

스마트 케이블-댐퍼의 성능검증을 위한 sag가 고려된 사장 케이블의 진동해석 Vibration Analysis of Stay Cable Considering Sag for Performance Verification of Smart Cable-Damper

박정수* · 김인호* · 정형조†

Jeongsu Park, In-Ho Kim and Hyung-Jo Jung

1. 서 론

최근 들어 건설되고 있는 사장교, 현수교를 비롯한 케이블을 사용한 대형토목구조물은 그 규모가 커짐에 따라서 케이블의 길이 또한 점점 증가하고 있다. 하지만 이렇게 길이가 긴 케이블은 구조물의 장주기화를 초래하여 바람이나 지나다니는 차량들로 인하여 발생하는 진동에 취약하다는 약점을 가지고 있기 때문에 진동 저감을 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 케이블의 진동을 제어하는 효과적인 시스템 중 하나는 스마트 재료인 MR 유체를 사용한 댐퍼를 이용한 반능동 제어시스템으로, 자기장이 흐르면 고체처럼 거동하는 유체의 특성을 통해 구조물을 제어함으로써 제어를 위해 필요한 소비전력을 줄이고 제어력을 구조물에 직접 가하지 않아 안정성을 보장할 뿐만 아니라 제어 효과 또한 기존의 능동형 제어시스템과 유사하다는 장점을 가지고 있다. 하지만 센서와 컨트롤러를 비롯한 복잡한 시스템 구조로 인하여 유지 관리가 어렵고 비용이 많이 소요된다는 점에서 시스템의 복잡성을 최소화하고 추가적인 외부 전력 공급이 필요하지 않은 스마트 수동형 제어 시스템이 제안되었다⁽¹⁾. 스마트 수동형 제어 시스템이란 반능동 제어 시스템의 센서, 컨트롤러, 그리고 외부전력 공급을 위한 복잡한 시스템을 electromagnetic induction (EMI)으로 대체한 시스템이다. EMI는 영구자석과 솔레노이드 코일로 구성되어 있어서 둘 사이의 상대변위를 통해 유도전류를 생산하는 장치로써 이를 이용하면 구조물의

움직임을 이용하여 별도의 외부 전력 장치 필요 없이 MR 댐퍼에 전력을 공급할 수 있을 뿐만 아니라 구조물의 움직임에 따라 생산 전력이 달라지는 EMI(electromagnetic induction) 장치가 반능동 제어 시스템의 컨트롤러 기능을 대신할 수 있다. 본 연구에서는 수치해석을 통하여 스마트 수동형 시스템의 성능을 검증해본다. 해석 대상으로는 길이 203.2m의 케이블이 사용되었으며, 케이블의 길이 증가로 인한 처짐현상(sag)이 구조물의 거동에 영향을 알아보기 위하여 sag를 고려하여 수치해석을 수행하고 이를 sag를 고려하지 않았을 때와 비교해본다.

2. 케이블의 수치적 모델링

2.1 케이블의 운동방정식

Figure 1은 해석에 사용한 케이블 모델을 간단히 도식화 한 것이다. 해석에 사용된 모델은 기울기와 sag의 영향이 고려된 것으로 $v_t(x, t)$ 는 케이블의 길이방향에 대한 수직 변위, l 은 케이블의 길이, 그리고 $f_w(x, t)$ 는 케이블에 작용하는 분포하중이다. 케이블 요소의 운동방정식은 식(1)과 같다.

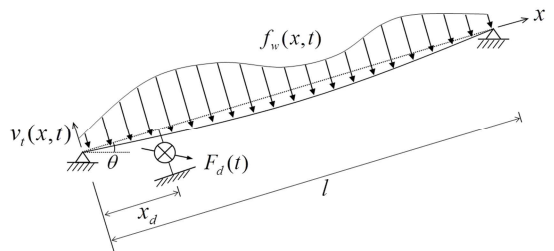


figure 1 In-plane motion of cable with sag⁽²⁾

$$m \cdot \ddot{v}_t(x, t) + c \cdot \dot{v}_t(x, t) - T_0 \frac{d^2}{dx^2} v(x, t) + \frac{\lambda^2}{l^3} T_0 \int_0^l v(x, t) dx = f(x, t) \quad (1)$$

† 교신저자; 정희원, 건설 및 환경공학과, 한국과학기술원

E-mail : hjung@kaist.ac.kr

Tel : 042-350-3666, Fax : 042-350-3610

* 건설 및 환경공학과, 한국과학기술원

여기서 m , c 는 각각 단위길이당 케이블의 질량과 감쇠계수, T_0 는 케이블 장력, 그리고 λ^2 는 sag와 관련된 독립 변수로서 sag가 고려되지 않았을 때는 0의 값을 가진다. 수치해석에 사용된 모델의 경우 단위길이당 질량과 장력은 각각 51.3kg/m 2659kN이며 sag ratio는 0.671이다.

