

스마트폰 내장 가속도계와 카메라를 이용한 케이블 장력 추정에 관한 연구

A Study on Cable Tension Estimation Using Smartphone Built-in Accelerometer and Camera

이형진*

Hyeong-Jin Lee*

〈Abstract〉

Estimation of cable tension through proper measurements is one of the essential tasks in evaluating the safety of cable structures. In this paper, a study on cable tension estimation using the built-in accelerometer and camera in a smartphone was conducted. For the experimental study, visual displacement measurement using a smartphone camera and acceleration measurement using a built-in accelerometer were performed in the cable-stayed bridge model. The estimated natural frequencies and transformed tensions from these measurements were compared with the theoretical values and results from the normal visual displacement method. Through comparison, it can be seen that the error between the method using the smartphone and the normal visual displacement is sufficiently small to be acceptable. It has also been shown that those errors are much smaller than the difference between the values calculated by the theoretical model. These results show that the deviation according to the type of measurement method is not large and it is rather important to use an appropriate mathematical model. In conclusion, in the case of cable tension estimation, it can be said that the visual displacement measurement and acceleration using a smartphone can be a sufficiently applicable method, just like the normal visual displacement method. It is also noteworthy that the smartphone accelerometer has a larger magnitude error and has more limitations such as high-frequency sampling instability compared to the visual displacement method, but shows almost the same performance as the visual displacement method in this cable tension estimation.

Keywords : Smartphone Accelerometer, Smartphone Camera, Visual Displacement, Cable Tension, Vibration Method

* 정회원, 교신저자, 창원대학교 공과대학 스마트 그린공학부 * Dept. of Civil Engineering, School of Smart & Green
건설시스템공학전공, 교수 Engineering, Changwon National University

E-mail: leehjn@changwon.ac.kr

1. 서론

사회 기간시설물의 구조물 안전도 평가에서 구조 거동 계측은 구조물의 실제 상황 정보를 획득하기 위한 필수적 과정이라 할 수 있다. 그러나 보통 이런 대형 구조물에서의 현장 작업은 계측 장비의 설치 및 운용에 따른 어려움이 크기 때문에 시공 시의 계측기 설치뿐만 아니라 추가적인 보완 계측을 위한 작업도 매우 어려운 편이다. 이러한 이유로 설치나 운용에서 편이성이 큰 계측 방법은 그 필요성이 매우 크다 할 수 있다.

이러한 배경에서 무선(Wireless) 계측 및 영상 변위(Visual Displacement) 계측법 등 다양한 연구가 이루어지고 있다[1],[2]. 스마트폰 가속도 센서를 이용하는 방법[3],[4]의 연구도 유사한 목적에서 진행되는 연구라 할 수 있다. 스마트폰 내장 가속도 센서는 스마트폰 자체의 다양한 기능성, 편의성 및 미래 확장성과 연계되어 큰 주목을 받고 있다. 그러나 샘플링 부정확성이나 크기 오차 문제 등으로 현재 기기 수준으로는 본격적인 계측에는 부족하다는 평가도 있다[3],[4].

이 논문에서는 일반 상용 캠코드를 이용한 영상 변위 계측이 크기 오차 등의 문제에도 불구하고 케이블 장력 추정 분야에서는 충분히 사용 가능한 방법이라는 연구 결과[2]에 기반하여, 스마트폰 내장 카메라 기능을 이용한 영상 변위 계측법의 적용성을 검토하는 연구를 수행하였다. 더불어 스마트폰 내장 가속도 센서 또한 정밀 계측에는 부족한 장비이나 케이블 장력 추정 분야에서는 유사한 적용성이 있을 것으로 판단하여 이에 관한 연구도 동시에 진행하였다. 이를 통해 스마트폰 내장 기능만으로도 유의미한 케이블 장력 추정이 가능함을 확인하려 하였다.

연구를 위해 사장교 모형 교량을 이용한 실험이 수행되었으며 그 결과는 이론값 및 기존 영상 변위 계측에 의한 결과와 비교하였다.

