

진도대교 케이블 댐퍼시스템 설계 및 검증실험

The Design of Cable Damper System for Jindo Bridge and its Field Verification Test

서주원*

Juwon Seo

김남식**

Namsik Kim

안상섭***

Sangsup Ahn

정운*

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 방안에 대한 논의가 많이 진행되고 있다. 본 연구에서는 진도대교를 대상으로 케이블 교량의 진동을 감소시키고자 새로운 케이블 댐퍼를 개발하고 현장적용을 통한 검증실험을 수행하였다. 강박스 사장교인 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 기능 뿐만 아니라, 추가적으로 케이블의 감쇠 성능을 증가시키는 목적으로 설계되었다.



그림 1. 진도대교 케이블 정착구 및 임시 고무 패드

케이블 댐퍼의 현장적용을 위하여 케이블 댐퍼 해석모델을 정립하고 댐퍼용량, 현장여건을 고려한 댐퍼 설치위치 등을 고려하여 예상 감쇠목표를 정하여 설계하였다. 현장적용 후 실제 구조물에 대한 진동실험을 수행하여 댐퍼 설계시 수행된 실내성능실험과 비교하였다.[7]

* 현대건설 기술연구소 선임연구원

** 현대건설 기술연구소 책임연구원

*** 한국도로공사 도로연구소 책임연구원

2. 케이블 댐퍼 해석모델

케이블 댐퍼 시스템의 해석모델링을 위하여 그림 2에 양단 고정점을 연결한 케이블 구조물과 양단 고정점으로부터 X_d 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.

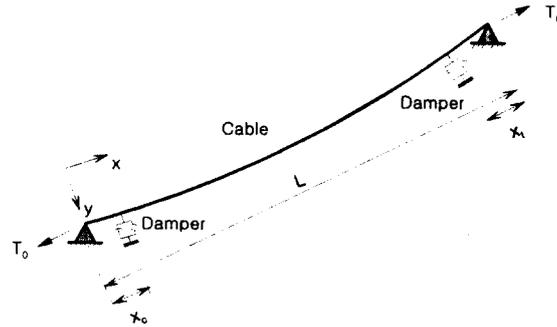


그림 2. 케이블-댐퍼 시스템 (양단 고정 댐퍼)

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.

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

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 $M = \frac{mL}{2} \delta_{ij}$, $C = \frac{cL}{2} [\delta_{ij}]$ (7)

$$K_c = \left[\frac{i^2 \pi^2 T_0}{2L} \delta_{ij} \right] + \left[\frac{E A x^2 (1 - (-1))^i (1 - (-1))^j}{\pi^2 L} \right] \quad (8)$$

$$F = \int_0^L F(x, t) dx \quad (9)$$

$$F_D = k_D \left[\sin i\pi \frac{x_c}{L} \sin j\pi \frac{x_c}{L} \right] Q + c_D \left[\sin i\pi \frac{x_c}{L} \sin j\pi \frac{x_c}{L} \right] \dot{Q} \quad (10)$$

$$x = \frac{mg \cos \theta L}{T_0} \quad (11)$$

케이블의 연직응답은 다음식으로 구할 수 있다.

$$v(x, t) = Q^T \cdot \Phi \quad \text{여기서 } \Phi = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n\} \quad (12)$$

3. 케이블 댐퍼 제작 및 특성실험

3.1 케이블 댐퍼 설계

고감쇠 고무를 이용하여 유효강성과 감쇠비를 케이블 감쇠비가 극대화 되도록 고무의 전단탄성계수 및 최대변위를 조절하여 댐퍼를 설계하였다. 케이블-댐퍼 시스템이 가능한 최대의 감쇠능력을 갖기 위해서는 댐퍼 자체의 감쇠능력을 최대화하며, 큰 전단변형을 유도하기 위하여 충분히 유연한 강성을 갖도록 하기 위하여 고감쇠 고무를 적용하고 형상을 결정하였다. 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.

