

ARX모델기반 가상센싱을 통한 사장교 케이블의 장력 추정

Estimation of Cable Tension Force by ARX Model-Based Virtual Sensing

최가희¹⁾ · 신수봉^{1)*}

Choi, Gahee¹⁾ · Shin, Soobong^{1)*}

¹⁾인하대학교 토목공학과

¹⁾Department of Civil Engineering, Inha University

/ A B S T R A C T /

Sometimes, it is impossible to install a sensor on a certain location of a structure due to the size of a structure or poor surrounding environments. Even if possible, sensors can be frequently malfunctioned or improperly operated due to lack of adequate maintenance. These kind of problems are solved by the virtual sensing methods in various engineering fields. Virtual sensing technology is a technology that can measure data even though there is no physical sensor. It is expected that this technology can be also applied to the construction field effectively. In this study, a virtual sensing technology based on ARX model is proposed. An ARX model is defined by using the simulated data through a structural analysis rather than by actually measured data. The ARX-based virtual sensing model can be applied to estimate unmeasured response using a transfer function that defines the relationship between two point data. In this study, a simulation and experimental study were carried out to examine the proposed virtual sensing method with a laboratory test on a cable-stayed model bridge. Acceleration measured at a girder is transformed to estimate a cable tension through the ARX model-based virtual sensing.

Key words: Virtual sensing, ARX model, Cable tension force, Unmeasured response

1. 서론

교량등과 같은 사회기반시설의 관리를 위해 물리센서를 이용하여 구조물의 거동을 측정하는 것은 중요하다. 하지만 가속도계, 변위계, 변형률계 등과 같은 센서들은 복잡화, 대형화되고 있는 구조물들에 적용하는데 여러 제약사항이 존재한다. 예를 들어 해상에 존재하는 장대교량의 경우 해풍 및 외부에서 작용하는 하중과 같은 주변 환경조건의 영향으로 인해 정확한 데이터의 측정이 불가하므로 물리센서를 사용하여 거동을 측정하는데 문제가 있다. 뿐만 아니라 설치되는 센서의 비용이 고가인 경우 구조물의 유지관리를 위해 사용하는 것에 어려움이 있으며, 측정을 하고자 하는 데이터의 성질이나 상태가 물리센서에 의한 측정만으로는 불가한 경우도 존재한다. 이러한 문제들을 극복하기 위해 가상센서의 필요성이 제기되고 있으며[1], 이는 앞으로도 증가할 것으로 보인다.

이러한 물리센서의 문제점을 보완하기 위하여 다양한 가상센싱기법들

이 기계, 화학, 유체역학 등 많은 분야에서 활발히 연구·적용되고 있다. 건설분야의 경우 가상센싱을 이용한 단순 구조모델 적용사례가 존재하지만 [2, 3] 제시되어 있는 기법들은 전체 시스템을 식별하기 위해 여러 과정을 거치며, 경우에 따라 많은 변수들을 추정하거나 수차례의 트레이닝 과정을 반복하는 등 복잡한 단계를 필요로 한다. 본 연구는 교량 구조물에서 물리센서를 이용하여 측정이 불가한 거동을 추정하기 위해 전달함수를 이용한 가상센싱기법을 제안한다. 입출력데이터를 이용한 전달함수의 경우 제시되어 있는 방법들과 달리 전체 시스템을 반영할 필요가 없다.

본 연구에서는 구조물에서 임의의 측정데이터 획득이 가능한 지점 A와 획득이 불가능한 지점 B를 정하고 이들 거동 사이의 고유한 성질을 나타내는 전달함수를 구조해석을 통해 형성하여 지점 B에서의 데이터를 추정하는 방법을 제안하였다. 형성된 전달함수는 SISO (Single Input Single Output) ARX모델로 입력 값과 출력 값으로 구성하였다. 연구를 통해 추정하고자 하는 대상을 사장교 케이블의 장력으로 설정하고 일반적으로 가속도계가 설치되는 거더 상의 한 지점의 가속도와 케이블의 가상 가속도의 관계를 정의하는 전달함수를 통해 케이블의 가속도를 추정하였다. 추정된 가속도를 FFT 변환하여 구한 고유진동수를 이용, 최종적으로 케이블의 장력을 추정하는 과정을 수행하였다.

*Corresponding author: Shin, Soobong

E-mail: sbshin@inha.ac.kr

(Received January 6, 2017; Revised June 8, 2017; Accepted September 8, 2017)

2. 이론적 배경

2.1 가상센싱

가상센싱(virtual sensing) 기술은 센서를 실제로 설치하지 않았음에도 센서를 부착한 것과 같이 원하는 위치의 데이터를 획득하는 기술을 의미한다. 물리센서를 대체할 수 있는 대안으로 제시되고 있으며, 가상센싱기법은 접근방법에 따라 크게 해석적기법(Analytical techniques)과 실험적기법(Empirical techniques)으로 구분할 수 있다.

