

# 사장교 케이블의 동특성 추정을 위한 케이블 가진 로봇의 개발

## Development of Cable Exciting Robot for Estimating Dynamic Properties of Stay Cables

이종재\* · 김재민\*\* · 안상섭\*\*\* · 최준성\*\*\*\*

Lee, Jong-lae · Kim, Jae-Min · Ahn, Sangsup · Choi, Jun-Sung

---

### ABSTRACT

It is necessary to estimate the dynamic characteristics of stay cables i.e., the natural frequencies and the damping ratios of the stay cables to design cable damper for appropriate mitigation of cable vibrations and/or to estimate the tension of cables in service. In this study, a cable exciting robot for evaluating dynamic characteristics of stay cables has been developed, and the feasibility of the developed system has been demonstrated through a field test on the stay cable installed at the test yard of Highway and Transportation Technology Institute (HTTI). The dynamic characteristics of the stay cable were estimated based on acceleration data as well as displacement measured by digital image processing technique.

**Keywords** : Stay cables; cable exciting robot; natural frequency; damping

---

사장교에 있어서 케이블은 중요한 구조 부재로써, 차량, 풍우 등에 의한 케이블의 진동은 교량 전체의 안전성과 사용성에 직접적인 관계가 있다. 케이블에 발생하는 과도 진동을 억제하기 위하여 댐퍼를 설치하고자 할 때, 케이블 댐퍼의 설계시 또는 또한 필요한 감쇠 성능을 가진 댐퍼를 설치한 후 최종적으로 성능을 확인하고자 할 때, 케이블의 감쇠비를 정확히 산정하는 것이 필요하다. 한편, 케이블이 제 기능을 수행하기 위해서는 감쇠비 뿐만 아니라 케이블에 걸리는 장력을 평가하는 것이 중요하다. 일반적으로 케이블의 장력을 직접 평가하기는 매우 어려우므로 케이블의 공진주파수를 이용하여 간접적으로 추정하는 방법이 대안으로 제시되고 있다. 따라서 감쇠비와 공진주파수 등 케이블의 동특성을 합리적으로 추정하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 원하는 진동모드에 대한 정확한 가진이 가능하며, 이로부터 케이블의 동특성을 정밀하게 산정하기 위한 사장 케이블 가진 로봇을 개발하였다. 사장 케이블은 단면적에 비해서 비직지 길이가 길어서 힘강성이 낮을 뿐만 아니라 초기 장력에 비해 동적 거동시 나타나는 축방향 장력의 크기가 작으므로 케이블 자체의 감쇠비는 대단히 낮으므로, 케이블의 질량에 비해 비교적 작은 가진 질량으로도 가진이 가능하다. 개발된 케이블 가진 로봇의 성능검증을 위하여 한국도로공사 도로교통기술원에 설치된 100m 길이의 모형 케이블

---

\* 한국과학기술원 스마트 사회기반시설 연구센터, 연구조교수, E-mail: [jongjae@kaist.ac.kr](mailto:jongjae@kaist.ac.kr)

\*\* 전남대학교 건설환경공학부, 부교수, E-mail: [jm4kim@chonnam.ac.kr](mailto:jm4kim@chonnam.ac.kr)

\*\*\* 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원, E-mail: [ahns@freeway.co.kr](mailto:ahns@freeway.co.kr)

\*\*\*\* (주)한국유지관리, 대표이사, E-mail: [ceo@kmcotech.co.kr](mailto:ceo@kmcotech.co.kr)

에 대하여 성능실험을 수행하였다. 성능실험에서는 두개의 가진 주파수(1.07, 2.14Hz)를 이용하여 케이블을 장시간 가진하면서 가진 응답을 계측하고, 가진력을 제거한 이후의 자유감쇠 응답 및 상시진동 응답을 계측하였으며, 각각에 대한 케이블의 동특성에 대한 결과를 분석하였다.

그림 1에서는 케이블 가진 로봇의 성능실험 장면을 나타내었다. 40m 지점에 가진 로봇을 설치하고, 60m 지점에 무선 가속도계 및 변위계측을 위한 디지털 캡코더 및 타깃을 설치하였다. 1.07Hz의 가진주파수로 2회 반복하여 가진 응답과 자유감쇠 응답을 계측하고, 2.14Hz의 가진주파수에 대해서도 2회 반복하여 각각 응답을 계측하였다. 그림 2에서는 가속도 계측 신호의 시간-주파수 응답 및 시계열 응답을 나타내었으며, 그림 3에서는 영상처리기법을 통하여 구한 변위의 시계열 응답을 나타내었다. 가진장치에 의한 케이블의 변위응답은 가진력의 크기에 비례하고, 가속도 응답은 가진력의 크기와 가진주파수의 제곱에 비례한다<sup>1</sup>. 따라서 그림 2에서 보는 바와 같이 2.14Hz의 가진주파수에 대한 가속도 응답은 1.07Hz로 가정한 응답에 비해 대략 크기가 4배 정도 증가한 것을 확인 할 수 있으나, 변위 응답의 경우는 케이블의 첫번째 고유주파수(0.94Hz) 부근인 1.07Hz로 가정한 경우에 더 큰 진폭이 발생함을 알 수 있었다. 추후에는 정현진동실험(sine sweeping test)을 통하여 케이블의 고유주파수를 구한 후, 공진진동실험(resonance test)을 수행하여 케이블의 최대 변위 응답을 키우는 것이 바람직하다.