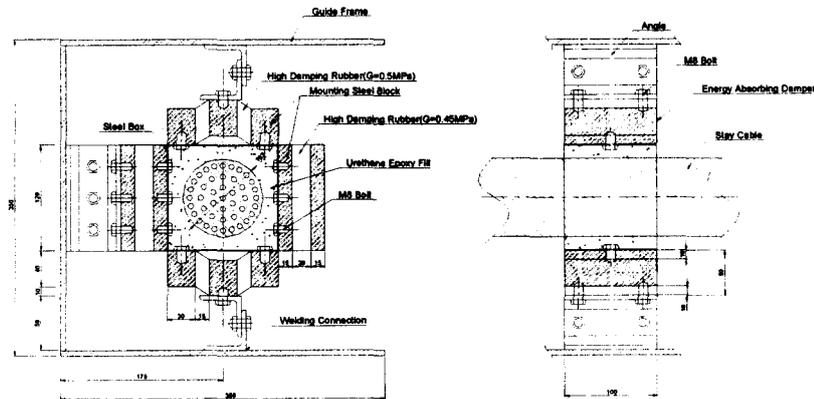


그림 3. 고감쇠 고무를 이용한 케이블 댐퍼

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

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 $K_{eff}=1.54kN/mm$, $\xi_{eq}=10.75\%$ 로 유효강성은 다소 큰 결과를 보였으나, 유효 감쇠비는 설계치에 상당히 접근한 것으로 나타났다.

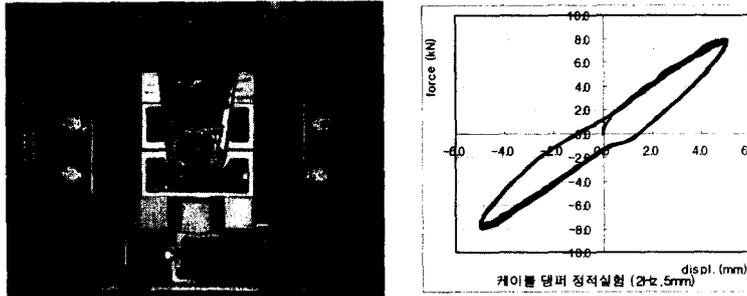


그림 4. 케이블댐퍼의 특성실험 결과

4. 진도대교 케이블 댐퍼 시스템 설계

4.1 기존 케이블 현장계측

댐퍼설치전 진동계측의 목적은 댐퍼를 이전 케이블의 감쇠비를 댐퍼 설계시 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 공간에 9번부터 17번까지의 케이블이 설치되어 있다.

표 3. 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)	168.07	103.32	131.66	136.62	168.62
진동수(Hz)	0.977	0.83	0.73	0.68	0.59
감쇠비(%)	0.136	0.171	0.194	0.213	0.304

현재 케이블 양단에 임시로 rubber pad가 설치된 상태에서 각 케이블의 감쇠비를 측정한 결과가 표 3과 같이 0.13%~0.30%의 범위를 나타내고 있다. 이것은 기존의 고무댐퍼가 설치된 상태에서의 감쇠응답이다. 각 케이블 진동수와 감쇠비의 관계, 케이블 길이와 장력과의 관계가 그림 7에 비교되어 전체적으로 케이블의 진동수와 감쇠비는 역의 관계를 보여주고 있다.

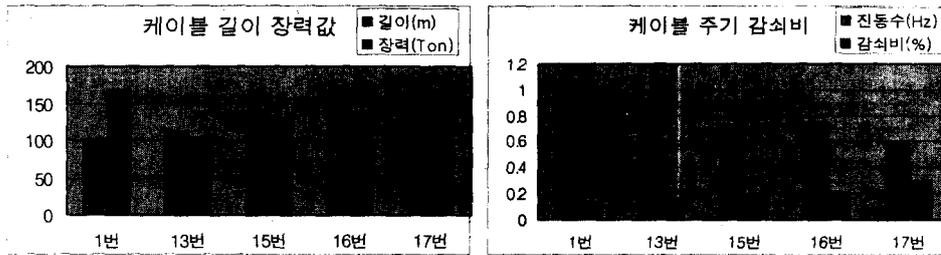


그림 5. 케이블 진동수-감쇠비, 길이-장력값 관계

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 최대 감쇠비에 영향을 미친다. 일반적으로 케이블에 부가되는 댐퍼의 감쇠비와 강성의 관계는 다음 그래프로 나타난다. [1]

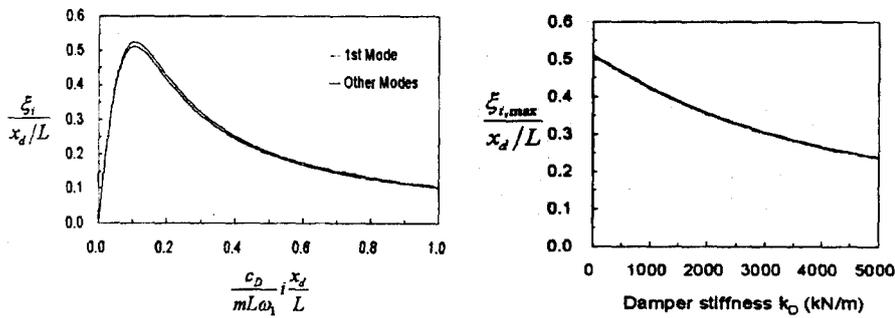


그림 6. 케이블댐퍼 부가감쇠 및 강성의 영향

케이블 댐퍼가 설치될 위치는 정착부 양단에서 케이블 길이의 약4% 위치에 설치될 예정으로 그림 6로부터 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.