해석적기법은 시스템의 정보를 포함하는 해석적 혹은 수치적 모델을 사용하여, 측정(measurements), 모델(models), 추정알고리즘(estimation algorithms)을 주요 요소로 구성한다. 실험적기법은 과거에 측정된 데이터를 기반으로 하거나 다른 측정 가능한 변수들과의 관계를 기반으로 데이터를 추정한다. 주로 다양한 회귀분석 등의 방법을 통해 구현되며 데이터 기반으로 접근하기 때문에 트레이닝 과정을 필요로 하는 경우가 많다[4].

기계, 자동차, 로봇, 화학, 유체, 소음 등의 다양한 공학 분야에서 가상센싱이 활용되고 있으며[5-10] 최근에는 IoT기술과 접목하여 건강관리, 무선 계측 등[11, 12]에도 이용되고 있다.

2.2 ARX모델

전달함수란 시스템의 입력값과 출력값의 상관관계를 함수 형태로 나타내어 정의하는 것으로 시간영역의 전달함수와 주파수영역의 전달함수로 나뉜다. 일반화된 시간영역의 전달함수 모델은 식(1)로 표현할 수 있다.

$$A(q)y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}x(t) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t) \tag{1}$$

여기서, $A(q)$, $B(q)$, $C(q)$, $D(q)$, $F(q)$ 의 전달함수모델은 후진연산자인 q 를 이용하여 $A(q) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a}$ 와 같이 표현되며, $B(q)$, $C(q)$, $D(q)$, $F(q)$ 는 각각 b_{n_b} , c_{n_c} , d_{n_d} , f_{n_f} 를 이용하여 표현할 수 있다. t 는 시간, $x(t)$, $y(t)$ 는 시간에 따른 입력력 값을 의미한다.

식(1)에서 $A(q)$, $B(q)$, $C(q)$, $D(q)$, $F(q)$ 중 어떤 전달함수모델을 사용하는지에 따라 AR, ARX, ARMA, ARMAX 등으로 분류할 수 있으며[13], 본 연구에서는 사용한 데이터의 특성상 ARX모델이 적합한 것으로 판단하여 이를 이용하였다. ARX모델은 출력성분의 전달함수모델인 $A(q)$ 와 입력성분의 전달함수모델인 $B(q)$ 를 사용하는 모델로 식(2)로 표현된다. 후진연산자를 반영하여 다시 표현하면 식(3)과 같다.

$$A(q)y(t) = B(q)x(t) + e(t) \tag{2}$$

$$\begin{aligned} y(t) + a_1y(t-1) + a_2y(t-2) + \dots + a_{n_a}y(t-n_a) \\ = b_1x(t-n_k) + b_2x(t-n_k-1) \\ + \dots + b_{n_b}x(t-n_k-n_b+1) + e(t) \end{aligned} \tag{3}$$

여기서, n_a 는 회귀차수, n_b 는 외인성차수, n_k 는 지연차수이며 ARX모델에

서는 최적의 회귀차수와 외인성차수를 결정하여 모델을 구성하는 것이 중요하다.

2.3 케이블의 장력 추정

케이블의 장력 추정방법은 직접법과 간접법으로 나뉜다. 직접법은 교량에 부착된 로드셀 혹은 유압잭, 광섬유센서 등을 이용하는 방법이 있으나 초기 설치비용이 높고 계측기의 지속적인 유지관리가 어려우며 유지관리단계가 아닌 가설 시에 주로 사용되는 방법들이기 때문에 활용성이 떨어진다[14, 15]. 간접법에서는 케이블에서 측정되는 가속도 데이터로부터 고유진동수를 측정하고 이를 이용하여 장력을 추정한다. 이와 같은 간접법의 시작은 현의 진동이론을 기초로 한다[14], [16].

2.3.1 현의 진동이론

현의 진동이론을 이용한 장력 추정 식은 식(4)와 같다.

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

여기서, w 는 케이블의 중량, l 은 케이블의 길이, g 는 중력가속도, f_n 은 n 차에서의 고유진동수를 의미한다.

식(4)에 따르면, 현의 진동이론의 장력식은 케이블의 휨강성 및 새그의 효과를 고려하지 않으므로, 해당 식(4)를 적용하는 경우 케이블의 모든 지점에서의 장력이 동일하게 나타난다. 하지만 실제 케이블의 경우 휨강성의 고려와 새그의 영향을 포함해야하기 때문에 현의 진동이론에 의한 장력식의 적용은 정확성이 떨어진다[14].

