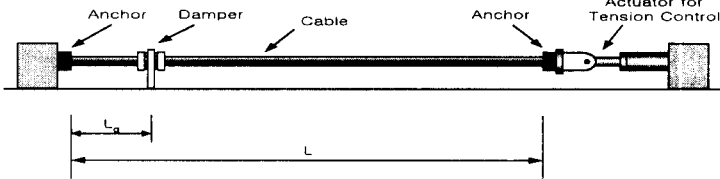


그림 5. 케이블-댐퍼 시스템 진동제어 성능평가를 위한 진동실험 setup

댐퍼 시작품에 대한 진동감쇠 성능을 검증하기 위하여 그림 5와 같이 모형 케이블에 댐퍼를 장착하여 제작된 댐퍼의 감쇠성능을 검토하였다. 모형케이블은 7 wire strand로 전체 길이는 19.96m로서 각각 15ton, 25ton의 장력을 가한 경우에 전체 케이블 길이의 6%, 8%(Ld/L)위치에 댐퍼가 설치된 경우의 감쇠성능을 구하였다.[6]

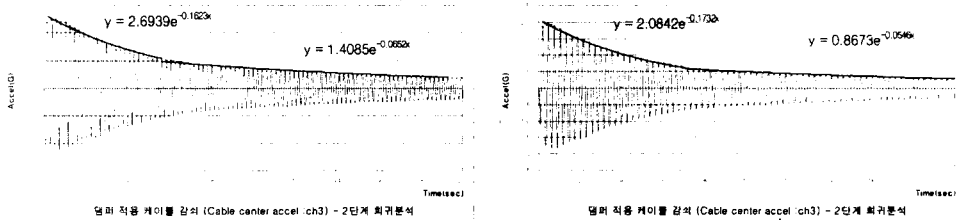


그림 6. 케이블 댐퍼에 의한 실험용 케이블의 감쇠

실험결과 그림 6의 그래프와 표 3에 나타난 바와 같이 약0.25%의 감쇠비를 나타내었다. 케이블의 1st mode에 대한 진동수는 장력이 증가하거나, 댐퍼의 설치위치가 정착부 쪽으로 갈수록 커지며 감쇠비는 케이블 장력이 작을수록, 정착부에서 멀리 댐퍼가 설치될 수록 큰 결과를 보였다. 감쇠비 증가율이 예상보다 작게 나온 것은 모형케이블의 제원에 비하여 댐퍼의 유효강성이 큰 것이 주요 원인으로 그림 8의 케이블 강성과 감쇠효과와의 관계에서도 알 수 있으며 표 3에서 케이블의 강성을 줄여 실험한 경우¹ 감쇠율의 증가가 매우 크게 나온 결과에서도 알 수 있다.

표 3. 고감쇠 케이블 댐퍼에 의한 감쇠비 증가율

장력 (kN)	댐퍼 위치	고유진동수 (Hz)		등가 감쇠비(%)		감쇠비 증가율
		Undamped	Damped	Undamped	Damped	
147	6%	3.42	3.61	0.20	0.24(0.29 ¹)	20%(45%)
	8%		3.71		0.25	
245	6%	4.39	4.59	0.19	0.23	21%
	8%		4.69		0.25	31%

그림 6에서 감쇠비를 구하기 위하여 적용한 logarithmic decrement식이 2단계로 수립하는 결과를 보였다. 초반부는 약 0.7~0.85%의 급격한 감쇠를 나타내는데 이것은 실험용 케이블이 짧아 비하여 케이블 스트랜드 사이의 마찰이 상대적으로 큰 것에 원인이 있는 것으로 판단된다. 케이블 스트랜드 사이의 마찰은 케이블 연직 변위에 크게 비례하기 때문에 마찰의 영향이 작은 후반부의 감쇠비를 댐퍼에 의한 유효감쇠비로 보았다. 즉, 고감쇠 고무댐퍼의 경우 유효강성과 감쇠비의 변화가 발생변위와 거의 관계없이 일정하다고 볼 수 있기 때문이다.

4. 진도대교 케이블 댐퍼 시스템 설계

4.1 케이블 현장계측

댐퍼가 설치되기 이전의 진도대교 케이블의 감쇠비를 구하기 위하여 현장진동계측을 수행하였다. 진동계측의 목적은 댐퍼를 설치하기 전 케이블의 감쇠비를 댐퍼설계에 반영하며, 댐퍼 설치후 감쇠향상 효과를 비교하기 위함이다. 진도대교의 케이블은 해남측 진도측 주탑을 중심으로 각각 17개씩 총 68개의 케이블로 구성되어 있다. 양쪽 지간에 6개의 Setback 케이블을 포함하여 8개의 케이블이 설치되어 있으며, 중앙 경간에 9번부터 17번까지의 케이블이 설치되어 있다.