2. 진동법을 이용한 케이블 장력 추정법

케이블 장력 추정에는 케이블에 미리 장착된 광섬유나 로드셀 등으로 장력을 직접 계측하는 방법(Direct Method)과 케이블의 진동 계측의 결과로부터 장력을 환산하는 간접법(Indirect Method)이 사용된다. 진동법(Vibration Method)은 간접법의 대표적인 방법으로 케이블 진동으로부터 고유진동수를 추정하고 이를 장력-고유진동수 관계식으로 환산하는 방법이다(Fig. 1)[5].

진동법에서 사용하는 장력 추정식[5],[6]은 고유진동수들과 장력의 관계식이다. 장력이 작용하는 보(Fig. 2)의 운동방정식은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$m(x)\ddot{y} + (EI(x)y'')'' - (Ty')' = p(x,t) \quad (1)$$

여기서, $\ddot{y} = \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2}$, $y'' = \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2}$ 이며 m 은

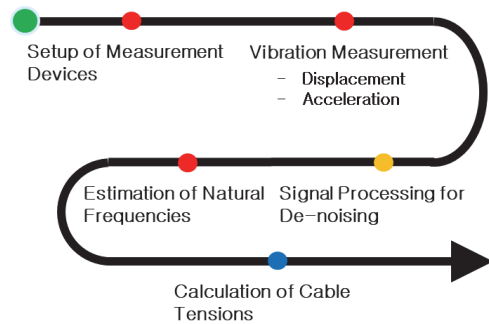


Fig. 1 Flow of cable tension estimation using vibration method

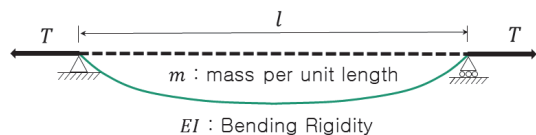


Fig. 2 Beam model under tension (distributed mass)

단위 길이당 질량, E 는 휨강도, T 는 케이블 장력이며, $p(x,t)$ 는 동적 분포하중이다. 이때, 케이블의 장력과 고유 진동수의 관계식은 아래의 식 (2)로 표현된다.

$$\left(\frac{f_n}{n}\right)^2 = \frac{T \cdot g}{4wl^2} + \frac{EI\pi^2g}{4wl^4} \cdot n^2 \quad (2-1)$$

$$= b + a \cdot n^2 \quad (2-2)$$

여기서 l 은 케이블의 길이, f_n 은 n 차 고유진동수, $w(=mg)$ 는 케이블의 단위길이당 중량, g 는 중력가속도이다. 또한 케이블 새그(Sag) 효과를 고려하거나, 케이블 단부 조건을 고려하는 응용도 존재한다. 이때 구조물을 보(Beam)가 아닌 현(String)으로 가정하여 휨강도(EI)를 무시하고 첫 번째 고유진동수만 사용하여 정리하면 식 (3)으로 표현될 수 있다.

$$(f_1)^2 = \frac{T \cdot g}{4wl^2} \quad (3)$$

이 논문에서는 식 (3)과 더불어 아래 식 (4)의 집중질량 모형(Fig. 3)도 같이 사용되었다. 현장 케이블과 달리 실제 모형 실험체에는 케이블 질량에 비해 무시할 수 없는 크기의 집중 질량체(타겟, 스마트폰)가 부착됨으로 연속질량 모형보다는 식 (4)의 집중질량 모형이 실험 상황에 더욱 부합되리라 판단하였다.

$$f_1^2 = \frac{Tg}{\pi^2 Wl} \quad (4)$$

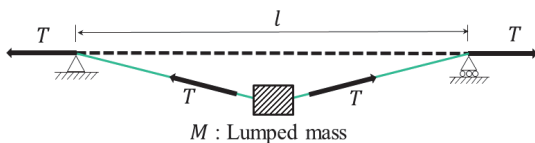


Fig. 3 String model under tension (concentrated mass)

여기서 $W(=Mg)$ 는 집중질량의 무게이며, 분포질량은 무시된다.

