

최소화된 계측 및 신호 처리 시스템을 이용한 상시진동 케이블의 효율적인 장력 추정에 관한 연구

이형진
창원대학교 토목공학과

A Study on the Efficient Tension Estimation of Cables under Ambient Vibration using Minimized Measurement and Signal Processing System

Hyeong-Jin Lee

Department of Civil Engineering, Changwon National University

요 약 최근 계측 기술의 발달에 따라 종래의 복잡하고 시간 소모적인 현장 계측분석 작업을 단순하고 편리하게 만드는 작업이 가능해지고 있다. 이런 배경에서 이 논문에서는 최소화된 계측 및 신호처리를 통해 상시진동 케이블의 장력을 추정하는 문제에 대해 연구하였다. 최소화 계측 방법으로는 저가 영상장비로 촬영된 동영상만을 이용하는 영상 변위 계측을 구상하였다. 또한 이로 인한 유효 주파수 대역 부족 문제의 해결을 위해 미러 주파수를 이용한 고유진동수 추정 방법을 제시하였다. 더불어 현장 사용 성능과 관련한 상시진동 문제를 처리하기 위해 신호처리 및 고유진동수 추정법으로 FDD 방법이 채택되었다. 제안된 최소화 계측 시스템과 미러 주파수 개념의 특성 및 FDD 방법의 적용성을 보기 위하여 사각교 모형을 이용한 실험적 연구가 수행되었다. 실험 결과는 상시진동을 위한 FDD 방법이 최소화 시스템을 이용한 고유진동수 판별에서도 효과적으로 잘 작동됨을 보여 주었다. 또한 미러 주파수 개념은 저속촬영에 따라 왜곡된 신호에서도 고주파수 영역에 있는 고유진동수 추정이 가능함을 보여 최소화 시스템의 한계 돌파에 효과적임을 보여 주었다. 결론적으로 실험결과는 제안된 최소화 계측 및 신호처리 시스템이 상시진동 케이블 장력 추정에 효과적인 방법이 될 수 있음을 보여주었다.

Abstract Recently, according to the development of measurement techniques, it has become possible to take complicated and time-consuming field measurements in a simple and convenient manner. In this background, this study estimated the tension of cables under ambient vibration using minimized measurement and signal processing. The VBDM using video-only by low-cost equipment was used as a minimized measurement. An estimation of the natural frequency using the mirror frequency concept was also proposed to solve the shortage of frequency band in this case. Furthermore, the FDD method was adopted for a natural frequency estimation in the ambient vibration related to field application. Experimental studies using a cable-stayed bridge model were carried out to examine the properties of the mirror frequency and the applicability of FDD with the proposed minimized system. The results showed that FDD for ambient vibration also works properly in an estimation of the natural frequency using the minimized system. In addition, the mirror frequency concept can allow a high natural frequency estimation even in a distorted signal by low-speed recording, which can overcome the limit of the minimized system. Overall, the proposed minimized system can be effective for the tension estimations of a cable under ambient vibration.

Keywords : Ambient Vibration, Cable Tension, Frequency Domain Decomposition, Minimized System, Vibration Method, Vision-based Displacement

이 논문은 2017~2018년도 창원대학교 자율연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Hyeong-Jin Lee(Changwon National Univ.)

Tel: +82-55-213-3774 email: leehjn@changwon.ac.kr

Received August 22, 2018

Revised (1st September 27, 2018, 2nd October 4, 2018)

Accepted November 2, 2018

Published November 30, 2018

1. 서론

케이블 지지 구조물에서 케이블 장력(Cable tension)은 구조물 안전성의 핵심이다. 특히, 케이블 지지 구조물은 그 특성상 사회 기간시설물인 경우가 많아 유지관리와 안정성 확보 측면에서 장력 관리는 그 중요성이 매우 크다 할 수 있다[1-2].

이런 중요성 때문에 최근의 케이블 장력 추정에는 시공부터 미리 계측기를 매립해서 직접적으로 장력을 측정하고 장기적으로 정교하게 관리하는 방식을 추구하고 있다 [3-4]. 그러나 경제적, 기술적 문제로 이런 시공이 이루어지지 않은 경우에는 진동법(Vibration method)[5-6] 등의 간접적인 장력 추정법도 여전히 사용되고 있다.

장력 추정 작업은 보통 대형 기간시설물에서 이루어지는 작업이라 장비설치, 계측 및 후속 작업이 복잡하고 비용이 많이 들며 현장의 각종 환경조건에 따른 오차 요인이 크다는 문제점이 있다. 이런 이유로 작업의 부담이 적고 현장 적용이 가능한 케이블 장력 추정 시스템을 구축하려는 시도가 많이 이루어지고 있다[6-9].

이 논문에서는 이런 노력의 일환으로 케이블 장력 추정에 최적화되고 좀 더 최소화된 시스템을 구축하고, 이에 따른 후속 문제를 해결하여 작업의 효율성과 경제성을 향상시키는 방안에 대해 연구하였다. 더불어 이 최소화 시스템의 현장 적용에 따른 정확도 저하를 줄이기 위한 적절한 신호처리 기법을 채택하고 이의 효율성, 정확성 검증을 통해 현장 사용성을 입증하려 하였다.

케이블 장력 추정을 위한 최소화된 계측 방법으로는 진동법을 이용한 케이블 장력 추정에 큰 장점을 가지는 영상변위 계측(Vision-based displacement measurement; VBDM)법[7-9]을 좀 더 단순화된 형태로 적용하였다. 또한 현장 사용성 문제에서 현장 오차의 가장 큰 요인인 상시진동(Ambient vibration) 문제[10-12]를 해결하는 방안으로, 적용성과 안정성이 잘 알려져 있는 주파수 영역 분해(Frequency Domain Decomposition; FDD) 방법 [10-12]을 도입하였다. 이때 이 논문의 최소화 시스템에 따른 오차 증가 상황에서도 FDD 법이 유효함을 보이고 적용 범위를 살펴보기 위한 실험적 연구가 수행하였다.

