

시공 중 사장교 실측을 통한 케이블 장력 추정 기법 비교 연구

Comparative Study of Cable Tension Measurement Methods by In-situ Measurements on a Cable-stayed Bridge under Construction

조 수 진* · 임 진 석** · 신 성 우*** · 정 형 조**** · 윤 정 방***** · Ming L. Wang*****
Cho, Soojin · Yim, Jin-Suk · Shin, Sung Woo · Jung, Hyung-Jo · Yun, Chung-Bang · Wang, Ming. L.

요 약

사장교에서 케이블은 하중을 지지하는 주요 부재로, 케이블 장력은 사장교의 건전성과 안전도 평가에 있어서 매우 중요한 변수이다. 케이블 장력을 추정하기 위한 대표적인 방법으로는 로드셀을 이용한 직접법과 진동 계측 자료를 이용한 간접법 등이 있으며, 최근에는 자기장-응력 관계를 이용한 EM (Elasto-Magnetic) 센서 측정법이 개발되어 케이블 장력 추정에 적용되었다. 본 논문에서는 세 가지 장력 추정 기법을 실제 시공 중인 사장교에 적용하여, 그 성능을 상호 비교하였다. 본 연구는 한국의 KAIST와 미국 Northeastern 대학교의 공동연구로 수행되었다. 대상 교량은 부산 화명동과 김해 초정리를 연결하기 위해 현재 건설 중인 화명대교이다. 화명대교의 교량 형식은 2주탑 콘크리트 사장교 (주탑 경간장 270m, 총 사장교 구간장 500m)이며, 사장재로는 MS (Multi-Strand) 형 케이블이 사용되었다. 실험 당시 화명대교는 중앙경간의 폐합 후 선형관리를 위한 장력조정작업을 수행하였으며, 케이블 재긴장시의 정확한 장력관리를 위하여 로드셀을 이용한 Lift-off test 방법으로 케이블의 장력을 측정하였다. 이와 동시에 두 개의 케이블을 대상으로 진동 가속도 센서와 EM 센서를 설치하고 장력 계측을 수행하였으며, 재긴장 단계별 장력 변화치를 지속적으로 계측하였다. 계측된 결과를 바탕으로 케이블 장력 추정 기법의 정확성 및 실교량에서의 활용성을 비교하였다.

keywords : 케이블 장력, 직접법, 진동법, EM 센서, 사장교, 화명대교

1. 서 론

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. 사장교의 경우 시공 중, 그리고 공용상태에서 케이블의 장력을 지속적으로 산출함으로써 교량의 건전성을 감시할 수 있다. 케이블의 장력을 추정하는 기법으로, 로드셀 및 유압잭 등을 이용하여 케이블의 응력을 직접

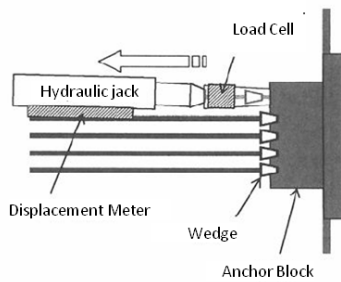
* 정회원 · KAIST 건설및환경공학과 박사후연구원 zelos@kaist.ac.kr
** 미국 Intelligent Instrument System Inc. 기술이사 jinsuk.yim@iis-system.com
*** 정회원 · 부경대학교 안전공학과 조교수 shinsw@pknu.ac.kr
**** 정회원 · KAIST 건설및환경공학과 부교수 hjung@kaist.ac.kr
***** 정회원 · KAIST 건설및환경공학과 교수 ycb@kaist.ac.kr
***** 미국 Northeastern 대학교 토목환경공학과 교수 mi.wang@neu.edu

측정하는 직접법과 케이블의 형상조건과 계측된 동적 특성을 활용하여 장력을 역산하는 진동법이 가장 많이 활용되고 있으며, 최근 들어서는 케이블 내부 강재의 응력변화로 인하여 유발되는 자기장 변화를 탐지하는 EM센서의 연구 및 활용이 증가하고 있다. 본 연구에서는 실제 시공 중인 사장교의 케이블에 본 3가지 장력 측정법을 적용하고, 그 결과를 비교분석하였다.