3. 동적 진동 계측을 위한 계측법들

진동법에서 가장 우선적인 문제는 고유 진동수 추정에 적합한 계측의 수행이라 할 수 있다. 비교를 위해 고전적 계측기와 최근 적용이 늘어난 편의성 기반의 영상 변위 계측, 그리고 스마트폰 내장 가속도센서에 대한 흐름을 정리하였다.

3.1 진동 계측을 위한 고전적 계측기기

진동의 계측은 계측되는 물리량에 따라 변형을 계측, 변위 계측, 가속도 계측으로 나눌 수 있다. 보통 변위 계측에는 LVDT(Linear Variable Displacement Transducer), 가속도 계측에서는 가속도계(Accelerometer)가 주로 사용된다(Fig. 4).

이들 계측기기 특히 대형 구조물용 계측 기기의 특성은 저주파 대역에서 우수한 성능을 보이는 전문 계측기기이나 가격이 비싸고 통신, 전력선의 설치 시공이 필요해 현장 작업이 매우 어렵다는 특징이 있다. 따라서 장기 모니터링용으로 구축된 시설 계측망에도 충분한 수의 계측기가 구비되지 못한 경우도 많다.

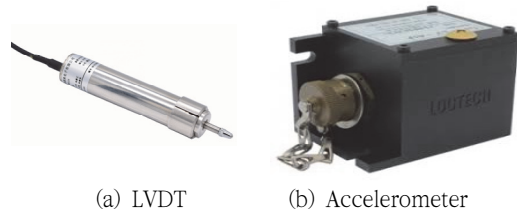


Fig. 4 Conventional transducers for vibration measurement in large infra-structures

3.2 영상 변위 계측

영상 변위 계측법은 최근 주목을 받는 변위 계측법으로, 고가 고정밀의 레이저 변위계와 같은 광학 계열 계측법이나 파동적 특성보다 간편한 영상을 이용하는 저비용의 방법이다.

영상 변위 계측법은 촬영된 이미지를 이미지 처리 기법으로 수치 데이터로 환산하는 방법이다 (Fig. 5). 영상 변위 계측법의 가장 큰 장점은 비접촉식 계측방식이라 복잡한 연결선 설치 작업이 필요 없다는 장점이 있다. 다만, 날씨 등에 따라 크기 정확도의 편차가 커 정확도 관리가 어려운 점이 있다. 그러나 계측에 나타나는 주파수 특성은 비교적 정확한 편이라 이들 주파수 특성이 중요한 영역(케이블 장력 추정 등)에서는 충분한 활용성이 있다고 판단되어져 왔다[2].

3.3 케이블 장력 추정을 위한 스마트폰 가속도 센서 및 영상 촬영 기능의 적용성

저주파 대역 고유 진동수를 가지는 토목 구조물 계측에서는 보통 압전형(Piezo-electric) 가속도계 대신 기계식 가속도계가 많이 사용되고 있다. 최근에는 다소 정밀도가 떨어지나 다수의 센서를 이용할 수 있다는 점에서 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 센서를 사용하는 방식도 많



Fig. 5 Setup for visual displacement measurement

이 연구되었다[1].

스마트폰에 내장된 가속도센서도 이런 MEMS 계열 센서로서, 스마트폰 환경과 결합하여 기능성, 적용성은 크게 확장되었으나 스마트폰 사용에 최적화되어 구조물 정밀 계측기로서는 부족한 측면이 많고 정확도 문제도 크다고 평가된다[3],[4]. 특히 고속 샘플링이 어렵다거나 샘플링 간격의 불규칙성(Sampling period jitter)으로 인해 실제 토목 구조물 계측(특히 고주파수 영역)에는 부적합하다는 판정이 있기도 했다. 그러나, 영상 변위 계측도 유사한 특성이 있었으나 케이블 장력 추정과 같은 특정 목적을 위해 충분히 잘 활용되고 있음을 주목할 필요가 있다[2].

