

교량의 사용성 증가를 위한 진동제어

Vibration Control of Bridge for Serviceability

하준식* 조지성** 박선규*** 이인원****
Ha, Jun-Sik Jo, Ji-Seong Park, Sun-Kyu Lee, In-Won

ABSTRACT

This paper mainly propose the new passive vibration control device, named BRV(the bridge reduced vibration), for reducing excessive traffic-induced vibration of bridges and for measuring performance of BRV numerical example was simulated. The purpose of BRV is mainly on reducing vertical acceleration and displacement of bridge. In BRV we can control the stiffness and damping coefficient to accept the performance we want. The result of simulation showed that the vertical acceleration and displacement was effectively diminished. It would be concluded that BRV can be used to improve the serviceability of bridge and fatigue life etc.

1. 서 론

최근에 물류증가에 따라 운송 수단이 대형화되고 교량의 경량화가 더욱 가속화되고 있다. 교량의 경량화로 인해 안전성에는 문제가 없지만 사용성에 문제가 제기 되는 경우가 많아지고 있다. 이처럼 보도교인 경우 또는 일반 교량이 정체로 인한 영향 등으로 발생하는 진동이 통행자 즉, 운전자, 승객 및 보행자에게 불안감을 주는 경우가 많이 발생하고 있다. 그렇기 때문에 통행자에게 심리적인 불안감을 유발시키는 사용성의 문제를 해결하고 반복하중에 의한 피로파괴를 억제할 수 있도록 진동을 흡수 소산시킬 수 있는 방법이 개발되어야 한다.

*한국과학기술원 건설및환경공학과 석사과정 · 042-869-5658(E-mail:hajusi@kaist.ac.kr)

**정회원 · 한국과학기술원 건설및환경공학과 박사과정 · 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)

차량 하중의 경우에 교량의 진동을 저감하기 위해 노면의 평탄화나 조인트 제거 같은 진동원에 대한 대책을 제시하는 방법과 교량의 충격 진동을 흡수하거나 감쇠하는 완충 장치를 갖는 완충구조를 설치하는 방법이 있다. 교량의 구조단면을 증가 시켜서 안전성을 확보하려는 방법이 주로 제시되기도 했지만 이는 비용에 비하여 진동감소율이 미미하며 비효율적이다. 또한 종래의 기술 중 교량의 진동 저감을 위해 개발된 기술은 능동, 수동 및 반능동 제어기술이 있으나 실제 시스템 구현에 비용 및 기술상의 어려움이 있어 이론적 연구가 대부분이었다. 능동 제어기의 경우는 상대적으로 거대한 교량을 제어하기 위해 큰 전원이 필요하므로 가로등의 유지비보다도 많은 유지비가 필요한 점등의 문제점으로 인해 적용되기가 힘들고 반능동 제어기술의 경우도 진동감소 효과 및 유지관리 측면 즉, 사용기간 내내 별도의 전원을 공급해야 하는 문제로 인해 실제 적용되기가 힘들다. 수동제어의 경우는 최근에 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. 차량하중에 의해 통행자가 느끼는 가속도와 변위를 감소시키고 기존의 교량에 설치에도 편리함을 줄 수 있도록 장치를 고안하였다. 그리고 교량의 통행차단 없이도 간편하게 설치가 가능하며 수동장치이므로 별도의 전원 공급이 필요하지 않은 점이 편리하다. 교량의 휨변형을 이용한 제어장치의 경우는 교량의 수직 처짐에 비해 상대적으로 크기가 작은 휨변형을 이용하여 차량에 의한 진동을 제어하고자 하였으나 수직처짐의 경우에 평균 10% 정도의 감소효과를 얻었으므로 이보다 더 큰 진동제어 효과를 얻기 위해서 처짐의 크기가 큰 수직 변위를 진동저감에 직접 이용하였다. 그리고 수치해석을 통해서 그 제어성능을 평가하였다.

