

유한요소모델 기반 장력추정 기법의 비교 연구

A Comparative Study of Finite Element Model-Based Tension Estimation Techniques

박 규 식¹⁾ · 이 정 휘²⁾ · 성 택 룡³⁾ · 윤 태 양⁴⁾ · 김 병 화⁵⁾

Park, Kyu Sik Lee, Jungwhhee Seong, Taek Ryong Yoon, Tae Yang Kim, Byeong Hwa

요 약 : 현수교 행어케이블은 일부가 클램프로 구속되어 있어 단일 케이블 모델을 기반으로 한 기존의 장력추정 방법들은 휨감성의 영향이 큰 짧은 케이블 일수록 오차가 커지게 된다. 따라서 최근에 유한요소모델 기반의 역해석 기법 및 시스템인식 기법을 이용한 장력추정 방법이 제안되었다. 본 논문은 광안대교 행어케이블을 대상으로 역해석 기법 및 시스템인식 기법을 이용한 장력추정 방법의 적용성을 비교·검토 하였다. 장력추정결과 유한요소모델을 기반으로 한 역해석 기법 및 시스템인식 기법은 기존의 현이론 및 선형회귀법에 의한 장력추정 방법에 비해 고유진동수 오차를 기준으로 보다 높은 신뢰성을 가지고 장력을 추정하였다. 하지만 모델기반의 장력추정 방법은 유한요소모델의 정확도에 따라 그 오차가 다르게 나타날 수 있다. 특히, 짧은 케이블 일수록 경계조건의 영향을 많이 받기 때문에 가능하다면 실험을 통해 경계조건을 명확히 파악하는 것이 중요하다. 시스템인식 기법을 이용한 장력추정 방법은 다양한 경계조건을 용이하게 고려할 수 있으며, 또한 입력되는 측정 고유진동수의 개수에 민감하지 않기 때문에 그 효용성이 높다고 할 수 있다.

ABSTRACT : Hanger cables in suspension bridges are constrained by the horizontal clamp. So, the accuracy of estimated tension of hange cable using existing methods based on the simple mathematical model of singel cable decreases as the length of cable decreases because of the flexural rigidity. Therefore, back analysis and system identification techniques based on the finite element model are proposed recently. In this paper, the applicability of the back analysis and system identification techniques are compared using the hanger cable of Gang-An Bridge. The experimental results show that the back analysis and system identification techniques are more reliable than the existing string theory and linear regression method in the view point of the error of natural frequencies. However, the estimation error of tension can be varied according to the accuracy of finite element model in the model based methods. Especially, the boundary condition is more affective when the length of cable is short, so it is important to identify the boundary condition through experiment if it is possible. The tension estimation method using system identification technique is more attractive because it can easily consider the boundary condition and it is not sensitive to the number of input measured natural frequencies.

핵심용어 : 행어케이블, 시스템인식 기법, 역해석 기법, 현수교

KEYWORDS : hanger cable, system identification technique, back analysis technique, suspension bridge

1. 서론

최근 들어 국내·외에 장대교량의 건설사례가 증가하고 있다. 이러한 장대교량 중 현수교(suspension bridge)는 주케이블(main cable)에 보강형(stiffening girder)을 매달아 하중을 지탱하는 형태로 국내에서는 1973년 남해대교의 완공을 시작

으로 영종대교, 광안대교 등의 현수교가 건설되었으며, 광양대교, 울산대교 등 많은 현수교 프로젝트가 계획되어 있다. 현수교와 같은 장대교량은 대부분의 하중을 케이블이 지지하는 형식이기 때문에 교량의 시공 중 안정성 확보 및 완공후 유지보수를 위해 케이블의 장력추정이 필요하다.

케이블의 장력추정을 위한 가장 정확한 방법은 로드셀(load

1) 교신저자, RIST 토목연구본부 선임연구원, 공학박사
(Tel. 031-370-9643, Fax. 031-370-9599, E-mail: kyusikpark@rist.re.kr)
2) RIST 토목연구본부 책임연구원, 공학박사(jwhee2@rist.re.kr)
3) RIST 토목연구본부 책임연구원, 공학박사(trseong@rist.re.kr)
4) RIST 토목연구본부장, 공학박사(tyoon@rist.re.kr)
5) 경남대학교 토목공학과 전임강사, 공학박사(bhkim@kyoungnam.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2009년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

cell)을 이용해 장력을 직접적으로 측정하는 것이지만, 현장여건 등 여러 제약으로 인해 제한적으로 사용되고 있다. 따라서, 현재 주로 사용되는 방법은 계측된 가속도 신호로부터 고유진동수를 추출하여 고유진동수와 장력과의 관계를 나타내는 이론식에 의해 장력을 추정하는 간접적인 방법이다. 이러한 방법들 중에 가장 널리 사용되는 방법은 케이블의 휨강성을 고려하지 않는 현이론(taut string theory, Irvine, 1981)과 휨강성을 고려하기 위해 케이블을 축하중을 받는 보로 해석하는 선형회귀법(Shimada, 1995) 등이 있다. 윤자걸 등(1999)은 이러한 선형회귀법에서 유효길이의 영향을 분석하였으며, 안상섭 등(2003)은 동적인 방법대신 최소한의 측정이 요구되는 정적인 방법으로 행어케이블(hanger cable)의 장력을 산정하였다.

기존의 동적방법을 이용한 장력추정 방법은 고유진동수와 장력과의 관계식에 계측된 고유진동수 값들을 대입하여 장력을 추정하기 때문에 사용된 수학적 모델이 실제 구조물과 상이한 경우 큰 오차를 수반 할 수 밖에 없다. 특히 현수교에서 보강형에 걸리는 하중을 주케이블로 전달하는 행어케이블의 경우 일반적으로 휨강성이 큰 짧은 케이블이고 클램프(clamp) 및 경계조건의 영향으로 기존방법으로 장력을 추정할 경우 오차가 크게 발생할 수 있다(박대효 등, 2007, 김남식 등, 2007).

