

댐퍼가 부착된 사장교의 케이블 장력에 관한연구

A Study on Tension for Cables of a Cable-stayed Bridge Damper is Attached

박연수¹⁾ · 최선민²⁾ · 양원열³⁾ · 홍혜진⁴⁾ · 김운형⁵⁾
Park, Yeon Soo Choi, Sun Min Yang, Won Yeol Hong, Hye Jin Kim, Woon Hyung

요약 : 국가경제력 향상과 함께 바다와 섬에 대한 관심이 높아지면서 육지와 섬, 섬과 섬을 연결하는 해상 장대교량이 많이 건설되고 있다. 장대교량은 현수교, 사장교, 아치교, 트러스교 등으로 대변할 수 있는데 그 중에서도 사장교는 주탑(Pylon)과 케이블(Cable), 보강형(Stiffened Girder)이 조화를 이루면서 외관이 아름다워 매력적인 교량형식의 하나로 최근 많이 계획되고 있다. 장력측정은 케이블에 설치한 가속도 센서로부터 케이블의 고유진동수 변화를 이용하는 간접법인 진동법을 적용하였다. 본 연구에서는 댐퍼 설치 케이블의 유효길이 산정식을 제안하였는데 이는 케이블의 유효길이 변화를 실측치와 해석값을 비교하여 분석한 것으로 기존의 유효길이 산정방법인 댐퍼와 정착단간의 순간격에 의한 것은 최종 케이블 장력값 추정에 있어서 신뢰도가 떨어짐을 확인할 수 있었다. 그러므로 향후 유지관리 단계에서는 본 연구에서 제안한 케이블의 유효길이 산정식을 활용하여 장력을 정확하게 파악하는 것이 케이블의 재긴장 및 교체시기 결정 등에도 합리적인 의사결정 자료로 사용될 수 있을 것이다.

BSRACT : Recently, many ocean bridges that connect land to island or island to island have been constructed along with the improvement of the nation's economy. Long-span bridges can be categorized as suspension bridge, cable-stayed bridge, arch bridge and truss bridge. In this study, correction with respect to construction error can be presented on site through the monitoring of the cable tension change of real structure for four major construction stages so that construction accuracy, including the management of profiles, can be improved. A vibration method, the so-called indirect method that uses the cable's natural frequency changes from the acceleration sensor installed on the cable, is applied in measuring cable tension. In this study, the estimation formula for the effective length of cable with damper is presented by comparing and analyzing between actual measurement and analysis result for the change of the cable's effective length. By the way, it is known that the reliability of estimating cable tension by applying the former method that uses the net distance from damper to anchorage is low. Therefore, for future reference of the maintenance stage, the presented formula for estimating the effective length of cable can be used as a reference for the rational decision-making, such as the re-tensioning and replacement of cable.

핵심용어 : 진동법, 케이블의 유효길이, 댐퍼, 고유진동수, 장력측정, 사장교

KEYWORD : A vibration method, effective length of cable, damper, frequency, measure of cable tension, Cable-Stayed Bridge

1. 서론

최근 장대교량은 많은 교통량을 수송한다는 측면에서 중요한 사회간접자본 중 하나이다. 특히 주탑으로 펼쳐지는 케이블의 외관이 돋보여 매력적인 교량형식으로 꼽히는 사장교에 대해 관심이 많아지고 있다.

케이블의 장력을 측정하는 방법으로는 케이블 하중계를 이용

하여 측정하는 직접법과 가속도계를 이용하여 케이블의 고유진동수를 추정 장력을 측정하는 간접법이 있다. 일반적으로 간편하게 고유진동수를 이용하는 진동법이 많이 쓰인다. 한편 사장교의 주요 부재인 사장교 케이블은 유연성이 크고 자체 구조 감쇠비가 매우 낮아서 다양한 형태의 진동에 노출되고 이로 인한 유해 진동 사례가 보고되면서 최근에는 케이블 장력 변화 측정의 중요성과 더불어 케이블 자체의 진동의 감쇠력을 높이

1) 정회원, 전남대학교 토목공학과 정교수(parkys@chonnam.ac.kr)
2) 교신저자, 전남대학교 토목공학과 박사과정
(Tel.062-530-1658, Fax. 062-530-1659, E-mail: csm6700@hanmail.net)
3) 학생회원, 전남대학교 토목공학과 박사과정(goldfun@mocet.go.kr)
4) 학생회원, 전남대학교 토목공학과 박사과정(kiki9298@lycos.co.kr)
5) 정회원, 전남도청 (gwh1101@naver.com)

본 논문에 대한 토의를 2009년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

기 위한 방법도 여러 가지로 연구되어 지고 있다(안상섭 2002).

