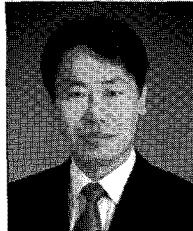
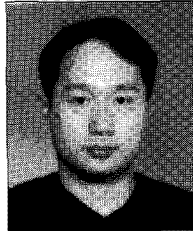


사장교 케이블 진동 저감을 위한 댐퍼 시스템에 대한 소개 - 세풍대교 적용

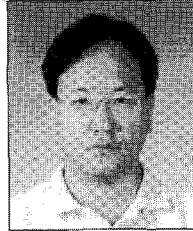
Introduction to the Damper System for Mitigation of Cable Vibration in Cable-Stayed Bridges - Application in Sepung Bridge



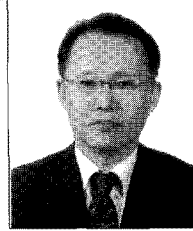
황인호*



안중산*



이경재**



김재홍**

* 대림산업(주) 특수교량팀 과장
** 대림산업(주) 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 진동저감 대책이 요구된다.

일반적으로 케이블의 진동제어는 크게 공기역학적인 방법, 고유진동수 변화에 의한 방법 그리고 감쇠비 증가에 의한 방법이 있다. 이 중 댐퍼를 장착하여 케이블의 감쇠력을 증가시키는 방법은 가장 효과적인 진동저감법으로 그 동안 많은 연구가 진행되어 왔다. 대표적으로 Kovacs(1982)에 의해 수동댐퍼를 부착한 케이블의 최대 감쇠율과 최적의 감쇠계수를 결정하는 근사해가 개발되었으며, Pacheco 등(1993)은 무차원 변수를 사용하여 댐퍼의 위치에 따른 최적의 감쇠계수를 산정할 수 있는 설계곡선을 제안하였다. Krenk(2000)는 평행한 케이블에서 댐퍼의 위치에 따른 저차 모드에서의 감쇠율을 계산할 수 있는 정확해를 개발하였으며, Main 등(2002)은 점성댐퍼가 부착된 케이블의 복소

고유치 문제를 해석적으로 체계화하였다.

그러나 현장 엔지니어가 이러한 이론적인 접근을 통하여 사장교 케이블의 최적의 댐퍼를 설계하거나, 설계된 댐퍼에 의한 감쇠비를 계산하여 진동저감량을 산정하기란 쉽지 않다. 이에 본 기술기사에서 현장 엔지니어가 쉽게 접근할 수 있는 Pacheco의 설계곡선을 이용한 최적의 감쇠계수 산정 방법을 소개하였다. 또한 현재 진행 중인 세풍대교 케이블의 댐퍼 설계 예를 통하여 현장 적용 방법을 설명하고자 한다.

2. 댐퍼에 의한 감쇠력

일반적으로 케이블의 운동방정식은 식 (1)과 같으며, 편미분방정식을 다양한 방법에 의해 풀어 케이블의 변위(v)를 구할 수 있다.

$$T \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + c \frac{\partial v}{\partial t} \delta(x - x_c) \quad (1)$$

그러나 현장 엔지니어가 편미분방정식을 풀어 해를 구하기란 쉽지 않다. 이에 1993년 Pacheco는 무차원 변수를 사용하여 댐퍼의 위치에 따른 최적의 감쇠계수와 감쇠비를 산정할 수 있는 설계곡선을 제안하였다(그림 1).