따라서, 현수교의 행어케이블과 같이 휨강성의 영향이 큰 짧은 케이블의 장력을 추정하기 위해서 행어케이블의 유한요소모델에 기반한 방법들이 제안되었다. 김남식 등(2007)에 의해 제안된 역해석 기법은 해석모델을 통해 계산된 진동수와 실제 계측된 케이블의 진동수의 오차를 목적함수로 정의하여, 이를 최소화하기 위한 최적화 알고리즘인 단변분탐색법과 보정계수를 사용하였다. 박대효 등(2007)에 의해 제안된 진동기반 시스템인식(system identification) 기법을 이용한 방법은 계측된 진동수를 입력변수로 하여 민감도 방정식을 이용해 반복 계산을 통해 장력을 추정하게 된다. 이때 행어케이블의 정확한 시스템 인식을 위하여 3차원 유한요소모델이 구성되며 장력을 포함한 케이블과 클램프의 강성치들을 인식변수로 설정한다. 역해석 기법을 이용한 행어케이블의 장력추정은 광안대교에 적용되었으며(김남식 등, 2007), 시스템인식 기법을 이용한 행어케이블의 장력추정은 이론개발(박대효 등, 2007) 및 영종대교(김병화 등 2007), 시험체(장한택 등, 2008)에 적용되었다.

본 논문에서는 현재까지 개발된 방법 중 행어케이블과 같이 휨강성이 큰 짧은 케이블의 장력추정에 활용성이 높은 유한요소모델 기반의 역해석 기법 및 시스템인식 기법을 이용한 장력 추정 방법을 광안대교 행어케이블을 이용해 그 신뢰성을 기존 방법과 비교해 그 적용성을 확인하였다.

2. 광안대교 행어케이블

2.1 진동신호 계측

광안대교는 총 길이 900m(중앙경간 500m, 측경간 200m씩 총 3경간 2한지), 교량너비 24m, 주탑높이(평균해수면 기준) 116.5m로서 부산광역시에 위치하고 있다. 광안대교의 행어케이블은 주탑을 기준으로 경간 중앙으로 갈수록 길이가 점점 짧아지는 형태를 갖고 있으며, 본 논문에서는 그림 1과 같이 해변측에 위치한 2개소의 행어케이블을 고려하였다. 각각의 개소에는 한 개의 행어케이블 밴드(band)에 그림 2와 같이 2개 그룹의 행어케이블이 설치되어 있으며, 이 중에서 교량쪽 행어케이블의 가속도 신호를 계측하였다.

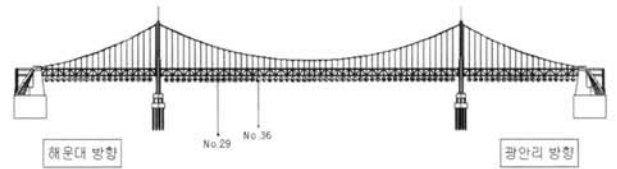


그림 1. 계측에 사용된 행어케이블 위치 (김남식 등, 2007)

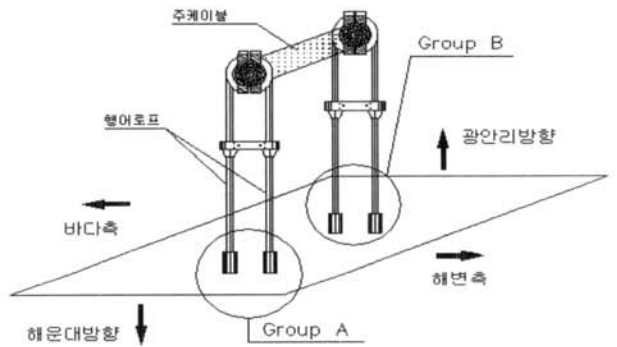


그림 2. 행어케이블 그룹 (김남식 등, 2007)