그림 4와 그림 5에서는 가진구간과 자유감쇠구간(상시진동구간) 각각에 대한 가속도와 변위 응답의 스펙트럼 값을 나타내었다. 자유감쇠 응답의 경우에도 가진주파수 부근의 응답 신호만이 크게 증폭된 것을 확인 할 수 있다. 표 1에서는 추계론적 부구조기법(Stochastic subspace identification)<sup>2</sup> 을 이용하여 추정한 케이블의 고유주파수와 감쇠비를 정리하여 나타내었다. 고유주파수는 4차 모드까지 가속도 신호, 변위신호, 가진응답, 자유응답의 여부에 관계없이 거의 일정하게 추정되었으나, 케이블의 감쇠비의 경우에는 0.1% 미만에서 큰 차이를 나타내었다. 일반적으로 첫번째 모드의 감쇠비가 0.1~0.2% 정도인 것에 비하여<sup>3</sup>, 본 실험으로 구한 모드 감쇠비는 상당히 작은 값으로 나타났다. 이는 케이블의 감쇠비가 진폭에 따라 달라지는 경향을 고려해 볼 때, 보다 정확한 케이블의 감쇠비 추정을 위해서 큰 진폭으로 가진 할 필요가 있음을 보여준다. 추후, 공진진동실험과 함께 가진력을 높이기 위한 가진 로봇의 보완이 요구된다.

### 감사의 글

본 연구는 건설교통부주관 지역기술혁신사업 내풍기술연구단의 연구비 지원에 의한 결과로써, 저자들은 이의 지원에 감사한다.

### 참고문헌

1. 김남식, 정운, 서주원, 안상섭 (2003), “사장교 케이블 동특성 평가를 위한 케이블 가진시스템 개발”, 한국지진공학회 논문집 7(4), pp. 71-79.
2. Pecters, B., De Roeck, G (1999) Reference-Based Stochastic Subspace Identification for Output-Only Modal Analysis. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 13, No. 6, pp. 855-878.
3. 이진학, 구기영, 김남식, 윤정방 (2004), “확장형 칼만필터를 이용한 케이블의 동특성 추정”, 대한토목학회 논문집 24(6A), pp. 1267-1274.

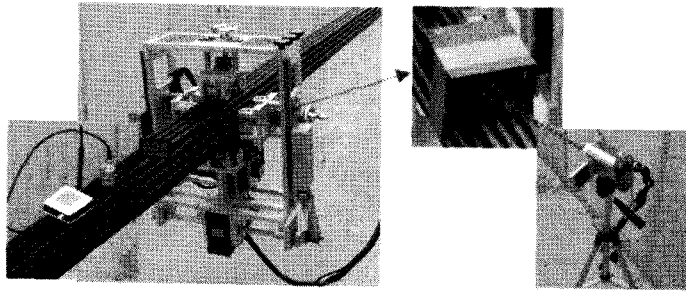


그림 1. 케이블 가진 로봇의 성능실험

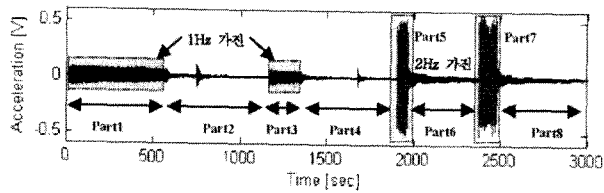
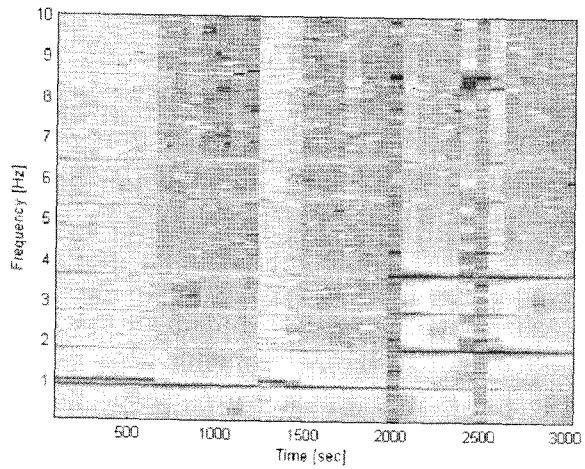