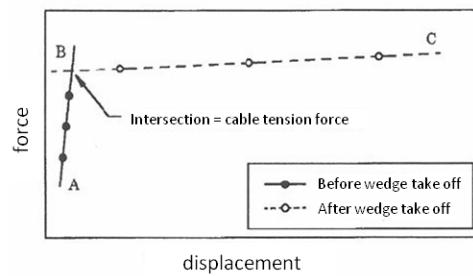
2. 사용된 장력 계측 방법

2.1. 직접법: 리프트오프 테스트(Lift-off Test)

리프트오프 테스트는 어스 앵커와 포스트 텐서닝 구조물의 텐션의 장력 계측에 많이 활용되는 직접법의 하나로, 유압잭과 로드셀을 이용한다. 그림 1(a)는 케이블에 리프트오프 테스트를 수행하는 방법을 나타낸다. 케이블의 스트랜드에 로드셀과 변위계, 유압잭을 설치하고 당기면, 그림 1(b)의 A-B구간과 같은 힘-변위관계가 나타나는데, 이때 당기는 힘이 케이블의 장력을 넘어서면 웨지(Wedge)가 들리면서 케이블의 전장이 힘을 받으므로, 힘-변위관계가 B-C와 같이 변한다. 이때 교점인 B에 해당하는 힘을 케이블의 장력으로 가정하는 방법이다.



(a) 리프트오프 테스트 방법



(b) 리프트오프 테스트에 의한 장력 결정

그림 1 리프트오프 테스트

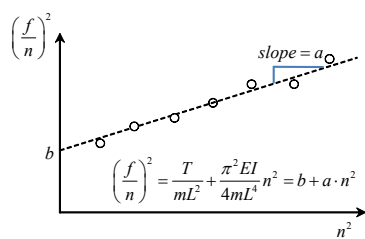


그림 2 진동법에 의한 장력 산정법

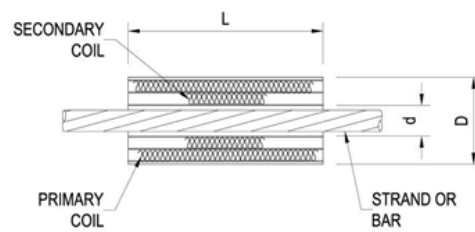


그림 3 EM센서의 구조

2.2. 진동법(Vibration Method)

진동법은 케이블에 가속도계를 부착한 뒤, 케이블에서 획득한 가속도 신호로부터 케이블의 고유진동수와 모드형상과 같은 동적 특성을 획득하고, 이와 케이블의 형상조건을 활용하여 케이블의 장력을 역산하는 방법이다. 일반적으로 케이블의 처짐이 크지 않은 경우, 그림 2와 같이 고유진동수 여러 개를 추출하여 그 각각을 모드차수로 나눈 값의 제곱 $(f_n/n)^2$ 과 해당 모드차수의 제곱 (n^2) 에 대한 1차회귀선을 그려 장력을 산정하는, Shimada(1994)가 제안한 방식을 많이 활용한다.

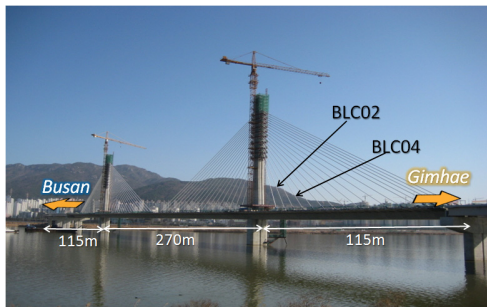
2.3. EM(Electro-Magnetic) 센서법

EM센서는 철과 같은 강자성체(Ferromagnetic)에 가해지는 장력과 같은 외력에 의하여 발생하는 자화이력(Magnetic loop)의 변화를 통하여 장력을 확인하는 방법이다. EM센서는 그림 3과 같이 강자성체를 강하게 자화시키기 위한 첫 번째 코일과, 자화도의 변화에 의하여 전류가 유도되는 두 번째 코일(센싱코일)로 구성되며, 첫 번째 코일에 강한 전압을 걸어주어 강자성체를 자화시키면서 두 번째 코일에 유도되는 전류를 측정하는 Power-stress Unit을 이용하여 측정한다. EM센서를 이용하여 장력을 측정하는 더 자세한 방법은 정운 등(2010)을 참조하기 바란다.

3. 시공 중 사장교 실측

3.1. 대상 교량 및 실험 과정

본 비교 연구를 위하여, 현재 부산 화명동과 김해시를 연결하기 위하여 낙동강 하류에 건설 중인 사장교(화명대교)에서 3가지 방법을 통한 장력 측정 실험을 수행하였다. 화명대교는 총 연장 500m(주경간 270m)의 프리스트레스트 콘크리트 사장교로, 내구성이 높은 MS(Multi-Strand)형식의 케이블을 사용, 시공되었다. 본 실험의 대상은 그림 4(b)와 같이 49개의 Strand로 구성되어 있는 김해 쪽 측경간의 두 번째(BLC02)와 네 번째(BLC04) 케이블로, 중앙 키세그먼트 조립 후 두 개의 케이블 재긴장 작업 중(12월 20일 21시-21일 05시)과 모든 케이블의 재긴장이 완료된 후에 측정을 수행하였다. 그림 5는 케이블 재긴장 작업 당시 수행한 리프트오프 테스트와, 진동법을 위해 설치한 가속도계, 그리고 EM센서용 코일의 모습이다.