이 논문에서는 이런 점에 착안하여 스마트폰을 이용한 영상 변위 계측법과 더불어 내장 가속도계를 이용하여 케이블 장력 추정을 방법의 기능성 및 적용성을 검토하였다.

4. 모형실험을 통한 특성 분석

4.1 실험개요

실험에 사용될 모형 교량은 사장교 형식으로 기둥 1800×90×90mm, 슬래브 3200×285×19mm, 다리 1000×38×90mm 목재로 제작되었다(Fig. 6).



Fig. 6 Cable stayed bridge model for experiments

케이블은 각각 1.1, 1.3, 1.5m의 세 종류로 하부에 추(무게 3, 5, 7 kgf)를 매달아 장력을 부여하였다(Fig. 7).

실험은 스마트폰 영상 변위 기능 검증과 가속도계 기능 검증의 두 가지 구성으로 이루어졌다. 비



Fig. 7 View of applying cable tension



Fig. 8 Target for VDM and smartphone for acceleration measurement

교를 위한 기준값으로 수식에 의한 이론값과 상용 캠코드(SAMSUNG NX2000, 해상도 1280x720)를 이용한 영상 변위에 의한 결과값이 사용되었다. 사용된 스마트폰 및 가속도 계측 어플은 갤럭시 S9(해상도 1920x1080)과 physics tool box이다. 영상 및 가속도의 샘플링은 모두 60Hz(영상의 경우는 60 FPS(Frames Per Second))로 통일되었다.

케이블 단위 길이당 중량은 0.0090 kgf, 스마트폰 무게는 0.1676 kg이며 타겟 무게는 0.0107 kgf이다. Fig. 8은 케이블에 설치된 영상 변위 계측용 타겟 및 스마트폰을 보이고 있다.

길이별, 장력별, 계측기별로 여러 조합의 실험이 진행되었고 이를 Table 1에 정리하였다.

4.2 스마트폰 영상 변위 기능 검증

스마트폰 영상 변위 계측 결과 및 비교를 위한 캠코드 계측의 결과는 Fig. 9에 보였다. 케이블에 충격하중을 가해 자유진동을 계측하였고 각각에서 고유 진동수를 추정하여 최종적으로 그 평균값을 사용하였다.

실험 여건상 동일 실험의 동일 계측이 아니기 때문에 두 시간이력의 직접 비교는 어려우나 두 경우 모두 자유진동을 잘 묘사하고 있음은 볼 수 있었다.

Fig. 10에는 계측 시간이력을 주파수 변환 후 고유 진동수를 추정한 결과를 보였다.

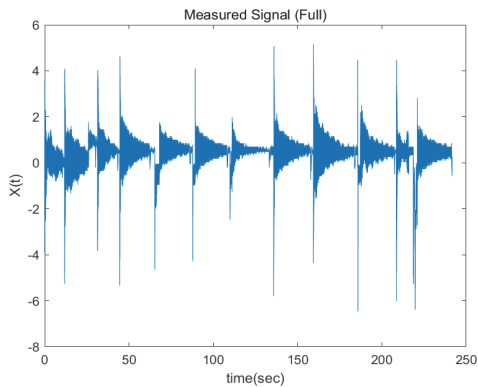
Table 1. Experimental cases

Measurement Devices		Smartphone Camera			Smartphone Accelerometer		
Leng. (m)	Tens. (Kgf)	3	5	7	3	5	7
	1.1	-VDM ^(*) using Normal Cam. vs. -VDM using smart phone camera				-VDM using Normal Cam. vs. -Acceleration using smart phone Accelerometer	
1.3							
1.5							

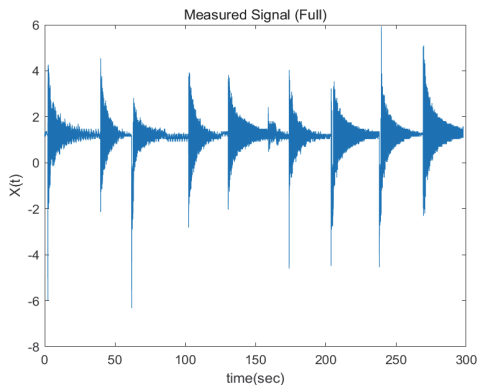
(*) VDM: Visual displacement measurement