이 연구의 목표는 진동법에 따른 장력 추정에서 영상 변위 계측 자체의 문제점과 최소화 과정에 따른 문제를 개선하여 간편하고 효율적인 현장적용 방법의 개발로 요약할 수 있다.

2. 본 론

2.1 케이블의 장력 추정 관련 이론

케이블 장력의 추정에는 케이블에 미리 설치된 장력 센서를 이용하는 직접법과 케이블의 진동을 계측하여 환산하는 간접법이 사용된다.

후자의 방법 중에 가장 보편적인 방법은 변위나 가속도를 계측하여 고유진동수를 추정하고 이를 장력-고유진동수 관계식으로 환산하여 장력을 추정하는 진동법(Vibration method)[5-6]이 있다. 이들 방법도 계측 장비의 종류나 계측 신호의 처리법 및 장력 추정식의 종류에 따라 다양한 조합의 경우가 있다. 최근에는 변위나 가속도 계측을 위한 장비의 간소화 및 설치 작업의 단순화를 목적으로 영상 변위 계측[7-9]을 활용하는 문제가 많이 연구되고 있다.

Fig. 1은 영상 변위 계측법을 적용해서 케이블의 진동을 계측하고, 이를 적절히 신호처리(Signal processing)하여 구한 고유진동수를 이용하여 장력을 구하는 진동법[5-6]의 과정을 보이고 있다.

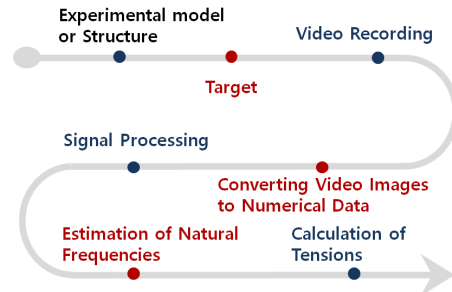


Fig. 1. Procedure of tension estimation using vision-based displacement measurement

이 논문에서는 저가 영상장비를 이용한 영상 변위 계측법을 채택하여 이에 따른 문제점을 해결하는 방안을 연구하였다. 또한 현장 적용을 목표로 계측 진동이 자유진동이 아닌 실제 현장에서 발생하는 상시진동인 경우에서 사용할 수 있도록 이 연구에서 제시된 최소화된 영상 변위 계측법과 효율적인 결합이 가능한 신호처리 기법의 선정 및 효율성도 연구되었다.

이 논문에서 사용된 영상변위 계측법, 신호처리법 및 장력 추정식을 다음에 요약하였다.

2.1.1 영상변위계측법

영상변위 계측법은 Fig. 2와 같이 캠코더 등의 영상장비로 촬영된 이미지를 이미지처리(Image processin)기법으로 수치적 데이터로 환산하는 방법이다.

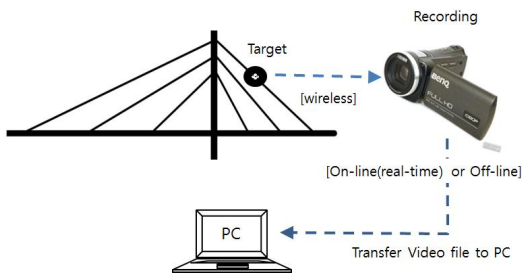


Fig. 2. Setup of vision-based displacement measurement

영상 변위 계측법의 가장 큰 장점은 비접촉식 계측방식이라 가속도계 설치에서와 같이 복잡하게 연결선을 설치하고 운용해야 하는 어려움이 없다는 것이다. 또한 비슷한 비접촉식 광학 변위계인 레이저 변위계에 비해서는 훨씬 경제적이라는 점도 있다.

단점은 날씨 등 광학적 상황, 영상 장비의 촬영속도 (Frames per secons; FPS)나 해상도(Resolution of image)에 따라 계측되는 진동수나 변위의 정확도가 제한되거나 왜곡된 결과를 얻을 수 있다는 것이다.

더불어 실시간 이미지 처리를 통한 수치 데이터 환산의 경우는 고속 영상 처리를 위한 각종 부가장치(Frame Graber 등)들이 필요하고, 아날로그 전기식 센서 등에 비해 Anti-aliasing이 쉽지 않아 고주파수 진동이 존재하는 경우에는 Anti-Aliasing을 위한 부가장치들이 필요하거나 어쩔 수 없이 고속촬영을 필수적으로 해야 하는 경우도 있다. 요약하면 영상 변위 계측법에서도 고가의 장비나 복잡한 작업이 필요한 경우가 종종 발생할 수 있다는 것이다.

그런데 토목구조물에서 취급하는 진동은 비교적 저주파수 진동이므로 고속촬영 장비나 부가장비의 필요성이 상대적으로 적은 경우에 해당되어 이 분야에의 응용이 많이 증가하고 있다[9].

이 논문에서는 이런 토목구조물에서의 영상 변위 계측법의 장점에 착안하여 이 장점을 극대화하는 방법에 대해 연구하였다. 이를 위해 실시간 동영상 처리나 고속 촬영 장비, Anti-aliasing 장비 등은 전혀 사용하지 않고 저가의 상용캠을 이용해 촬영된 동영상만을 사용하는 방

법을 구상하였다. 사용된 이미지 처리 방식은 문헌[7]의 이미지 처리 알고리즘을 응용하였다. 이때, 이미지를 실시간 수치 데이터로 환산하는 대신 촬영이 끝난 동영상을 PC에서 오프라인(Off-line) 방식으로 수치화하는 방법을 채택하여 실시간을 위한 여러 처리나 부가 장비가 없어도 되도록 경제적으로 구성하였다.

