

세풍대교 케이블 진동저감을 위한 댐퍼 시스템

The Damping System for Mitigation of Cable Vibration in Sepung Bridge



황인호*



안중산**



윤자길***

* 대림산업 특수교량팀 과장
 ** 대림산업 광양시우회도로 현장 과장
 *** 대림산업 특수교량팀 부장

1. 서론

최근 들어 사장교는 구조적 효율성과 경제성 및 미적인 장점으로 인해 세계적으로 건설이 증가하며 장경간화가 급속히 진행되고 있다. 그러나 사장교 주요 부재인 케이블은 강성 및 자체 구조 감쇠비가 매우 작아서 바람 또는 비바람에 의해 쉽게 진동이 발생한다(Watson & Stafford 1988). 이러한 진동은 케이블의 수명을 단축시키고 접합부의 피로 파괴를 야기시킬 뿐만 아니라 교량의 사용성에도 막대한 영향을 미치므로 적절한 진동저감대책이 요구된다.

일반적으로 케이블의 진동제어는 크게 공기역학적인 방법, 고유진동수 변화에 의한 방법 그리고 감쇠비 증가에 의

한 방법이 있다. 이 중 댐퍼를 장착하여 케이블의 감쇠력을 증가시키는 방법은 가장 효과적인 진동저감법으로 그 동안 많은 연구(Kovacs 1982, Pacheco 등 1993, Krenk 2000, Main 등 2002) 및 실교량에 적용되어 왔다. 케이블 댐퍼를 적용한 대표적인 사장교는 서해대교를 비롯하여 제2진도대교, 인천대교 등이 있다.

세풍대교는 전라남도 광양시 광양읍 세풍리와 성황동을 연결하는 공사로 광양만권 개발에 따른 교통량 증가를 대비한 광양시 관내 국도대체 우회도로(세풍-중군) 건설공사에 속해 있으며, 총연장 875m(접속교 150m + 사장교 725m)로 2@220m의 중앙경간으로 구성되어 있으며, R=2,000m의 평면선형을 가진 곡선현 3주탑 콘크리트 사장교로 일부 케이

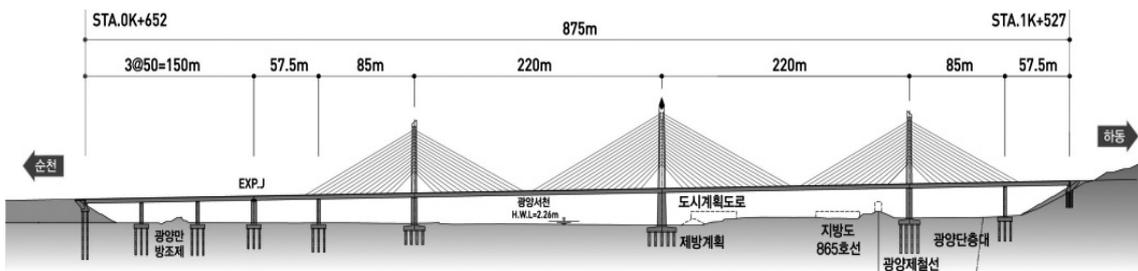


그림 1 세풍대교 일반도

블에 외부댐퍼(External Damper)를 설치할 예정이다.

2. 케이블 댐퍼 설치 계획

세풍대교는 총 90개(28+34+28)의 1면 케이블이 적용되었으며, 15.7mm 7연선 와이어를 48~61 가닥까지 사용한 Multi Strand Type으로 최단 25.1m에서 최장 130.6m로 구성



그림 2 세풍대교 케이블



그림 3 PE-sheath



그림 4 Compact Type 케이블 가설

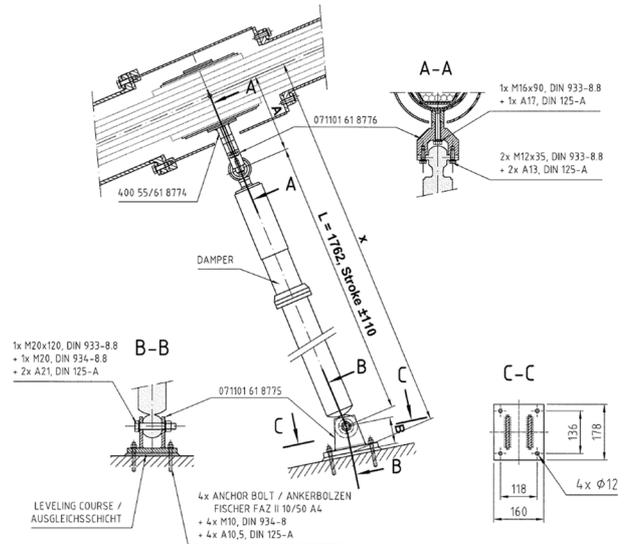


그림 5 외부댐퍼의 설계

되어 있다. 풍하중의 영향을 줄이고자 일반 케이블보다 외경이 작은 Compact Type이 적용되었으며, Double Helical Fillet 처리된 PE-sheath를 케이블 외부에 설치하였다.

