

진동법을 이용한 사장교의 시공 중 장력 평가

조수진 · 윤정방 · 심성한[†]

울산과학기술대학교 도시환경공학부
(2013. 11. 11. 접수 / 2014. 2. 25. 채택)

Evaluation of Cable Tension Forces Using Vibration Method for a Cable-stayed Bridge under Construction

Soojin Cho · Chung-Bang Yun · Sung-Han Sim[†]

School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology
(Received November 11, 2013 / Accepted February 25, 2014)

Abstract : When a cable-stayed bridge is under construction, the cable tension that changes according to the construction phase is the index indicating the proper construction management. In this study, the vibration method using the least-square estimation has been implemented to monitor changing tensions of two multi-strand cables of a cable-stayed bridge under construction. The test bridge is Hwamyung Bridge in Korea with a prestressed concrete box girder. The field tests are executed during the second tensioning stage just after the installation of the key segment. The tensions of two cables are measured before and after the tensioning and 5 days later (i.e., after finishing the tensioning of all cables). The accuracy of the estimated tensions by the vibration method has been improved by employing proper effective lengths of the cables. The measured tensions are compared with the result of the lift-off tests and design tensions. The vibration method shows very good performance in monitoring the changing tensions according to the construction phase with minimal error.

Key Words : cable tension, vibration method, cable-stayed bridge, construction management, lift-off test

1. 서론

최근 들어 재료 및 시공 기술의 지속적 발전으로 인하여, 국내외적으로 장대교량의 건설이 증가하고 있다. 그 중에서도 사장교는 다수의 케이블의 장력을 조정하여 주탑과 거더의 응력을 조정하는 고차 부정정 구조물로, 다양한 형태의 설계가 가능하고 미관이 뛰어나기 때문에 현재 많은 중장대형 교량에 적용되고 있다. 이와 같은 추세에 맞추어 국내에서도 최근 800m 경간장을 갖는 인천대교를 시공하였을 뿐만 아니라, 국내 최대길이인 1114m 경간장의 북항대교가 2014년 4월 개통될 예정으로 건설되고 있다.

케이블로 하중의 대부분을 지지하는 케이블 지지교량 중 하나인 사장교의 경우, 시공 중과 공용상태에서 케이블에 도입되는 장력의 평가가 유지관리의 가장 중요한 요소 중 하나이다. 실제 케이블은 케이블 정착구의 손상이나 부식, 케이블 내부 강선(strand)에 발생하

는 피로, 부식 등 다양한 요인들로 인하여 열화될 수 있으며, 이는 케이블이 지지하는 장력을 감소시키는 결과를 초래한다. 또한 이렇게 감소된 장력은 다른 케이블들로 재분배되어 교량 전체의 안정성(stability)을 감소시키게 된다.

케이블의 장력 측정기법은 크게 직접법과 간접법으로 나눌 수 있다. 직접법은 힘을 직접 측정하는 로드셀(Load Cell)을 이용한다. 직접법은 과정 자체가 단순하고 정확하며, 오차를 유발할 수 있는 추가적인 계산과정을 필요로 하지 않는 장점을 가지고 있으나, 계측 장비가 비싸고 내구성이 높지 않으며 현재 사용 중인 교량에 적용하기 힘들다는 단점을 가지고 있다. 간접법은 이러한 직접법의 단점을 보완하기 위하여, 힘이 아닌 다른 물리량을 측정한 뒤 케이블의 재료적 성질 및 형상조건 등의 자료를 함께 활용하여 장력을 역산하는 방법이다. 간접법은 직접법에 비해 정확도는 떨어지지만, 계측 장비가 저렴하고 설치가 손쉬워 시공 중, 또

[†] Corresponding Author : Sung-Han Sim, Tel : +82-52-217-2816, E-mail : ssim@unist.ac.kr

School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, 50 UNIST-gil, Eonyang-eup, Ulju-gun, Ulsan 689-798, Korea

는 공용 중인 교량 모두에 손쉽게 적용할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다. 간접법 중에는 계측물리량으로 가속도를 활용하는 진동법이 가장 많이 활용되고 있으며, 그 외에도 변형률을 활용하거나 전자기장(Electromagnetic field)을 활용하는 방법 등이 있다¹⁾.