2.3.2 보의 진동이론

보의 진동이론은 다중모드를 이용하는 방법과 단일모드를 이용하는 두 가지 방법으로 나뉘며 단일모드를 이용하는 경우 새그의 영향에 따른 다양한 실용식이 제시되어있다[17]. 다중모드를 고려하는 경우 케이블의 장력을 식(5)와 같이 구할 수 있다.

$$\left(\frac{f_n}{n}\right)^2 = \frac{T \cdot g}{4wl^2} + \frac{EI_{eq}\pi^2g}{4wl^2} \cdot n^2 = b + a \cdot n^2 \tag{5}$$

$$T = \frac{4wl^2}{g} \cdot b \tag{6}$$

여기서, a 와 b 는 다중 고유진동수의 선형회귀분석을 이용하여 구한다. 다중모드를 이용한 장력 추정의 결과는 일반적으로 타당하게 판단되며[14], Jeong et al.[18]은 사장교 케이블 종류별 다중모드를 고려한 장력평가를 비교·분석하여 다중모드를 고려한 장력 추정의 신뢰성을 확인하였다.

3. 사장교 케이블의 미계측 거동 추정

3.1 개요

케이블 장력을 추정하기 위한 연구의 진행과정은 Fig. 1의 흐름도와 같다.

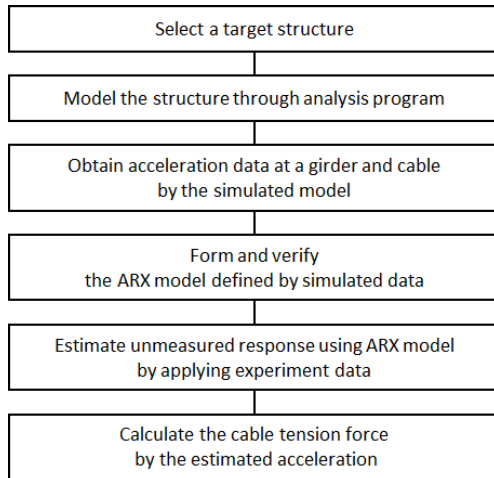


Fig. 1. Process of estimating cable tension force

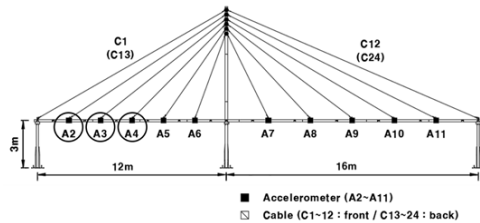


Fig. 2. Sensor layout and cable numbering

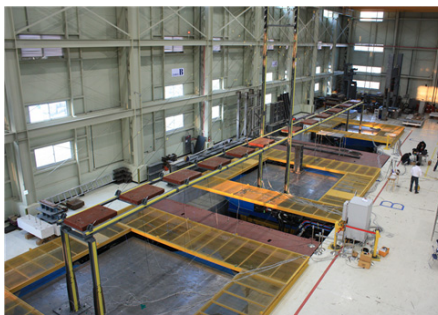


Fig. 3. Cable-stayed bridge for testing

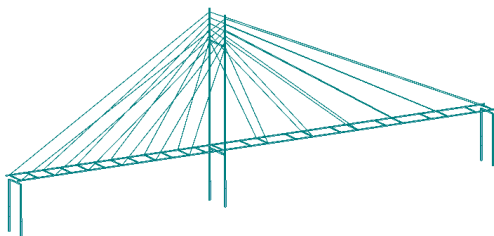


Fig. 4. Model for structural analysis

대상이 되는 사장교 모형은 Fig. 2이며, 장력 추정은 전면부에 위치한 12개 중 왼쪽에서 세 번째에 C3케이블을 대상으로 한다. 즉 C3케이블의 동적거동을 Fig. 2에 원형으로 표시한 거더 위의 A2, A3, A4를 이용하여 추정하는 것이다. Fig. 3은 실내모형실험을 위해 진동대 위에 설치한 사장교 모형을 보여주며, 구조해석모델은 Midas Civil 2016을 이용하여 Fig. 4와 같이 모델링하였다.

3.2 해석모델 검증

실험모형과 해석모델이 동일하게 구현되었는지 확인하였다. 해석모델은 모델업데이팅을 통해 구현되었으며, 실험데이터와 해석데이터에서 얻어진 고유진동수와 변위를 비교하여 모형의 일치 여부를 확인하였다. 해석모델과 실험모형의 비교결과는 Table 1에 표시하였다. 표에서 모델업데이팅을 통한 해석값과 실험값의 오차율이 10% 이내이므로 모델업데이팅이 적합하게 이루어진 것으로 판단 할 수 있다[19].

3.3 ARX모델 구성

3.3.1 ARX모델의 차수 결정

ARX모델 구성에 앞서 차수를 결정한다. ARX모델의 차수는 너무 높을 경우 수치적으로 불안정한 문제가 생기며, 너무 낮을 경우 시스템을 정확히 표현하지 못하는 문제가 있으므로 적절한 차수를 결정하여야 한다. 본 연구에서는 Akaike[20]의 최종예측오차(FPE: Final Prediction Error)를 이용하였으며, 회귀차수 n_a 와 외인성차수 n_b 를 변화시켜 가면서 FPE값이 급격하게 떨어지는 지점을 최적차수를 결정하는데 기준으로 반영하였다.

