

차량 하중을 받는 교량의 진동제어

Vibration Control of Bridge with Vehicle Load

하준식* · 조지성** · 박선규*** · 이인원****

Ha, Jun-Sik · Jo, Ji-Seong · Park, Sun-Kyu · Lee, In-Won

1. 서 론

최근에 물류증가에 따라 운송 수단이 대형화되고 교량의 경량화가 더욱 가속화되고 있다. 이러한 이유로 인해 강교 또한 많은 곳에서 사용되어 지고 있다. 하지만 강교의 경우 안전성에는 문제가 없지만 사용성에 문제가 제기 되는 경우가 많이 있다. 이처럼 사용성의 문제로 인해 보도용으로 사용되고 있거나 차량의 정체로 인한 영향으로 발생하는 진동이 통행자에게 불안감을 주는 경우가 많이 발생하고 있다. 그렇기 때문에 통행자에게 심리적인 불안감을 유발시키는 사용성의 문제를 해결하기 위한 방법이 개발되어야 한다. 종래에는 교량의 구조단면을 증가 시켜서 안전성을 확보하려는 방법이 주로 제시되었지만 이는 비용에 비하여 진동감소율이 미미하며 비효율적이다. 최근에는 진동 응답을 억제하거나 감소시키려는 방법들이 제시되고 있는데 국내에서는 TMD를 이용한 교량의 진동제어를 권호철(1998)이 수동 제어장치를 권순덕(2000)이 시도하였다. 본 연구에서는 기존의 TMD와 King-post Mechanism을 적용한 새로운 진동 제어 장치를 제안하였다. 차량 하중에 의해 통행자가 느끼는 가속도와 변위를 감소시키고 기존의 교량에 설치에도 편리함을 줄 수 있도록 장치를 고안하였다. 교량의 수직진동을 제어할 수 있도록 개발되었으며 수치해석을 통해서 그 제어성능을 평가하였다.

2. 교량-진동제어장치의 운동방정식

2.1 교량의 운동방정식

단순 지지보의 운동방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$M \frac{\partial^2 V(x, t)}{\partial t^2} + C \frac{\partial V(x, t)}{\partial t} + EI \frac{\partial^4 V(x, t)}{\partial x^4} = f(x, t) \quad (1)$$

식 (1)에서 M , C , K 는 각각 교량의 단위길이당 질량, 감쇠, 강성이며 E 는 탄성계수, I 는 관성모멘트를 나타낸다. 식 (1)에서 수직변위 V 는 모드 형상, $\phi(x)$ 과 일반화 좌표계의 변위, $q(t)$ 의 곱으로 표현할 수 있다.

$$V(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(x) q_i(t) \quad (i=1, 2, \dots) \quad (2)$$

여기서 단순지지보의 모드 형상 $\phi(x)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

*한국과학기술원 건설및환경공학과 석사과정 · 042-869-5658(E-mail:hajusi@kaist.ac.kr)
**정회원 · 한국과학기술원 건설및환경공학과 박사과정 · 공학석사 · 042-869-5658(E-mail:pyramid@mail.kaist.ac.kr)
***정회원 · 성균관대학교 토목환경공학과 교수 · 공학박사
****정회원 · 한국과학기술원 건설및환경공학과 교수 · 공학박사 · 042-869-3618(E-mail:iwlee@kaist.ac.kr)

$$\phi_i(x) = \sin \frac{i\pi x}{L} \quad (i=1, 2, \dots) \quad (3)$$

여기에서 식(1)에 식(2)를 대입하고 직교 조건을 적용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{q}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = \frac{\int_0^L (\sin \frac{i\pi x}{L}) f(x, t) dx}{M \int_0^L (\sin \frac{i\pi x}{L})^2 dx} \quad (i=1, 2, \dots) \quad (4)$$

여기서 차량하중을 P_w 라고 하면 하중 $f(x, t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(x, t) = P_w \delta(x - vt) + C_d \dot{z}(t) + K_d z(t) \quad (5)$$

2.2 수동형 진동제어 장치의 운동방정식

진동제어 장치의 운동방정식은 식(6)과 같다.