케이블의 진동에 대한 가장 효과적인 대책 중 하나인 케이블 댐퍼에 관한 대부분의 연구는 댐퍼 설치에 따른 케이블의 동적 특성 해석에 주안점을 두고 있으며, 이들의 해석방법은 매우 어렵고 복잡하다. 따라서 댐퍼의 설치 이후에도 진동법을 적용하여 케이블의 장력을 추정하기 위해서는 댐퍼 설치 전·후 케이블 유효길이 변화 효과에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 케이블 댐퍼의 설치 전·후 발생하는 사장교 케이블의 유효길이 변화 효과를 실험적인 값과 이론적인 값을 정량화하여 비교함으로써 댐퍼가 설치되어 공용중인 사장 케이블의 장력 측정시 효과적인 케이블 유효길이 산정방식을 제시하고자 한다.

2. 장력산출

2.1 진동방정식에 의한 케이블 장력추정

케이블의 장력은 케이블이 인장됨에 따라 고유진동수가 변화하는 특성을 이용하여 평가할 수 있다. 케이블의 휨강성(EI)은 실제로 케이블의 길이, 장력 또는 휨에 의하여 변화된다고 판단되나, 장력측정이 주목적이므로 전 길이에 걸쳐 항상 일정하다고 가정한다. 케이블의 진동방정식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{w}{g} \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 z}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

여기서, z : 보의 처짐량, x : 보의 길이방향 좌표

w : 케이블의 단위중량, g : 중력가속도

식(1)에 양단 힌지의 경계조건을 이용하여 미분방정식의 해를 구하면 식(2)와 같다.

$$T = \frac{4wL_{eff}^2}{g} \left(\frac{f_n}{n}\right)^2 - \frac{EI\pi^2}{L_{eff}^2} n^2 \quad (2)$$

여기서, T : 케이블장력, L_{eff} : 케이블유효길이

F_n : 고유진동수, n : 진동차수 ($n = 2L_{eff}N_k / \sqrt{T/w}$)

N_k : 케이블n차 모드 고유진동수

또한, 식(2)를 최소자승법을 이용 일차 회귀항으로 표현하면 식(3)과 같다.

$$\left(\frac{f_n}{n}\right)^2 = \frac{Tg}{4wL_{eff}^2} + \frac{EI\pi^2g}{4wL_{eff}^4} n^2 = b + an^2 \quad (3)$$

여기서, $T = \frac{4wL_{eff}^2}{g} \times b$, $EI = \frac{4wL_{eff}^2}{\pi^2g} \times a$

따라서, 1차 회귀식으로부터 매개변수 a(기울기)와 b(y절편)를 구하면, 케이블의 장력과 휨강성을 그림 1과 같이 산정할 수 있다.

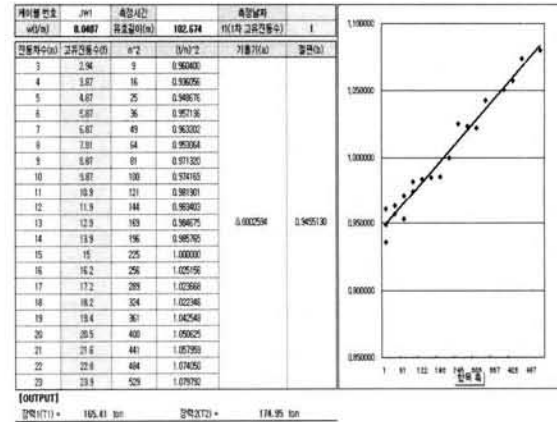


그림 1. 차수별 고유진동수를 이용한 장력산정 예

2.2 댐퍼설치 후의 유효길이 산정

댐퍼 설치 후의 유효길이 산정에 있어 기존의 사용되어온 방법은 댐퍼 설치 전의 유효길이를 그대로 도입하거나 단지 댐퍼로 인해 실제 줄어든 케이블의 길이를 적용하였다. 이러한 기존 방법들에 대한 문제점은 실제 장력의 변화가 거의 없음에도 불구하고 단지 케이블 댐퍼로 인해 변화되어진 고유진동수를 진동방정식에 적용시킴으로서 댐퍼 설치 전의 장력과 댐퍼 설치 후의 장력의 차이를 만들어 내게 된다. 그로 인해 구조물의 완공 후에 지속적으로 측정되어질 케이블의 장력값들도 구조물과 케이블의 변동을 미리 예측할 목적이지만 불확실한 유효길 이로 인해 절대값을 가질 수가 없으므로 정밀하지 못한 예측이 될 수도 있다.