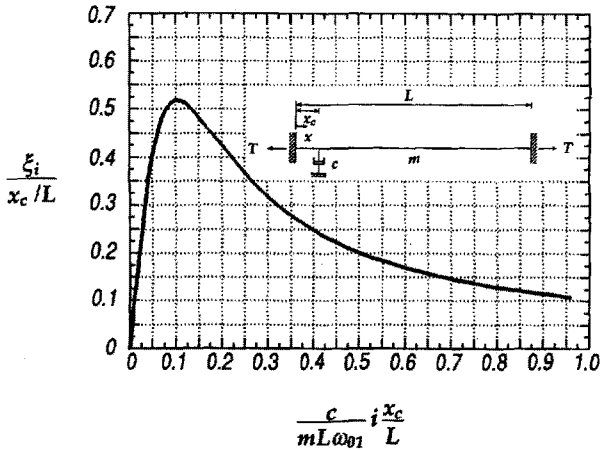


그림 1 무차원 변수를 사용한 케이블 댐퍼 설계곡선 (Pacheco 등, 1993)

그림 1과 같이 케이블은 새그(Sag)가 없는 팽팽한 케이블로 가정하며, 사장교가 설계되면 케이블의 길이(L), 초기장력(T), 단위질량(m)이 결정되고 댐퍼를 설치할 수 있는 위치(x_c)가 결정이 된다. 이러한 케이블 상수가 결정되면, 설계곡선의 가로축은 댐퍼의 감쇠계수(c)만을 변수로 가지는 무차원 항이 되며, 여기서 i번째 고유진동수(ω_{0i})는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\omega_{0i} = \frac{\pi i}{L} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad i = \text{케이블의 모드 차수} \quad (2)$$

세로축은 댐퍼의 위치(x_c/L)를 상수로, 감쇠력(ξ_i)을 변수로 하는 무차원 항으로 구성된다. 설계곡선에 알 수 있듯이 최대 감쇠비(ξ_{i,max})는 0.52x_c/L로 댐퍼의 위치가 케이블 단부(x_c/L=0)에 있을때 최소값(0=0.52×0)을 가지며, 중앙(x_c/L=0.5)에 있을때 최대값(0.26=0.52×0.5)을 갖는다. 그러나 케이블 중앙에 댐퍼를 위치시킬 수 없으며, 예를 들어 x_c/L=0.01, 0.02를 가질때 최대 부가감쇠력(ξ_{i,max})은 0.005(0.5%), 0.01(1.0%)을 가지게 된다. 또한 최대 감쇠력을 갖기 위한 최적의 감쇠계수(c_{opt,i})는 가로축 항이 0.1을 가질때 결정됨을 알 수 있다.

Pacheco의 설계곡선에 의해 구해진 최적의 감쇠계수와

최대 감쇠비는 다른 연구결과에 비교를 통하여 비슷한 결과를 보이고 있다(표 1).

설계곡선에 의해 감쇠비와 최적의 감쇠계수를 결정하는 과정을 정리하면 다음과 같다.

- ① 사장교 케이블이 설계되면 케이블에 관련된 계수들이 결정 됨.
- ② 교량의 구조적, 미학적 고려에 의해 댐퍼를 장착할 수 있는 위치가 결정(댐퍼의 위치는 앵커리지에서 최대한 멀리, 즉 케이블 중앙부로 가까이 갈수록 감쇠력 증가).
- ③ 댐퍼의 설치 위치가 결정이 되면, 설계곡선의 세로축에 의해 최대 감쇠력이 결정.
- ④ 세로축에서 결정된 감쇠력을 발생시키기 위한 최적의 감쇠계수를 가로축에서 산정.

3. 세풍대교 적용

3.1 일반사항

세풍대교는 전라남도 광양시 광양읍 세풍리와 성황동을 연결하는 공사로 광양만권 개발에 따른 교통량 증가를 대비한 광양시 관내 국도대체 우회도로(세풍-중군) 건설공사에 속해 있으며, 2012년 완공예정으로 2011년 5월 현재 42%의 공사가 진행 중이다. 세풍대교는 총연장 875m(접속교 150m + 사장교 725m)로 2@220m의 중앙경간으로 구성되어 있으며, R=2,000m의 평면선형을 가진 곡선형 3주탑 콘크리트 사장교이다(그림 2와 3).