FPE값과 함께 결정계수를 이용하여 구성된 ARX모델의 정확성을 판단하여 최적차수를 결정하였다. 이를 통해 최적차수는 $n_a = 1$, $n_b = 30$ 으로 결정하였다.

3.3.2 ARX모델 구축

ARX모델을 구성하기 위해 해석프로그램에 내장되어 있는 10개의 지진지반가속도 데이터를 하중으로 입력하여 각각의 경우에 얻어지는 거더 A2, A3, A4위치와 케이블 C3의 중간지점의 축과 수직방향 가속도 데이터를 이용하여 3개의 ARX모델을 구성하였다. Fig. 5는 적용한 10개의 지진지반가속도 중 Parkfield 지진하중을 작용하였을 때 거더의 A2, A3, A4 위치와 케이블 C3 지점에서 계산된 가속도 데이터를 보여준다. 거더에서 얻어

Table 1. Comparison of analysis and measured data

		Analysis (Hz)	Measured (Hz)	Error (%)
Frequency	1 st mode	1.26	1.29	2.4
	2 nd mode	3.02	2.96	2.0
	3 rd mode	3.74	3.67	1.9
Deflection	Point A5	-5.35	-5.38	0.6
	Point A10	-0.68	-0.69	1.5

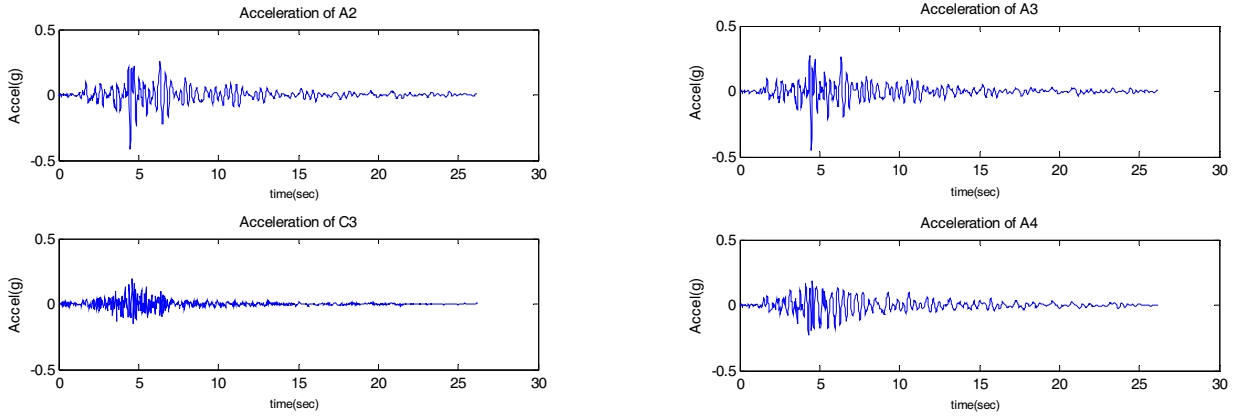


Fig. 5. Computed acceleration at each location due to parkfield earthquake excitation