일반적으로 케이블의 진동에 대한 위험성은 케이블 길이가 늘어남에 따라 증가한다. 경험에 의하면 70~80m이하의 짧은 케이블은 특별한 진동저감 대책이 필요없다. 그러나 80m이상의 긴 케이블에 대해서는 진동에 주의해야 하며, 일반적으로 케이블 감쇠비로 0.5%이상을 추천하고 있다(콘크리트 사장교 설계지침, 2008). 이에 세풍대교는 케이블 길이가 80m 이상인 30개에 대하여 외부댐퍼를 설치하여 감쇠력을 증진시킬 계획으로 설계, 제조 및 시공의 효율성과 비용의 절감을 위한 단일 규격의 오일댐퍼를 계획하였다.

3. 케이블 댐퍼 설계

댐퍼의 설계는 적절한 댐퍼의 용량과 감쇠계수를 결정하는 과정으로 케이블마다 각각 최적의 값을 결정할 수 있다. 그러나 세풍대교의 경우 경제적인 측면에서 대표적인 용량과 감쇠계수는 갖는 하나의 대표 댐퍼를 설계하고 이를 30개의 케이블에 적용할 예정이다. 케이블 댐퍼 설계를 위하여 댐퍼를 설치하기로 한 30개 케이블의 감쇠력을 비교하여야 하나 각각의 케이블은 기하학적 구조와 경계조건이 비교적 비슷한 관계로 30개의 케이블을 대표할 수 있는 4개의 케이블을 선정하였다(표 1).

- ① 1CR14: 평균길이 케이블 중 최소 장력 케이블
- ② 2CL17: 최대무게 케이블 중 strand 61의 최장길이 케이블

표 1 댐퍼설계를 위한 Input data

pylon No.	stay no.	no of strands	cable type	distance from bearing plate deck to			cable weight	cable force
				bearing plate pylon [m]	center of elastomeric bearing deck	damper connection [m]		
PY1	1CR14	61	DG-P61	109,012	3,761	7,506	84,1	4,938
PY2	2CL17	61	DG-P61	130,584	3,775	7,520	84,1	5,918
PY2	2CR11	55	DG-P55	89,883	3,542	7,287	75,4	5,850
PY3	3CR14	61	DG-P61	109,012	3,761	7,506	84,1	6,368

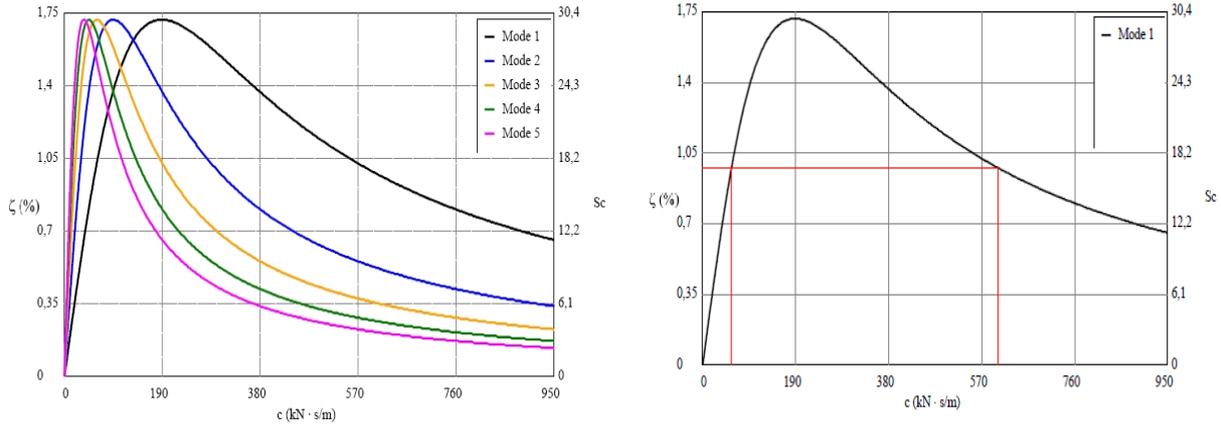


그림 6 감쇠계수에 따른 감쇠비 및 Scruton number (1CR14)