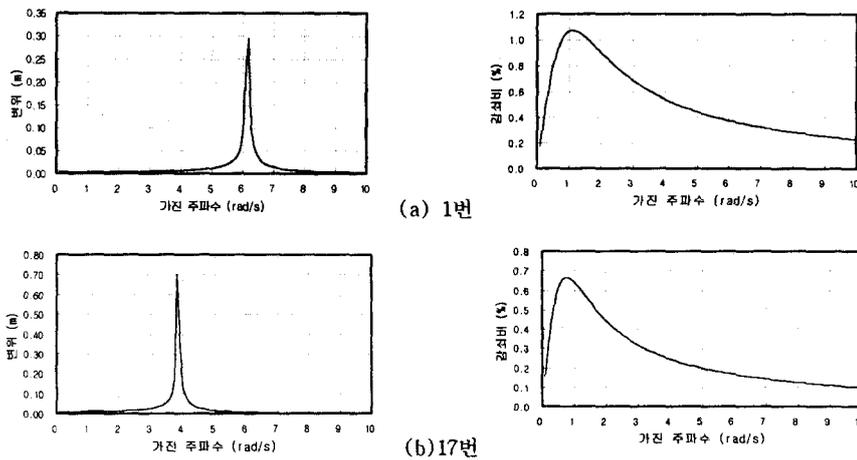


그림 7. 댐퍼 설치된 케이블 주파수 응답곡선과 부가감쇠비 곡선

전체 케이블의 응답을 구한 결과 표 5에 나타난 바와 같이 케이블 댐퍼로 부가감쇠비는 0.18~0.27% 정도로 증가함을 알 수 있으며, 케이블 자체만의 감쇠비를 0.1%로 볼 경우, 댐퍼설치후의 최종감쇠비는 0.26~0.35%가 됨을 알 수 있다.

표 4. 케이블 위치별 부가 감쇠비 케이블 종류에 따른 부감 감쇠비

구분	CABLE 길이 (m)	케이블 장력 (kN)	직경 (mm)	주파수 (Hz)	전체감쇠비(%) (케이블감쇠=0%)	전체감쇠비(%) (케이블감쇠=0.2%)	전체감쇠비(%) (케이블감쇠=0.1%)
1	102.742	1552	87.0	6.45	0.269	0.454	0.354
2	102.043	1506	87.0	6.36	0.266	0.452	0.352
3	101.345	1562	87.0	6.55	0.273	0.459	0.359
4	100.015	1398	87.0	6.27	0.256	0.441	0.341
5	98.566	1478	87.0	6.55	0.268	0.454	0.354
6	97.118	1454	87.0	6.64	0.266	0.451	0.351
7	78.259	879	66.5	8.18	0.226	0.411	0.311
8	64.703	760	56.0	10.9	0.234	0.420	0.320
9	62.288	546	56.0	9.60	0.190	0.376	0.276
10	71.352	643	56.0	9.18	0.192	0.377	0.277
11	82.808	750	66.5	7.27	0.188	0.373	0.273
12	96.500	957	66.5	7.00	0.204	0.389	0.289
13	110.904	1013	76.0	5.64	0.185	0.367	0.267
14	125.299	1214	76.0	5.45	0.194	0.378	0.278
15	141.514	1291	76.0	4.91	0.188	0.371	0.271
16	157.506	1340	76.0	4.55	0.176	0.358	0.258
17	174.276	1650	87.0	4.00	0.185	0.366	0.266

5. 현장측정 결과

5.1 진동법에 의한 감쇠비 및 장력 측정결과

케이블 댐퍼 설치 공사후 댐퍼의 성능을 평가하기 위하여 현장측정 실험을 수행하였다. 현장측정은 1차 계측작업과 동일하게 인력으로 케이블에 강제진동을 가진한 후 케이블의 진동 가속도를 측정하여 장력과 감쇠비를 구하였다.