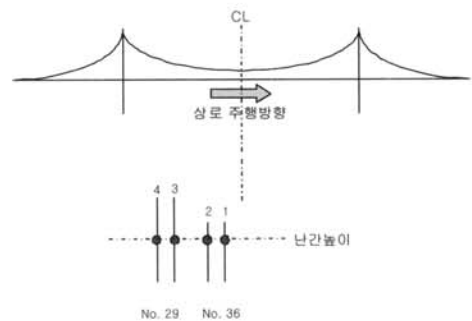


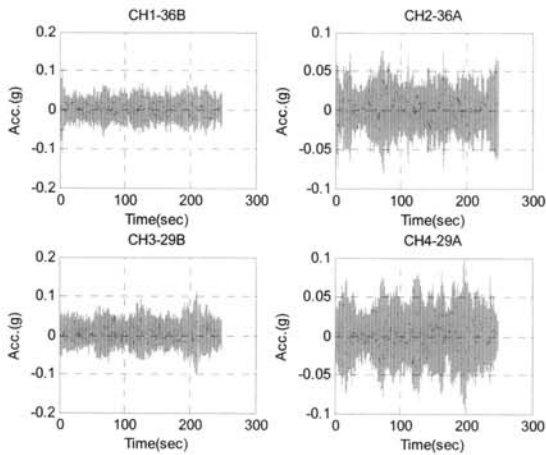
그림 3. 행어케이블에 설치된 가속도계 위치

2008년 6월 6일 행어케이블의 교축직각방향으로 가속도센

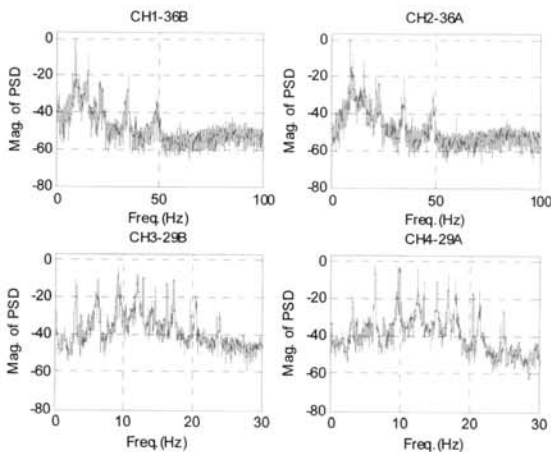
서를 그림 3과 같이 설치해 행어케이블의 가속도 진동신호를 계측하였다. 이때 가속도계는 설치의 용이성과 누락되는 저차의 진동모드가 없도록 하기 위해 광안대교 난간높이에 설치했으며, 계측시점이 공휴일이기 때문에 교통량은 평소보다 적었다. 따라서 신뢰성 높은 가속도 신호를 얻기 위해 5분내외의 진동신호를 2회에 걸쳐 계측하였다. 그림 4는 현장 계측 장면을 보여준다.



그림 4. 행어케이블 가속도 계측



(a) 가속도 신호



(b) power spectral density

그림 5. 행어케이블의 가속도 및 PSD 데이터

총 4개의 행어케이블에 대해 상시진동(ambient vibration) 상태에서 데이터취득속도(sampling rate) 1000Hz로 계측하였다. 특히 진동계측의 효율성을 위해 한국유지관리(주)의 무선동적로거인 1ch AnyLogger를 사용하였다. 그림 5는 행어케이블의 교축직각방향에서의 상시진동상태로부터 얻어진 가속도 응답신호와 응답신호의 power spectral density (PSD)를 나타낸 것이다. 시스템인식 기법을 이용한 장력추정 시 각 진동모드의 차수 및 고유진동수 값이 중요하며, 가속도 신호 및 PSD의 절대적인 크기는 장력추정 결과에 영향을 미치지 않는다.

2.2 유한요소모델

시스템인식 기법을 이용한 장력추정 방법에서 장력의 변화에 따른 행어케이블의 고유진동수 변화를 해석하기 위해 축방향 하중을 받는 3차원 선형요소를 사용해 행어케이블을 모델링하였다. 이때 질량행렬은 일반 프레임(frame)요소의 질량행렬을 사용했으며, 강성행렬은 일반 프레임 요소의 강성행렬(오일러빔)과 장력의 영향을 고려한 기하강성행렬의 합으로 나타내었다.

양단한지로 가정한 광안대교 행어케이블의 길이 및 물성치는 표 1과 같다. 이때 케이블 직경은 유효단면적에 해당하는 환산된 직경이다. 또한 설계장력은 광안대교 행어케이블 설계시방서 상의 장력으로 시스템인식 기법을 이용한 장력추정시 초기 장력으로 가정하였다.

표 1. 행어케이블의 물성치 (김남식 등, 2007)

케이블 번호	길이 (m)	직경 (mm)	탄성계수 (kN/mm ²)	질량 (kN/mm ³)	설계장력 (kN)
29A	25.3234	49.52	1.3734X10 ²	8.0X10 ⁻⁸	377.685
29B	24.9986				
36A	9.0173				
36B	8.8329				

클램프는 하부고정소켓을 제외한 사각부만을 모델링하였으며, 행어케이블에서 클램프 상단의 케이블 길이는 1m로 일정하며, 클램프 하단의 케이블은 일부분이 클램프에 고정되어 있는 것을 고려하기 위해 클램프 하부고정소켓의 높이(0.5m)를 뺀 길이를 하부 케이블의 유효길이라고 가정하였다.

그림 6은 29A 케이블의 유한요소모델을 나타낸 것이다. 양쪽의 행어케이블은 각각 30개의 요소로 모델링 했으며, 클램프는 3개의 요소로 모델링하였다.

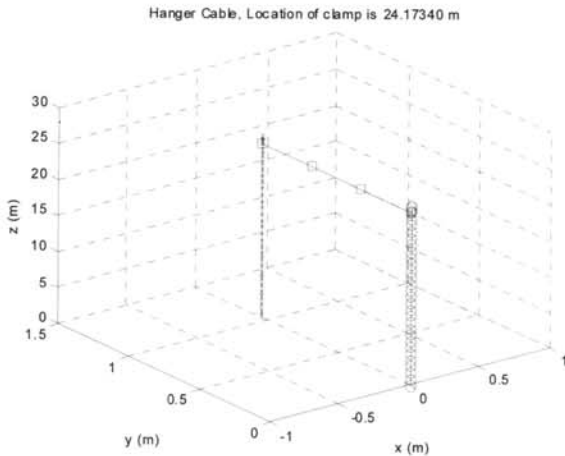


그림 6. 행어케이블 모델 (29A)

2.3 고유진동수 추출

그림 5(b)와 같이 일반적인 행어케이블의 상진동신호를 살펴보면, 측정된 진동모드(mode)의 차수를 명확하게 정의하기 어려운 경우가 많다. 또한 본 논문에서는 각 행어케이블에 1개의 가속도계만을 설치했기 때문에 진동모드를 실험적으로 추출할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 김남식 등 (2007)의 논문에 제시되어 있는 측정치와의 비교를 통해 각 진동모드의 차수 및 고유진동수를 결정하였다. 이렇게 결정된 각 행어케이블의 고유진동수는 표 2와 같다. 이때 각 고유진동수는 행어케이블의 동조모드(symmetric mode)에 해당하는 고유진동수를 추출하여 2번의 실험에 대해 평균한 것이다.