표 2. 1CR14 케이블 감쇠비 및 Scruton number

Mode	Optimal Damper Coefficients (kN · s/m)	Option 1 : c=58,94 kN · s/m		Option 2 : c=604,32 kN · s/m	
		Damping (%)	Scruton Number	Damping (%)	Scruton Number
1	188.74	0,98	16,99	0,98	16,99
2	94.37	1,54	26,83	0,52	9,1
3	62.91	1,71	29,8	0,35	6,15
4	47.18	1,68	29,14	0,27	4,63
5	37.75	1,56	27,12	0,21	3,72

- ③ 2CR11: 최소무게 케이블 중 strand 55의 최소길이 케이블
- ④ 3CR14: 평균길이 케이블 중 최대 장력 케이블

1CR14 케이블의 경우 저차(1~5차) 모드에서의 감쇠계수(c)에 따른 각 케이블의 감쇠비(ξ)와 Scruton number(S_c)은 그림 6과 같다. 1차 모드에서는 최적감쇠계수(c_{opt})가 약 $190kN/(m/s)$ 에서 나타나며, 이때 최대감쇠비(ξ_{max})가 약 1.7%를 보인다. 모드 차수가 증가함에 따라 최적감쇠계수(c_{opt})는 대략 절반씩 줄어든다. 각 모드에 대한 최적의 감쇠계수 및 조건에 따른 감쇠비 및 Scruton number는 표 2와 같다.

선형댐퍼에서는 모든 진동모드에 대해 최적의 감쇠계수를 만족할 수 없으므로 본 댐퍼설계에 있어서는 초기 5개 저차모드에 비교적 효과적인 $60kN/(m/s)$ 의 감쇠계수(c)를 선정하였다. 또한 FHWA report (2007)에 의하면 풍우진동 저감을 위한 표면처리를 한 케이블에 대해 최소 요구 Scruton number (S_c)를 5로 표면처리가 되지 않은 케이블은 10으로 제안하였다. 이에 본 댐퍼는 비록 풍우진동에 대해 표면처리가 되어 있는 케이블에 설치되지만 보수적인 측면에서 S_c 의 기준을 10으로 선정하였다.

2CL17, 2CR11, 3CR14에 대한 저차모드의 감쇠비 및 Scruton number는 다음과 같이 나타난다.