비록 토목구조물의 경우 고주파수 진동 측정의 필요성이 적다지만 이 논문에서와 같이 극도로 최소화된 저가장비를 이용하는 시스템에서는 지나치게 낮은 촬영속도의 영향으로 토목구조물에서조차도 충분한 주파수 대역을 확보할 수 없는 문제가 발생할 수 있다.

그런데 진동법을 이용한 장력 추정에서는 진동의 크기 오차나 일정 부분 주파수 왜곡이 있더라도 고유진동수 Peak의 주파수 위치를 판별할 수 있다면 장력 추정에는 큰 문제가 없다는 특징이 있다. 즉 저속촬영에 따른 Aliasing 발생으로 인한 진동의 왜곡이 발생해도 Peak 주파수 위치를 잘 판별할 수 있다면 충분히 만족스런 결과를 얻을 수 있다는 뜻이다.

이 논문에서는 이런 개념에 착안해서 Aliasing 발생에 따른 신호의 왜곡은 무시하고 고유진동수 위치 판별에 집중함으로써 주파수 대역 부족문제를 해결하는 방안을 고안하였다. 이 방법은 기본적인 모드이론[14]에서 간단히 유도될 수 있다.

미러 진동수를 이용한 고유진동수 추정

고유진동수 추정은 기본적으로 응답의 주파수 함수에서 Peak의 위치를 판별하여 구해진다.

이때 Nyquist 이론[14]에 따라 샘플링 타임(Sampling time)의 역수인 샘플링 주파수($f_s = 1/\Delta t$)의 반까지의 주파수 대역($0 \sim f_s/2$)이 고유진동수를 검출할 수 있는 이론적 범위가 된다.

그러나 실제 촬영속도 즉 샘플링 주파수가 부족하면 샘플링 타임이 부족해 질 수 있다. 이 말은 샘플링 타임이 충분하지 않은 저속 촬영 캠코더를 이용하는 경우, 유효 주파수 대역이 고유진동수 추정에는 부족한 경우가 있을 수 있다는 뜻이다.

이를 자세히 살펴보면 주파수 변환에서 주파수 축은 샘플링 주파수까지이나 절반을 기준으로 대칭인 결과를 보임으로 보통의 추정가능 주파수 영역은 샘플링 주파수의 반까지이다. 이때, 이 범위를 넘어선 고주파 진동이 있다면 (Fig. 3의 (A)) 거울의 상(Mirror image)에 해당

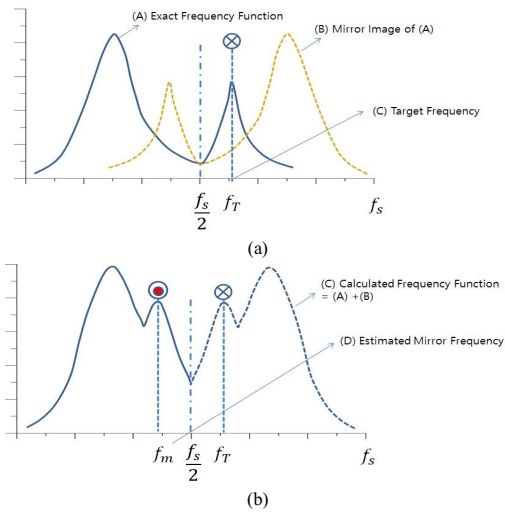


Fig. 3. Frequency function due to aliasing effect
(a) Exact frequency function and mirror image
(b) Actually estimated frequency function

하는 함수가 더해져서 왜곡된 주파수 함수 (Fig. 3의 (C))를 추정하는 Aliasing 현상이 발생하게 된다[14]. 이때 이렇게 Aliasing 현상으로 왜곡된 주파수 함수에서 실제 진동의 크기와 미러 진동의 크기를 온전히 분리해 내는 것은 불가능하지만 미러 진동수의 실제 주파수 위치 추정은 가능하다. 미러 이미지로 거짓 추정된 고유진동수(f_m)가 진짜 고유진동수의 미러 이미지임을 알고 있다면(구조해석결과나 사전 정보를 통해) 간단히 아래의 식으로 실제 고유진동수(f_T)로 환산할 수 있다.

$$f_T = f_m + (f_s/2 - f_m) \times 2 \quad (1)$$

이 식의 의미는 이론적으로 샘플링 주파수의 반까지인 유효 주파수 대역을 샘플링 주파수까지로 2배 확대할 수 있다는 뜻이 된다. 물론 실제로는 이론적인 유효 주파수 대역 중 0 Hz 근처와 $f_s/2$ 근처에서는 오차가 심하므로 확대 주파수 대역에서도 이들 영역과 더불어 f_s 부근에서의 결과는 신뢰성은 다소 떨어질 것이다.

2.1.2 상시진동을 위한 신호처리 방법

상시진동(Ambient vibration)은 보통 풍하중, 교통하중(Traffic loads) 등의 환경하중 (Environmental loads)에 의한 평상시의 진동을 뜻하고, 역학적으로는 구조물의 안전도와 상관없는 크기가 작은 미소진동의 경우를 의미하거나 입력하중을 계측할 수 없고 응답만 계측할 수 있다는 의미로 사용된다. 이 논문에서는 후자의 의미

로 특히 응답의 주파수 함수에서 고유진동수와 가진 하중의 Peak이 혼재되어 구별이 어려운 경우라는 뜻으로 사용되었다.