이와 같은 장력 측정은 구조물이 시시각각 변하는 시공 중의 교량에 대해 그 필요도가 매우 높다. 일례로 많은 사장교의 시공에서 시공 시 케이블을 먼저 가설한 뒤 이를 가설재로 활용하여 보강형을 설치하는 캔틸레버 공법이 많이 활용되고 있는데, 이 경우 각 시공 단계에 따라 케이블에 걸리는 하중이 급격하게 변화하게 된다. 이러한 경우 미리 수행된 시공단계해석에 의하여 계산된 장력과 실제 케이블이 지지하는 장력을 지속적으로 측정, 비교함으로써 정교한 시공관리를 수행할 수 있다.

본 연구에서는 실제 사장교 케이블의 장력 측정에 가장 많이 활용되는 간접법 중 하나인 진동법을 이용하여 실제 시공 중인 사장교에서 시공 중 변화에 따른 케이블의 장력의 변화를 측정하였다. 진동법으로는 가장 많이 활용되는 최소자승법²⁾을 활용하였다. 대상교량은 2007년 착공되어 2012년 6월 준공된 대동화명대교(이하 화명대교)이며, 마지막 키 세그먼트 접합 이후 모든 케이블을 재긴장하며 구조형상관리를 수행하는 기간 동안, 2개의 케이블을 대상으로 계측을 수행하였다. 진동법을 통하여 얻은 장력값들은 시공단계해석을 통하여 얻은 설계장력, 리프트오프 테스트를 통하여 얻은 장력과 비교하여, 실제 시공관리에의 적용 가능성을 검토하였다.

2. 장력 계측 방법

2.1. 직접법: 리프트오프 테스트(Lift-off Test)

리프트오프 테스트는 흙막이(Earth Anchor)와 후긴장(Post-tensioning) 구조물의 텐던(Tendon)의 장력 계측에 많이 활용되는 직접법의 하나이다. 리프트오프 테스트는 Fig. 1과 같이 케이블, 또는 케이블 내부 스트랜드에 로드셀과 변위계, 유압잭(Hydraulic Jack)을 설치하고 로드셀에 걸리는 힘과 변위계로 측정한 변위와의 관계를 이용하여 케이블의 장력을 산정하는 방식이다. 우선 유압잭을 이용하여 케이블을 점차적으로 당기면서 그림 2와 같이 힘과 변위를 측정한다. 이때 유압잭으로 당기는 힘이 케이블의 장력보다 작은 경우에는 케이블의 앵커 바깥쪽에 위치하는 여분의 케이블에만 힘이 걸리게 되므로, 여분의 케이블에 해당하는 힘-변위 그래프(Fig. 2의 A-B)가 나타나게 된다. 만일 유압잭이