3.2 케이블 댐퍼 설계

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 구성되어 있다. 풍하중의 영향을 줄이고자 일반 케이블보다 외경이 작은 Compact Type이 적용되었으며, Double Helical

표 1 최적 감쇠계수와 최대 감쇠비 비교

연구자	최적의 감쇠계수 c _{opt,i}	최대 감쇠비 ξ _{i,max}
Pacheco et al. (1993)	0.10mLω ₀₁ ⁱ / (ix _c /L)	0.52x _c /L
Kovacs (19982)	1/2π(mLω ₀₁ ⁱ) / (ix _c /L)	1/2x _c /L
Yoneda & Maeda (1989)	6.25/2π(mLω ₀₁ ⁱ x _c /L) / [sin ² (πix _c /L)]	(6.25/2π)x _c /L[0.45 + (x _c /L)]
Uno et al. (1991)	6.25/(2π)(mLω ₀₁ ⁱ x _c /L) / [isin ² (πx _c /L)]	(3.3/2π)(x _c /L)



그림 2 세풍대교 전경

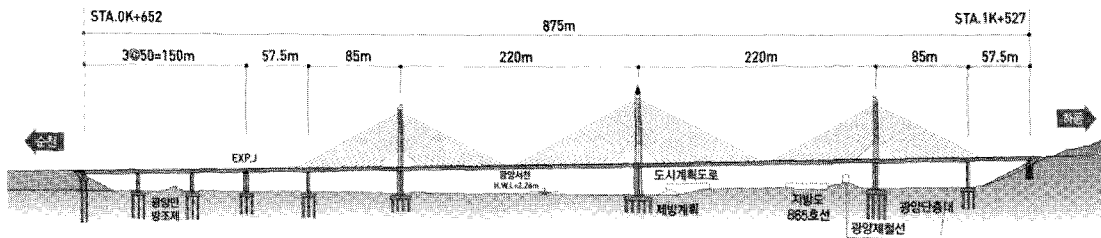


그림 3 세풍대교 일반도

Fillet 처리된 PE-sheath를 케이블 외부에 설치하였다.

일반적으로 케이블의 진동에 대한 위협성은 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 30개(표 2)에 대하여 외부댐퍼(External Damper)를 설치하여 감쇠력을 증진시킬 계획으로 설계, 제조 및 시공의 효율성과 비용의 절감을 위한 단일 규격의 오일댐퍼를 제안하였다.

제안된 댐퍼의 진동저감 성능을 평가하기 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.

- ① 1CR14: 평균길이 케이블 중 최소 장력 케이블
- ② 2CL17: 최대무게 케이블 중 strand 61의 최장길이 케이블
- ③ 2CR11: 최소무게 케이블 중 strand 55의 최소길이 케이블
- ④ 3CR14: 평균길이 케이블 중 최대 장력 케이블

본 기술기사에서 30개의 케이블을 대표하는 위의 4개 케이블에 대한 진동저감 성능평가를 바탕으로 최적의 댐퍼를 설계하였으며, 선정기준은 댐퍼에 의한 감쇠력에 영향을 많이 미치는 인자인 케이블의 길이와 장력이다. 이에 의해 결정된 댐퍼는 30개 모든 케이블에 적용하여 진동저감 성능을 평가하여야 하나 본 기사에서는 이를 생략한다.

3.3 세부 댐퍼 설계

그림 4는 탄성베어링과 오일댐퍼가 설치된 케이블의 시스템 구성이다. 여기서 L, m, T 는 각각 케이블 길이, 단위 질량, 장력이며 k_p, c 는 각각 탄성베어링의 탄성계수와 댐퍼의 감쇠계수이며, x_k, x_c 는 각각 단부에서부터 탄성베어링과 댐퍼의 위치이다.

저차(1~5차) 모드에서의 감쇠계수(c)에 따른 각 케이블의 감쇠비(ξ)와 Scruton number(S_c)은 그림 5와 같이 계산된다. 그림 5(a)에서와 같이 1CR14의 1차 모드에서는 최적 감쇠계수(c_{opt})가 $190kN/(m/s)$ 에서 나타나며, 이 때 최대감쇠비(ξ_{max})가 약 1.7%를 보인다. 모드 차수가 증가함에 따라 최적감쇠계수(c_{opt})는 대략 절반씩 줄어든다.