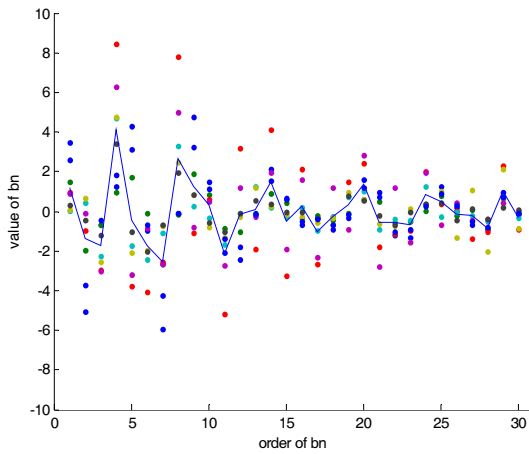


Fig. 6. Coefficient b_n of the ARX model

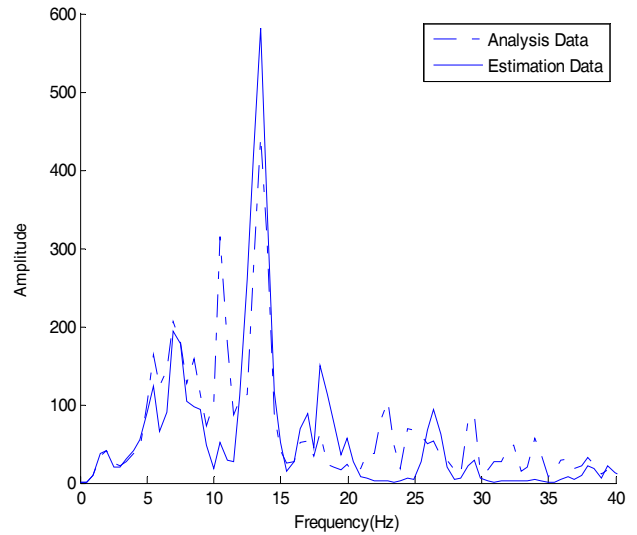


Fig. 8. Comparison of frequency-domain data

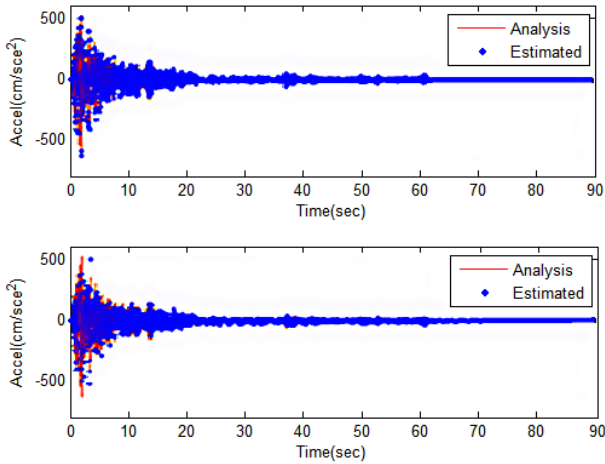


Fig. 7. Comparison of time-series data

진 데이터는 각각 3개의 입력값이고, 케이블에서 해석적으로 구해지는 가속도데이터를 출력값으로 하여 ARX모형을 구축하였다. 3개의 ARX모형을 각각 ARX (A2-C3), ARX (A3-C3), ARX (A4-C3)로 표현하여 구분하였다.

하중 케이스에 따라 최적화 된 각각의 ARX모형이 형성되는데 이를 이

용하여 지점 간의 관계를 하나로 정의하는 일반화된 ARX모형으로 구성하였다. Fig. 6은 ARX (A2-C3)모형의 외인성계수인 b_n ($n = 1 \sim 30$) 값의 분포를 예로 나타낸 것이다. 하중케이스별로 구해진 10개의 값을 수치적으로 평균하여 일반화된 ARX모형의 외인성계수 값으로 이용한다. 점을 이루는 값들은 ARX모형 구성 시 입력력 데이터에 최적화되어 구해진 값들이며 실선으로 표현된 것은 평균값을 의미한다. 점을 이루는 값은 최적모델이기 때문에 높은 추정률을 보이지만, 평균을 이용한 일반화 모델을 적용한 경우에는 최적화 모델에 비해 낮은 추정률이 나타날 것으로 예상할 수 있다. 실험 데이터를 재적용하여 두 모형의 추정결과의 차이를 시계열과 주파수영역에서 비교한 결과는 Fig. 7, Fig. 8과 같다.

시계열 데이터의 비교는 결정계수를 이용하였으며, 일반화한 모형의 경우 최적화모델에 비해 약 10~20%의 결정계수 값의 감소가 나타나는 것을 확인하였다. 주파수영역으로 변환한 결과에서는 진폭의 차이는 있었으나 고유진동수가 나타나는 위치는 유사한 것으로 확인할 수 있었다. 이를 통해 일반화된 ARX모형을 통한 추정은 시계열 데이터의 진폭변화 등이 발생하지만 고유한 특성의 변화는 생기지 않으므로 일반화된 ARX모형을 이용하여 주파수영역의 데이터 추정이 가능할 것으로 판단하였다.

3.3.3 실내실험 데이터의 적용

해석모델의 데이터를 이용하여 만든 ARX모델을 Fig. 3의 실내모형실험에서 구한 데이터에 적용하였다. 사장교 모형실험데이터 중 진동대를 이용한 가진실험과 다지점타격실험의 데이터를 사용하여 검증하였다. 사장교 모델의 거동계측을 위해 총 121개의 다양한 계측센서가 설치되었으며, 본 연구에서는 거더 위에 부착된 가속도계에서 얻은 데이터와 주탑상부 케이블 정착단에 위치한 로드셀로부터 얻은 데이터를 이용하였다. 사장교 케