댐퍼 설치 후의 장력 측정에 있어서 장력의 변화 없이도 댐퍼가 강제적으로 고유진동수를 변화시키므로 진동수와 유효길이 두 가지가 중요한 변수로 작용하는 진동방정식을 이용하기에는 다소 무리가 따른다. 그리하여 유효길이를 역으로 추정하기 위해 식 (4)를 이용하여 유효길이를 미지수로 변환하여 정리하면 다음과 같다.

$$L_{eff} = \sqrt{\frac{T_{bt}g}{4wb}} \quad (4)$$

여기서, T_{bt} : 댐퍼 설치 직전의 진동법을 이용한 장력값

본 연구에서는 댐퍼설치 전의 장력을 진동법으로 산정하고, 댐퍼에 의한 동적 장력을 무시하는 조건으로 댐퍼 설치 전과 후에는 장력의 변화가 없다고 가정하였다. 따라서, 댐퍼에 의해 변화된 고유진동수를 진동방정식에 적용하고 식 (4)에 댐퍼 설치 전의 장력값을 대입하여 댐퍼 설치 후의 유효길이를 재산정 할 수가 있다.

3. 시공단계별 케이블 장력측정

3.1 대상교량 개요

해남과 진도를 연결하는 제2진도대교는 1등교로 설계되었으며, 구조형식은 그림 2에 나타난 바와 같이 3경간 비대칭사장교로서 중앙경간 344m, 측경간 70m의 총 484m로 구성되어 있다.

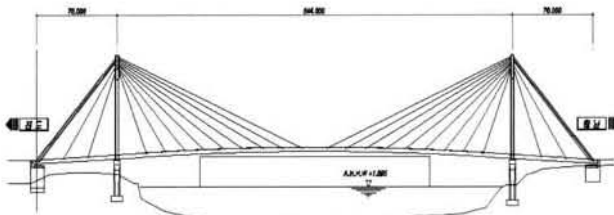


그림 2. 제2진도대교

본 연구에서의 측정대상으로 선정한 케이블 구간은 그림 3에 나타난 바와 같이 진도측 방향의 JC1~JC15 두 쌍과 해남측 방향 HC1~HC15 두 쌍으로 총 60개의 케이블에 대하여 장력측정을 실시하였다. JC와 HC는 지명의 이니셜로 구분하였고 측경간에서 교량 중앙 방향 순으로 번호를 부여하였다. 그리고 진도측에서 해남측을 바라볼 때 교축중심으로부터 오른쪽을 R측, 왼쪽을 L측이라고 표기하였다.

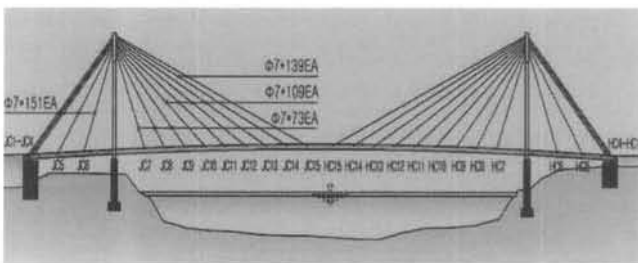


그림 3. 케이블 배치도

3.2 케이블 제원

대상교량의 케이블 형식은 정착구 배치조건, 기존교량과의 근접에 따른 케이블 직경규모의 조화, 고강도 적용추세의 반영, 정착구의 피로강도확보 및 공장제작에 따른 품질 및 공사 관리의 효율성 등 종합적인 측면에서 유리한 NPWS(New Parallel Wire Strand) 방식의 케이블을 적용하였다.

NPWS 케이블의 단면은 7mm 소선을 소요강도에 적합하도록 다발을 형성하고, 인장강도 및 탄성계수를 유지하는 범위내 (3~4°)로 꼬아서 구성된다.

본 연구에서 수행한 각 케이블에 대한 제원은 표 1과 같다.

표 1. 케이블 제원

케이블 번호	케이블 종류	직경 (mm)	단면적 (m ²)	단위하중 (ton/m)	길이 (m)
JC1, HC1	Φ7x151	108	0.005811	0.0476	101.445
JC2, HC2	Φ7x151	108	0.005811	0.0476	100.635
JC3, HC3	Φ7x151	108	0.005811	0.0476	98.750
JC4, HC4	Φ7x151	108	0.005811	0.0476	97.100
JC5, HC5	Φ7x151	108	0.005811	0.0476	78.600
JC6, HC6	Φ7x151	108	0.005811	0.0476	65.000
JC7, HC7	Φ7x73	78	0.002809	0.0231	62.625
JC8, HC8	Φ7x73	78	0.002809	0.0231	71.620
JC9, HC9	Φ7x73	78	0.002809	0.0231	83.165
JC10, HC10	Φ7x109	95	0.004195	0.0347	96.515
JC11, HC11	Φ7x109	95	0.004195	0.0347	110.94
JC12, HC12	Φ7x109	95	0.004195	0.0347	126.090
JC13, HC13	Φ7x109	95	0.004195	0.0347	141.755
JC14, HC14	Φ7x139	106	0.005349	0.0439	157.880
JC15, HC15	Φ7x139	106	0.005349	0.0439	174.150

