

외부 긴장재 장력추정기법의 현장적용 사례

Field Application of Tension Estimation Technique for External Tendon



박 규 식^{1)*}

Park, Kyu Sik



성 택 룡²⁾

Seong, Tack Ryong



노 명 현³⁾

Noh, Myung Hyun



이 정 휘⁴⁾

Lee, Jung Whee

1. 서론

현수교의 주케이블, 행어케이블, 사장교 주케이블, 강연선, 외부 보강용 케이블 등 많은 구조물에 외부 긴장재가 사용되고 있다. 외부 긴장재는 케이블에 도입된 장력을 이용하여 각 구조물 별로 주부재 또는 부부재로 사용된다. 시공단계에서 도입된 외부긴장재의 장력은 완공후 시간이 지날수록 여러 요인으로 변하기 때문에 외부 긴장재의 장력을 추정하는 것은 구조물의 안정성과 유지관리 측면에서 매우 중요하다. 이러한 외부긴장재의 장력을 추정하기 위한 가장 정확한 방법은 로드셀 (Load Cell)을 이용해 장력을 직접적으로 측정하는 것이지만, 비용이 고가이며 수명이 구조물의 수명에 비해 매우 짧고 기타

여러 가지 현장여건 등으로 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 않은 현이론 (Taut String Theory)과 휨강성을 고려하기 위해 케이블을 축하중을 받는 보로 해석하는 선형 회귀법 등이 있다. 그러나 기존의 동적응답을 이용한 장력추정 방법은 고유진동수와 장력과의 관계식에 계측된 고유진동 값들을 대입하여 장력을 추정하기 때문에 사용된 수학적 모델이 실제 구조물과 상이한 경우 필연적으로 큰 오차를 수반할 수 밖에 없다.

본 기사에서 소개하고자 하는 외부 긴장재 장력 추정 기법은 다음과 같은 두 가지 특징을 가지고 있다. 첫째, 임의의 외부 긴장재 형상에 대해서 적

1) RIST 강구조연구소 책임연구원

2) RIST 강구조연구소 수석연구원

3) RIST 강구조연구소 선임연구원

4) 단국대학교 토목환경공학과 교수

* E-mail : kyusikpark@rist.re.kr

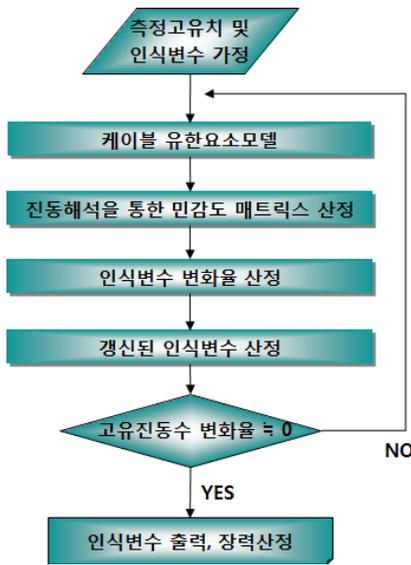


Fig. 1 시스템 인식기법을 이용한 장력추정 방법 개략도

용 가능하도록 유한요소모델을 도입하였다. 왜냐하면, 구조물이 기하학적으로 복잡해 단순화된 수학적 모델로 해를 찾기 어려운 경우 유한요소 해석은 가장 효과적인 대안이기 때문이다. 즉, 구조물의 고유진동수를 분석적인 방법이 아닌 유한요소모델을 이용해 구하는 것이다. 둘째, 인식하고자 하는 변수들이 많을 경우 해석 고유진동수와 측정고유진동수 사이의 오차를 최소화하는 방법은 많은 계산량을 수반하기 때문에 민감도 해석을 이용한 시스템 인식 (System Identification) 기법을 도입하였다. 시스템 인식 기법을 이용한 장력추정 방법의 개략도는 Fig. 1과 같으며, 본 기사에서는 이러한 장력추정 기법의 타당성을 검증하기 위해 실시된 시험체 및 다양한 종류의 외부 긴장계에 적용사례를 소개하고자 한다.