2. 교량-진동제어장치의 모델링 및 운동방정식

2.1 교량-진동제어장치의 모델링

교량에 BRV를 설치했을 때의 도면은 그림 1과 같다. 교량은 사용성에 문제를 보이는 경우가 많은 강교의 경우를 고려하였다.

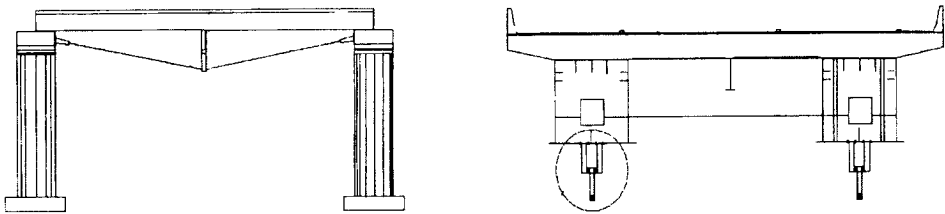


그림 1. 교량과 수동형 진동제어장치 정면도 및 측면도

그림 2는 탄성체 및 점탄성 물질을 포함하는 BRV를 확대한 도면이다. 탄성체와 점탄성 물질을 이용하여 진동을 제어하도록 고안하였으며 탄성체는 설치가 간단한 스프링을 사용하였다.

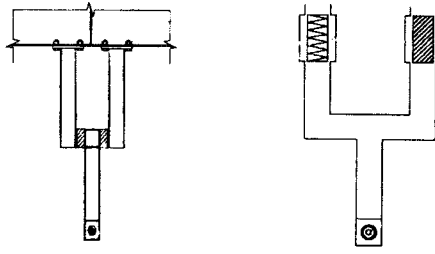


그림 2. 수동형 진동제어장치

그림 3은 BRV를 설치한 교량의 진동 해석을 위해 모델링한 개략도이다. 수동형 진동제어 장치를 고정하기 위하여 King-Post Mechanism의 개념을 적용 케이블을 이용하여 고정하였다.

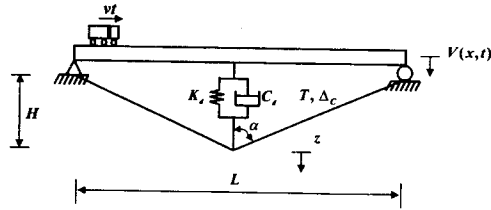


그림 3. 교량 및 수동형 진동제어장치

2.2 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.

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

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

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

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

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

2.3 수동형 진동제어 장치의 운동방정식

진동제어 장치의 운동방정식은 식(6)과 같다.

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

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 진동 제어 장치의 최종적인 운동방정식을 얻을 수 있다.

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

2.4 최적 탄성계수와 점성계수 결정을 위한 방정식

가격 함수를 J 라고 하자. 이때 J 는 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \alpha \cdot \frac{|d_{con.}|_{\max}}{|d_{uncon.}|_{\max}} + (1 - \alpha) \frac{|a_{con.}|_{\max}}{|a_{uncon.}|_{\max}} \quad (9)$$

여기서 α 는 가속도와 속도의 제어에 관한 유효계수이다. 교량의 특성에 따라서 가속도와 변위 중 어느 한 가지가 사용성을 저해하는 영향이 큰 경우에 α 의 값을 조종해서 사용성을 만족시킬 수 있다. 이상과 같은 가격 함수 J 를 최소화하는 C_d 와 K_d 값을 교량의 사용성을 극대화시키는 최적 값으로 보았으며 본 논문에서는 $\alpha=0.5$ 로 보고 수치예제를 실행하였다.

3. 수치 예제 해석

3.1 교량 및 진동제어장치 제원

해석에 사용된 교량은 강구조학회지에 실린 '압연형강을 이용한 단경간 강교량 설계표준화'에서 사용한 강합성교량(1등급 교량)으로서 전체 제원 및 단면 형상과 물성치는 다음과 같다.