3.3 계측기의 선정 및 위치

가속도계는 진동을 측정하기 위한 가장 기본적이고 중요한 기기이다. 따라서 시공단계에서 케이블 장력을 측정하기 위해서는 가속도계에 의해 얻어지는 가속도신호를 FFT분석을 이용하여 고유진동수를 파악하는 것이 필요하다.

가속도계의 측정방향은 케이블의 진동방향으로 배치되어야 하며, 위치는 단부의 소켓 등에 의한 영향을 적게 받을 수 있는 부분에 설치하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 단부에서 최대한 떨어진 곳에 가속도계를 설치하여 진동신호를 획득하였다.

본 연구에서 사용한 가속도계는 표 2에 나타난 바와 같이 민감도가 좋고 장기적인 유지관리모니터링 시스템이 가능한 센서

를 사용하였다.

표 2. 가속도계 사양


계측센서	항 목	사 양	부착모습
1축 가속도계	모 델	8312A2	
	형 식	Capacitive Type	
	측정범위	0.03 ~ 300 Hz	
	Range	±2g	
	사용온도	-40 ~ 85℃	
	제조회사	kistler (미국)	

그림 4는 필터링이 완료된 상태의 FFT해석 결과의 예를 보여주고 있다. x축은 주파수(Hz), y축은 크기(Amp.)로 나타내어진다. 이 때의 최대치들이 바로 고유진동수가 되는데, 주기가 가장 긴 즉 주파수가 가장낮은 최대치가 1차 고유진동수가 되며, 주파수가 커짐에 따라 각각의 최대치값들이 각 차수별의 고유진동수가 된다.

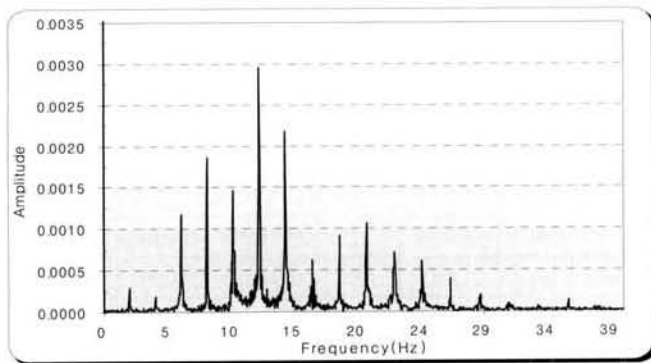


그림 4. FFT 해석을 통한 고유진동수 산정결과 예

4. 시공단계별 케이블 장력관리

4.1 시공단계별 케이블 장력변화

본 연구에 대상이 되는 사장교의 시공은 크게 4단계로 분류된다. 첫째는 보강형 인양을 위한 데릭크레인의 이동, 둘째는 데릭크레인을 이용한 보강형 인양 및 거치, 셋째는 거치 후 용접, 넷째는 케이블 설치 및 긴장으로 나타낼 수 있다. 따라서 케이블 설치 후 위의 용접공정을 뺀 나머지 공정에서 기존에 설치된 케이블의 장력은 변화하게 된다.

주공정인 케이블 인장력 도입공정에 따른 각 케이블의 장력변화를 표 4에 나타내었다. 그 결과 최초 케이블 장력 도입후 90tonf 가량의 데릭크레인 무게로 인하여 장력변화가 발생함을 알 수 있다.

표 4. 케이블 시공단계별 장력변화

케이블번호	시공단계별 장력변화(tonf)	시공단계별 장력변화(tonf)			
		기존케이블 장력	데릭크레인 이동 후 장력	보강형인양 후 장력	추가케이블 긴장 후 장력
6번 케이블	실측값	92.4	109.4	137.2	77.3
	해석값	105.6	115.2	141.1	75.9
7번 케이블	실측값	81.7	116.7	145.0	86.8
	해석값	84.6	97.8	136.8	86.2

표 4의 결과로부터 인접케이블인 7번 케이블의 경우 실측값은 81.7tonf에서 116.7tonf으로 증가하여 약 42.8%의 장력증가를 보이며, 설계값은 84.6tonf에서 97.8tonf으로 약 15.6%의 변화를 보인다. 또한 측정간의 6번 케이블의 장력변화는 실측값의 경우 92.4tonf에서 109.4tonf으로 증가하여 약 18.4%가 증가를 하며, 해석값의 경우 105.6tonf에서 115.2tonf으로 약 9.1% 증가한다. 이렇게 실측값의 변화량과 해석값의 변화량차이는 시공오차에 의한 변수를 포함하지 못하여 발생하는 것으로 판단된다.