스마트폰 영상 변위 결과는 연속질량 모형(식(3))에 따른 이론값과는 큰 오차를 보였으나 식(4)의 집중질량 모형에 따른 계산 고유 진동수(Cal_Lm2)와는 근소한 오차만 보였다(최소 0.09Hz, 최대 1.07Hz). 기준인 캠코더 영상 변위에 의한 값과는 최소 0.05Hz, 최대 0.43Hz의 차이를 보였다. 이 결과는 스마트폰 영상 변위 계측도 일반 영상 변위 계측과 동일한 수준의 사용이 가능하다는 의미로 해석되었다. 또한 이론값과의 차이가 실측값끼리의 차이보다 크게 나타나 장력 추정식의 모형식 설정이 중요함을 알 수 있었다.

Fig. 11에는 추정된 고유 진동수를 이용한 환산 장력을 비교하였다.

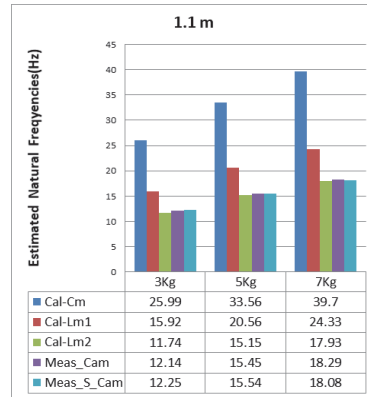


(a) VDM using normal camcorder

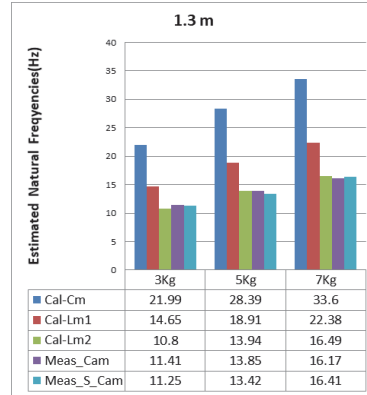


(b) VDM using smartphone camera

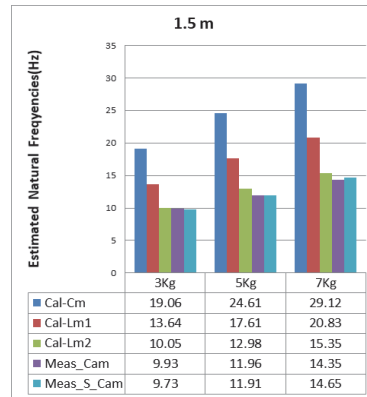
Fig. 9 Measured time histories (L=1.3m, T=3kgf)



(a) 1.1 m



(b) 1.3 m

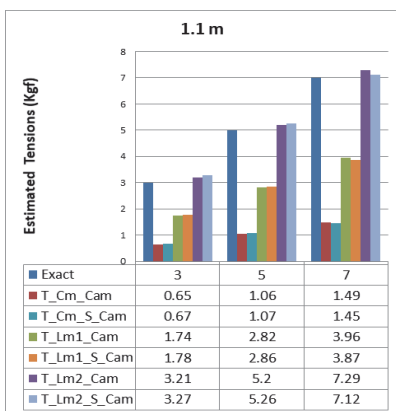


(c) 1.5 m

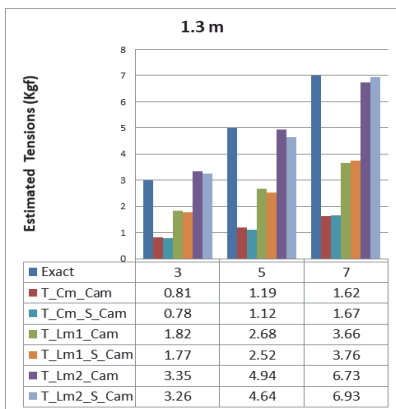
(*1) Cal : Calculated, Meas : Measured, Cm : Continuous mass, Lm : Lumped mass