입력 가진 하중 계측 없이 응답만 계측하는 상시진동 문제는 구조 특성 파악에 많은 어려움을 유발한다. 그러나 현실적으로는 상시진동 만이 계측 가능하거나 강제진동(Forced vibration) 실험을 해도 상시진동이 상당량 포함된 계측결과인 경우가 많다. 특히 케이블 구조와 같이 자연환경에의 노출이 심한 대형 사회기간시설물에 대한 계측일수록 이런 경향이 강하다.

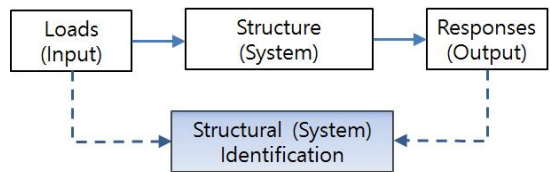


Fig. 4. Basic concept of system identification method

계측신호를 이용하여 구조물의 강성이나 모드 정보를 구하는 방법은 보통 구조추정법 (System identification method)이라 불린다. 이 방법은 Fig. 4와 같이 3가지 기본 요소 중 입력인 하중과 출력인 응답의 2 가지 요소를 이용하여 나머지 하나인 구조물 정보를 구하는 방법이다. 이때, 상시진동 계측과 같이 입력하중 없이 응답만으로 이루어지는 추정은 수학적으로 추정이 매우 어렵거나 불가능한 경우가 된다.

입력인 가진 하중이 걸리지 않는 상시진동 응답에는 구조물의 고유진동수 외에 가진 하중의 주파수 특성이 응답에 같이 혼재해 나타나게 되고 이 속에서 고유진동수를 판별해내야 한다. 따라서 보통은 부족한 정보 속에서 신호처리 기법과 해석정보를 총 동원하여 고유진동을 추정, 선별해내는 방식을 사용한다.

상시진동에 활용이 가능한 신호처리 기법은 그 필요성으로 인해 오래전부터 연구되기 시작해서 현재까지도 다양한 방법이 개발되어 오고 있다[10-12]. 이 분야에서의 최근 동향을 보면 Wavelet 변환을 이용하는 방법 등의 새로운 신호처리 기법[13]의 개발도 시도되기도 하나 대체적으로 안정성에 대한 검토가 충분히 이루어진 기법들의 성능향상이나 적용에 대한 연구가 많이 이루어지고 있는 편이다[11-12].

이 논문에서 사용된 최소화된 장력 추정 시스템도 기본적으로 현장 사용을 목표로 하고 있어 상시진동 신호

처리 기법의 도입이 필수적이라 생각되었다. 더구나 최소화 계측시스템에서는 가진 하중의 Peak 외에도 Aliasing 등으로 인한 응답계측 신호의 왜곡이 추가될 수 있어 고유진동수 판별을 위한 방법인 상시진동 신호 처리 기법들이 더욱 필요하고 도움이 되리라 판단되었다.

여러 기법들을 비교 연구한 문헌[11]의 결과를 보면 이들 방법은 시간, 주파수영역에 따라, 가진 하중의 형태를 가정하는 방식이나 다측점인 경우의 모드형상(Mode shape) 추정방식, 노이즈(Noise) 처리방식에 따라 다양한 형태로 존재한다. 그러나 이 논문에서 필요한 방법은 단일 측점의 결과만을 이용하여 고유진동수를 추정하는 경우이다. 따라서 이 경우에 사용하기 적합하고 오랫동안 검증된 방법인 주파수 영역 분해(Frequency Domain Decomposition (이하 FDD)) 방법[10-12]을 채택하여 최소화 시스템과의 결합에 따른 사용의 적합성과 문제점을 분석하였다.

이 논문에서 사용된 Direct Fourier Analysis(이하 DFA) 방법과 FDD방법을 아래에 정리하였다. DFA 방법은 최소화 계측시스템 하에서의 FDD 방법의 효과와 비교하기 위한 목적으로 실험적 모드 해석(Experimental modal analysis)[14]의 기본 개념만을 사용한 방법이다.

Direct Fourier Analysis

통상 기본적인 이론[14]에서 계측 응답에서의 다양한 진동 중에 고유진동(혹은 자유진동) 만을 남기기 위해 사용되는 가장 흔한 방법은 평균을 이용하는 방법이다. 이 방법은 Fig. 5와 같이 장시간 계측된 상시진동을 분할하여 각 구간의 주파수 함수를 평균해 나가는 방법이다.

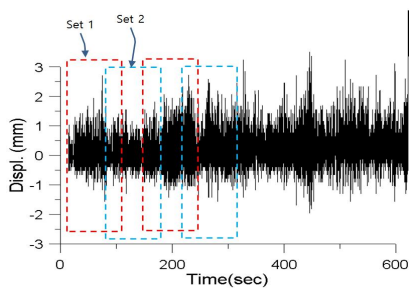


Fig. 5. Grouping of time history for average

평균작업을 진행함에 따라 구조물 고유 특성이라 시 불변(Time-invariant) 성질을 가진 자유진동(혹은 고유

진동)의 성분은 상대적으로 그 크기가 커지고, 시간변동 특성인 가진 성분이나 노이즈 성분은 그 크기가 작아진다는 개념이다. 다만 이 방법은 하중자체가 주파수 패턴을 가진 경우나 가진 하중의 크기가 큰 경우는 효과가 적어진다.

비교 목적의 DFA에서는 평균의의 다른 신호처리 방식은 도입하지 않았다.