데릭크레인 이동 후의 공정인 보강형 인양에 따른 장력증가는 데릭크레인이 위치하는 7번 케이블의 경우 실측값이 116.7tonf에서 145.0tonf으로 24.3%의 장력증가가 나타났으며, 해석값은 97.8tonf에서 136.8tonf으로 약 39.9% 증가하였다. 또한 측정간의 6번 케이블의 경우는 109.4tonf에서 137.2tonf으로 25.4%의 장력증가가 나타났으며, 해석값은 115.2tonf에서 141.1tonf으로 약 22.5%로 증가하였다. 추가 케이블긴장 이외의 시공단계에 있어 데릭크레인 이동에 따른 장력변화는 데릭크레인이 이동해 위치하는 7번 케이블이 측정간의 6번 케이블의 장력변화보다 약 24.4% 더 크게 장력변화가 일어났으며, 해석값 또한 동일함을 확인할 수 있었다.

4.2 댐퍼 설치 전의 최종장력 비교분석

케이블의 마지막 단계인 15번 케이블 설치 후 선형관리를 통해 Key Seg 접합이 이루어진다. 중앙부 Key Seg 접합 후에는 완성계의 거동을 하게 되고, 추가적으로 진행되는 부가작업에 따른 장력의 변화는 크게 나타나지 않는다. 댐퍼 설치전의 유효길이는 케이블의 전체 길이에서 정착구 길이와 베어링 플레이트(bearing plate)값 및 shim 플레이트(shim plate)값을 제외한 길이로 하여 장력측정에 이용하였다.

Key Seg 접합 후의 실제 측정 장력값과 설계값 그리고 해석값의 비교를 통해 각 케이블에 걸려 있는 최종도입장력에 대해 값들의 추세를 살펴보기 위해 각 결과를 정리하여 표 5에 나타내었다.

표 5. 각 케이블 시공 후 댐퍼 설치 전 장력측정 결과

케이블 번호	실측값(L) (tonf)	실측값(R) (tonf)	설계값 (tonf)	해석값 (tonf)
JC1	245.6	252.0	237	242.5
JC2	246.1	241.9	237	239.9
JC3	266.5	265.0	237	244.8
JC4	242.3	242.6	237	245.9
JC5	290.7	290.9	271	284.5
JC6	282.2	280.7	271	271.5
JC7	57.9	63.7	70	64.0
JC8	66.3	69.8	73	68.7
JC9	85.0	84.7	90	88.2
JC10	112.8	115.7	108	112.9
JC11	121.8	119.2	122	134.4
JC12	139.4	144.2	141	148.6
JC13	149.5	148.9	160	164.1
JC14	186.4	188.8	174	180.8
JC15	215.3	217.9	202	201.3

케이블 번호	실측값(L) (tonf)	실측값(R) (tonf)	설계값 (tonf)	해석값 (tonf)
HC15	223.7	223.3	202	204.8
HC14	181.6	183.1	174	182.1
HC13	162.2	164.3	160	163.6
HC12	137.9	139.9	141	147.0
HC11	129.1	132.8	122	132.6
HC10	104.6	106.5	108	111.4
HC9	81.6	86.2	90	87.6
HC8	76.6	77.5	73	68.5
HC7	53.7	59.0	70	64.1
HC6	315.6	293.1	271	271.8
HC5	298.8	304.8	271	284.8
HC4	264.9	260.2	237	246.2
HC3	267.0	266.7	237	244.0
HC2	232.0	232.5	237	240.3
HC1	252.2	258.7	237	241.8

표 5의 결과를 이용하여 각 케이블의 실측값과 설계값 및 해석값의 비교결과를 그림 6에 나타내었다.