표 2. 행어케이블의 동조모드 고유진동수

Sym. mode	Measured Frequency (Hz)			
	29A	29B	36A	36B
1st	3.20	3.05	9.38	9.20
2nd	6.42	6.10	15.91	15.46
3rd	9.60	9.11	23.15	22.90
4th	12.63	12.05	34.82	34.78
5th	15.32	14.54	49.14	48.28

3. 장력추정 결과

본 연구에서 고려한 시스템인식 기법을 이용한 장력추정의 개략도는 그림 7과 같으며 보다 자세한 내용은 박대호 등 (2007)의 논문에 제시되어 있다. 시스템인식 기법의 인식변수는 식 (1)과 같이 장력, 케이블 및 클램프의 축강성, 휨강성, 비틀림강성으로 총 9개로 가정하였다. 이때 반복해석의 수렴조

건은 식 (2)와 같이 고유진동수 오차의 제곱합평균(square root of sum of square, SRSS)을 이용하였다.



그림 7. 시스템인식 기법을 이용한 장력추정 방법 개략도

$$U = [T \quad EA \quad EI_y \quad EI_z \quad GJ \quad EA_c \quad EI_{yc} \quad EI_{zc} \quad GJ_c]^T \quad (1)$$

$$\sqrt{\left(\sum_{k=1}^n \left| \frac{f_{measured}^k - f_{calculated}^k}{f_{measured}^k} \times 100 \right|^2 \right)_{step}} - \sqrt{\left(\sum_{k=1}^n \left| \frac{f_{measured}^k - f_{calculated}^k}{f_{measured}^k} \times 100 \right|^2 \right)_{step+1}} < 0.01 \quad (2)$$

그림 8은 시스템인식 기법에서 36B 행어케이블의 최종유한 요소모델의 동조모드형상을 나타낸 것이며, 표 3은 추정방법에 따른 각 행어케이블의 장력을 나타낸 것이다. 여기서 김남식 등(2007)의 방법은 행어케이블의 경계조건을 양단고정으로 가정하여 모드기여도(mode participation factor)를 고려하여 여러 진동모드를 이용한 역해석 결과이며, 시스템인식 기법을 이용한 장력추정시에도 행어케이블의 경계조건은 양단고정으로 하였으며, 5개의 동조모드 고유진동수를 입력 계속 값으로 사용하였다. 현이론 및 선형회귀법은 각각 식 (3)과 (4)를 이용하여 장력을 추정한 결과이며, 이때 현이론은 첫 번째 동조모드를 이용하였다.

$$T = 4mL_c^2 \left(\frac{f_n}{n} \right)^2 \quad (3)$$

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

그림 8에서 보듯이 36B 케이블의 경우 교축방향으로 1, 3, 5, 7 번째 진동모드가 각각 1, 2, 3, 4 번째 동조진동모드임을 알 수 있다. 시스템인식 기법을 이용한 장력추정의 경우 식 (1)과 같이 케이블의 장력뿐만 아니라 다른 변수들 (케이블 및 클램프의 축강성, 휨강성, 비틀림 강성)도 추정할 수 있다. 그러나 행어케이블의 경우 장력의 변화가 고유진동수를 변화시키는 주된 요인이며 다른 변수들의 영향은 미미하다. 이는 박대

효 등 (2007)에서 수행한 각 변수들의 민감도 해석을 통해 확인되었으며, 본 논문에서 광안대교 케이블을 이용한 장력외의 변수들의 추정에서도 유사한 결과를 얻었다. 따라서 본 논문에서는 케이블 장력추정 결과만을 언급하였다. 표 3에서 보듯이 4개의 행어케이블에 대해 시스템인식 기법으로 추정된 장력이 다른 방법으로 추정된 장력에 비해 작게 추정되는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 짧은 행어케이블인 36번 케이블에서 더 크게 나타난다. 또한 케이블의 길이가 짧아질수록 추정된 장력도 감소하는 것을 알 수 있다. 이에 비해 역해석 기법을 이용한 방법은 케이블의 길이에 관계없이 유사하게 장력을 추정하였으나, A 그룹의 케이블 장력이 B 그룹에 비해 크게 추정되었다. 현이론을 이용한 장력추정 방법은 역해석 기법과 유사한 경향을 보이지만, A, B 그룹의 추정된 장력의 편차가 크게 나타났다. 선형회귀법을 이용한 방법은 시스템식별 기법을 이용한 방법과 유사하게 케이블이 짧아질수록 추정된 장력도 감소하였다.

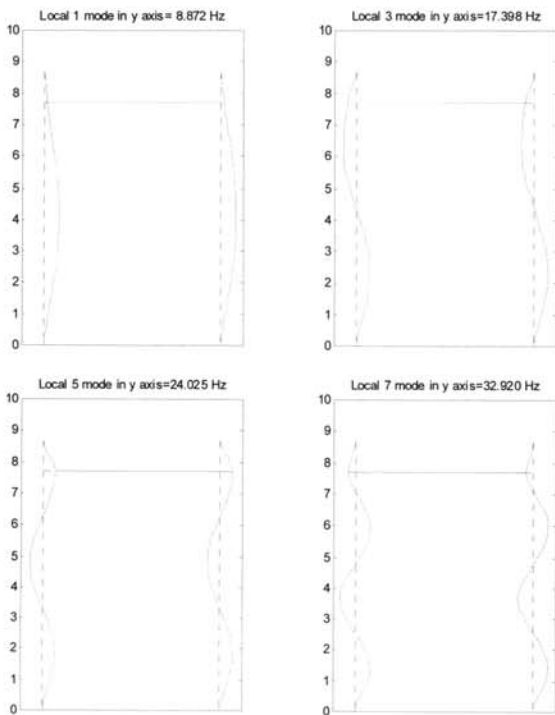
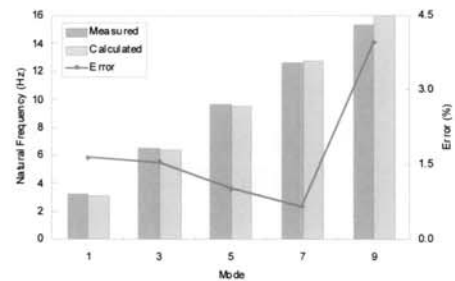