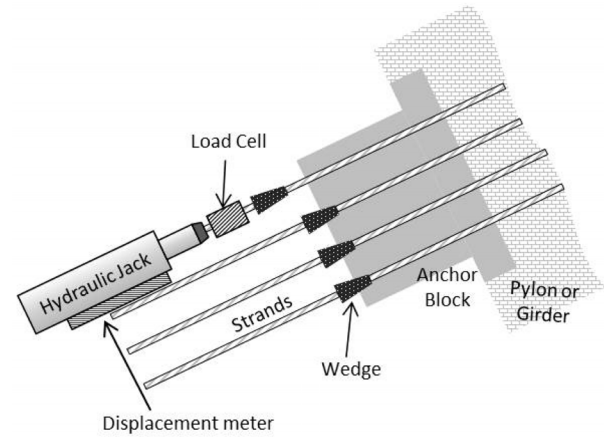


Fig. 1. Setup for lift-off test

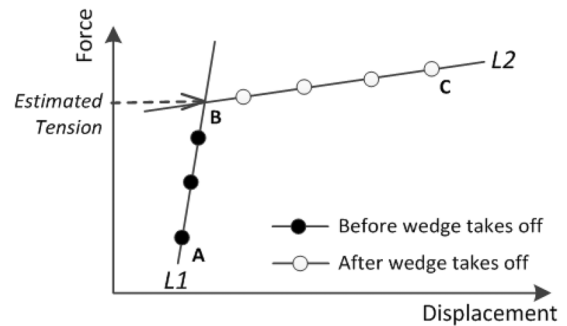


Fig. 2. Force-displacement relationship from lift-off test

당기는 힘이 케이블의 장력을 넘어서면, 케이블의 선단을 케이블 앵커에 고정하는 웨지(Wedge)가 앵커에서 들리면서 케이블의 전장이 힘을 받게 되므로 힘-변위 관계가 변하게 되며(Fig. 2의 B-C), 측정된 힘과 변위의 관계는 두 개의 직선 L1과 L2로 표현할 수 있다. 이때 L1과 L2의 교점인 B에 해당하는 힘을 케이블의 장력으로 산정한다.

2.2. 간접법: 진동법(Vibration Method)

진동법은 케이블 외부에 가속도계를 설치하여 획득한 가속도 응답으로부터 케이블의 모드특성을 추정하고, 이와 케이블의 형상조건을 활용하여 케이블의 장력을 역산하는 방법이다. 진동법은 케이블의 새그(sag)와 휨강성이 고려되지 않은 단순한 현이론에서 출발하였으³⁾, 케이블의 휨강성과 새그를 고려함으로써 정확도와 활용성을 높이는 방향으로 다양하게 발전되었다.^{2),4-7)} 이 중 Shimada²⁾가 제안한 최소자승법에 기반한 진동법이 가장 널리 활용되고 있다.

Shimada가 제안한 진동법은 케이블의 휨강성을 고려하기 위하여, 케이블을 힘이 존재하는 보(beam)로 가정한다. 이때 케이블의 진동방정식은 식(1)과 같이 나

타낼 수 있다.

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

여기에서, z 는 케이블의 면내(in-plane) 처짐, x 는 케이블의 길이방향 좌표, m 은 케이블의 단위중량, EI 는 케이블의 휨강성, T 는 케이블에 걸린 길이방향의 장력을 의미한다. 케이블의 전장에 걸쳐 장력과 휨강성이 일정하다고 가정하고, 케이블 양단의 경계조건(boundary condition)이 힌지조건이라고 가정하면 식(1)의 해는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T = 4ml^2 \left(\frac{f_n}{n} \right)^2 - \frac{EI\pi^2}{l^2} n^2 \quad (2)$$

여기에서, l 은 케이블의 길이, f_n 은 n 의 모드차수를 갖는 케이블의 고유진동수를 의미한다. 위의 식(2)를 다시 정리하면 다음 식(3)과 같은 1차식의 형태를 유도할 수 있다.

$$\left(\frac{f_n}{n} \right)^2 = \frac{EI\pi^2}{4ml^4} + \frac{T}{4ml^2} = an^2 + b \quad (3)$$

실제로 케이블에서는 많은 고유진동수를 쉽게 얻어낼 수 있으며, 이를 n^2 와 $(f_n/n)^2$ 의 관계로 나타내면 Fig. 3과 같은 그래프를 얻을 수 있는데, 이를 회귀분석한 1차식의 기울기(a)와 y 절편(b)를 이용하면 다음과 같이 케이블의 휨강성과 케이블의 장력을 얻을 수 있다.

$$EI = \frac{4ml^4}{\pi^2} a \quad (4)$$

$$T = 4ml^2 b \quad (5)$$

이 방법은 계측한 고유진동수 여러 개를 함께 이용하기 때문에, 계측오차와 실제 케이블이 현이론을 만족시키지 못함(길이방향으로 균일하지 않은 케이블 휨강성 및 새그)으로서 발생하는 오차를 보정할 수 있다는 점에서 활용도가 매우 높다⁸⁾.