표 2 댐퍼설계를 위한 Input data

pylon No.	stay no.	no of	cable	distance from bearing plate deck to			cable	cable
		strands	type	bearing plate pylon	center of elastomeric bearing deck	damper connection	weight	force
				[m]		[m]	[kg/m]	[kN]
PY1	1CL14	61	DG-P61	110.427	3.783	7.528	84.1	6.318
	1CL13	61	DG-P61	103.912	3.767	7.512	84.1	6.307
	1CL12	61	DG-P61	97.632	3.848	7.593	84.1	5.943
	1CL11	61	DG-P61	90.795	3.630	7.375	84.1	5.944
	1CR11	61	DG-P61	89.564	3.608	7.353	84.1	5.255
	1CR12	61	DG-P61	96.045	3.727	7.472	84.1	5.172
	1CR13	61	DG-P61	102.529	3.745	7.490	84.1	5.098
	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
	2CL16	61	DG-P61	124.011	3.762	7.507	84.1	5.983
	2CL15	61	DG-P61	117.437	3.747	7.492	84.1	6.121
	2CL14	55	DG-P55	110.857	3.622	7.367	75.4	5.940
	2CL13	55	DG-P55	104.290	3.609	7.354	75.4	5.964
	2CL12	55	DG-P55	97.716	3.585	7.330	75.4	5.881
	2CL11	55	DG-P55	91.148	3.563	7.308	75.4	5.908
	2CR11	55	DG-P55	89.883	3.542	7.287	75.4	5.850
	2CR12	55	DG-P55	96.372	3.563	7.308	75.4	5.795
	2CR13	55	DG-P55	102.865	3.583	7.328	75.4	5.719
	2CR14	55	DG-P55	109.359	3.600	7.345	75.4	5.623
	2CR15	61	DG-P61	115.863	3.626	7.371	84.1	5.809
	2CR16	61	DG-P61	122.358	3.740	7.485	84.1	5.685
	2CR17	61	DG-P61	128.855	3.753	7.498	84.1	5.529
PY3	3CL14	61	DG-P61	110.472	3.783	7.528	84.1	5.103
	3CL13	61	DG-P61	103.913	3.767	7.512	84.1	5.273
	3CL12	61	DG-P61	97.353	3.749	7.494	84.1	5.361
	3CL11	61	DG-P61	90.796	3.630	7.375	84.1	5.443
	3CR11	61	DG-P61	89.565	3.608	7.353	84.1	5.891
	3CR12	61	DG-P61	96.347	3.849	7.594	84.1	6.237
	3CR13	61	DG-P61	102.529	3.745	7.490	84.1	6.342
	3CR14	61	DG-P61	109.012	3.761	7.506	84.1	6.368

Strand : 279kN 1.3kg/m
 Sheathing : Type DG-P 55: 180×6.9 3.9kg/m
 Type DG-P 61: 200×7.7 4.8kg/m