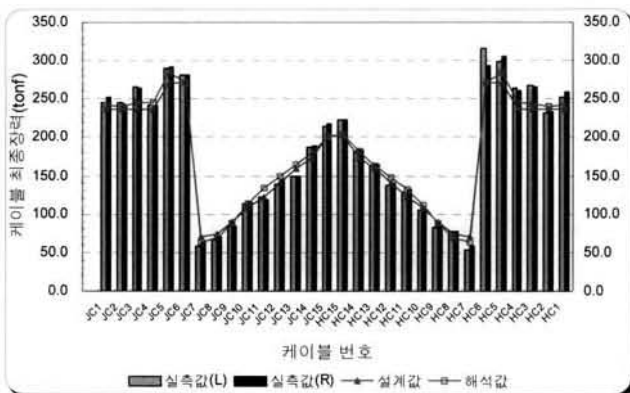


그림 5. 각 케이블 시공 후 댐퍼 설치 전 장력측정 결과

표 5 및 그림 5에 나타나듯이 다른 케이블에 비해 케이블 길이가 비교적 긴 JC1(HC1), JC2(HC2), JC3(HC3)과 JC14(HC14), JC15(HC15)에서 오차가 가장 크게 발생하였다. 그러나, 전체적으로 실측값과 설계값 및 해석값이 다소간의 오차는 발생하나, 전체적인 추세가 큰 차이를 보이지 않고 유사한 형태를 나타내고 있다. 이는 장력 관리 시스템에 진동법을 이용한 측정이 가능함을 나타낸다고 할 수 있겠다.

5. 댐퍼 설치에 따른 케이블 유효길이 재산정

5.1 댐퍼 설치 후 케이블 고유진동수 변화

케이블 댐퍼로 인한 강제적 진동수 변화는 진동방정식에 의한 장력 산출 값을 기존의 값과 비교하기에 정확성이 떨어지게 된다. 대상교량 케이블의 진동 차수에 따른 댐퍼 설치 후의 고유진동수의 변화를 표 6 및 표 7에 나타내었다.

표 6. 댐퍼 설치 전·후의 케이블 고유진동수 변화(R측)

Cable 번호	R측 1차진동수(Hz)		R측 2차진동수(Hz)	
	댐퍼설치 전	댐퍼설치 후	댐퍼설치 전	댐퍼설치 후
JC1	3.369	3.418	4.492	4.590
JC2	3.320	3.418	4.443	4.541
JC3	4.736	4.834	5.957	6.055
JC4	3.467	3.516	4.639	4.688
JC5	4.688	4.785	6.250	6.396
JC6	5.566	5.713	7.446	7.617
JC7	3.955	4.248	5.273	5.688
JC8	3.613	3.784	4.834	5.054
JC9	3.418	3.613	4.590	4.785
JC10	3.760	3.931	4.688	4.932
JC11	3.320	3.467	4.150	4.346
JC12	2.393	2.515	3.223	3.345
JC13	2.905	2.979	3.613	3.760
JC14	3.271	3.369	3.906	4.053
JC15	3.174	3.271	3.809	3.906

표 7. 댐퍼 설치 전·후의 케이블 고유진동수 변화(L축)

Cable 번호	L축 1차진동수(Hz)		L축 2차진동수(Hz)	
	댐퍼설치 전	댐퍼설치 후	댐퍼설치 전	댐퍼설치 후
JC1	5.162	5.762	6.836	6.895
JC2	3.369	3.418	4.492	4.590
JC3	4.736	4.834	5.957	6.055
JC4	3.467	3.516	4.614	4.688
JC5	4.688	4.736	6.250	6.348
JC6	5.566	5.713	7.471	7.642
JC7	3.760	4.053	5.029	5.469
JC8	4.688	4.980	5.908	6.250
JC9	3.418	3.516	4.590	4.736
JC10	3.711	3.906	4.639	4.834
JC11	3.369	3.467	4.199	4.395
JC12	2.344	2.441	3.174	3.271
JC13	2.930	2.979	3.613	3.760
JC14	3.223	3.320	3.906	4.004
JC15	3.174	3.223	3.809	3.906

표 6과 표 7의 결과로부터 케이블 제진 장치인 댐퍼의 영향으로 진동수가 변화되었음을 알 수 있으며, 1차, 2차, 고차모드 진동수에 관계없이 고유진동수가 평균적으로 변화함을 알 수 있다.