안상섭 등⁹⁾은 가장 기초적인 진동현이론(Irvine 1981)에 대하여 장력의 오차요인으로 질량오차, 계측오차, 휨강성오차, 새그오차, 경계조건오차를 들었다. Shimada가 제안한 진동법의 경우, 계측오차와 휨강성 오차는 최소화할 수 있으나, 케이블의 새그로 인한 오차와 경계조건(힌지조건)오차는 여전히 존재한다. 특히

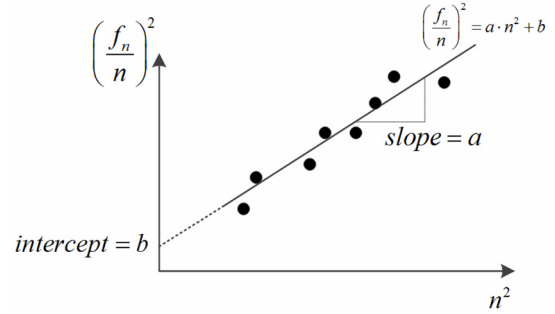


Fig. 3. Least-square estimation of tension and flexural rigidity using vibration method



Fig. 4. Hwaryung cable-stayed bridge and test cables

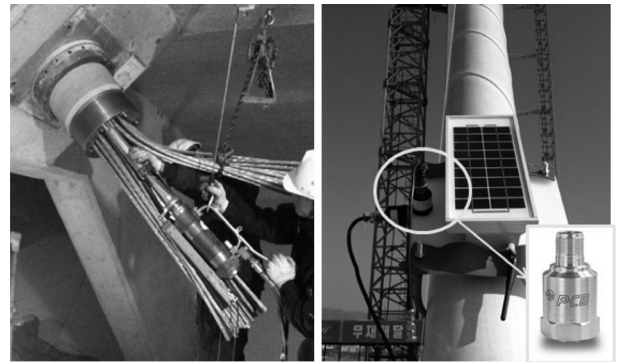


Fig. 5. Lift-off test (left) and vibration measurement (right)

케이블의 정착구가 크거나 댐퍼가 설치되어 있는 경우 유효길이는 실제 케이블의 길이보다 짧으며, 이 경우 식(5)에 의하여 장력을 과대평가하는 요소가 된다. 일반적으로 유효길이(l_e)는 식 (6)에 의하여 산정한다¹⁰⁾.

$$l_e = l - d \quad (6)$$

여기에서 d 는 케이블의 직경이다.

3. 시공 중 사장교 실측

3.1. 대상 교량 및 실험 일정

본 비교 연구를 위하여, 부산광역시 화명동과 김해시 대동면을 연결하는 대동화명대교(이하 화명대교)에서 진동 기반의 장력 계측 실험을 수행하였다. 화명대교는 총 연장 1039m, 주교량 500m(=115m+270m+115m)

의 국내 최장 경간의 프리스트레스트 콘크리트 사장교이다¹¹⁾. 주교량은 보강형의 중앙에 케이블이 위치하는 1면 fan type 사장교로 설계되었다.

화명대교에 사용된 케이블은 긴장 및 재긴장이 용이하며 내구성이 높은 MS(multi-strand) type의 케이블이다¹¹⁾. 화명대교에는 총 72개의 케이블이 사용되었는데, 각 케이블이 지지하는 하중의 크기에 따라 강선(strand)은 49~85개까지 다르게 분포하며, 모든 강선은 내풍 안정성 증진을 위해 Helical Fillet 처리된 콤팩트 Type의 Duct를 이용하여 보호되고 있다. 실험 케이블은 Fig. 4에 표시된 김해 쪽 측경간(side span)의 네 번째 케이블(TC1)과 두 번째 케이블(TC2)이다. 실험 케이블의 상세한 특징은 Table 1에 정리하였다.