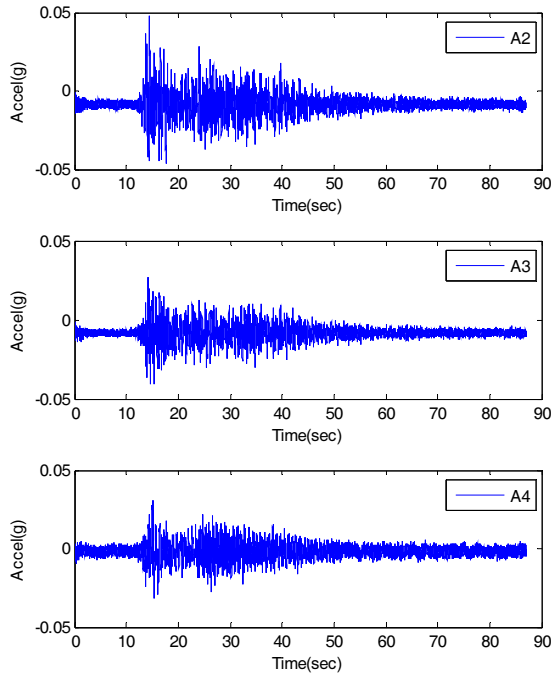


Fig. 9. Measured data of A2, A3, A4 (30% EI Centro)

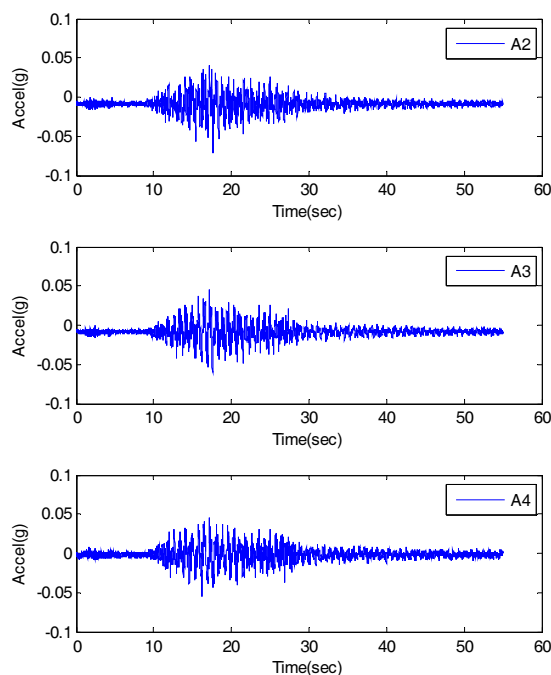


Fig. 10. Measured data of A2, A3, A4 (impact hammer)

이블에는 가속도계를 부착하지 않아 케이블의 동적응답이 계측되지 않았으므로 거더의 데이터와 ARX모델을 이용하여 추정하고 이를 주파수영역 변환하여 장력을 계산한 후, 로드셀로 계측된 장력과 비교하는 것으로 검증을 진행하였다.

Fig. 9는 30% EI centro 가진실험에서 계측된 A2, A3, A4 위치의 거더 가속도데이터이며, Fig. 10은 다지점타격실험에서 계측된 값이다. 실험계측데이터를 ARX모델에 적용한 3개의 데이터 평균을 구하여 케이블의 가속도 데이터를 추정한 결과를 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. 구해진 가속도를 주파수 영역으로 변환한 결과는 각각 Fig. 13, Fig. 14와 같으며 이를 통해 나온 고유진동수는 Table 2에 정리하였다.

3.3.4 사장교 케이블의 장력 계산

고유진동수를 이용하여 장력을 추정하는 방법은 현의 진동이론과 보의 진동이론 두 가지 방법을 적용한다. 현이론의 경우 실제 케이블의 휨 강성을

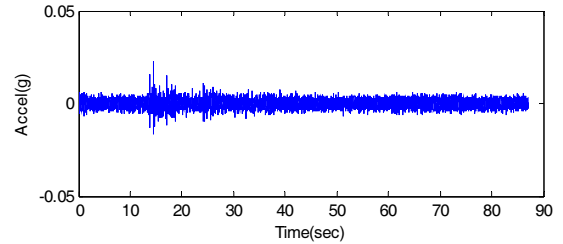


Fig. 11. Estimated data of C3 (30% EI Centro)

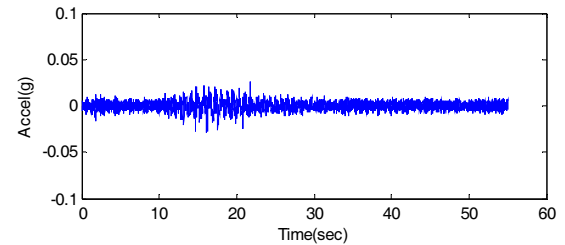


Fig. 12. Estimated data of C3 (Impact Hammer)