그림 8. 최종 유한요소모델의 동조모드형상 (36B)

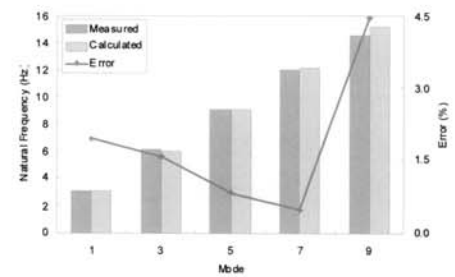
표 3. 추정방법에 따른 각 행어케이블의 장력 (kN)

케이블	29A	29B	36A	36B
설계장력	377.685			
시스템인식 기법	355.82	309.92	287.79	256.58
김남식 등(2007)	393.45	342.75	384.45	349.86
현이론	402.35	355.54	412.60	382.73
선형회귀법	397.75	348.68	321.70	294.74

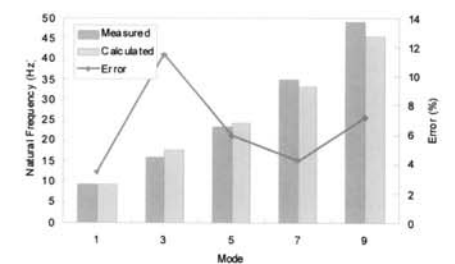
각 방법을 통해 추정된 장력의 신뢰성을 확인하기 위해서는 로드셀을 이용하여 각 행어케이블의 장력을 측정하여 추정치와 비교해야 하지만 고유진동수를 추정한 29, 36번 행어케이블에는 로드셀이 설치되어 있지 않기 때문에 실험시점의 정확한 장력값을 알 수 없다. 그러나 역해석 기법 및 시스템인식 기법을 이용한 장력추정 방법의 경우 고유진동수 SRSS 오차로 추정된 장력의 정확도를 간접적으로 확인할 수 있다.



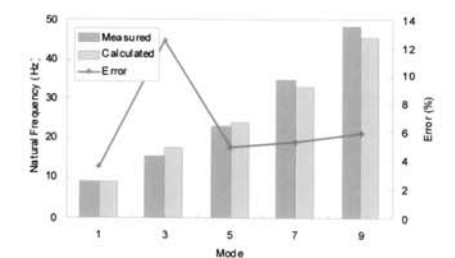
(a) 29A 케이블(SRSS = 4.70%)



(b) 29B 케이블(SRSS = 5.19%)



(c) 36A 케이블(SRSS = 15.73%)



(d) 36B 케이블(SRSS = 16.07%)

그림 9. 고유진동수 오차 (시스템인식 기법)

그림 9는 각 행어케이블에 대해 시스템인식 기법을 이용한 장력추정의 고유진동수 오차를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 29번 행어케이블은 측정치와 계산된 고유진동수의 오차가 비교적 작지만 상대적으로 36번 행어케이블의 고유진동수 오차는 큰 것을 알 수 있다. 따라서 고유진동수 오차가 큰 36번 행어케이블의 장력추정 결과는 신뢰도가 떨어진다. 이러한 결과의 원인으로는 측정된 고유진동수의 신뢰성이 떨어지거나 행어케이블의 유한요소모델, 경계조건이 실제와 다르기 때문이다. 하지만 측정된 고유진동수는 김남식 등(2007)의 논문의 결과와 비교해 볼 때 비교적 정확하다고 할 수 있다. 29번 케이블과 36번 케이블의 길이차가 두 케이블의 물성치 면에서 유일한 차이이다. 이러한 케이블 길이의 차이는 고유진동수의 변화를 주며, 고유진동수의 변화는 경계조건에 민감하다. 따라서 경계조건의 영향으로 짧은 케이블인 36번 케이블의 오차가 크게 발생하였다고 가정해 경계조건에 따른 영향을 분석할 필요가 있다.

4. 입력조건에 따른 시스템인식 기법의 민감도 분석

시스템인식 기법을 이용한 장력추정시 기본적으로 측정 고유진동수와 유한요소모델을 통해 계산된 고유진동수의 오차를 최소화하기 때문에 유한요소모델의 경계조건의 영향을 받게 된다. 실제 행어케이블의 경계조건을 파악하기 위해서는 실험을 통해 진동모드를 추출해야 하지만, 본 연구에서는 여러 제약조건 때문에 행어케이블에 1개의 가속도계만을 설치해 실험적으로 진동모드 형상을 파악할 수 없다.

표 4는 행어케이블의 경계조건을 양단힌지로 가정했을 때 시스템인식 기법을 이용한 장력추정 결과를 나타낸 것이다.

표 4. 시스템인식 기법을 이용한 장력추정(양단힌지)

케이블	진동수	1	2	3	4	5	SRSS (%)	장력 (kN)
29A	측정치(Hz)	3.20	6.42	9.60	12.63	15.32	2.73	381.96
	계산치(Hz)	3.18	6.36	9.53	12.66	15.68		
	오차(%)	0.79	0.91	0.73	0.25	2.33		
29B	측정치(Hz)	3.05	6.10	9.11	12.05	15.54	3.03	334.38
	계산치(Hz)	3.02	6.04	9.06	12.05	14.93		
	오차(%)	1.04	0.87	0.52	0.00	2.66		
36A	측정치(Hz)	9.38	15.91	23.15	34.82	49.14	8.31	363.89
	계산치(Hz)	9.12	16.77	23.90	24.28	47.00		
	오차(%)	2.82	5.40	3.27	1.53	4.35		
36B	측정치(Hz)	9.20	15.46	22.90	34.78	48.28	7.96	331.92
	계산치(Hz)	8.94	16.37	23.45	33.93	46.83		
	오차(%)	2.83	5.87	2.42	2.44	3.00		

표에서 보듯이 모든 케이블에 대해 양단고정인 경우와 비교해 각 고유진동수 오차 및 SRSS 오차가 감소했으며, 추정된 장력역시 역해석 기법의 결과와 유사하다. 특히 짧은 케이블인 36번 행어케이블의 고유진동수 오차 감소가 컸으며, 그에 따른 추정장력의 변화 역시 컸다. 이것은 긴 케이블에 비해 짧은 케이블이 경계조건의 영향을 크게 받기 때문이다. 그림 10은 36B 케이블의 경계조건에 따른 동조모드형상 및 고유진동수를 나타낸 것이다.