본 실험은 중앙 키 세그먼트(key segment) 조립 후 케이블에 2차 긴장력을 도입하는 기간동안 수행되었다. 두 개의 실험 케이블은 2차 긴장력을 도입하는 첫날 긴장되었으며, 각 케이블의 긴장 전과 후에 리프트 오프 테스트와 진동법을 위한 가속도계측을 Fig. 5와 같이 수행하였다. 또한 모든 케이블의 긴장이 이루어지고 난 4일 후에 추가로 실험케이블에서 리프트 오프 테스트와 가속도계측을 수행하였다. 실험 일정과 계측을 수행한 시간은 Table 2에 정리하였다.

3.2. 리프트오프 테스트 상세

실험 케이블 내부의 강선은 모두 동일한 장력을 받고 있다는 가정하에, 49개의 강선 중에서 5개만을 랜덤

Table 1. Properties of test cables

Cable Properties	Value
Nominal Area (mm ²)	7,350
Ensile Strength (kN)	13,671
Elastic Modulus (kN/mm ²)	195
Unit Weight (N/m)	661.89
Number of Strand	49
Diameter (m)	0.2
Cable Length (m)	TC1: 55.92 TC2: 45.57

Table 2. Test schedule

Time	Tensioning Stage	Measurement
BT1	Before Tensioning of TC1	0
AT1	After Tensioning of TC1	0
BT2	Before Tensioning of TC2	0
AT2	After Tensioning of TC2	0
INT	Tensioning of the other cables	
FIN	Finish of second tensioning	0

으로 선택하여 리프트오프 테스트를 수행하고, 식 (7)을 이용하여 케이블의 장력을 계산하였다.

$$T = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} T_i}{n_s} \times n \tag{7}$$

여기에서 T 는 케이블의 장력, T_i 는 리프트오프 테스트로 얻은 강선의 장력, n_s 는 리프트오프 테스트를 수

Table 3. Measured tension by lift-off test

Time	TC1 (kN)	TC2 (kN)
BT1	3245	-
AT1	5077	-
BT2	-	3186
AT2	-	4693
FIN	4859	4620

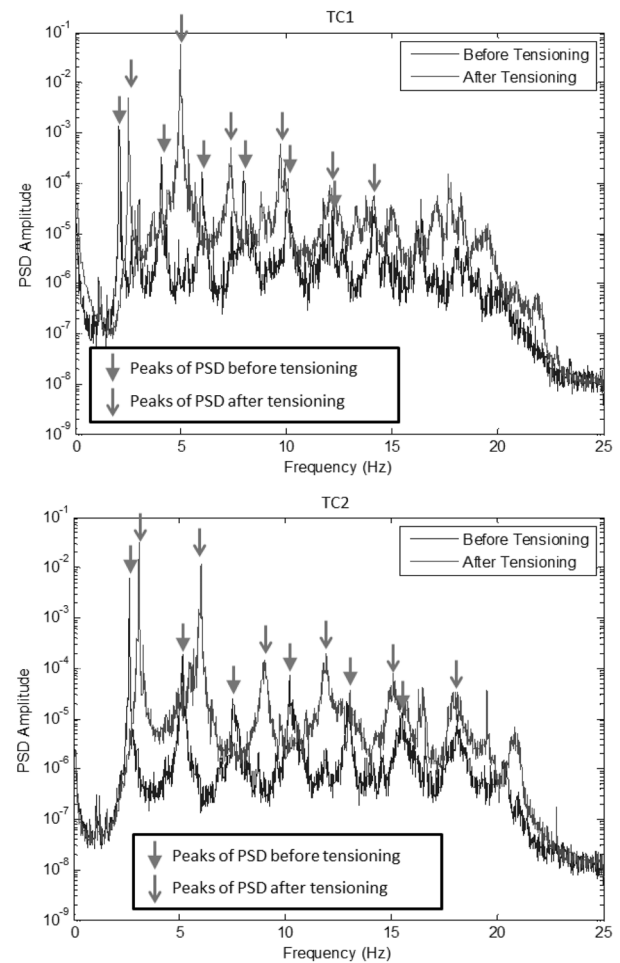


Fig. 6. Power spectral density before and after tensioning: TC1 (top) and TC2 (bottom)

행한 강선의 수(=5), 그리고 n 은 케이블 내의 강선의 수(=49)이다. 이렇게 얻은 각 케이블의 장력은 Table 3에 나타내었다.