MR 댐퍼는 최대 출력이 2kN인 Terasawa 모델⁽³⁾을 사용하였고 케이블 하단부로부터 3% 위치에 설치하였다. EMI는 MR댐퍼와 같은 위치에 설치되었으며, 케이블 가진은 케이블 1차 진동수의 조화함수를 사용하여 5주기만큼 가진시킨 후 자유진동을 관찰하였다.

2.2 수치해석 결과

수치해석은 케이블의 비제어시, 수동형, 그리고 본 스마트 수동형을 사용한 경우로 각각 수행되었다. Figure 2에 나타난 그래프는 케이블 중앙 부분의 변위 값을 비교한 것이다.

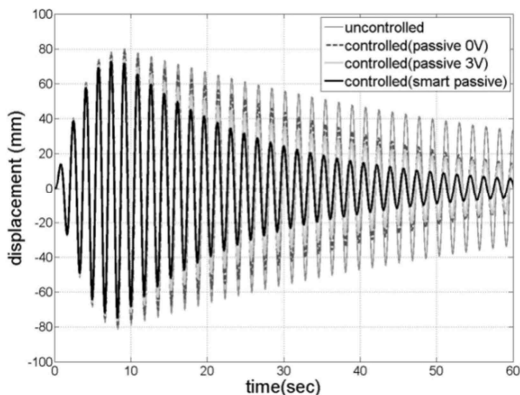


figure 2 simulation results of each control system

수치해석 결과, 비제어시와 수동형 제어시스템을 사용한 경우보다 스마트 수동형 시스템을 사용하였을 때, 케이블의 변위가 줄어들었으며 중간 지점 변위의 제곱평균(RMS)값은 약 1.36배 감소하였다.

Table 1 root mean square value of displacement

Case	RMS (no sag)	RMS (sag)	error
No Control	0.0533	0.0510	4.30%
Passive (0V)	0.0446	0.0424	4.80%
Passive (3V)	0.0361	0.0348	3.76%
Smart Passive	0.0293	0.0285	2.64%

또한 케이블의 1차 고유진동수는 sag를 고려할 경우 3.58Hz, 고려하지 않을 경우 3.52Hz로 미소하

게 달라진다. 두 가지 경우의 차이를 알아보기 위하여 sag를 고려한 경우와 하지 않은 경우를 각각의 1차 진동수로 케이블을 가진하여 그 결과값을 비교하였다. Table1은 케이블 중간지점의 변위의 RMS 값을 구하여 비교한 것으로, sag를 고려하였을 때 결과 값이 약 4% 내외로 감소한다.

3. 결 론

본 연구에서는 스마트 수동형 제어 시스템을 설치한 사장케이블의 거동을 수치해석을 통하여 알아보았다. 해석 대상으로는 길이 203m의 케이블이 사용되었으며 댐퍼는 3% 위치에 설치 가정하였다. 해석 결과 스마트 수동 시스템을 사용하였을 때, 비제어 시보다 큰 효과를 얻을 수 있었으며, 또한 수치해석에서 sag를 고려하지 않은 경우 sag를 고려한 경우보다 결과값이 더 크게 추산되는 것이 확인되었다. 케이블의 길이가 길어질수록 sag로 인한 오차는 더욱 증가하기 때문에 정확한 해석을 위해서는 케이블의 sag를 고려하는 것이 필수적이다.

후 기

본 연구는 국토해양부 건설교통기술연구개발사업의 연구비지원(07high Tech A01) 및 국토해양부에서 후원하는 U-City 석박사과정 지원사업에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Cho, S.W, Jung, H.J and Lee, I.W., 2005, Smart passive control system based on magnetorheological damper, Smart Materials and Structures, Vol. 14, pp.707~714.
- (2) I-H Kim, J-S Park, H-M Jeon, H-J Jung, H Myung., 2011, Numerical investigation on response reduction performance of MR damper-based smart damping system for stay cables, The international Conferences, Advances in Structural Eng. Mechanics (ASEM'11), Seoul, Korea, Sept. 18-22, 2011
- (3) Terasawa, T., Sakai, C., Ohmori, H., Sano, A., 2004, Adaptive identification of MR damper for vibration control, 43rd IEEE Conference on Decision and Control.