2. 시험체 적용 사례

시스템 인식기법을 이용한 장력추정 방법의 현장적용 이전에 발생 가능한 문제점을 파악하

고 보완하기 위해 2개의 시험체에 적용하였다.

2.1 강연선 시험체

강연선은 7개의 소선으로 구성되었으며, PC 강연선, 사장교, 현수교 케이블 등 외부긴장계의 기본 구성요소가 된다. 그 용도에 따라 Fig. 2와 같이 부식을 방지하기 위한 충전물 및 피복이 추가적으로 사용되기도 한다.

본 실험에 사용된 강연선은 PC 강연선에 사용되는 7연선으로 추가적인 충전물이나 피복은 없다. 장력변화에 따른 장력추정 효과를 살펴보기 위해 Fig. 3과 같이 RIST 강구조연구소 구조실험동의 300톤 액추에이터를 이용해 실험을 진행하였다. 가속도 신호계측을 위해 Fig. 4와 같이 총 4개의 가속도계를 강연선에 설치하였으며, 가속도 신호는 무선로거를 이용해 컴퓨터로 전송하였다.

총 4단계로 하중을 도입했으며, 가속도 신호로부터 추출된 고유진동수에 기반한 고유진동수는 Table 1과 같다. 이때, Test 1과 Test 4는 세 번째 고유진동수 추출에 실패하였다. Table 2



미피복 7연선

피복 7연선

Fig. 2 7연선

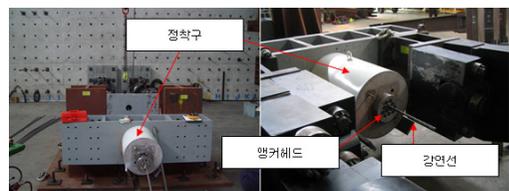


Fig. 3 실험 Setup

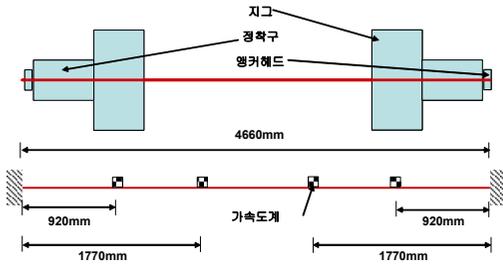


Fig. 4 가속도측정 Setup

Table 1 인가장력 및 추출 고유진동수

Test ID	인가장력 (톤)	추출 고유진동수 (Hz)
Test 1	4.05	21.36, 42.94
Test 2	8.73	30.88, 61.87, 93.41
Test 3	13.46	38.07, 76.35, 114.80
Test 4	18.35	44.31, 88.68

Table 2 강연선 인가장력 추정오차 (%)

Test ID	현이론	선형회귀법	시스템인식	
Test 1	1st	11.68	11.29	0.70
	2nd	12.83		
Test 2	1st	8.09	7.74	0.05
	2nd	8.48		
	3rd	9.90		
Test 3	1st	6.61	6.56	0.35
	2nd	7.20		
	3rd	7.72		
Test 4	1st	5.92	5.87	0.62
	2nd	6.07		

와 같이 시스템인식을 이용한 장력추정 기법은 기존의 현이론이나 선형회귀법에 비해 장력추정 오차가 작은 것을 알 수 있다. 이는 기존이론에서는 강연선의 휨강성이나 경계조건을 고려할 수 없기 때문이다.