3.3. 진동법 수행 상세

각각의 실험 시간에 대하여 리프트오프를 수행한 가속도계측을 수행하였다. 선행실험을 통하여 바람에 의한 상시진동만으로도 충분한 가진(excitation)이 됨을 확인한 뒤, 그에 따라서 상시진동을 약 5분 간 계측하였다. 가속도계로는 Fig. 5의 오른쪽 하단부에 보이는 것과 같은 PCB사의 압전형 가속도계(393B12)를 사용하였다. 면내(in-plane) 진동을 계측하기 위하여, 케이블에 맞는 지그(jig)를 제작하여 그 위에 가속도계를 설치하였다. 사전실험을 통해 샘플링 주파수를 50Hz로 결정하고, 20Hz에서 Low-pass filtering을 수행하였다. 상시진동을 더 잘 관찰하기 위하여 5배의 신호증폭(amplification)도 함께 수행하였다.

Fig. 6은 TC1과 TC2에서 각각 긴장전후에 얻은 가속도신호의 PSD(Power Spectral Density)와 그로부터 찾은 1-6차까지의 고유진동수를 표시한 그래프이다. 20Hz의 Low-pass filtering을 감안하여 20Hz 미만에서 총 6개의 고유진동수를 추출하였다. 두 실험 케이블 모두에서 긴장 이후 고유진동수가 1-6차에 걸쳐 모두 증가하였음을 확인할 수 있다.

Table 4와 5는 이와 같이 각각의 실험 단계에 대하여 얻은 6차까지의 고유진동수와 이를 진동법에 대입하여 얻은 각 케이블의 장력이다. 긴장에 의하여 고유진동수는 약 15~24% 정도 증가하였으며, 그에 의하여 장력은 TC1의 경우 54%, TC2의 경우 43% 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 변화율은 진동법에서 케이블의 장력의 변화에 따른 고유진동수의 민감도가 상당히 높음을 의미한다.

Table 4와 5에서 장력 아래 괄호 안에 표시된 값은 위 Table 3에 나타낸 리프트오프 테스트를 통해 얻은 장력과의 백분율 차이를 나타낸 것이다. 우선 모든 경우에 대하여 진동법을 통해 얻은 장력이 더 크게 나타났는데, 이는 진동법에 의한 장력 계산 시 케이블의 실제 길이보다 짧은 유효길이를 활용하여야 함을 의미한다. 또한 TC2가 TC1에 비하여 전체적으로 차이가 크게 나타났는데, 이는 TC2가 TC1보다 길이가 짧아 유효길이의 영향이 더 크게 나타났기 때문으로 보인다.

3.4. 케이블 유효길이의 고려

위에서 언급하였듯이, 진동법에 있어서 가장 큰 오

Table 4. Natural frequencies and estimated cable tension forces by vibration method (TC1)

		Time				
		BT1	AT1	BT2	AT2	FIN
Natural Frequencies	1st	2.063	2.557	2.527	2.515	2.515
	2nd	4.089	5.054	5.005	4.968	4.974
	3rd	6.024	7.477	7.263	7.239	7.33
	4th	7.983	9.833	9.766	9.717	9.857
	5th	10.095	12.421	12.354	12.036	12.036
	6th	12.036	13.904	14.014	14.136	14.05
Tension (kN)		3341 (2.96)*	5217 (2.76)	5099	5022	5082 (4.59)

*Percentage difference with lift-off test in the parentheses.

Table 5. Natural frequencies and estimated cable tension forces by vibration method (TC2)

		Time				
		BT1	AT1	BT2	AT2	FIN
Natural Frequencies	1st	2.600	2.576	2.557	3.058	3.058
	2nd	5.115	5.054	4.987	6	6.03
	3rd	7.605	7.495	7.477	8.881	9.021
	4th	10.242	10.12	9.961	11.774	11.871
	5th	13.001	12.744	12.433	15.04	15.064
	6th	15.564	15.32	15.381	17.932	17.993
Tension (kN)		3529	3417	3345 (4.99)*	4851 (3.37)	4862 (5.38)

*Percentage difference with lift-off test in the parentheses.