(*2) Lm1 : Cable mass only, Lm2 : Use both Cable and Target mass

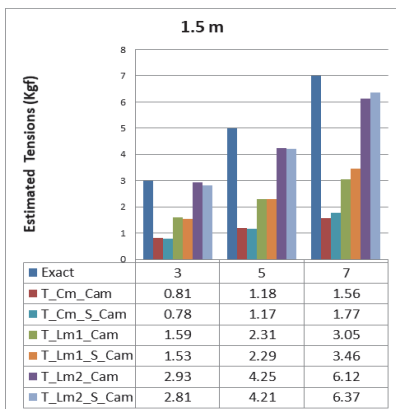
Fig. 10 Calculated and estimated natural frequencies



(a) 1.1 m



(b) 1.3 m



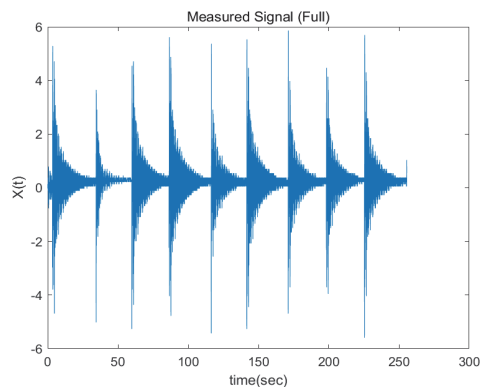
(c) 1.5 m

Fig. 11 Exact, calculated and estimated cable tensions

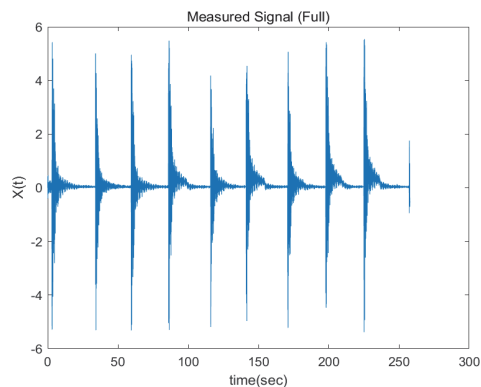
환산된 장력 중 충분한 집중질량을 고려한 집중질량 환산식(Lm2)의 장력이 가장 정확한 결과를 보였다 (실제 장력과 최소 0.06, 최대 0.88kgf차이, 영상변위 끼리는 최소 0.04, 최대 0.3kgf의 차이). 이로부터 스마트폰 영상도 영상 변위로 환산할 때, 충분히 활용 가능한 기능임을 확인할 수 있었다.

4.3 스마트폰 가속도 센서 기능 검증

스마트폰 가속도 센서를 이용한 계측의 결과 또 한 비교를 위한 캄코더 계측 결과의 함께 Fig. 12에 보였다. 실험, 계측 방식은 앞 절과 동일하다.