그림 8 케이블 댐퍼 설치 현황

케이블 댐퍼의 설치는 댐퍼가 설치될 위치에 stainless steel frame을 설치하고 댐퍼를 조립한다. 댐퍼와 케이블과의 고정에는 epoxy를 이용하여 고정하였다. 사용된 epoxy는 코레텍스 FC273 주재와 경화제를 1:1로 혼합하여 사용하였다. 감쇠비 측정은 1차 측정과 같은 방법으로 인위적으로 케이블을 증폭시킨후 감쇠비를 측정하였다. 대상 케이블은 1차 때와 동일한 해남서측 1번부터 17번 까지 측정하였다.

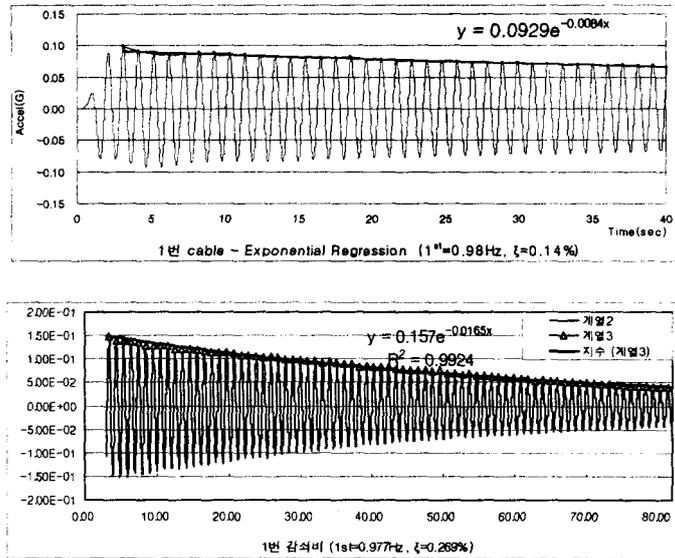
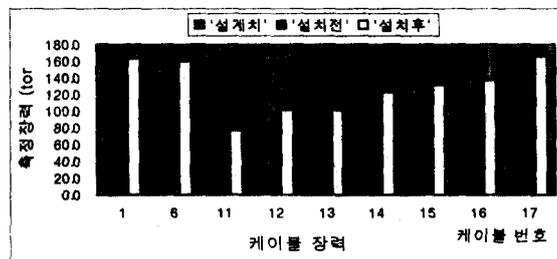


그림 9 댐퍼 설치 전후의 HW-1번 케이블의 감쇠비 비교

측정결과는 그림 9와 표 5에 제시되어 있다. 해남서측 1번 케이블은 해남측 교량진입부의 setback 케이블로서 대표적으로 그림 9에 댐퍼를 설치하기 전후의 감쇠비 계측결과가 나와 있다. 감쇠비 계측은 케이블을 가진하여 1st mode 에 대하여 진동을 유발한 후 진폭이 감소하는 것을 계측하여 시간의 경과에 따른 감쇠비를 측정하였다. 그림 9에서 1번 케이블의 경우 댐퍼 설치전에 1st mode에 대한 진동수와 감쇠비가 각각 0.98Hz, 0.14%에서 0.977Hz, 0.269% 로 측정되었다. 감쇠비의 경우 약 72% 증가하였으며, 진동수는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 해석에서 가정된 댐퍼가 없는 케이블의 감쇠비 값이 0.2%로 보았으나, 실제 케이블의 댐퍼 설치전 감쇠비는 약 0.1%로 나타났다. 따라서 댐퍼 설치후의 감쇠비는 표 4에 나타난 값에서 약 0.1% 정도 줄어든 감쇠비를 나타낼 것으로 판단된다.

5.2 측정 결과분석

표 5와 그림 10은 케이블 댐퍼 설치 전후의 장력과 진동수 및 감쇠비의 계측결과를 요약하여 나타내고 있다. 전반적으로 장력은 거의 변화가 없음을 알 수 있으며, 진동수의 경우 1-2% 정도 감소하였음을 알 수 있다. 이것은 이전에 설치되었던 고무패킹에 비하여 효과적으로 케이블을 지지하고 있음을 알 수 있다.