Frequency Domain Decomposition[10-12]

FDD에서도 Fig. 5의 분할된 시간이력을 이용하는 것은 동일하다. 다른 점은 FDD법에서는 앞서의 주파수 함수 대신 통계적으로 의미 있는 PSD(Power spectral density) 함수를 이용하는 것이다. 또한 이 방법의 핵심이 되는 것으로 PSD 함수의 SVD(Singular value decomposition)에서 구한 특이값(Singular value)들의 Peak을 이용하여 고유진동수를 구한다는 것이다. 응답의 PSD 함수 $S_{yy}(\omega)$ 는 SVD를 이용하면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$S_{yy}(\omega) = U(\omega)^T \Sigma(\omega) V(\omega) \tag{2}$$

여기서 U 와 V 는 모드 형상 추정과 관련된 행렬로 단일화 행렬, 즉 $U^T U = U U^T = I, V^T V = V V^T = I$ 이고 Σ 는 특이값으로 구성된 대각행렬이다. 특이값들은 응답의 주파수 특성치로 고유진동수 부근에서는 모드 특성과 유사하다. 따라서 이 특성을 이용하여 고유진동수를 보다 체계적으로 수학적으로 구할 수 있다.

2.1.3 고유진동수와 장력의 관계식[5-6]

진동법에서 사용하는 장력 추정식은 고유진동수들과 장력사이의 관계식이다. 크게 케이블을 현(String)으로 고려한 경우, 보 구조로 취급하는 방법 등이 있다. 그 외에도 사용 모드 수, 케이블의 유효길이, 새그(Sag) 효과의 고려에 따른 다양한 방식의 장력 환산식이 존재한다. 이 논문에서는 고유진동수를 여러 개 사용하기 어려운 경우, 케이블의 길이 및 자중 정보 외에는 다른 정보가 부족한 경우에도 사용할 수 있도록 가장 간단한 형태인 식 (3)의 현의 이론에 따른 장력식을 사용하였다.

$$T = \frac{4wl^2}{n^2g} f_n^2 \tag{3}$$

여기서, l 은 케이블의 길이, f_n 은 n 차 고유진동수, w 는 케이블의 단위중량, g 는 중력가속도이다.

2.2 예제해석

2.2.1 모형실험 및 진동수 추정

제안된 장력 추정 체계의 특징과 효율성을 보이기 위해 사장교 구조모형에 대한 모형실험이 수행되었다. 모형교량에는 Fig. 6(a)와 같이 한 개의 주탑과 0.39m 간격으로 3개의 케이블을 설치하였다. 케이블의 길이는 각각 1.29, 1.03, 0.84m이며, 장력은 각각 3, 6, 9 kgf로 Fig. 6(b)의 형태로 가해졌다. 원래 교량의 장력은 차량 하중 등의 활하중에 따라 케이블 장력이 시간에 따라 변동될 수 있으나 이 논문에서는 검증의 편의를 위해 각 계측시간 동안 고정된 값이 되도록 구성하였다.

Fig. 6는 실험을 위한 실험체, 설치된 타겟과 캠코드를 이용하여 동영상을 촬영하는 모습을 보여준다. 영상 장비로 상용 캠코드 중에서 비교적 고속촬영이 가능한 제품(최고 촬영속도 60 FPS)을 사용하였다. 촬영속도별 최고 해상도는 각각 30 FPS에서 1280x720, 60 FPS에서 720x480로 정밀한 수준은 되지 못했다.

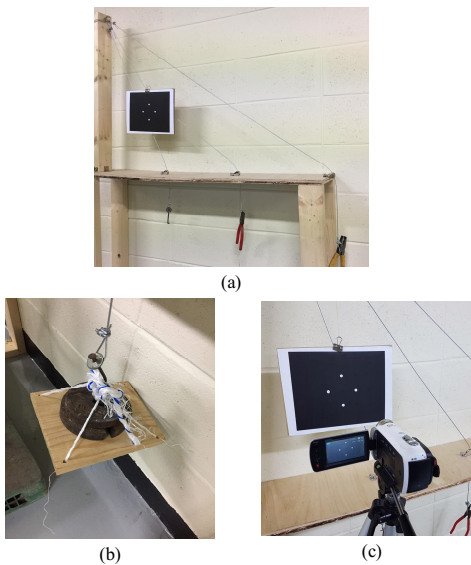


Fig. 6. Experimental setup

- (a) Model of cable-stayed bridge
- (b) Applied load (c) Target and cam-corder

실험은 길이, 장력, 촬영속도의 조합에 따라 총 18가지로 각 경우의 상세는 Table 1에 보였다. Table 1에서 기호 ‘○’은 예측 고유진동수가 이론적인 유효주파수 대역에 있는 경우, ‘△’은 미러 진동수 개념 (2.1.1절)을 사

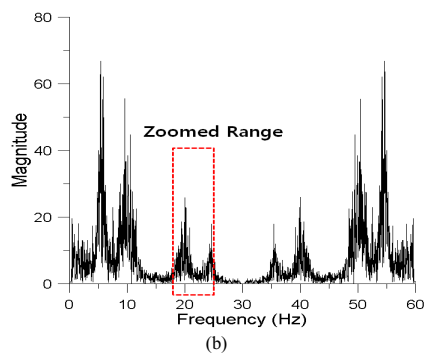
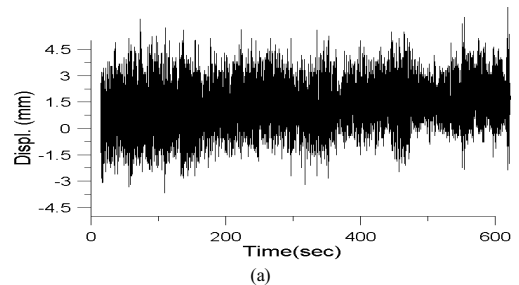
용한 경우, ‘×’은 고유진동수 추정이 불가능한 경우에 해당한다.