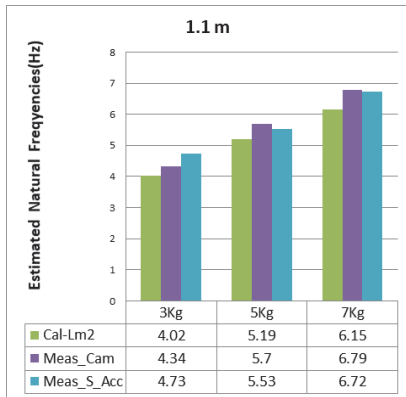


(a) VDM using normal camcorder

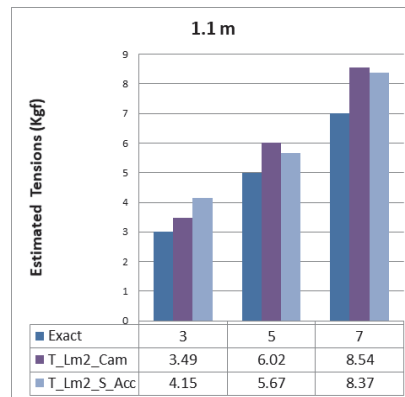


(b) Acc. using smartphone accelerometer

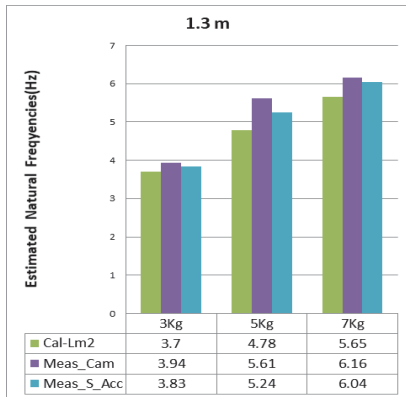
Fig. 12 Measured time histories (L=1.3m, T=3kgf)



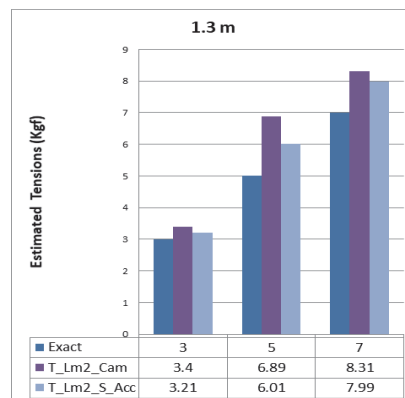
(a) 1.1 m



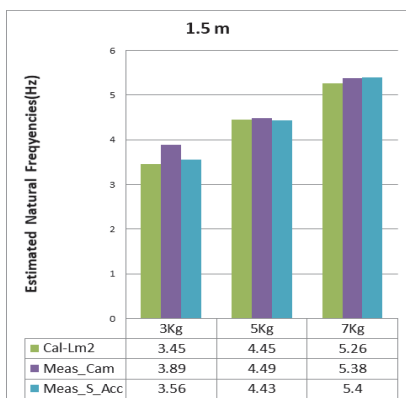
(a) 1.1 m



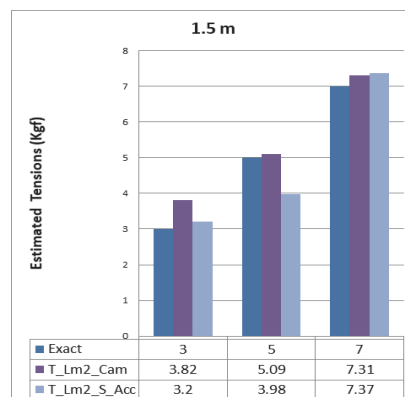
(b) 1.3 m



(b) 1.3 m



(c) 1.5 m



(c) 1.5 m

(*) S_Acc : Smartphone Acceleration
 (*) Lm2 : Use both smartphone and target mass

Fig. 13 Calculated and estimated natural frequencies

Fig. 14 Exact, calculated and estimated cable tensions

Fig. 13에는 고유 진동수를 추정된 결과를 보였다. 이 경우에는 부정확성이 큰 연속질량 모형식의 계산값은 배제하고 집중질량도 스마트폰 및 타겟 질량이 모두 포함된 경우만 보였다.

스마트폰 가속도센서를 이용한 결과는 식(4)의 계산 고유 진동수(Cal_Lm2)와는 최소 0.04Hz, 최대 0.71Hz의 차이를 보였으며, 비교용 캠코더 영상 변위에 의한 고유 진동수 값과는 최소 0.02Hz, 최대 0.52Hz의 차이를 보였다. 결과의 경향성은 앞의 영상 변위 사이의 결과와 유사하다. 더불어 앞 절의 영상 변위의 오차보다 이 결과의 오차가 유사하거나 더 작은 경우도 있어 스마트폰 가속도계측 또한 충분히 케이블 장력 추정에 사용될 수 있음을 보인다고 해석되었다.

Fig. 14에는 스마트폰 가속도계 검증 실험에서 추정된 고유 진동수를 이용한 환산 장력이 비교되었다.