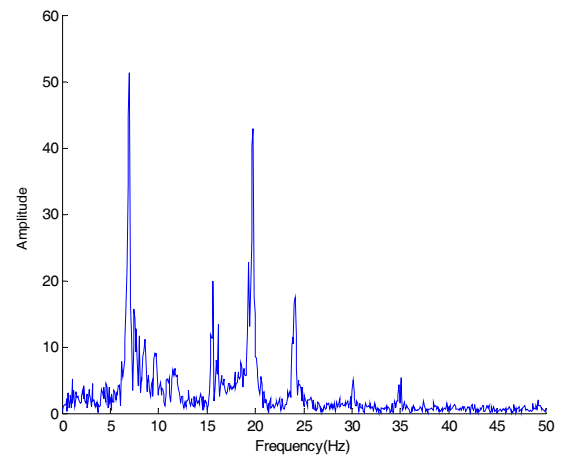


Fig. 13. FFT result of C3 (30% EI Centro)

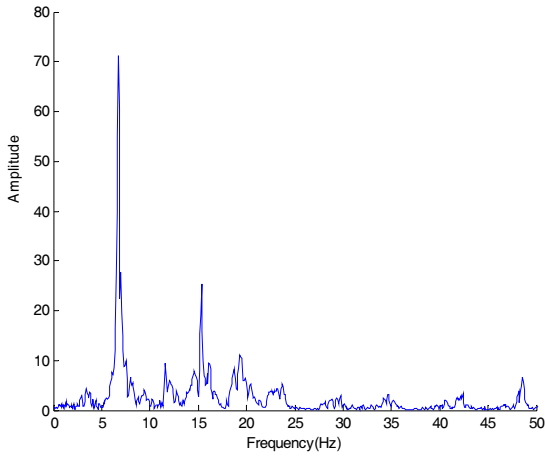


Fig. 14. FFT result of C3 (Impact Hammer)

Table 2. Frequency extraction through the data of C3

	1 st mode (Hz)	2 nd mode (Hz)	3 rd mode (Hz)	4 th mode (Hz)	5 th mode (Hz)	6 th mode (Hz)
30% El-Centro	6.72	15.53	19.51	23.67	30.14	35.04
Impact hammer	6.74	15.36	19.42	23.73	29.33	34.61

Table 3. Estimation of cable tension force by the estimated natural frequency

	Measured by Loadcell	Taut String theory		Beam theory	
	Tension (kN)	Tension (kN)	Error (%)	Tension (kN)	Error (%)
30% El-Centro	7.27	7.05	3.03	7.78	7.02
Impact hammer	7.27	7.13	1.93	7.83	7.70

Table 4. Properties of wire rope

Property	Value
Length(m)	10.248
Weight(kN/m)	7.73
Diameter(mm)	8.0

고려하지 않아 정확성이 떨어지는 것으로 판단되나, 본 모형실험에서의 케이블은 실제 구조물에서의 케이블에 비해 현저하게 작은 직경을 가지고 있으므로 현이론에 의한 장력식도 고려하는 것으로 하였다.

Park et al.[16]에 의해 현의 이론에 의한 장력추정의 오차는 진동모드가 증가할수록 오차도 크게 나타나는 것으로 나타났다. 본 연구에서도 고차모드를 적용한 현의 이론의 추정치는 신뢰할 수 없는 결과로 판단되므로 장력 계산은 1차 모드를 반영한 현의 이론식과 1~6차 모드를 모두 고려한 보의 이론의 다중모드방법을 통해 추정한다. 케이블의 기본재원은 Table 4에 나타냈으며, 고유진동수를 이용하여 구한 사장교 케이블의 장력 값은 Table 3과 같이 정리되었다. 그 결과 약 1~8%의 오차가 발생하는 것을 확인하였다.

연구에서 적용한 케이블의 경우 현이론(1차모드 반영)에 따른 계산이 오

차가 더 적게 발생하는 것을 확인 할 수 있었으나, 휨강성 및 새그를 고려할 필요가 있는 경우에는 이를 반영하여 계산한 보의 이론에 의한 결과가 더 작은 오차를 나타낼 것으로 예상된다.

4. 결론

다양한 하중케이스 가진을 통한 프로그램 해석데이터를 이용하여 구조물의 두 지점 사이에서 정의되는 ARX 모델을 사용한 가상센싱 기법을 적용하여 사장교의 케이블 장력을 추정하는 방법을 제안하고 이를 사장교 실내모형실험을 통해 검증하였다. 형성한 ARX모델을 이용하여 케이블의 가속도데이터를 추정한 결과, 시계열데이터에서는 오차가 발생하였으나 주파수영역에서는 로드셀로 직접 측정한 케이블 장력과 유사한 결과를 도출하여 ARX모델로 주파수 영역 추정을 수행할 수 있음을 확인하였다. 추정된 케이블의 가속도를 이용하여 고유진동수를 결정하고 케이블의 장력추정에 이용하는 보의 진동이론 및 현의 진동이론에 의해 케이블에 작용하는 장력을 계산하였으며, 장력계산 결과 오차율은 1.9%~7.7%로 나타나 허용 범위 내에서의 추정이 가능하였다.