표 4. 댐퍼 설치전 케이블 감쇠비 측정결과 (해남측)

케이블 No.	1번	13번	15번	16번	17번
길이(m)	102.742	110.904	141.514	157.526	174.276
장력(Ton)	154.54	95.07	124.94	131.41	160.02
진동수(Hz)	0.98	0.83	0.73	0.68	0.58
감쇠비(%)	0.14	0.17	0.19	0.21	0.49

현재 케이블 양단에 임시로 rubber pad가 설치된 상태에서 각 케이블의 감쇠비를 측정한 결과가

¹ 케이블 댐퍼의 상하 rubber bearing 만을 사용하여 강성을 줄여 실험한 경우

표 4와 같이 0.14%~0.21%의 범위를 나타내고 있다. 각 케이블 진동수와 감쇠비의 관계, 케이블 길이와 장력과의 관계가 그림 7에 비교되어 전체적으로 케이블의 진동수와 감쇠비는 역의 관계를 보여주고 있다.

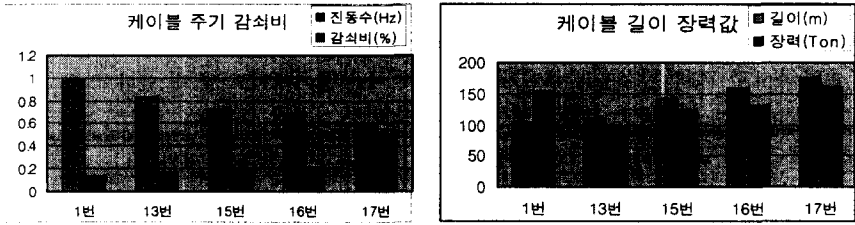


그림 7. 케이블 진동수-감쇠비, 길이-장력값 관계

4.2 케이블 댐퍼시스템 설계

케이블 모델 데이터를 이용하여 진도대교의 최적 케이블 감쇠비 및 각 케이블의 감쇠효과를 분석하였다. 케이블 댐퍼는 고감쇠 고무재료를 이용한 것으로 케이블 시스템에 부가감쇠 뿐만 아니라 댐퍼의 강성으로 최대감쇠비에 영향을 미친다. 일반적으로 케이블에 부가되는 댐퍼의 감쇠비와 강성의 관계는 다음 그래프로 나타난다.[1]

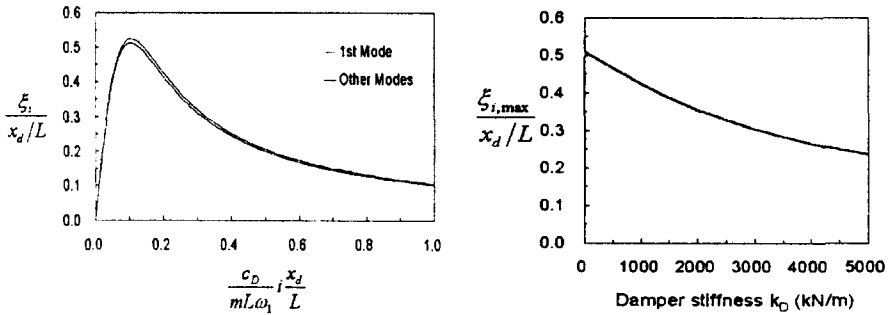
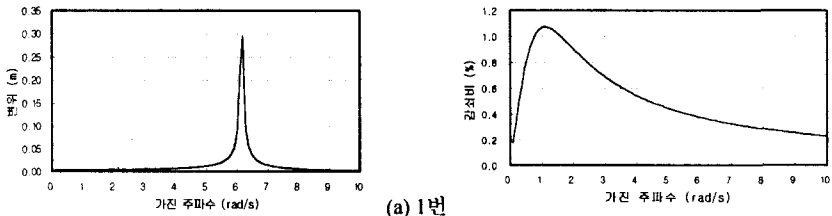
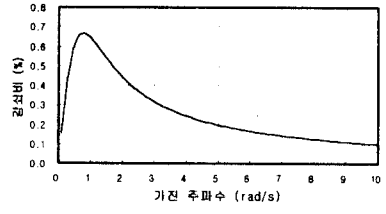
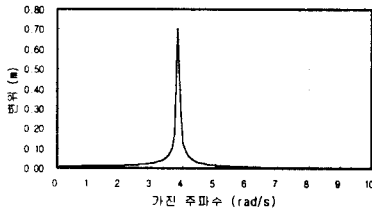


그림 8. 케이블댐퍼 부가감쇠 및 강성의 영향

케이블 댐퍼가 설치될 위치는 정착부 양단에서 케이블 길이의 약4% 위치에 설치될 예정으로 그림 8로부터 감쇠 목표치인 0.5%를 충분히 달성할 수 있음을 알 수 있다. 최종적으로 $k_{eff}=1.073\text{kN/mm}$, $\xi_{eq}=12\%$ 인 댐퍼의 경우 케이블의 주파수 응답과 부가감쇠비 곡선을 구하였다.