2.2 사장교 축소 시험체

강연선 시험체에 이어 Fig. 5와 같은 사장교 축소 시험체에 대한 장력추정 실험을 수행하였



Fig. 5 사장교 축소 시험체

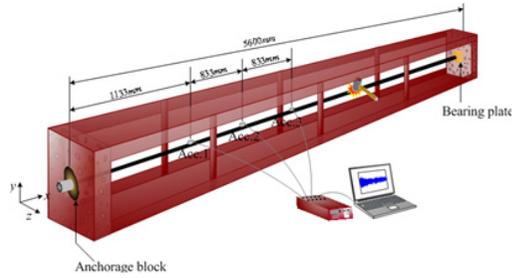


Fig. 6 사장교 축소 시험체 진동실험 Setup

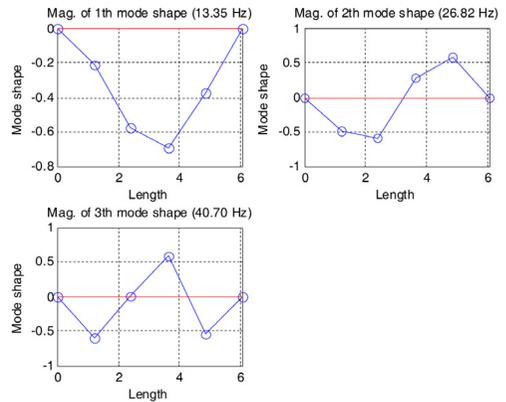


Fig. 7 고유진동모드 추출 (Test 1)

다. 이때 사용된 케이블은 피복된 강연선이며 긴 장력은 30 kN이다.

진동측정 Setup에 따른 장력추정 영향을 살펴 보기 위해 가속도계 설치위치, Impact Hammer 타격위치, 진동측정 시간을 달리해 총 4회에 걸쳐 실험을 수행하였다. 강연선 시험체와 같이 각 Test에 대해 3개의 고유진동수를 추출하였으며, 이를 기반으로 Table 3과 같이 장력을 추정하였다. Table 3에서 보듯이, 시스템인식 기법을 이용한 장력추정 방법의 장력추정 오차가 강연선

Table 3 사장교 축소 시험체 장력추정 오차 (%)

Test ID	현이론		선형회귀법	시스템인식
Test 1	1st	12.95	12.35	1.49
	2nd	13.98		
	3rd	16.59		
Test 2	1st	12.95	12.36	1.60
	2nd	14.24		
	3rd	16.94		
Test 3 (Test 4)	1st	14.24	13.44	2.19
	2nd	14.24		
	3rd	17.03		

시험체와 유사하게 현이론이나 선형회귀법에 비해 작은 것을 알 수 있다.

3. 현장적용 사례

2장에서 시험체 적용을 통해 확인된 시스템인식을 이용한 장력추정 기법을 현장에 적용해 그 타당성을 검증하였다.

3.1 영덕 1교 사장케이블

현장적용 첫 번째로서, 현재 실무에서 기존 이론(현이론, 선형회귀법)을 이용해 장력추정을 시행하고 있는 사장교 케이블에 적용하였다. 영덕 1교는 경기도 용인시 기흥구에 위치한 사장교로서 PPWS (Prefabricated Parallel Wire Strand) 케이블을 사용하였다.

Fig. 8과 같이 오른쪽 및 왼쪽 사장케이블 총 12개의 케이블에 대해 장력추정을 수행했으며, 기존이론과 장력추정오차를 비교하였다. Fig. 9와 같이 시스템인식을 이용한 장력추정 기법은 5% 내외의 장력추정 결과를 보인 반면, 기존이론을 이용한 장력추정은 몇몇 케이블에 대해 높은 오차를 보였다. 그러나 기존이론을 이용한 장