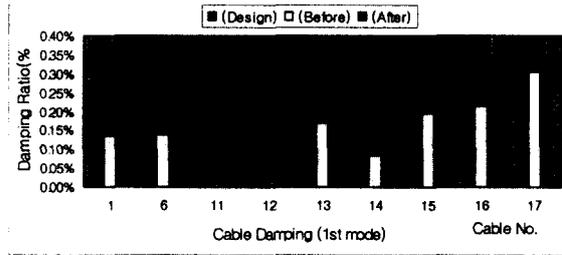


그림 10 케이블 댐퍼 설치 전후의 계측결과 비교

표 5 댐퍼 설치 전후의 장력, 진동수 및 감쇠비 비교

Cable No	길이(m)	장력			진동수(Hz)			감쇠비(%)	
		진동법측장력(ton)			1st Mode			1st Mode	
		설계치	설치전	설치후	설계치	설치전	설치후	설치전	설치후
1	102.74	144.44	168.07	163.43	0.908	0.977	0.977	0.136%	0.269%
6	97.12	144.44	-	159.40	-	-	1.013	0.140%	0.252%
11	82.81	77.06	76.48	76.91	1.063	1.050	1.070	-	0.234%
12	96.50	84.20	97.63	100.98	0.953	1.050	1.050	-	0.246%
13	110.90	92.97	103.32	101.69	0.772	0.830	0.840	0.171%	0.178%
14	125.30	103.87	123.70	122.62	0.722	0.806	0.780	0.085%	0.214%
15	141.51	114.78	131.66	131.76	0.672	0.732	0.730	0.194%	0.144%
16	157.53	131.41	136.62	136.43	0.624	0.684	0.671	0.213%	0.250%
17	174.28	151.68	168.28	165.61	0.549	0.586	0.600	0.304%	0.335%

위의 그림에서 보이듯이 케이블의 감쇠비는 당초에 예상되었던 감쇠 목표치에 상당히 근접해 있음을 알 수 있다. 그림 10에서 케이블 댐퍼를 설치하기 전(흰색)의 감쇠비와 설치후(파랑색)의 감쇠비를 비교하면 최대 50%까지 감쇠비가 증가하였음을 알 수 있다. 전체적으로 댐퍼가 설치되지 않은 bare cable의 감쇠비를 0.1%로 보았을 때 약 0.25%의 감쇠비 증가 효과가 있음을 알 수 있으며, 이것은 실내실험의 결과와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.[7]

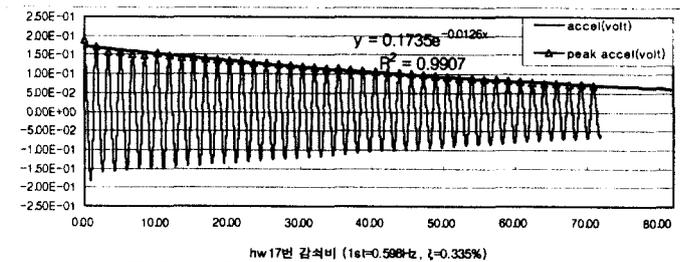


그림 11 17번 케이블의 1st mode 감쇠비

그림 11은 17번 케이블의 1st mode에 대한 감쇠비 측정결과를 보여주고 있다. 측정결과 약 0.335%의 감쇠비를 나타내어 예상대로 감쇠비가 증가하였음을 알 수 있었다.

5. 결 론

사장교 케이블의 진동감소를 위하여 고감쇠 고무를 이용한 댐퍼를 개발하였으며, 케이블 댐퍼시스템의 해석적 모델을 구성하고 실내검증 실험후 현장에서 설치후 검증실험을 수행하였다. 케이블댐퍼의 개발은 LRB 설계기술을 응용하여 고감쇠 고무재료만을 이용하여 약 10%대의 감쇠성능을 가진 댐퍼를 제작하였다. 케이블 댐퍼 시스템의 설계를 위한 해석적 모델의 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 0.35%까지 증가될 수 있음을 알 수 있다. 또한 모형 케이블을 이용한 실내실험에서 동일한 댐퍼를 이용하여 약 20% 감쇠성능이 개선됨을 확인할 수 있었으며 실내실험결과 약 20%의 감쇠성능 개선의 효과가 있음이 검증되었다.

댐퍼 설치후 수행된 현장실험 결과 1번 케이블의 경우 약 70%의 감쇠 개선효과가 있음을 알 수 있었으며, 댐퍼가 없는 bare cable의 감쇠비를 0.1%로 보았을 때 댐퍼 설치후 설계 목표치인 0.26-0.35%의 85%에 근접하는 결과는 보임으로써 전체적으로 감쇠비가 증가하였음을 최종 현장실험으로부터 확인할 수 있었다.

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 I -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*.
7. 서주원 외, (2001) 사장교 케이블 댐퍼 시스템 개발 및 검증실험연구, *한국지진공학회 춘계학술발표논문집*.