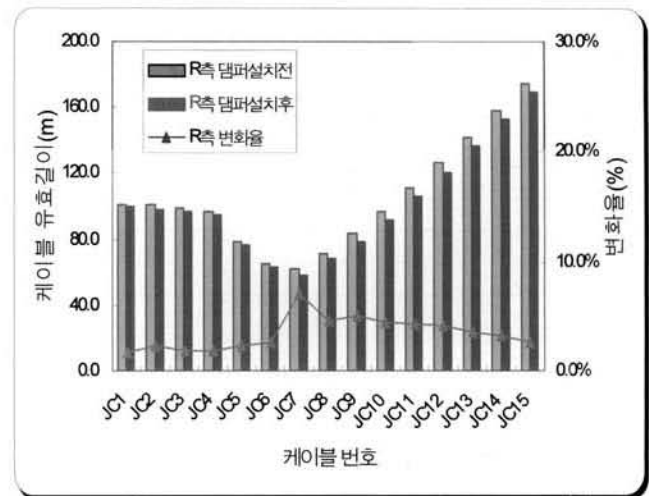
5.2 댐퍼 설치 후 케이블 유효길이

표 6과 표 7에서 측정한 각 케이블의 고유진동수와 댐퍼 설치 전의 장력값을 기준으로 진동방정식을 역 이용하여 유효길이를 재산정한 결과를 표 8에 나타내었다.

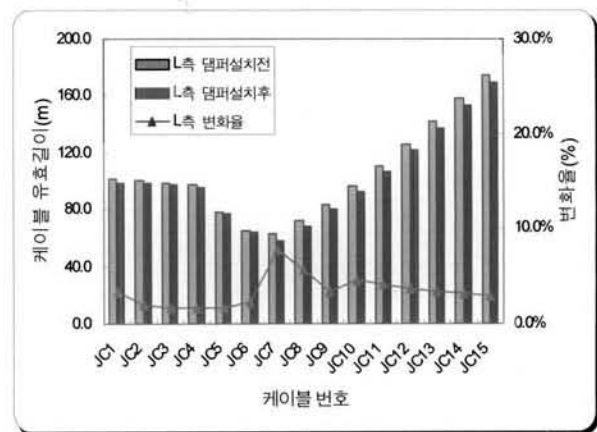
또한, 댐퍼 설치 전의 케이블 길이를 기준으로 댐퍼 설치 후의 케이블 유효길이 변화율을 그림 6에 나타내었다.

표 8. 댐퍼 설치 전·후의 케이블 유효길이

Cable 번호	R축 케이블 유효길이(m)		L축 케이블 유효길이(m)	
	댐퍼설치전	댐퍼설치후	댐퍼설치전	댐퍼설치후
JC1	101.445	99.801	101.445	98.106
JC2	100.635	98.251	100.635	98.627
JC3	98.750	96.895	98.750	97.121
JC4	97.100	95.383	97.100	95.482
JC5	78.600	76.761	78.600	77.335
JC6	65.000	63.327	65.000	63.495
JC7	62.625	58.170	62.625	57.807
JC8	71.620	68.369	71.620	67.547
JC9	83.165	79.011	83.165	80.340
JC10	96.515	92.172	96.515	92.164
JC11	110.940	106.201	110.940	106.314
JC12	126.090	120.886	126.090	121.410
JC13	141.755	136.869	141.755	136.991
JC14	157.880	152.704	157.880	152.829
JC15	174.150	169.686	174.150	169.215



(a) R축 케이블 유효길이 변화



(b) L축 케이블 유효길이 변화

그림 6. 댐퍼 설치 전·후의 케이블 유효길이 변화양상

표 8 및 그림 6의 결과로부터 댐퍼 설치 후 케이블의 유효길이는 3~7% 범위내에서 감소하는 것으로 나타났으며, 평균 감소율은 약 3.4% 정도로 나타났다. 또한, 케이블 길이가 비교적 짧고 고유진동수의 변화가 가장 컸던 JC7, JC8에서의 유효길이가 최대 7% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

5.3 케이블 유효길이 변화에 따른 장력오차

표 8과 그림 6의 결과를 이용하여 유효길이의 변화를 고려한 경우(A)와 고려하지 않은 경우(B) 대하여 장력산정 결과를 비교하여 표 9 및 표 10에 나타내었다.

표 9. 케이블 유효길이 변화에 따른 장력오차 (R측)

케이블 번호	R측 A경우 (tonf)	R측 B경우 (tonf)	장력차이 (B-A)	장력오차
JC1	252.0	260.4	8.4	3.3%
JC2	241.9	253.8	11.9	4.9%
JC3	265.0	275.2	10.2	3.9%
JC4	242.6	251.4	8.8	3.6%
JC5	290.9	305.0	14.1	4.9%
JC6	280.7	295.7	15.0	5.4%
JC7	63.7	73.8	10.1	5.9%
JC8	69.8	76.6	6.8	9.7%
JC9	84.7	93.8	9.1	10.8%
JC10	115.7	126.9	11.2	9.7%
JC11	119.2	130.1	10.9	9.1%
JC12	144.2	156.9	12.7	8.8%
JC13	148.9	159.7	10.8	7.3%
JC14	188.8	201.8	13.0	6.9%
JC15	217.9	229.5	11.6	5.3%