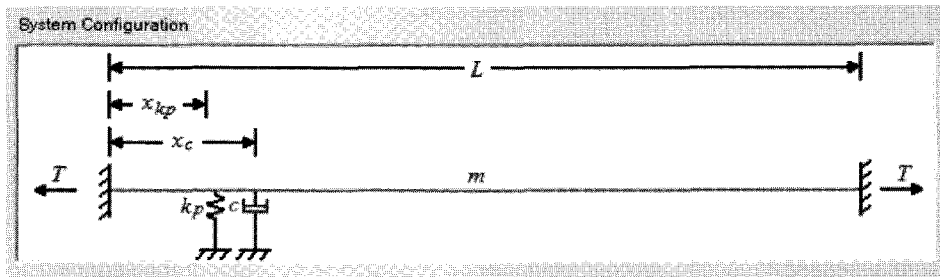


그림 4 댐퍼설계를 위한 시스템 구성

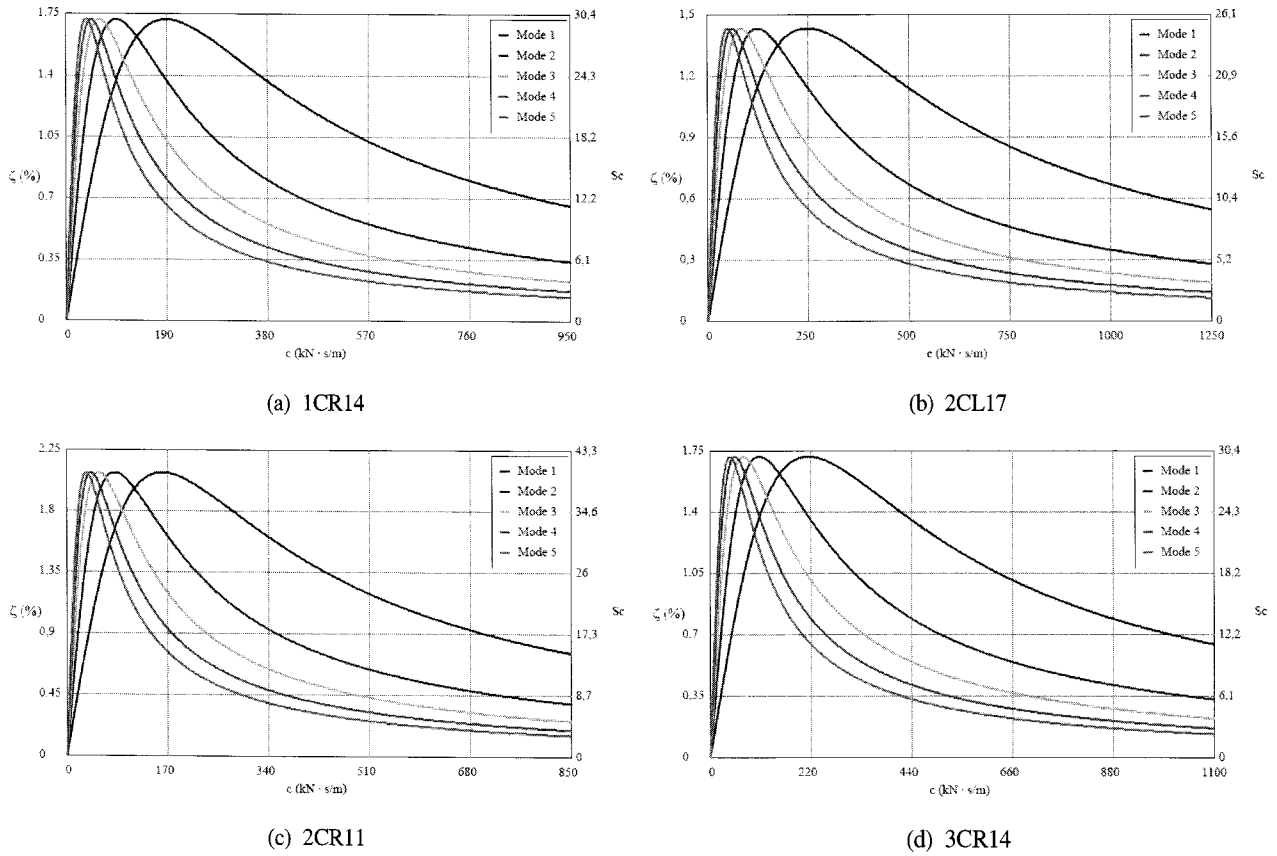


그림 5 감쇠계수에 따른 감쇠비 및 Scruton number

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

선형댐퍼에서는 모든 진동모드에 대해 최적의 감쇠계수를 만족할 수 없으므로 본 댐퍼설계에 있어서는 초기 5개 저차모드에 비교적 효과적인 $60\text{kN}/(\text{m}/\text{s})$ 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.

댐퍼의 성능 검증을 위한 4개의 대표 케이블의 input data는 표 3과 같다.