그림에서 보듯이 경계조건에 따라 진동모드 및 고유진동수 변화가 큰 것을 알 수 있다. 따라서 시스템인식 기법을 이용한 장력추정의 결과를 볼 때 본 연구에서 고려한 평안대교 행어케이블의 경계조건은 양단힌지로 가정하는 것이 타당한 것으로 사료된다. 이는 역해석 기법에서 고려한 양단고정의 경계조건과 상이한 결과이다. 이러한 원인으로는 두 기법에서 고려한 유한요소모델, 입력 고유진동수 값 및 개수가 다르기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 정확한 행어케이블의 경계조건을 파악하기 위해서는 다수의 가속도계를 이용해서 진동모드를 추출해 실험적으로 경계조건을 파악하는 것이 필요하다.

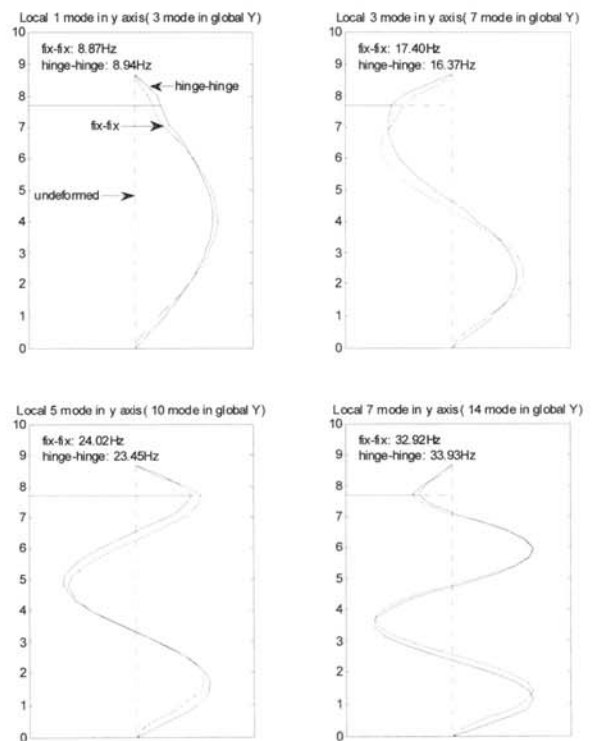


그림 10. 경계조건에 따른 동조모드형상 (36B)

시스템인식 기법을 이용한 장력추정 방법은 유한요소모델의 정확도뿐만 아니라 입력 고유진동수의 영향을 받는다. 따라서 입력 고유진동수에 따른 영향을 검토하기 위해 다음과 같은 방

법을 고려하였다. 식 (5)와 같이 각 고유진동수의 유효모드질량(effective modal mass, EMM)을 계산해 유효모드질량이 큰 모드의 고유진동수를 차례적으로 사용하여 이때 추정된 장력 및 계산된 고유진동수를 분석하였다.

$$EMM(\%) = \frac{\left(\frac{\phi_i^T M \{1\}}{\phi_i^T M \phi_i} \right)}{M_{total}} \times 100 \quad (5)$$

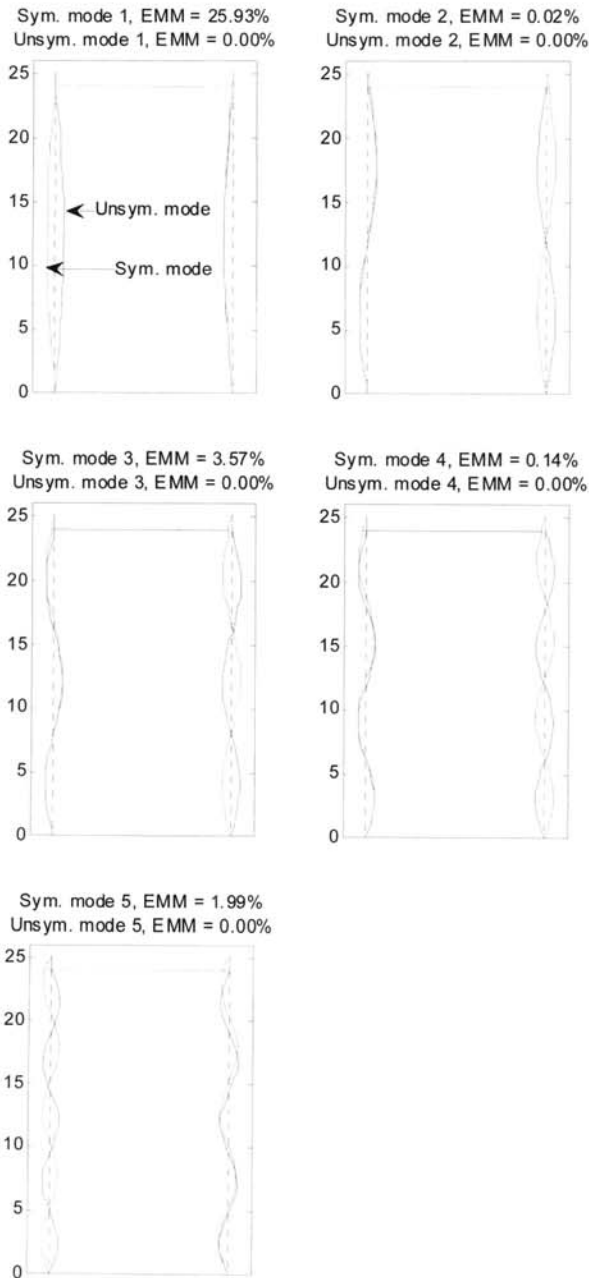


그림 11. 모드형상 및 유효모드질량(29A)

그림 11은 양단힌지 경계조건 및 설계장력하에서 29A 케이블의 10개의 고유진동모드 및 각각의 유효모드질량을 나타낸 것이다.