본 연구에서는 특정 지점 사이의 고유한 관계를 여러 케이스에 따른 ARX모델을 이용하여 일반화하였다. 시스템 내에서 임의의 관계를 일반화하여 모델을 형성할 수 있다면 원하는 데이터의 추정을 편리하게 수행할 수 있을 것으로 예상된다. 전체 시스템을 하나의 식으로 일반화하는 것은 매우 복잡하고 어려운 문제이나, 하나의 지점(입력)과 다른 하나의 지점(출력)의 관계를 정의하는 것은 보다 쉽고 경제적이다. 가상센싱은 계속되지 않은 미지의 데이터를 추정하는 것이기 때문에 정확한 입력데이터와 믿을만한 시스템 모델을 구성하는 것이 매우 중요하다. 실제 구조물에서는 구조물에 가해지는 하중을 정확히 측정하는 것이 어렵기 때문에 실제 차량하중 등을 이용한 데이터 확보를 통해 보다 일반화된 모델을 이용한 가상센서 추정에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 국토교통부 건설기술연구개발사업의 연구비지원(17SCIP-B128569-01 2)에 의해 수행되었습니다.

/ REFERENCES /

1. Kano M, Fujiwara K. Virtual sensing technology in process industries: trends and challenges revealed by recent industrial applications, J Japanese chem Eng. 2013;46(1):1-17.
2. Papadimitriou C, Fritzen CP, Kraemer P, Ntsios E. Fatigue predictions in entire body of metallic structures from a limited number of vibration sensors using Kalman filtering. Struct. Control & Health Monit. 2011 Aug;18(5):554-573.
3. Palanisamy RP, Cho S, Sim SH. KSCE Conference; 2014 Oct 22-24; Daegu, Korea: KSCE; c2014.
4. Wikipedia [Internet]. Virtual sensing. 2016 - [cited 2016 Sep 21]. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Virtual_sensing
5. Liu L, Kuo SM, Zhou M. International Conference In Networking,

- Sensing and Control; 2009 Mar 26–29; okayama, Japan: IEEE; c2009.
6. Atkinson C, Long TW, Hanzevack EL. SAE Technical Paper Virtual sensing: a neural network-based intelligent performance and emissions prediction system for on-board diagnostics and engine control (US); 1998 Feb. Report No. :980516. c1998.
 7. Liang CY, Srinivasan S, Jacobson EE. Patent(US). U.S. Patent and Trademark Office.; Washington, DC. Patent No. : 6,882,929.
 8. Petersen D, Zander AC, Cazzolato BS, Hansen CH. Optimal virtual sensing for active noise control in a rigid-walled acoustic duct. *J Acoust Soc Am*. 2005 Oct;118(5):3086–3093.
 9. Ko KJ, Kim WS, Yu SN, Han CS. Virtual Sensor Verification using Neural Network Theory of the Quadruped Robot. *J Mech Sci Technol*. 2009 Nov;33(11):241–246.
 10. Seren C, Hardier G, Ezerzere, P, Puyou G. Conference on control and fault-Tolerant systems; 2013 Oct 09–11; Nice, France: IEEE; c2013.
 11. Lee BM, Kang UG. Virtual Sensor for Diabetes Meter in U-Health Service. *J Bio Sci&Technol*. 2014 Dec;6(6):87–96.
 12. Park, S, Chen, D, B, Rho, S. Physical and virtual sensor networks for Energy-Internet of Things. *Int J Distrib Sens Networks* [Internet]. 2016 Nov [cited 2016 Dec 10];12(11):[about 2 p.]. DOI: 10.1177/1550147716676555.
 13. Ljung L. System identification: Theory for the user. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall; c1999. 609 p.
 14. Kim NS, Park DU, Park YM, Cheung JH. Back Analysis Techniques for the Estimation of Tension Force on Hanger Cables. *EESK J. Earthquake Eng*. 2007 Jun;11(3):1–10.
 15. Noh MH, Lee SY. Tension Force Identification of Cable Structures using Various Analytical Methods. *J Korean Soc Adv. Compos. Struct*. 2012 Sep;3(3):38–46.
 16. Park YS, Choi SM, Lee BG, Kim MJ. Estimation of Stay Cable Tension Using String Vibration Theory. *J Korean Soc Hazard Mitigation*. 2009 Apr;9(2):17–22.
 17. Zui H, Shinke T, Namita Y. Practical formulas for estimation of cable tension by vibration method. *J struct Eng*. 1996 Jun;122(6):651–656.
 18. Jeong HJ, Kim KS, Lee SC. Comparison and Analysis for Evaluation Results of Tension force by cable type of cable-stayed bridge using Measured Control System. *KISTEC*. 2010 Jun;36:35–49.
 19. Korea Concrete Institute. Guide and practice for safety of existing concrete bridge. Seoul (KR): KCI; c2010. 303 p.
 20. Akaike H, Kitagawa G. The practice of time series analysis. New York: Springer Science & Business Media; c2012. 386 p.