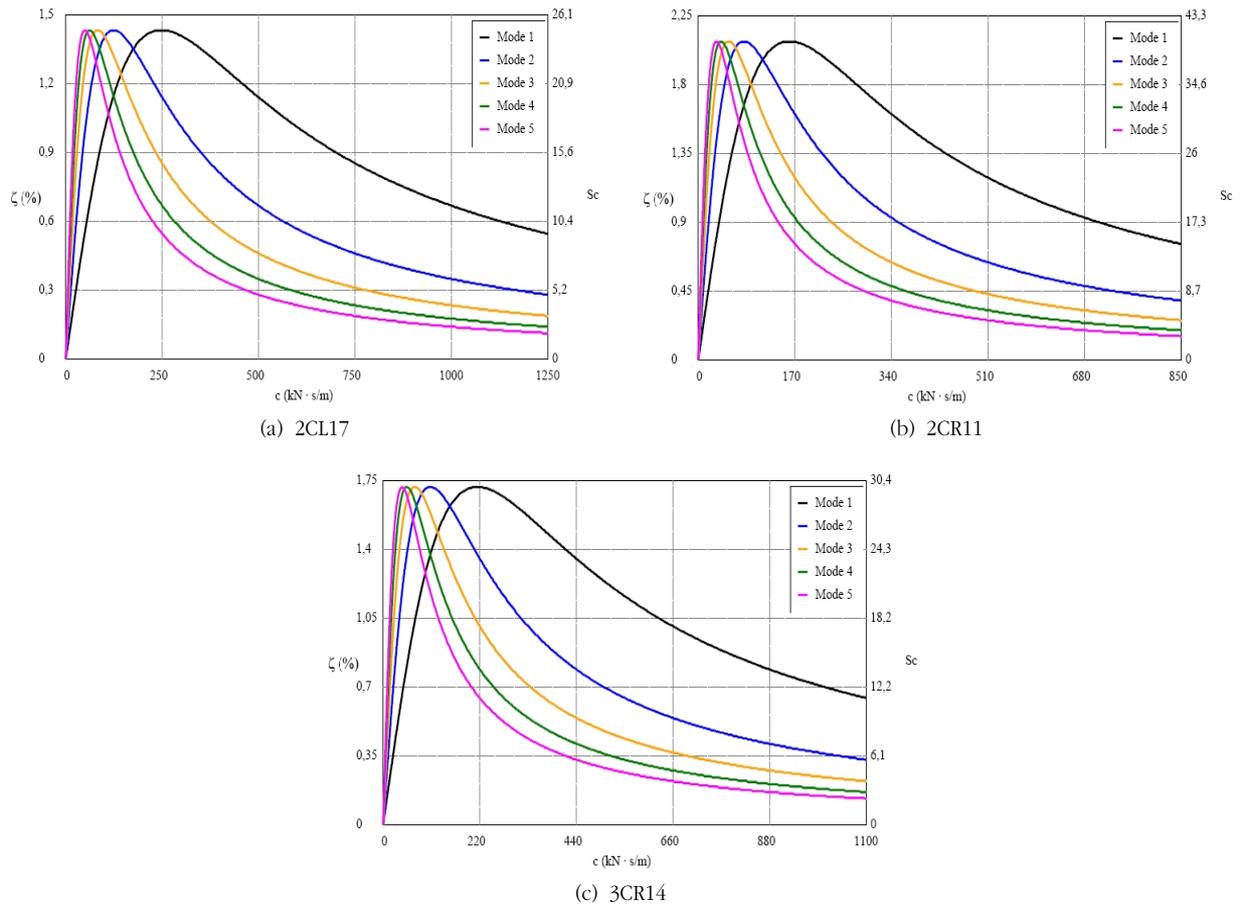


그림 7 감쇠계수에 따른 감쇠비 및 Scruton number

표 3 대표 케이블의 Input data

Cable	L [m]	x_c [m]	x_{kp} [m]	n	W_s [kg/m]	OD [m]	W_p [kg/m]	m [kg/m]	T [kN]
1CR14	109,012	7.51	3.76	61	79.30	0.200	4.8	84.10	4,938
2CL17	130,584	7.52	3.78	61	79.30	0.200	4.8	84.10	5,918
2CR11	89,883	7.29	3.54	55	71.50	0.180	3.9	75.40	5,850
3CR14	109,012	7.51	3.76	61	79.30	0.200	4.8	84.10	6,368

표 4 대표 케이블의 모드별 감쇠비

Cable	c [kN/(m/s)]	Mode 1			Mode 2			Mode 3		
		S_c	ξ [%]	δ [%]	S_c	ξ [%]	δ [%]	S_c	ξ [%]	δ [%]
1CR14	58.9	17.0	0.98	6.16	26.8	1.54	9.68	29.8	1.71	10.74
2CL17	58.8	11.2	0.64	4.02	19.3	1.11	6.97	23.6	1.36	8.55
2CR11	59.1	26.0	1.35	8.48	38.3	1.99	12.50	39.9	2.07	13.01
3CR14	59.1	15.3	0.88	5.53	25.3	1.45	9.11	29.3	1.69	10.62

with : logarithmic decrement $\delta = 2\pi\zeta$

4. 케이블 댐퍼 성능 검증

댐퍼의 성능 검증을 위한 4개의 대표 케이블의 input data

는 다음과 같다.

표 4에서와 같이 1차 모드에서 감쇠계수 $c = 59 \text{ kN}/(m/s)$ 일 때 Scruton number (S_c)는 2CL17에서 가장 작은 11.2를 보

표 5 댐퍼의 요구 용량과 stroke

Cable	x_c/L	D [m]	y_o [m]	A_o [m]	f_1 [Hz]	c_{design} [kN s/m]	A_d [mm]	v [m/s]	F kN	P_{50} N m/s
1CR14	0.069	0.200	0.008	0.064	1.1114	60	13.8	0.096	5.8	176
2CL17	0.058	0.200	0.018	0.077	1.0157	60	13.8	0.088	5.3	149
2CR11	0.081	0.180	0.003	0.053	1.5495	60	13.3	0.130	7.8	321
3CR14	0.069	0.200	0.010	0.064	1.2621	60	13.8	0.109	6.5	228

표 6 세풍대교 댐퍼 성능

Damping Characteristic 60 kN/(m/s)				
Frequency	Amplitude	Velocity	Compression	Expansion
1.0 Hz	±16	0.10 m/s	6,000±900N	6,000±900N
2.0 Hz	±16	0.20 m/s	12,000±1,800N	12,000±1,800N

표 7 세풍대교 댐퍼 일반도 및 세부명칭

number	name	number	name
1	Damper	6	Nor-lock washer
2	Ball Bearing Assembly	7	Mounting bracket
3	Ball Bearing Assembly WLB	8	Hexagon socket cap screw
4	Extension tube	9	Hexscrew
5	Hexagon screw		

이며 이때 대수감쇠비(δ)는 4%로 계산되며 나머지 모드에서는 보다 높은 값을 갖는다.