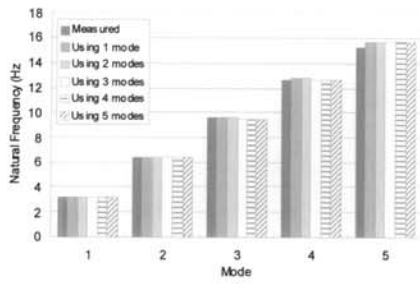
그림에서 보듯이 비동조모드(unsymmetric mode)의 유효모드질량은 0에 가까운 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 각 모드의 유효모드질량을 고려하여 각 케이블에 대해 1, 2, 3, 4, 5 개의 측정 고유진동수를 유효모드질량이 큰 순서대로 사용하여 결과를 비교하였다. 표 5는 각 케이블에 대해 양단힌지 경계조건 및 설계장력하에서 각 진동모드의 유효모드질량을 나타낸 것이다.

표 5. 각 진동모드의 유효모드질량 (%)

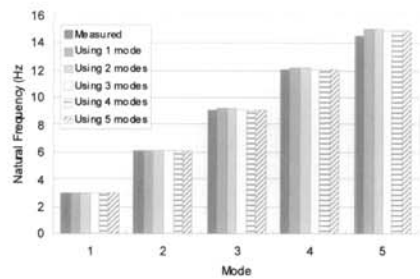
모드	29A	29B	36A	36B
1(동조 1st)	25.9265	25.9176	27.1070	27.2265
2(비동조 1st)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3(동조 2nd)	0.0237	0.0250	1.2822	1.2983
4(비동조 2nd)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5(동조 3rd)	3.5729	3.5950	3.5551	3.4151
6(비동조 3rd)	0.0000	0.0000	0.0001	0.0001
7(동조 4th)	0.1392	0.1473	0.1101	0.1227
8(비동조 4th)	0.0000	0.0000	0.0002	0.0002
9(동조 5th)	1.9872	2.008	0.4461	0.4355
10(비동조 5th)	0.0000	0.0000	0.0003	0.0004

표 5에서 보듯이 케이블의 길이가 짧아질수록 작기는 하지만 비동조모드의 유효모드질량이 조금씩 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 동조모드의 경우 29번 케이블은 1, 3, 5, 4, 2번째 모드순으로 유효모드질량이 크지만 36번 케이블은 1, 3, 2, 5, 4번째 모드순으로 유효모드질량이 큰 것을 알 수 있다. 즉, 긴 케이블과 짧은 케이블의 전체적인 유효모드질량의 양상은 유사하지만 비동조모드의 영향, 동조모드의 유효모드질량 크기 순 등 미세한 차이를 보이고 있다.

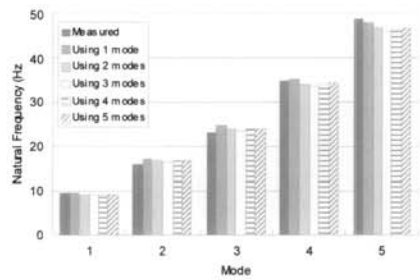
그림 12와 13은 시스템인식 기법의 입력 고유진동수에 따른 최종유한요소모델의 5개 동조모드의 고유진동수 및 고유진동 SRSS 오차 및 추정장력을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 시스템인식 기법의 고유진동수 입력개수에 따라 최종유한요소모델의 고유진동수 변화는 크지 않으며, 이때 추정된 장력 역시 29A, 29B, 36A, 36B 케이블에 대해 각각 최대 8.08, 9.34, 38.94, 34.24 kN 으로 설계장력에 대해 약 10% 내외로 변화가 있는 것을 알 수 있다. 따라서 시스템인식 기법을 이용하여 장력을 추정할 경우 유효모드질량이 큰 소수의 진동모드의 고유진동수만을 사용해도 신뢰성 있는 장력을 추정할 수 있는 장점이 있다.