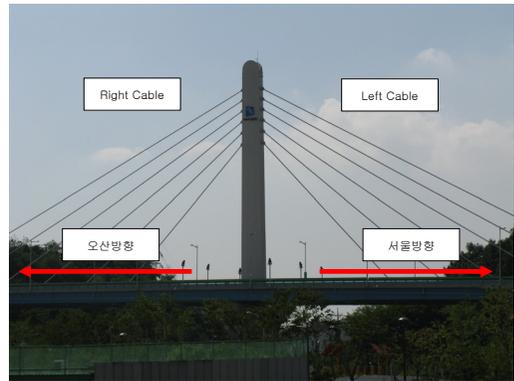


Fig. 8 영덕 1교 사장교

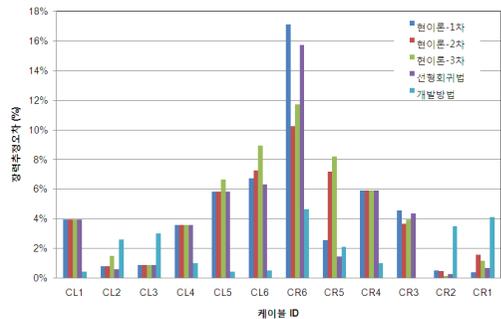


Fig. 9 영덕 1교 사장케이블 장력추정 오차 (%)

Table 4 영덕 1교 장력추정 오차 평균 및 표준편차 (%)

방법	평균	표준편차
현이론	4.42	4.59
선형회귀법	4.14	4.29
시스템인식	1.95	1.59

력추정 방법 역시 전체적으로 양호한 결과를 보였다. 이는 영덕 1교 사장케이블이 44m~95m의 길이를 갖는 긴 케이블로서 기존이론의 가정 사항과 유사하기 때문이다.

시스템인식을 이용한 장력추정 기법은 Table 4에서 보듯이 기존이론에 비해 장력추정오차의 표준편차가 작기 때문에 추정된 장력의 신뢰성이 높다고 할 수 있다.

3.2 인천대교 접속교 구간 외부 긴장재

일반교량의 외부 긴장재는 시공시에 사용되기도 하며, 완공후에 보강용으로 사용되기도 한다. 이러한 외부 긴장재에 대한 시스템인식을 이용한 장력추정 기법의 적용성을 살펴보기 위해 인천대교 접속교 구간의 외부 긴장재를 고려하였다. 외부 긴장재는 사장교나 현수교 케이블과 달리 Fig. 10과 같이 외부 긴장재 사이에 진동방지공이나 Deviation Block 이 설치되어 있다. 또한, 외부 긴장재는 HDPE 파이프로 피복되어 있으며, 내부는 부식방지를 위해 Mortar로 충전되어 있다. 따라서, 기존이론을 적용하기 어렵기 때문에 로드셀을 이용한 장력측정 방법외에 현재 실무에서 사용되는 적절한 방법은 없다.

Fig. 11과 Table 5에서 보듯이 기존이론은 영덕 1교 사장케이블과 달리 외부 긴장재에서 큰 오차를 보이고 있다. 이는 외부 긴장재가 기존이

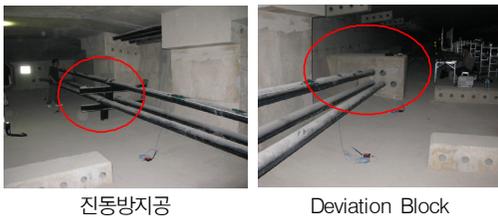


Fig. 10 인천대교 접속교 외부긴장재

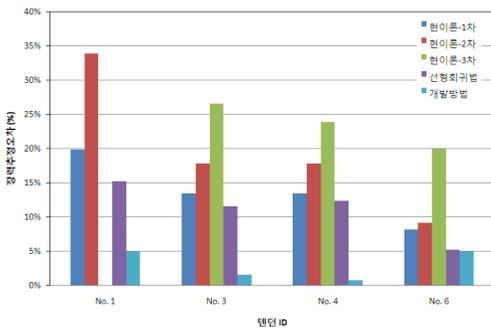


Fig. 11 인천대교 외부긴장재 장력추정 오차 (%)

Table 5 인천대교 장력추정 오차 평균 및 표준편차 (%)

방법	평균	표준편차
현이론	18.60	7.61
선형회귀법	11.13	4.19
시스템인식	3.11	2.21

론의 가정사항과 다르기 때문이다. 이에 비해 시스템인식을 이용한 장력추정 기법은 영덕 1교 사장케이블에 비해 오차가 증가했지만, 여전히 5% 이내의 장력추정 오차를 보이고 있다.