Table 1. Specification of cases

Case	Cable Length (m)	Applied Tension (kgf)	Calculated Nat. Freq. (Hz)	Detectability According to FPS	
				60	30
1	1.29	3	11.74	○	○
2		6	16.60	○	△
3		9	20.33	○	△
4	1.03	3	14.70	○	○
5		6	20.79	○	△
6		9	25.46	○	△
7	0.84	3	18.02	○	△
8		6	25.49	○	△
9		9	31.22	△	×

○ : Detectable, △ : Detectable by Mirror Freq.,
× : Undetectable

실험을 위한 상시하중으로 교통하중 등에 따른 케이블 진동을 모사하기 위하여 상판을 통하여 케이블에 랜덤하중을 가하였다. 이 실험의 주목적이 최소화 시스템에서 주파수 패턴이 있는 상시하중에 의한 경우에도 상시진동 신호처리 기법이 유효하고 적절한 지를 살펴보는 것이므로 가진 하중은 주파수 패턴이 다양하도록 무작위로 가해졌다.



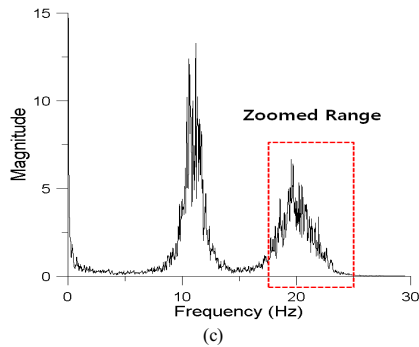


Fig. 7. Measured time history, frequency and PSD functions (129cm 9kg, 60FPS)
 (a) Measured time history (b) Frequency function in DFA (No window) (c) PSD function in FDD (Hanning window)

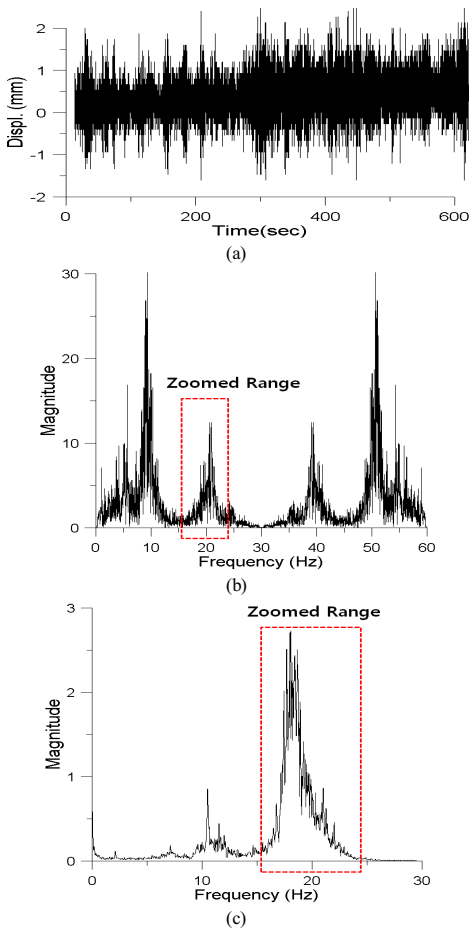


Fig. 8. Measured time history, frequency and PSD functions (84cm 3kg, 60FPS)
 (a) Measured time history (b) Frequency function in DFA (No window) (c) PSD function in FDD (Hanning window)

각 경우에 대한 계측으로 각각 10여분의 동영상촬영이 이루어졌다. 이들 동영상은 PC에서 수치 데이터로 환산되었고, 수평, 수직의 2개 성분 중 수직 성분을 사용하였다. 계측된 데이터는 중복구간 500개인 2048개씩으로 나누어(겹침 비율 24.41%) 각각 DFA, FDD법이 적용되었다. 이 경우 각 동영상의 길이가 조금씩 다르지만 60 FPS의 경우 대략 20여회, 30 FPS의 경우 대략 10여회의 평균이 이루어졌다.

계측된 시간이력, DFA 방법에서의 구해진 주파수함수 그리고 FDD 방법에서의 PSD 함수의 일부는 Fig. 7-8에 보였다. 이때 (b)의 결과에 비해 (c)의 FDD 방법에 의한 결과에서 Peak의 수가 뚜렷하게 줄어들어 있음을 볼 수 있다. 이는 상시진동을 위한 신호처리의 효과와 필요성을 보여주는 것이라 생각된다. 그럼에도 일부 고유진동 외의 Peak이 남아있는 이유는 최소화 시스템 사용으로 Aliasing 효과가 발생하여 고주파수 진동의 Peak 들이 저주파수에서 보이는 현상과 상시하중의 주파수 패턴이 강하게 존재한 때문으로 판단되었다.

고유진동수 추정은 통상적인 방법과 같이 해석 정보 등을 바탕으로 고유진동수 추정을 위한 주파수 대역(Fig 7-8의 점선 박스 영역)을 설정하여 이루어졌다. 이때 일반 상시진동의 경우 보다 실험에 사용된 최소화 시스템을 통한 상시진동 계측의 왜곡이 더욱 심하여 고유진동수 추정을 위한 주파수 대역의 설정이 좀 더 세심하게 이루어져야 할 것으로 생각되었다.

결론적으로 FDD 방법에서 사용하고 있는 상시진동 신호처리 방법은 최소화 시스템에서의 상시진동에서도 충분히 유효하나 고유 진동수 추정 단계에서 정밀 계측의 상시진동에 비해 좀 더 세심하게 처리할 필요가 있다고 판단되었다.

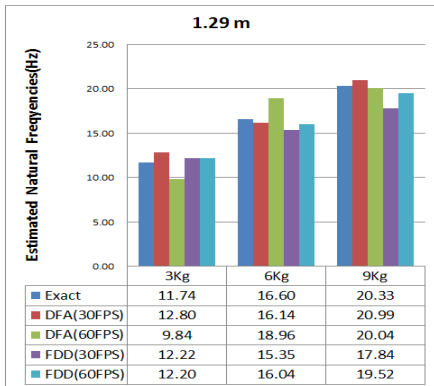
이들 주파수 함수와 PSD 함수를 이용하여 추정된 고유진동수는 Fig. 9에 보였다. Fig. 9의 결과에는 미리 진동수 개념 추정이 가능한 경우(Table 1 참조)는 이로부터 구한 고유진동수를 사용하였다.