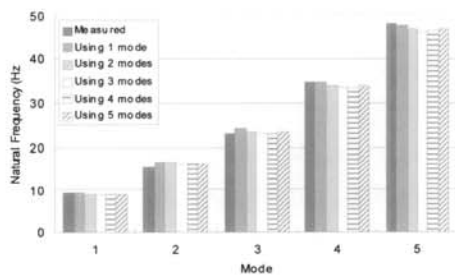
(a) 29A 케이블



(b) 29B 케이블

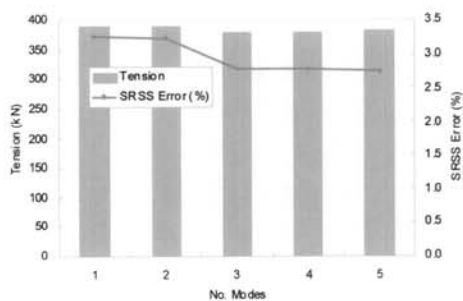


(c) 36A 케이블

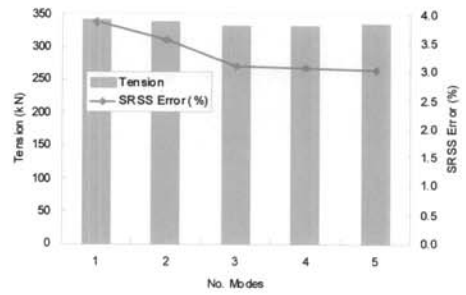


(d) 36B 케이블

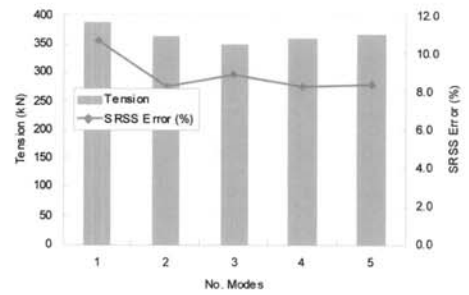
그림 12. 고유진동수 입력개수에 따른 고유진동수 변화



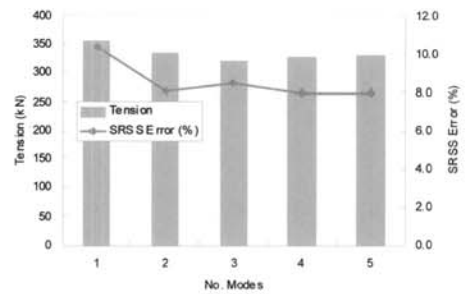
(a) 29A 케이블



(b) 29B 케이블



(c) 36A 케이블



(d) 36B 케이블

그림 13. 고유진동수 입력개수에 따른 고유진동수 SRSS 오차 및 추정장력의 변화

5. 결론

본 논문에서는 케이블의 장력을 추정하기 위해 개발된 유한요소모델 기반의 방법들을 광안대교 행어케이블에 적용하여 그 신뢰성 및 적용성 비교·검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

일반적인 케이블의 장력추정시 사용되는 현이론 및 선형회귀법은 비교적 긴 케이블인 29번 행어케이블에 대해서는 유한요소모델 기반의 역해석 기법 및 시스템인식 기법을 이용한 장력 추정 방법과 유사한 장력을 추정한 반면, 짧은 케이블인 36번 행어케이블에 대해서는 많은 차이를 보이고 있다. 또한 기존 방법들은 케이블의 다양한 경계조건에 적용할 수 없으며 로드셀에 의해 장력을 측정하지 않는 이상 그 신뢰성을 검증할 방법이 없다. 그에 비해 시스템인식 기법을 이용한 방법은 다양

한 경계조건을 손쉽게 고려할 수 있으며 계측된 고유진동수와 계산된 고유진동수의 오차를 통해 추정된 장력의 신뢰성을 간접적으로 확인할 수 있다. 또한 장력뿐만 아니라 케이블 및 클램프의 강성 등 다양한 변수에 대해서 추정이 가능하며, 입력되는 계측 고유진동수의 개수에 민감하지 않기 때문에 그 효율성이 높다.

행어케이블의 유한요소모델을 구성할 때 중요한 것은 적절한 경계조건을 도입하는 것이다. 경계조건에 따라 진동모드의 형태는 동일하지만 각 절점에서의 상대적인 진동모드의 크기가 달라지기 때문에 경계조건에 따라 진동모드의 차이가 나타나며, 이러한 차이는 지점부로 갈수록 커지게 된다. 하지만 경계조건에 따른 진동수 변화는 일정한 경향이 나타나지 않으며 각 고유진동수 차수에 따라 다르게 나타난다. 특히 짧은 케이블일수록 이러한 경계조건의 영향이 크기 때문에 실험을 통해 진동모드를 추출해 실험적으로 경계조건을 판단하는 것이 필요하다.

따라서 케이블의 길이가 긴 경우에는 기존방법뿐만 아니라 행어케이블의 유한요소모델에 기반을 둔 방법 모두 사용할 수 있으나, 길이가 짧아질수록 기존방법의 오차는 증가할 수 밖에 없으며, 유한요소모델에 기반한 장력추정방법의 신뢰성이 높을 것으로 사료된다. 하지만 모델기반의 장력추정 방법은 경계조건을 포함한 유한요소모델의 정확성이 해석결과에 미치는 영향이 크기 때문에 적절한 유한요소모델의 구성이 중요하다.

감사의 글

본 논문은 2006년도 건설핵심기술연구사업(06건설핵심 D20)의 일환으로 수행되었으며, 역해석 기법 및 논문작성에 도움을 주신 부산대학교 김남식 교수님과 박동욱 연구원님께

감사드립니다. 또한 광안대교 현장계측을 지원해 주신 부산광역시 시설관리공단 광안대로 사업단 관계자분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김남식, 박동욱, 박용명, 정진환(2007) 역해석기법을 이용한 행어케이블의 장력추정, 한국지진공학회논문집, 제11권 제3호, pp.1-10
- 김병화, 문석용, 배인환, 박대효(2007) 진동기반 SI기법을 이용한 현수교 행어의 장력추정: II. 현장적용, 대한토목학회논문집, 제27권, 제2A호, pp.173-179.
- 박대효, 문석용, 주환중, 김병화(2007) 진동기반 SI기법을 이용한 현수교 행어의 장력추정: I. 이론, 대한토목학회논문집, 제27권, 제2A호, pp.165-172.
- 안상섭, 이일근, 배인환, 최호근(2003) 행어 케이블 장력 산정을 위한 정적방법, 대한토목학회 학술발표회논문집, pp. 1418-1423.
- 윤자걸, 손진, 장승필(1999) 교량 케이블의 장력 측정에 관한 연구, 대한토목학회 학술발표회논문집, pp.117-120.
- 장한택, 김병화, 박대효(2008) 진동기반 SI기법을 이용한 현수교 행어의 장력추정: III. 실험적 검증, 대한토목학회논문집, 제28권, 제2A호, pp.215-222.
- Irvine, H., M.(1981), *Cable Structures*, MIT PRESS, CAMBRIDGE, MASS.
- Shimada, T. (1995), *A Study on the Maintenance and Management of the Tension Measurement for the Cable of Bridge*, Ph.D. Dissertation, Kobe University.

(접수일자 : 2009. 1. 29 / 심사일 2009. 2. 9 / 게재확정일 2009. 3. 16)