Vortex shedding에 의한 케이블 직경에 따른 최대 진폭비는 경험식에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{y_o}{D} = \frac{1.29}{(1 + 0.43(2\pi S_t^2 S_c^2))^{3.35}} \quad \text{with } S_t = 0.2 \quad (1)$$

식 (2)에서 계산된 최대진폭은 $A_0 = L/1700$ (fib Bulletin 30)에 의해 계산된 최대진폭보다 매우 작기 때문에 보수적인 측면에서 A_0 를 케이블의 최대진폭으로 선정하였다(콘크리트 사장교 설계지침, 2008 : $A_0 = L/1600$).

각 모드에서의 진동수는 케이블 장력(T), 길이(L) 및 단위질량(m)에 의해 다음 식으로부터 구해진다.

$$f_n = n \frac{\sqrt{T/m}}{2L} \quad \text{with } n = 1 \text{ for the first mode} \quad (2)$$

대표케이블에 대한 요구되는 댐퍼의 용량 및 stroke 계산 결과 값은 표 5와 같다. 여기서 x_c/L 는 케이블 길이에 따른 댐퍼의 설치 위치를 나타내며 D 는 케이블 지름, y_o 는 케이블의 최대 진동 진폭, A_0 는 케이블 중앙에서의 최대 진폭, f_1 은 1차 모드의 진동수, A_d 는 댐퍼의 stroke, v 는 1차 모드에서의 최대 속도, F 는 최대 감쇠력, 그리고 P 는 최대진폭을 50%에서 힘의 소산을 나타낸다.

댐퍼설계에 사용된 감쇠계수($c = 60 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})$)에 대한 최대 댐퍼 용량은 7.8 kN 이며, 이때의 1차모드 진동수(f_1)는 1.55 Hz , 최대진폭(A_0)는 0.053 m 로 계산되었다. 이에 따라 본 세풍대교 케이블 진동 저감을 위한 댐퍼의 최대 용

량은 $12kN$ 로 선정하였다.

5. 결 론

세풍대교의 케이블 길이가 80m 이상인 30개의 케이블에 대하여 외부댐퍼를 설치할 계획이며, 댐퍼의 감쇠계수(C)는 $60KN/m/s$ 로 설계되었다. 케이블의 감쇠비(ξ)는 0.64%으로 0.5%이상(콘크리트 사장교 설계지침, 2008) 되도록 설계되었으며, Scruton number (S_c)는 풍우진동 저감을 위한 표면처리가 되었을 경우 5이상만 확보하면 되나 10 이상을 확보하도록 설계되었다. 최대진폭은 국내 콘크리트 사장교 설계지침에서 추천하는 $1/1600$ 보다 엄격한 $1/1700$ 을 적용하였고, 댐퍼의 최대 용량 $12KN$, 최대변위 $\pm 16mm$ 로 계산된 용량 $7.8KN$, 변위 $13.3mm$ 이상을 확보하였다.

참고문헌

1. Kovacs, I. (1982) Zur Frage der Seilschwingungen und der Seil-dämpfung. Die Bautechnik, 10, pp.325-332, (in German).
2. Krenk, S. (2000) Vibrations of a Taut Cable with an External

- Damper. J. Applied Mech., ASME, 67, pp.772-776.
3. Main, J. A. and Jones. N. P. (2002) Free Vibrations of Taut Cable with Attached Damper. I: Linear Viscous Damper. J. Eng. Mech., Vol. 128, No. 10, pp.1062-1071.
4. Pacheco, B. M., Fujino, Y., and Sulekh, A. (1993) Estimation Curve for Modal Damping in Stay Cables with Viscous Damper. J. Struct. Eng., ASCE, Vol. 119, No. 6, pp.1961-1979.
5. Uno, K., Kitagawa, S., Tsutsumi, H., Inoue, A., and Nakaya, S. (1991) A Simple Method of Designing Cable Vibration Dampers of Cable-Stayed Bridge. J. Struct. Engrg., JSCE, Tokyo, Japan, 37A, 789-798.
6. Watson, S. C. and Stafford, D. (1988) Cables in Trouble. Civil Eng., ASCE, Vol. 58, No. 4, pp.38-41.
7. Yoneda, M., and Maeda, K. (1989) A Study on Practical Estimation Method for Structural Damping of Stay Cable with Damper. Proc., Canada-Japan Workshop on Bridge Aerodynamics, Ottawa, Canada, 119-128. 

[담당 : 황인호 편집위원]