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

보이며, 이 때 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.

$$\frac{y_o}{D} = \frac{1.29}{(1 + 0.43(2\pi S_t^2 S_c))^{3.35}} \quad \text{with } S_t = 0.2 \quad (3)$$

식 (3)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 사상교 설계지침, 2008 : $A_0 = L/1600$)

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

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 $\delta = 2\pi\zeta$

표 5 댐퍼의 요구 용량과 stroke

Cable	x_c/L	D	y_0	A_0	f_1	c_{design}	A_d	v	F	P_{50}
		[m]	[m]	[m]	[Hz]	[kN s/m]	[mm]	[m/s]	kN	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

with :
 D = cable diameter
 $A_0 = L/1700$ maximum stay cable amplitude according to fib Bullentin 30
 c = Damper coefficient
 $A_d = A_0 \times \sin(x_c/L \times \pi)$ +/- dynamic stroke of damper
 $v = A_d \times f_1 \times 2\pi$ maximum velocity in first mode
 $F = c \times v$ maximum damper force
 $P = v \times F/\pi$ power dissipation at 50% maximum amplitude

$$f_n = n \frac{\sqrt{T/m}}{2L} \quad \text{with } n = 1 \text{ for the first mode} \quad (4)$$

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 D는 케이블 지름, y_0 는 케이블의 최대 진동 진폭, A_0 는 케이블 중앙에서의 최대 진폭, f_1 는 1차 모드의 진동수, A_d 는 댐퍼의 stroke, v는 1차 모드에서의 최대 속도, F는 최대 감쇠력, 그리고 P는 최대진폭을 50%에서 힘의 소산을 나타낸다.

댐퍼설계에 사용된 감쇠계수($c = 60 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})$)에 대한 최대 댐퍼 용량은 7.8kN이며, 이때의 1차모드 진동수(f_1)는 1.55 Hz, 최대진폭(A_0)는 0.053m로 계산되었다. 이에 따라 본 세풍대교 케이블 진동 저감을 위한 댐퍼의 최대 용량은 12kN로 선정하였다.

이를 통하여 결정된 사항은 다음과 같다.

- ① Damper의 감쇠계수(C)는 60kN/m/s로 설계되었다.
- ② 케이블의 감쇠비(ξ)는 0.64%으로 0.5%이상(콘크리트 사장교 설계지침, 2008)되도록 설계되었다.
- ③ Scruton number (S_c)는 풍우진동 저감을 위한 표면치리가 되었을 경우 5이상만 확보하면 되나 10이상을


확보하도록 설계되었다.

- ④ 최대진폭은 국내 콘크리트 사장교 설계지침에서 추천하는 1/1600보다 엄격한 1/1700을 적용하여 설계되었다.
- ⑤ Damper의 최대 용량 12kN, 최대변위 ±16mm로 계산된 용량 7.8kN, 변위 13.3mm 이상을 확보하였다.
- ⑥ Damper의 설계는 케이블의 진동 제어를 위하여 적절한 절차를 통하여 적절히 설계된 것으로 판단된다

4. 결 론

사장교 케이블의 진동저감을 위한 방법 중 댐퍼에 의한 감쇠비 증가법에 대해 논하였다. 일반적인 편미분방정식을 풀어 변위를 계산하고 이를 통하여 감쇠비를 구하고 있으나 현장 엔지니어에게는 쉽지 않은 방법이다. 이에 본 기술 기사에서는 Pacheco 등(1993)에 의해 제안된 무차원 설계곡선을 소개하였으며, 무차원 설계곡선을 통해 최적의 감쇠계수와 최대 감쇠비를 구하는 방법을 설명하였다. 또한 실 교량 사례인 세풍대교의 댐퍼 설계 사항을 추가하여 실질적인 현장 기술이 되도록 노력하였다. 세풍대교 댐퍼 설계를 통하여 감쇠계수는 60kN/(m/s)로 결정하였으며, 이는 케이블 요구 사항은 모두 만족함을 보였다.

참 고 문 헌

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 : 강형택, 편집위원]