표 10. 케이블 유효길이 변화에 따른 장력오차 (L측)

케이블 번호	L측 A경우 (tonf)	L측 B경우 (tonf)	장력차이 (B-A)	장력오차
JC1	245.6	262.6	17.0	6.9%
JC2	246.1	256.2	10.1	4.1%
JC3	266.5	275.5	9.0	3.4%
JC4	242.3	250.6	8.3	3.4%
JC5	290.7	300.3	9.6	3.3%
JC6	282.2	295.7	13.5	4.8%
JC7	57.9	68.0	10.1	17.4%
JC8	66.3	74.5	8.2	12.4%
JC9	85.0	91.1	6.1	7.2%
JC10	112.8	123.7	10.9	9.7%
JC11	121.8	132.6	10.8	8.9%
JC12	139.4	150.4	11.0	7.9%
JC13	149.5	160.1	10.6	7.1%
JC14	186.4	198.9	12.5	6.7%
JC15	215.3	228.0	12.7	5.9%

표 10의 결과로부터 댐퍼 설치에 의하여 변화된 케이블 유효 길이를 고려하지 않는다면 케이블 장력산정시 6~17 tonf 범위에서 과다하게 산정될 수 있으며, 장력의 평균오차는 약 7.3% 정도 과다산정 될 수 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 사장교의 케이블 장력을 진동법을 이용한 간접법으로 측정하였으며, 시공공정별 케이블의 장력변화와 케이블 댐퍼 설치 전·후의 케이블 유효길이 변화를 검토하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 시공단계에서 진동법을 이용하여 단계별 장력 측정과 댐퍼 설치 전의 최종장력을 측정하여 해석값과 비교 분석하였으며, 장기적인 장력변화를 측정하는 방법으로 진동법이 적용 가능함을 확인하였다.
- (2) 댐퍼 설치 전의 케이블 길이를 기준으로 댐퍼 설치 후의 케이블 유효길이를 산정한 결과, 댐퍼 설치 후 케이블의 유효길이는 3~7% 범위내에서 감소하는 것으로 나타났으며, 평균 감소율은 약 3.4% 정도로 나타났다.
- (3) 댐퍼설치에 의한 케이블의 유효길이 변화를 고려하지 않는 경우 기존방법에 의한 케이블 장력산정 방법은 실제 장력보다 6~17 tonf 범위에서 과다하게 산정될 수 있으며, 장력의 평균오차는 약 7.3% 정도 과다산정 될 수 있는 것으로 나타났다.

따라서, 케이블 댐퍼가 설치된 사장 케이블의 장력을 산출하는 경우에는 댐퍼 설치 후의 유효길이 효과를 고려하여 장력을 산출하는 것이 지속적인 장력관리를 위해서 합리적인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2007년 전남대학교 연구년교수연구비 지원사업으로 이루어진 것으로 본 연구를 가능하게 한 학교당국에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 강경구(2005), 신뢰성에 기초한 사장교 케이블장력관리를 위한 관리한계치 설정에 관한 연구, 한양대학교 박사학위 논문.
 김상효, 이상호, 최수일, 여동훈(1997), 진동법을 이용한 케이블의 장력측정기법과 계측환경의 영향분석, 연세대학교 산업기술연구소 논문집, 제2권 제29집, pp.143-150.
 박연수, 전동호, 전양배, 강경구(2005), 진동법을 이용한 사장교 시공단계별 케이블 장력 관리, 한국구조물진단학회논문집, 제 9권, 제 4호, pp.127-134.
 안상섭(2002), 사장교 케이블의 진동 검토 및 대책, 대한토목학회논문집, 제 22권, 제3-A호, pp.663-678.
 Hiroshi Zui, Tohru Shinke & Yoshio Namita(1996),

- Practical Formulas for Estimation of Cable Tension by Vibration Method, *Journal of Structure Eng.*, ASCE, Vol. 122, No.6. pp.651-656.
- Irvine, H.M.(1981), *Cable Structures*, MIT Press, Cambridge, Mass.
- Irvine, H.M. & Caughey.(1974), The linear theory of free vibration of a suspended cable. *Proc. Royal Soc., London, England, Series A*, vol. 341.
- Randall, R. B.(1987), *Frequency Analysis*, Bruel & Kjaer Korea Ltd.,
- Tanaka, H., Kamei, M., & Kaneyoshi, M.(1987), *Cable Tension Adjustment by Structural System Identification, Cable-Stayed Bridges Experiences & Practice*, Vol. 2, pp. 856-866.
- (접수일자 : 2008. 3. 3 / 심사일 2008. 4. 4 / 게재확정일 2008. 8. 14)