(a) 1번



(b)17번

그림 9. 댐퍼 설치된 케이블 주파수 응답곡선과 부가감쇠비 곡선

전체 케이블의 응답을 구한 결과 표 5에 나타난 바와 같이 케이블 댐퍼로 부가감쇠비는 0.24~0.38%로 증가함을 알 수 있다.

표 5. 케이블 위치별 부가 감쇠비

구분	CABLE길이(m)	케이블장력(kN)	직경(mm)	주파수(rad/sec)	부가감쇠비(%)
1	102.742	1417	87.0	6.18	0.367
2	102.043	1417	87.0	6.18	0.370
3	101.345	1417	87.0	6.27	0.369
4	100.015	1417	87.0	6.27	0.376
5	98.566	1417	87.0	6.36	0.379
6	97.118	1417	87.0	6.45	0.382
7	78.259	904	66.5	3.82	0.255
8	64.703	663	56.0	10.1	0.321
9	62.288	583	56.0	9.93	0.302
10	71.352	550	56.0	8.45	0.263
11	82.808	756	66.5	7.27	0.289
12	96.500	826	66.5	6.55	0.276
13	110.904	912	76.0	5.36	0.257
14	125.299	1019	76.0	5.00	0.256
15	141.514	1126	76.0	4.64	0.253
16	157.506	1203	76.0	4.36	0.243
17	174.276	1488	87.0	3.82	0.255

5. 결론

사장교 케이블의 진동감소를 위하여 고감쇠 고무를 이용한 댐퍼를 개발하였으며, 케이블 댐퍼시스템의 해석적 모델을 구성하고 현장적용을 위한 실내검증 실험을 수행하였다. 케이블댐퍼의 개발은 LRB 설계기술을 응용하여 고감쇠 고무재료만을 이용하여 약 12%대의 감쇠성능을 가진 댐퍼를 제작하였다. 케이블 댐퍼 시스템의 설계를 위한 해석적모델의 구성은 기존의 케이블 거동모델에 주기에 따라 감쇠계수가 변화하는 kelvin형 댐퍼모델을 적용하여 운동방정식을 구성하였다.

케이블 댐퍼의 현장적용을 위하여 현장계측과 실내실험으로부터 기존케이블 시스템의 감쇠비와

케이블 댐퍼의 감쇠성능을 검증하였으며, 해석적 모델로부터 댐퍼의 제작과 재료시험을 병행하여 최적의 댐퍼시스템을 설계하였다. 적용예정 교량인 진도대교는 강박스 사장교로 댐퍼설치 이전에 0.14~0.21%의 감쇠비를 나타내고 있었으며 케이블 댐퍼를 적용하여 해석한 결과 최대 0.46~0.52%까지 증가될 수 있음을 알 수 있다. 또한 모형 케이블을 이용한 실내실험에서 동일한 댐퍼를 이용하여 약 20% 감쇠성능이 개선됨을 확인할 수 있었다. 성능을 나타내고 있었으며, 케이블 댐퍼 시스템의 실내실험결과 약 20%의 감쇠성능 개선의 효과가 있음이 검증되었다. 향후 현장설치 완료후 진동계측을 통하여 최종적인 감쇠성능 개선 정도를 정량적으로 분석할 예정이다.

감사의 글

케이블 댐퍼의 설계 및 제작에 직접 참여하고 많은 도움을 주신 ㈜유니슨산업 기술연구소의 권형오 선임연구원님과 진도대교 현장계측 업무에 많이 협조해 주신 진도대교 유지관리 사무소 직원분들에게 감사드립니다.

참고문헌

1. 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.
2. 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.
3. 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 Earthquakes Engineering Research, Technical Report NCEER-95-0001
4. 안상섭, (2000) 케이블용 납-전단 댐퍼의 진동 감소 효과, *대한토목학회 추계학술발표회 논문집 I* pp. 597-600.
5. 최현 외, (1997) 점탄성 재료의 동적특성 추정에 관한 연구, *한국소음공학회지 제7권 6호* pp. 937-943.
6. 한국도로공사 도로연구소, (2000) 교량진동감소 장치에 관한 연구, *한국도로공사 연구보고서*.