60FPS의 경우에 대한 결과가 30FPS의 결과보다 안정적이었다. 다만 30FPS의 결과가 대부분 미리 진동수 개념을 활용하여 구해졌음에도 정확도의 저하가 크지 않아 제시된 미리 주파수 개념이 충분히 활용 가능한 방법임을 보인다고 판단되었다. 전반적으로 FDD 법의 PSD 함수가 DFA 법의 주파수 함수 보다 안정적이듯이 고유진동수 추정도 FDD 법의 PSD 함수에 의한 결과가 편차

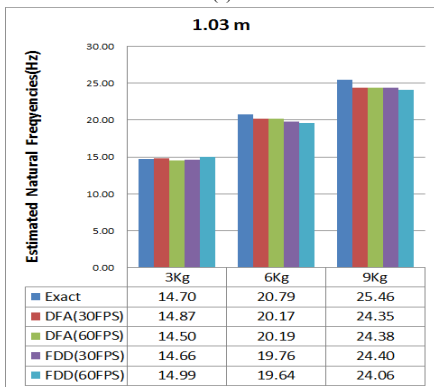
가 적은 보다 안정적인 결과를 볼 수 있다. FDD 법의 경우가 촬영속도에 따라 결과의 편차가 작다는 것은 FDD 법의 고유진동수 판별 능력에 따라 신호 왜곡의 영향을 덜 받기 때문이라 생각되었다. 이는 최소화 시스템에서도 상시진동 신호처리 기법이 중요한 역할을 할 수 있음을 보이는 내용이라 생각되었다.

2.2.2 장력추정

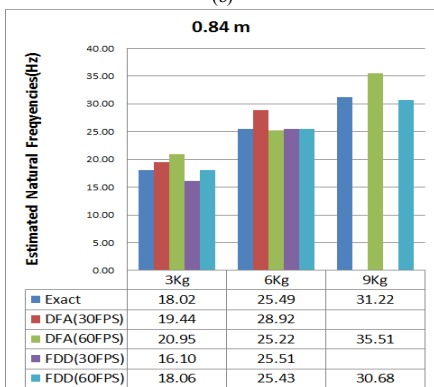
Fig. 9의 추정된 고유진동수로 최종 목표에 해당하는 장력을 계산하여 Fig. 10에 보였다. 고유진동수와 장력의 일대일 대응 관계식이 사용되었으므로 나타난 결과의 경향은 고유진동수 추정에서의 동일하였다.



(a)

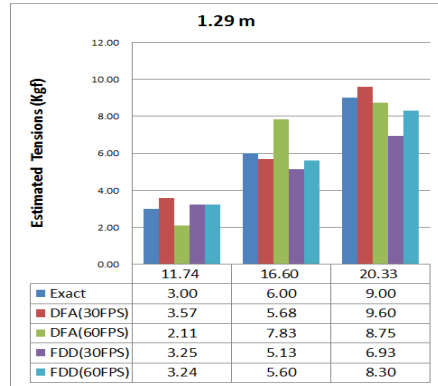


(b)

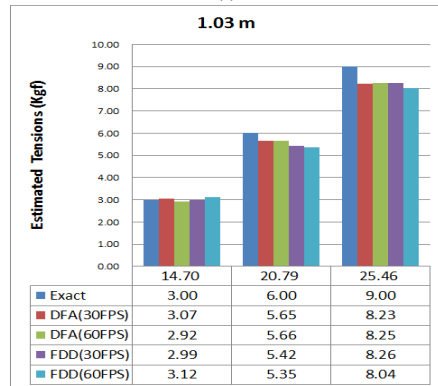


(c)

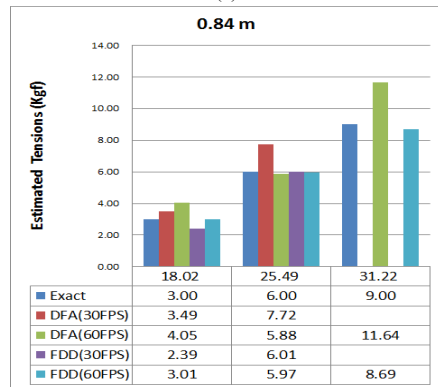
Fig. 9. Exact and estimated natural frequencies
(a) 1.29 m (b) 1.03 m (c) 0.84 m



(a)



(b)



(c)

Fig. 10. Exact and estimated cable tensions
(a) 1.29 m (b) 1.03 m (c) 0.84 m

추정된 장력에는 몇몇 돌출된 부정확성(Outlier)도 있으나 대체적으로 충분히 사용 가능한 정확도를 가진다고 판단되었다. 이들 부정확성은 30FPS, DFA 경우에 주로 나타나므로 촬영속도나 적절한 신호처리 방법이 중요함을 보여준다 할 수 있다.

3. 결 론

이 논문에서는 상시진동 케이블의 장력 추정을 위한 효율적인 최소화 계측시스템을 구축하고 이에 수반된 문제를 개선하는 방법에 대해 연구하였다. 이를 위해 영상 변위시스템을 채택하되 최소한의 장비를 사용하는 방법을 구상하였다. 또한 미리진동수 개념을 도입하여 저속 촬영에 따라 제약되는 주파수 대역 문제를 해결하려 하였다. 더불어 현장 적용에 필수적인 상시진동 신호처리 체계를 도입하였고 이 방법의 최소화 시스템에서의 특성을 조사하였다. 이에 대한 결과를 아래에 정리하였다.