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	$0.00102 m^2$

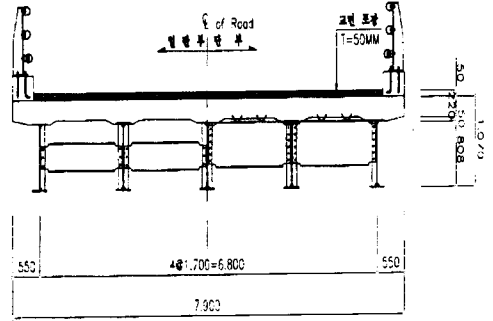


표 1. 해석 대상 교량의 제원

그림 4. 해석 대상 교량의 단면

3.2 최적의 C_d 와 K_d 의 결정

C_d 와 K_d 의 변화에 따른 교량 중심부의 가속도와 변위의 응답은 다음과 같다.

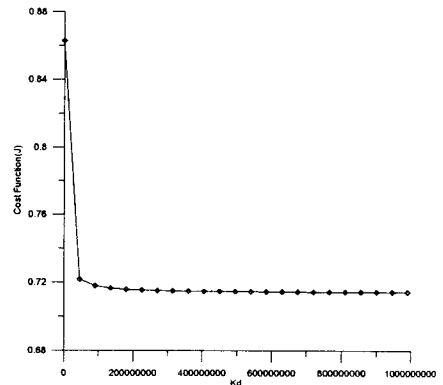
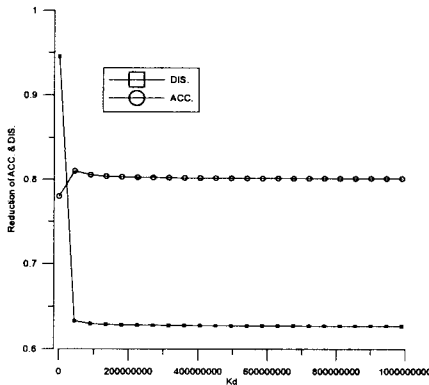


그림 5. 경간 중앙 점의 변위, 가속도 및 가격 함수 ($C_d=10$ 으로 일정한 경우)

그림 5에서 볼 수 있듯이 K_d 가 증가할 때 처음에는 가속도와 변위, 가격함수 모두 감소하지만 2×10^8 이상은 큰 영향이 없다는 것을 알 수 있다.

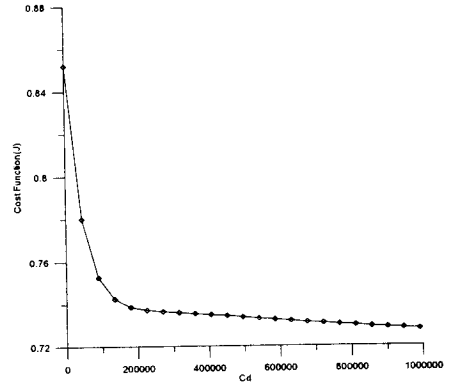
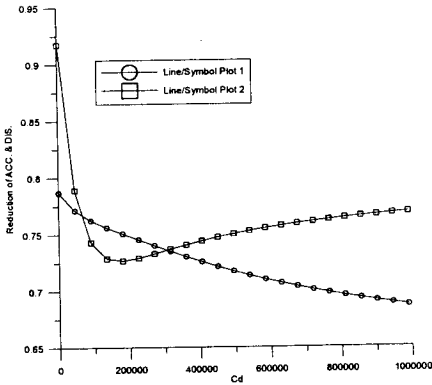


그림 6. 경간 중앙점의 변위, 가속도 및 가격 함수($K_d=10^6$ 으로 일정한 경우)

그림 6에서는 C_d 의 값이 증가할수록 변위는 점점 감소하게 됨을 알 수 있다. 하지만 가속도의 경우는 약 1.5×10^5 에서 가장 큰 감소 효과를 보이며 C_d 가 증가함에 따라 가속도가 다시 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다. $\alpha=0.5$ 볼 때의 가격함수는 C_d 가 증가함에 따라 감소하게 됨을 알 수 있다.