3.3 아암교 Extradosed 케이블

아암교는 인천대교 접속구간에 설치된 교량으로서, 사장교와 유사한 Extradosed 교로 시공되었으며, MS (Multi-Strand) 케이블이 사용되었다. 케이블은 HDPE 파이프로 피복되어 있으나,



Fig. 12 아암교 전경

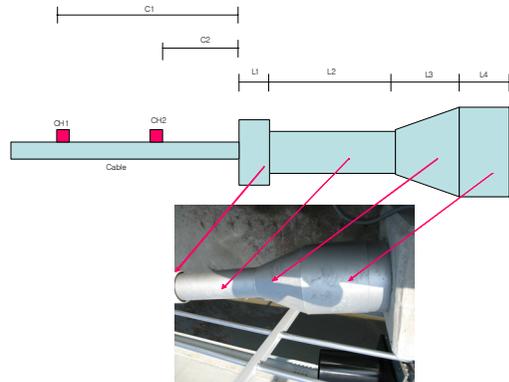


Fig. 13 진동측정 Setup

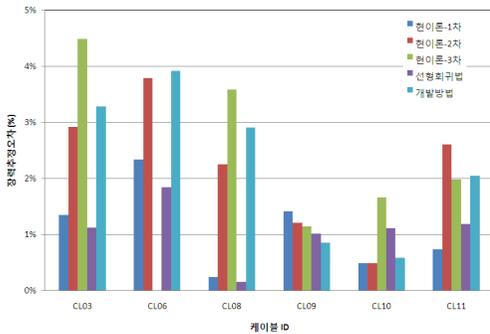


Fig. 14 아암교 장력추정 오차 (%)

Table 6 아암교 장력추정 오차 평균 및 표준편차 (%)

방법	평균	표준편차
현이론	1.93	1.24
선형회귀법	1.08	0.54
시스템인식	2.27	1.34

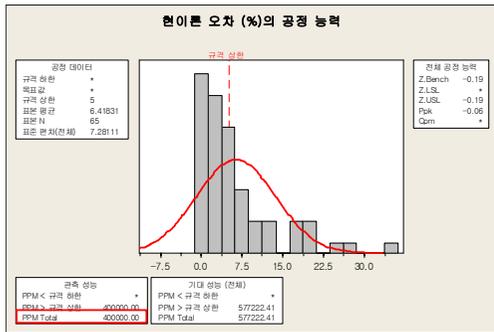


Fig. 15 현이론 현장적용 오차 공정능력

내부에 별도의 그라우팅을 실시하지 않았다.

아암교 케이블은 비교적 긴 케이블로서, 장력 추정 결과 Fig. 14와 Table 6과 같이 이론이론이 시스템인식을 이용한 장력추정 기법에 비해 다소 좋은 결과를 보였다. 하지만, 모든 방법에서 5% 이내의 장력추정 오차를 보였다. 현장에서 장력추정시 가속도 신호, 계측오차, 물성치 및 변수 오차, 온도영향 등 이론적으로 제거할 수 없는 오차 등으로 인해 5%의 오차이내로 장력을 추정할 수 있을 경우 실무에서 적용 가능한