그림 2. 가속도 계측 신호의 시간-주파수 응답 및 시계열 응답

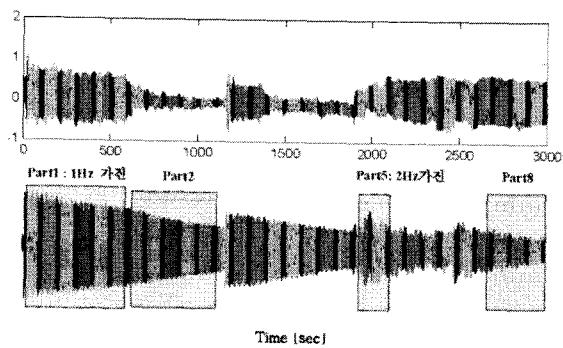


그림 3. 변위 시계열 응답

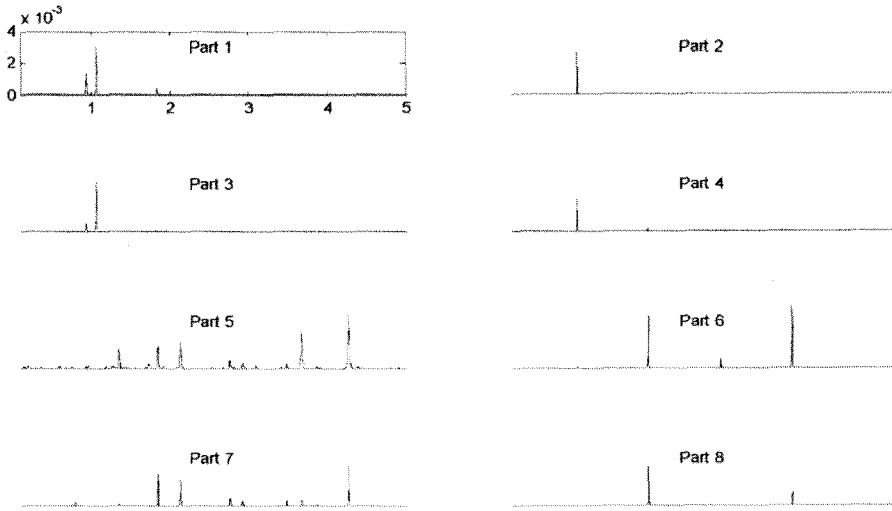
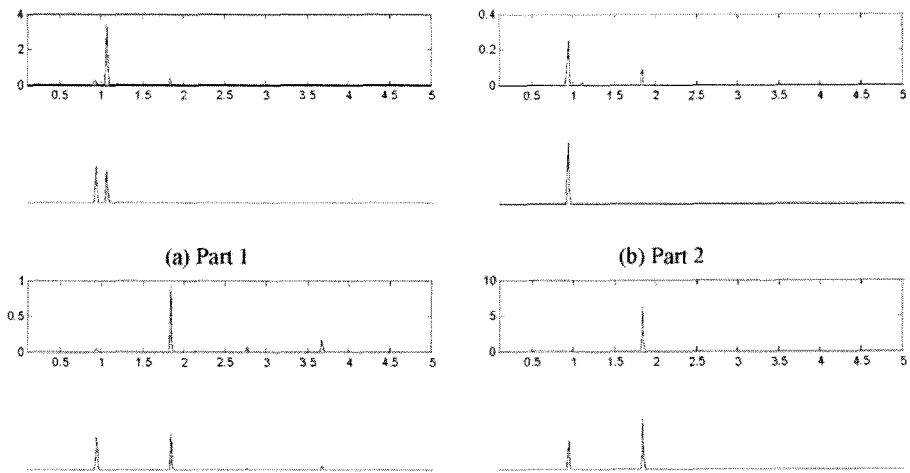


그림 4. 각 구간별 스펙트럼 분석 결과 : 가속도



(a) Part 1 (b) Part 2  
(c) Part 5 (d) Part 8  
그림 5. 각 구간별 스펙트럼 분석 결과: 변위

표 1. 케이블의 동특성 추정 결과

Mode	가속도				변위			
	Part2		Part8		Part2		Part8	
	주파수(Hz)	감쇠비(%)	주파수(Hz)	감쇠비(%)	주파수(Hz)	감쇠비(%)	주파수(Hz)	감쇠비(%)
1	0.938	0.025	0.938	0.025	0.938	0.043	0.940	0.073
2	1.842	0.013	1.842	0.013	1.840	0.034	1.846	0.050
3	2.766	0.024	2.766	0.024	2.763	0.132	2.771	0.052
4	3.673	0.018	3.673	0.018	3.669	0.061	3.681	0.048