이러한 경향을 이용하여 가격함수($\alpha=0.5$)를 최소로 하는 C_d 와 K_d 의 값을 구해 보았다.

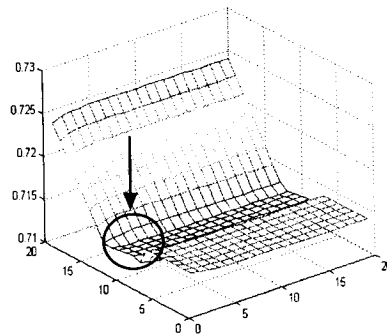


그림 7. 그림 6. 경간 중앙점의 가격 함수 그래프

그림 7의 결과를 이용해 $C_d=6 \times 10^6$, $K_d=4 \times 10^{10}$ 일 때 가격함수($\alpha=0.5$)가 최소값을 갖게 됨을 알 수 있다.

3.3 단경간 교량 해석

DB-24의 차량이 시속 60km/h의 속도로 본 교량을 통과할 때의 변위와 가속도를 비교 분석하였다. 여기서 사용한 스프링 계수와 감쇠 계수는 Parameter Study를 통해 구한 가격 함수를 최소로

하는 값을 사용하였다. 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 편차도 사용하였다.

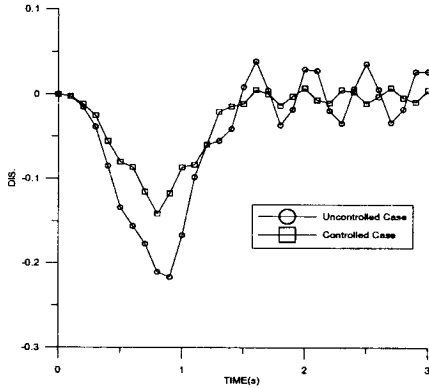


그림 8. 경간 중앙 점의 변위 비교

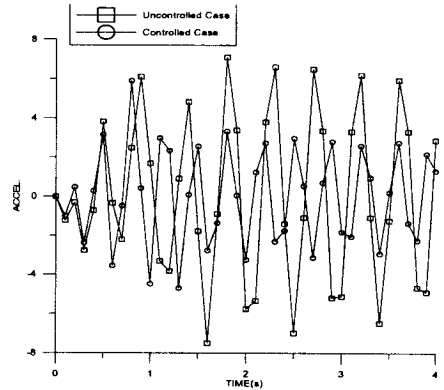


그림 9. 경간 중앙점의 가속도 비교

위의 그래프에서 볼 수 있듯이 변위와 가속도의 최대 값이 감소하였음을 알 수 있다. 또한 자유 진동의 경우도 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 2초 주위에 최대 가속도가 발생했다는 점이다. 그러므로 가속도의 제진효과를 평가하기 위해서 최대가속도가 발생하는 시간 이전까지의 표준편차를 구하여 비교하였다.

	감 소 량	백분율(%)
최대 변위	0.084(m) 감소	37.8(%) 감소
최대 가속도	1.33 m/s^2 감소	17.7(%) 감소
가속도 표준편차	0.4712 감소	14.9(%) 감소

표 2. 가격 함수($\alpha=0.1$)를 최소로 하는 경우의 응답 감소율 비교

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 가격함수($\alpha=0.5$)를 최소화 하는 C_d 와 K_d 를 사용하였을 경우 변위는 37.8%와 가속도는 17.7% 감소하였다. 따라서 본 수동 진동제어장치는 차량하중에 의한 진동을 저감시켜서 통행자의 불안감을 제거하여 교량의 사용성을 향상시키는데 뛰어난 효과를 발휘하였으며 교량이 가속도와 변위 중에 큰 영향을 끼치는 것을 고려하여 최적의 C_d 와 K_d 를 구할 수 있다. 또한 기존의 교량에도 정착하는데 차량 통행에 무리를 주지 않으므로 사용성에 문제를 보이는 많은 교량들의 사용성을 증가시키기 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 실험 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.