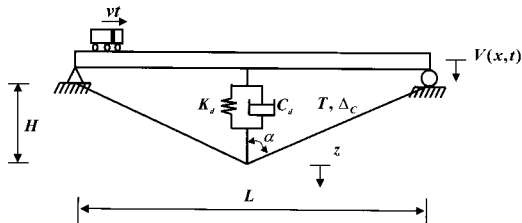
$$m(\ddot{z}(t) + \ddot{V}(\frac{L}{2}, t)) + C_d \dot{z}(t) + K_d z(t) = -2T \cos \alpha \quad (6)$$

식(6)에서 m 은 케이블의 유효질량을 C_d 는 진동제어장치의 감쇠계수를 K_d 는 진동제어장치의 스프링상수를 나타내며 T 는 케이블의 장력을 나타낸다. 또 케이블의 장력(T)은 식(7)과 같다.

$$T = \frac{E_c A_c \cos^2 \alpha}{H} (z(t) + V(\frac{L}{2}, t)) \quad (7)$$

여기서 E_c 는 케이블의 탄성계수를 A_c 는 케이블의 단면적을 나타낸다. 식(6)과 식 (7)로부터 진동제어 장치의 최종적인 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$m(\ddot{z}(t) + \ddot{V}(\frac{L}{2}, t)) + C_d \dot{z}(t) + K_d z(t) + \frac{E_c A_c \cos^3 \alpha}{H} (z(t) + V(\frac{L}{2}, t)) = 0 \quad (8)$$



여기서 사용한 교량과 수동형 진동제어장치는 그림(1)과 같이 모델링 하였다. 수동형 진동제어 장치를 고정하기 위하여 King-Post Mechanism의 개념을 적용 케이블을 이용하여 고정하였다.

그림 1. 교량과 수동형 진동제어장치

3. 수치 해석 예제

3.1 교량 및 진동제어장치 제원

해석에 사용된 교량은 강구조학회지에 실린 ‘압연형강을 이용한 단경간 강교량 설계표준화’에 나온 강합성 교량으로서 전체 제원 및 단면 형상과 물성치는 다음과 같다.

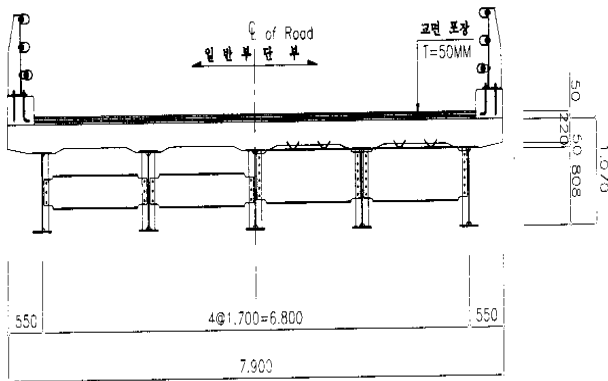


그림 2. 해석 대상 교량의 단면

표 1. 해석 대상 교량의 제원

특 성	기 호	제 원
교 량		
경간장	L	18(m)
휨강성	EI	$2.1 \times 10^8 N/m^2$
밀 도	ρ	$14182 kg/m^3$
감쇠비	ξ	0.006
제어장치		
탄성 계수	E_c	$2.1 \times 10^{11} N/m^2$
단 면 적	A_c	$0.00102 m^2$
스프링계수	K_d	1.0×10^6
감쇠 계수	C_d	6.4×10^4

여기서 사용한 스프링 계수와 감쇠 계수는 Parameter Study를 통해 구한 최적 값이다. 수치해석은 최적값을 사용하였다. 또한 차량하중은 DB-24를 사용하였다.

3.2 단경간 교량 해석

DB-24의 차량이 시속 60km/h의 속도로 본 교량을 통과할 때의 변위와 가속도를 비교 분석하였다. 교량 중심부에서 가장 큰 응답이 발생하기 때문에 교량 중심부의 변위와 가속도를 비교 분석하였다. 또한 가속도의 경우는 최대가속도만으로 사용성을 평가하는 것에는 무리가 있다. 따라서 사람이 불안감을 느끼게 될 가능성을 측정하는 수단으로 가속도의 표준 편차를 사용하였다.