(a) 화명대교

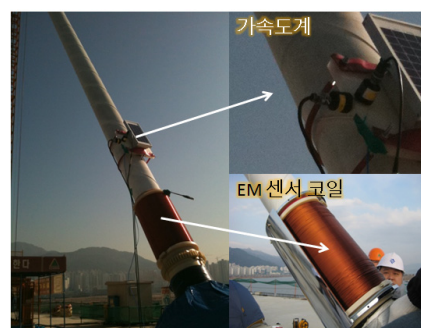
	면적	7,350 mm ²
	인장강도	13,671 kN
	탄성계수	195 kN/mm ²
	비중	67.54 kg/m
	스트랜드	49 strands

(b) 화명대교에 사용한 MS 케이블

그림 4 화명대교와 실험 대상 케이블



(a) 리프트오프 테스트



(b) 진동법을 위한 가속도계와 EM센서용 코일

그림 5 비교를 위한 실험 셋업

3.2. 결과 비교

표 1은 각 케이블의 재긴장 전후와 모든 케이블의 재긴장이 완료된 이후(4일 후)에 각 장력계측 방법을 통하여 측정된 장력이다. EM센서의 경우, 재긴장 당시 리프트오프 테스트 결과를 기준으로 현장 보정 (Calibration)을 수행하고 나서 장력을 추정하였으며, 재긴장 당시뿐만 아니라 재긴장 이후에도 정확도가 매우 높음(오차 1.5% 미만)을 알 수 있다. 진동법의 경우 현장 보정 없이, 주어진 정보와 계측한 고유진동수만을 이용하여 산정하였음에도 2.1%~6.0% 정도의 작은 오차를 보였다. 특히 모든 경우 약간 리프트오프 테스트 결과에 비해 약간 큰 값을 나타내었는데, 이는 케이블의 실제 길이보다 짧은 유효길이를 활용하여야 함을 의미하며, 이 또한 현장 실험을 통하여 보정할 수 있을 것이다.

표 1 장력 계측 결과 비교 (*는 보정에 활용된 값, 괄호 안은 리프트오프 테스트 기준 오차)

작업 및 계측시간	BLC02 (kN)			BLC04 (kN)		
	리프트오프 테스트	진동법	EM센서법	리프트오프 테스트	진동법	EM센서법
BLC04 재긴장 전 (20일 20:27-20:37)	-	3462	-	3245	3343 (3.0%)	3246* (-0.0%)
BLC04 재긴장 후 (20일 23:35-23:44)	-	3428	-	5077	5186 (2.1%)	5076* (-0.0%)
BLC02 재긴장 전 (21일 2:43-2:52)	3186	3349 (5.1%)	3188* (0.1%)	-	5072	-
BLC02 재긴장 후 (21일 4:14-4:23)	4693	4851 (3.4%)	4691* (-0.1%)	-	5058	-
재긴장 4일 후 (25일 20:53-21:02)	4626	4901 (6.0%)	4690 (1.5%)	4876	5067 (2.2%)	4930 (-0.6%)

4. 결론

시공 중 사장교인 화명대교에서 3가지 종류의 장력 측정 기법을 실험, 비교하였으며, 결론은 다음과 같다.

- 1) 리프트오프 테스트와 진동법, EM센서법 모두 케이블의 장력을 유사한 값으로 측정하였다.
- 2) EM센서는 현장 보정을 통하여 매우 높은 수준(1.5%미만의 오차)의 정확도를 보여주었으며, 그에 따라 상시 장력 모니터링에 활용도가 높은 것으로 판단된다.
- 3) 진동법의 경우 오차가 약간 크게 (6%미만) 나타났지만, 경제성과 효율성을 감안하면 활용도가 높은 것으로 판단되며, 현장보정을 수행할 경우 더 정확도를 높일 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 스마트 사회기반시설센터의 지원으로 이루어졌으며, 저자들은 이에 감사드립니다.

참고문헌

Shimada (2000) Estimating method of cable tension from natural frequency of high mode, *Proceeding of JSCE*, 501/1-29, pp.163-171 (in Japanese).

정운, 서주원, 임진석, Yang Zhao. (2010) EM센서를 이용한 사장교 케이블의 장력 측정, 한국소음진동공학회 춘계 학술대회논문집, pp. 365-366.