이 검증에서도 집중질량 환산식(Lm2) 기준으로 상당한 정확도의 결과를 보여(실제 장력과 최소 0.09, 최대 1.89kgf 차이, 영상 변위와는 최소 0.06, 최대 0.88kgf의 차이) 스마트폰 가속도계로도 유의미한 장력 추정이 가능함을 확인하였다.

5. 결론

케이블 장력 추정은 케이블 구조물의 안전도 평가에서 가장 중요한 요소 중 하나이다. 이 논문에서는 스마트폰의 편의성, 확장성에 주목하여 스마트폰의 가속도 센서 및 영상 촬영 기능을 케이블 장력 추정에 적용하는 방법에 관한 연구를 수행하였다. 연구를 위해 사강교 모형을 이용한 실험이 수행되었으며 그 결과를 아래에 정리하였다.

1. 스마트폰 영상 변위 계측은 기존 영상 변위 계측법과 비교해 큰 차이 없는 유효한 결과

를 보였다. 이는 스마트폰 카메라 기능의 발달로 인해 스마트폰의 동영상 기능이 일반 캠코더 동영상 기능에 부족하지 않기 때문으로 보인다.

2. 스마트폰 가속도 센서의 기능 검증에서 우려되었던 주파수 범위 제한 문제나 샘플링의 불규칙성 문제는 이 연구의 주파수 대역에서는 큰 제한으로 작용 되지 않음을 확인하였다.
3. 실제 현장의 케이블과는 달리 실험의 케이블 장력 추정에서는 집중질량 모형이 더욱 적합한 것으로 평가되었다. 다만 사용된 모형식에 따라 상당한 오차가 발생하고 있어 실제 사용 현장에 따라 보다 정교한 모형식 사용이 중요하다고 평가되었다.
4. 스마트폰 가속도 센서의 검증 실험에서 스마트폰의 회전으로 인해 좌표축별 계측값의 크기 오차가 예상보다 더욱 크게 나타나는 문제가 있었음에도 주파수 특성은 비교적 정확히 계측되어, 이 계측 방법이 주파수 특성이 중요한 문제에는 충분히 적용성이 있음을 확인할 수 있었다.

결론적으로 스마트폰의 영상 촬영 기능이나 가속도 센서는 모두 케이블 장력 추정에 효과적으로 사용될 수 있다고 확인되었다. 더불어 크기 오차 문제, 샘플링 문제에 대한 보완이 있다면 스마트폰은 다양한 다른 구조물 계측 분야에서도 계측기로서의 역할을 충분히 수행할 수 있다는 가능성을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2021~2022년도 창원대학교 자율연구과제로 수행되었음.

참고문헌

- [1] Alessandro Sabato and Maria Q. Feng, "Feasibility of Frequency-Modulated Wireless Transmission for a Multi-Purpose MEMS-Based Accelerometer", *Sensors*, 14(9), pp. 16563-16585, (2014).
- [2] 김성완, 정진환, 김성도, "영상처리기술을 이용한 장대교량 케이블의 장력 측정", *한국구조물진단유지관리공학회 논문집*, Vol.22. No.2, pp. 115-123, (2018).
- [3] A. Sharma and D. Gupta, "Smartphone as a real-time and participatory data collection tool for civil engineers", *Int. J. Modrn. Comput. Sci.*, 2(5), pp. 22-27, (2014).
- [4] Adam J. Bittel, Ashraf Elazzazi, and Daniel C. Bittel, "Accuracy and Precision of an Accelerometer-Based Smartphone App Designed to Monitor and Record Angular Movement over Time", *Telemedicine and e-Health*, Vol. 22, No. 4, pp. 302-309, (2016).
- [5] H. Zui, T. Shinke and Y. Namita, "Practical Formulas for Estimation of Cable Tension by Vibration Method", *ASCE Journal of SE*, Vol. 122, No. 6, pp. 651-656, (1996).
- [6] 김두기, *구조동역학*, 4판, 구미서관, 서울, (2017).

(접수: 2022.08.16. 수정: 2022.09.13. 게재확장: 2022.09.16.)