차를 유발하는 요인은 바로 유효길이의 산정이다. 화명대교의 도면을 검토한 결과, 케이블의 실제 정착구간의 거리는 TC1의 경우 55.04m, TC2의 경우 44.69m로 실제 케이블의 길이인 55.92m, 45.57m에 비해 짧음을 확인할 수 있었다. 이 길이에 위의 식(6)을 적용하여 케이블의 지름인 0.2m를 상쇄할 경우, 각 케이블의 유효길이는 TC1이 54.82m, TC2가 44.49m가 된다.

Table 6은 시공단계해석으로부터 얻은 설계장력, 리프트오프 테스트로 얻은 장력, 원래 케이블 길이를 이용하여 진동법으로 얻은 장력, 그리고 유효길이를 고려하여 진동법으로 얻은 장력을 비교한 것이다. 케이블의 원래 길이를 활용하여 진동법으로 얻은 장력은 리프트오프 테스트의 결과와 5.4% 미만의 차이를 보였다. 그러나 유효길이를 고려한 경우에는 그 차이가 2.2%미만으로 현저히 감소하였다. 특히 재긴장을 수행한 지 5일이 지난 후(FIN)에 계측한 장력은 두 실험 케이블 모두에서 약 2% 정도의 차이만을 보였다.

Table 6. Comparison of cable tension forces obtained by lift-off test, vibration test using the original cable lengths, and vibration test using effective cable lengths

Cable	Method	Time				
		BT1	AT1	BT2	AT2	FIN
TC1	Design	3261	5175	5064	4984	4911
	Lift-off Test	3245	5077	-	-	4859
	Vibration Method (Original Length)	3341 (2.96) [*]	5217 (2.76)	5099	5022	5082 (4.59)
	Vibration Method (Effective Length)	3261 (0.48)	5092 (0.29)	4976	4901	4960 (2.08)
TC2	Design	3273	3162	3057	4789	4704
	Lift-off Test	-	-	3186	4693	4620
	Vibration Method (Original Length)	3529	3417	3345 (4.99)	4851 (3.37)	4862 (5.38)
	Vibration Method (Effective Length)	3425	3316	3247 (1.90)	4708 (0.33)	4719 (2.14)

*Percentage difference with lift-off test in the parentheses.

3.5. 결과 분석

Table 6에서 TC1의 BT2-AT2에서 진동법으로 얻은 장력을 관찰하면, TC1에 추가적인 긴장력의 도입이 없었음에도 불구하고 타 케이블에 긴장력을 도입하면서 발생한 장력의 재분배효과로 인한 장력의 변화까지도 충분히 예측할 수 있음을 알 수 있다. 재긴장이 끝난 5일 후(FIN)에 리프트오프 테스트와 진동법을 이용하여 예측한 장력이 유사하였음을 감안하면, BT2-AT2의 기간 동안에도 리프트오프 테스트와 진동법이 유사한 값을 나타냈을 것으로 추정할 수 있다. 이러한 결과는 비록 간접적이기는 하나 진동법이 사장교에서 케이블 시공 이후 시공관리에 효과적으로 사용될 수 있음을 보여준다. 특히 위 Table 6에서 설계장력과 진동법을 통하여 얻은 각 단계별 장력을 비교하여 보면, 두 개의 실험 케이블 모두에서 유효길이를 고려하여 진동법으로 얻은 케이블의 장력이 설계장력과 매우 유사한 값을 가짐을 알 수가 있다. 이 결과는 화명대교의 시공 과정이 시공단계별 해석의 결과와 크게 다르지 않게 수행되었음을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 시공 중 사장교인 화명대교에서 최소 자승법을 이용한 진동법을 이용하여 장력을 측정하는

실험을 수행하였다. 특히, 진동법을 이용하여 케이블의 재긴장 전후의 장력변화를 잘 측정할 수 있는지 리프트오프 테스트 결과와의 비교를 통하여 확인하였으며, 케이블의 유효길이를 이용하여 진동법의 정확도를 높이는 연구를 수행하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 두 개의 실험 케이블에 가속도계를 설치하고 상시진동시험을 실시한 결과, 20Hz 미만에서 1-6차의 고유진동수를 추출할 수 있었다. 이 고유진동수는 재긴장 시 장력이 변함에 따라 충분한 민감도를 가지고 변함을 확인하였다.