- 1) 최소화 계측시스템의 구축을 위해 저가 영상장비로 촬영된 동영상만을 이용하는 방안을 구상하였다. 이때 계측된 진동 신호가 왜곡되어 저해상도에 따른 크기 오차 문제, 저속촬영에 따른 유효 주파수 대역 부족 문제 등이 있을 수 있으나 케이블 장력 추정에 대한 활용에는 충분히 사용할 수 있음을 확인하였다.
- 2) 최소화 시스템의 문제점 중 촬영속도에 따른 유효 주파수 대역 부족 문제는 제시된 미리 진동수 개념을 이용하면 일정부분(2배까지) 확대할 수 있어 저가 영상장비로도 대부분의 케이블 장력 추정에 적용할 있음을 볼 수 있었다.
- 3) 최소화 계측시스템의 현장 적용을 위해 상시진동 처리 기법인 FDD 방법을 도입하였다. 이 방법이 최소 시스템 하의 상시진동 처리에서도 충분히 사용 가능함을 볼 수 있었고 저가 장비로 인한 신호의 왜곡 문제에서도 효과가 있는 것으로 판단되었다.
- 4) 전반적으로 일반적인 정밀도의 상시진동 케이블 장력추정에는 제시된 최소화 계측 및 신호처리 체계가 충분한 효용성이 있다고 생각된다.

References

- [1] S. K. Kim, H. M. Koh, J. W. Lee, I. H. Bae, "Signal Analysis from a Long-Term Bridge Monitoring System in Yongjong Bridge", *Journal of Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.10, No.6, pp.9-18, 2006.
DOI: <https://dx.doi.org/10.5000/EESK.2006.10.6.009>
- [2] S. Jo, H. Cho, S. Jang, J. Park, H. J. Jung, C. B. Yun, B. F. Jr. Spencer, J. W. Seo, "Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using wireless smart sensor technology: data analyses", *Smart Structures and Systems*, Vol.6, No.5_6, pp.461-480, 2010.
DOI: https://dx.doi.org/10.12989/sss.2010.6.5_6.461
- [3] Z. Zhou, X. Zhao, C. Wang, Z. Zhang, Q. Hu, J. Ou, "A new kind of smart bridge cable based on FBG sensors", *SPIE Proceedings*, Vol.5502, pp.196-199, Spain, 2004.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1117/12.566622>
- [4] J. Im, M. L. Wang, S. W. Shin, C. B. Yun, H. J. Jung, J. T. Kim, S. H. Eem, "Field application of elasto-magnetic stress sensors for monitoring of cable tension force in cable-stayed bridges", *Smart Structures and Systems*, Vol.12, No.3, pp.465-482, 2013.
DOI: https://dx.doi.org/10.12989/sss.2013.12.3_4.465
- [5] H. Zui, T. Shinke, Y. Namita, "Practical Formulas for Estimation of Cable Tension by Vibration Method", *Journal of Structural Engineering*, Vol.122, No.6, pp.651-656, 1996.
DOI: [https://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1996\)122:6\(651\)](https://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:6(651))
- [6] S. Cho, C. B. Yun, S. H. Sim, "Evaluation of Cable Tension Forces Using Vibration Method for a Cable-stayed Bridge under Construction", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol.29, No.2, pp.38-44, 2014.
DOI: <https://dx.doi.org/10.14346/JKOSOS.2014.29.2.038>
- [7] J. J. Lee, M. Shinozuka, "A vision-based system for remote sensing of bridge displacement", *NDT & E International*, Vol.39, No.5, pp.425-431, 2006.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.12.003>
- [8] S. W. Kim, N. S. Kim, "Multi-point Displacement Response Measurement of Civil Infrastructures Using Digital Image Processing", *Procedia Engineering*, Vol.14, pp.195-203, 2011.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.023>
- [9] D. Feng, T. Scarangelo, M. Q. Feng, Q. Ye, "Cable tension force estimate using novel noncontact vision-based sensor", *Measurement*, Vol.99, pp.44-52, 2017.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.020>
- [10] R. Brincker, L. Zhang, P. Andersen, "Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition", *Smart Materials and Structures*, Vol.10, No.3, pp.411-445, 2001.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/10/3/303>
- [11] J. H. Yi, C. B. Yun, "Comparative study on modal identification methods using output-only information", *Structural Engineering and Mechanics*, Vol.17, No.3_4, pp.445-466, 2004.
DOI: https://dx.doi.org/10.12989/sem.2004.17.3_4.445
- [12] D. Zenunovic, M. Topalovic, R. Folic, "Identification of

Modal Parameters of Bridges Using Ambient Vibration Measurements”, *Shock and Vibration*, Vol.2015, Article ID 957841, pp.1-21, 2015.

DOI: <https://dx.doi.org/10.1155/2015/957841>

- [13] K. K. Wijesundara, C. Negulescu, E. Foerster, “Estimation of Modal Properties of Low-Rise Buildings Using Ambient Excitation Measurements”, *Shock and Vibration*, Vol.2015, Article ID 173450, pp.1-18, 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.1155/2015/173450>
- [14] D. J. Erwins, *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, 2nd Edition, Research Press Ltd, 2000.
-

이 형 진(Hyeong-Jin Lee)

[정회원]



- 1992년 2월 : KAIST 토목공학과 (토목공학석사)
- 1997년 2월 : KAIST 토목공학과 (토목공학박사)
- 2003년 2월 ~ 2004년 1월 : 미국 UCI, 방문연구원
- 1997년 9월 ~ 현재 : 창원대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

구조 동역학, 구조물 건전성 모니터링, 구조물 계측, 손상도 추정