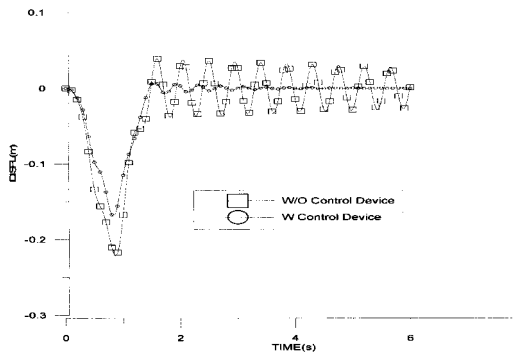


그림 3. 경간 중앙 점의 변위 비교

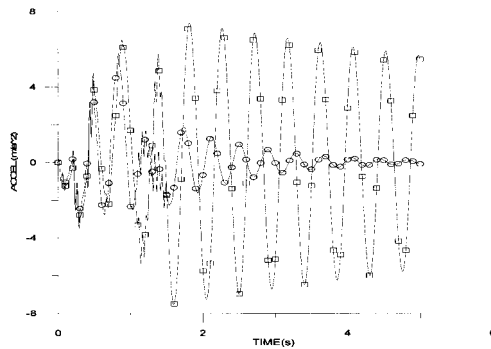


그림 4. 경간 중앙점의 가속도 비교

위의 그래프에서 볼 수 있듯이 변위와 가속도의 최대 값이 감소하였음을 알 수 있다. 또한 자유 진동의 경우에도 수동형 진동제어장치를 설치하였을 경우에는 훨씬 더 빠른 속도로 제진되고 있음을 알 수 있다. 이상에서와 같이 고안된 수동형 진동제어 장치는 사용성의 증대를 통해 통행자의 심리적 안전성 확보라는 목표를 달성했다고 볼 수 있다. 여기서 또 하나 생각 할 것은 차량이 교량을 지나간 후인 2초주위에 최대 가속도가 발생했다는 점이다. 그러므로 가속도의 제진을 평가하기 위해서 최대가속도가 발생하는 시간 이전까지의 표준편차를 구하여 비교하였다.

표 2. 최대 응답 감소율 비교

	감 소 량	백분율(%)
최대 변위	0.0517(m) 감소	23(%) 감소
최대 가속도	1.6208 m/s^2 감소	22(%) 감소
가속도 표준편차	1.6746 감소	46(%) 감소

4. 결 론

본 연구를 통해 차량 하중을 받는 교량의 사용성을 향상시키고, 유지관리를 최소화할 수 있으며 또한 기존 교량의 장착에도 편리한 수동 진동제어장치를 고안하고 그 성능을 검증하였다. 또한 새로운 수동 제어장치를 적용한 교량의 운동방정식을 유도하였다. 또한 수치 해석 결과를 통해 알 수 있듯이 변위와 가속도가 상당히 감소하였다. 따라서 본 수동 진동제어장치는 차량하중에 의한 진동을 저감시켜서 통행자의 불안감을 제거하여 교량의 사용성을 향상시키는데 뛰어난 효과를 발휘하였다. 또한 기존의 교량에도 정착할 수 있어서 사용성에 문제를 보이는 많은 교량들의 사용성 증대를 위해 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국가지정 연구실인 구조물 내진제어 연구실의 지원 하에 이루어졌습니다. 지원에 깊은 감사 드립니다.

참고문헌

1. Ho-Chul Kwon, Man-Cheol Kim & In-Won Lee, Vibration Control of Bridges under Moving Loads, *Computers and Structures*, Vol. 66, No. 4, pp. 473-480, 1998.
2. J. J. Connor, Introduction to Structural Motion Control, pp261-299
3. 권순덕, 이일근, 차량하중에 의한 진동을 완화하는 수동제어장치의 실패 적용, *대한토목학회 논문집*, vol. 20, No 2-A, pp265-272
4. 김준형, 수정된 King-Post Mechanism을 이용한 교량 구조물의 최적진동제어, 석사학위 논문, 1996
5. 이재혁, 김성태, 윤태양 & 은성운, 압연형강을 이용한 단경간 강교량 설계 표준화, *강구조학회지*, 14권 1호, pp72-85
6. Soong, T. T. and Dargush, G.F., *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, John Wiley & Sons., 1997.