2) 진동법의 경우 원래 케이블 길이를 이용할 시 리프트오프 테스트와 5.4% 미만의 차이를 보였으나, 유효길이를 활용할 경우 그 차이가 2.2% 정도로 감소하여 매우 높은 수준의 정확도를 보여주었다.

3) 진동법을 이용하여, 실험 케이블이 아닌 타 케이블에 긴장력을 도입할 때 발생하는 장력의 재분배효과로 인한 실험 케이블의 장력변화를 충분히 예측할 수 있었다. 또한 실험 케이블에 재긴장을 시행하고 난 5일 뒤 리프트오프 테스트와 진동법을 이용하여 예측한 장력은 둘 다 재긴장 직후의 장력과 매우 유사함을 확인함으로써, 간접적으로 진동법이 사장교에서 케이블 시공 이후 시공관리에 효과적으로 사용될 수 있음을 보였다.

4) 특히 리프트오프 테스트와 진동법 모두 설계장력과 매우 유사한 값을 보였으며, 이를 통하여 진동법이 실제 시공 중 사장교의 시공단계별 장력 관리에 충분히 활용될 수 있음을 보였다.

감사의 글: 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2012-R1A1A1-042867).

References

- 1) G. Wang, M. L. Wang and Y. Zhao, "Application of EM Stress Sensors in Large Steel Cables," Smart Struct. Sys., Vol. 2, No. 2, pp. 145-154, 2006.
- 2) T. Shimada "Estimating Method of Cable Tension from Natural Frequency of High Mode," Proc. JSCE, Vol. 501/1-29, pp. 163-171, 1994.
- 3) Irvine, M.. Cable Structures. Dover Publications Inc., New York, NY, 1981.
- 4) H. Zui, T. Shinke and Y. Namita, "Practical Formulas for Estimation of Cable Tension by Vibration Method," J.

- Struct. Eng-ASCE., Vol. 122, No. 6, pp. 651-656, 1996.
- 5) J. C. Russell and T. J. Lardner, "Experimental Determination of Frequencies and Tension for Elastic Cables", J. Eng. Mech.-ASCE, Vol. 124, No. 10, pp. 1067-1072, 1998.
 - 6) B. H. Kim and T. Park, "Estimation of cable tension using System Identification Technique: II. Theory", J. the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 25, No. 4A, pp. 661-668, 2005.
 - 7) B. H. Kim and T. Park, "Estimation of Cable Tension using System Identification Technique: II. Experiments and Applications", J. the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 25, No. 4A, pp. 669-675, 2005.
 - 8) Y. S. Park, S. M. Choi, B. G. Lee and M. J. Kim, "Estimation of Stay Cable Tension using String Vibration Theory", Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 9, No. 2, pp. 17-22, 2009.
 - 9) S. Ahn, M.-H. Kim and I.-B. Kim, "Estimation of Stay Cable Tension by Ambient Vibration Measurement in Seohae Cable-stayed Bridge", Proc. KSCE, pp. 1-4, 2001.
 - 10) J.-G Yoon, J. Sohn and S.-P. Chang, "A Study on Tension Measurement for Cable-supported Bridge", Proc. KSCE, pp. 117-120, 1999.
 - 11) K.-S. Kim, E.-K. Cho, C.-S. Lee, H.-K. Jeon and M.-S. Lee, "Design of Prestressed Concrete Cable-Stayed Bridge (Hwamyung Grand Bridge)", Magazine of the Korea Concrete Institute, Vol. 19, No. 5, pp. 58-61, 2007.