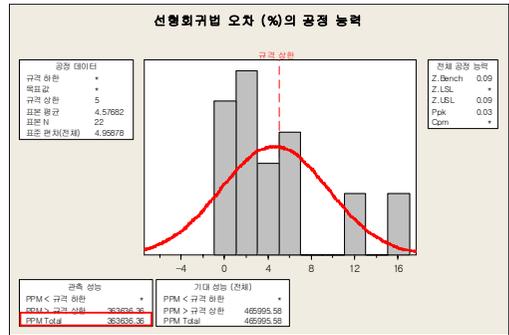


Fig. 16 선형회귀법 현장적용 오차 공정능력

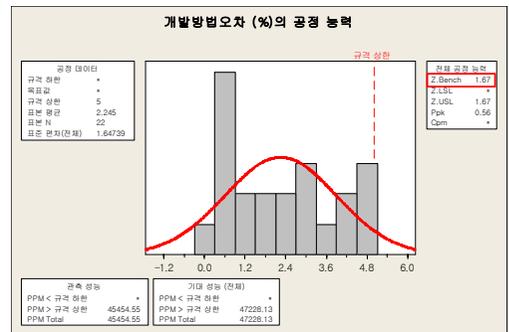


Fig. 17 시스템인식 기법 현장적용 오차 공정능력

Table 7 수율 및 단기 시그마 수준

방법	DMPO/Z-bench	수율 (%)	단기 시그마 수준
현이론	400,000	60.0	1.75
선형회귀법	363,636	63.6	1.85
시스템인식	1.67	95.3	3.17

방법으로 판단 할 수 있다.

3.4 현장적용 결과 시그마 수준 계산

3개의 현장적용 결과에 대해 각 장력추정 방법의 신뢰성을 검증하기 위해 시그마 수준을 계산하였으며, 이때 모든 방법에서 장력추정 오차 5%를 상한규격으로 설정하였다. Table 7과 같이 시스템 인식을 이용한 장력추정 기법이 이론에 비해 수율 및 단기 시그마 수준을 비교할

때 다양한 형태의 외부 긴장재에 대한 현장 적용성이 뛰어난 기법임을 알 수 있다.

4. 결론

본 기사는 다양한 형태의 외부 긴장재의 장력 추정을 위해 제안된 시스템인식을 이용한 장력 추정 기법을 시험체 및 현장에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

현이론 및 선형회귀법은 이론식에 근거하기 때문에 장력과 고유진동수의 관계식 유도시 사용된 가정사항과 유사한 조건을 가지는 외부 긴장재 (영덕 1교, 아암교)에 대해서는 실무에서 적용 가능한 정도의 장력추정 오차를 보였으나, 가정사항과 상이한 조건을 가지는 외부 긴장재 (인천대교 접속교 구간)에 대해서는 큰 장력추정 오차를 보여, 실무에서 적용하기 힘들 것으로 판단된다. 이에 비해 시스템 인식을 이용한 장력 추정 기법은 기존이론이 적용 가능한 외부 긴장재 뿐만 아니라 기존이론을 적용하기 힘든 외부 긴장재에 대해서도 적용 가능한 방법이며, 이는 시스템인식 기법이 유한요소모델을 기반으로 하

기 때문이다. 또한 측정된 고유진동수와 계산된 고유진동수의 오차를 이용해 추정된 장력의 신뢰성을 간접적으로 판단할 수 있다. 따라서 시스템인식을 이용한 장력추정 기법은 다양한 형태의 외부긴장재의 장력추정에 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 국토해양부, 정착부를 포함한 긴장재의 비파괴 안전진단기술 개발 및 실용화 최종보고서, 2009.
2. 박대효, 문석용, 주환중, 김병화, “진동기반 SI기법을 이용한 현수교 행어의 장력추정: I. 이론”. 대한토목학회 논문집, 제27권, 제2A호, 165-172, 2007.
3. Irvine, H. M., Cable Structures, MIT Press, Cambridge, Mass., 1981.
4. Shimada, T., A Study on Maintenance and Management of the Tension Measurement for the Cable of Bridge, Ph.D. Dissertation, Kobe University, 1995.

담당 편집위원: 박규식
(RIST 강구조연구소 책임연구원)
kyusikpark@rist.re.kr