

이동열차하중에 대한 강합성형 고속철도교의 수동형 진동제어

Passive Vibration Control of Steel-Concrete Composite High-Speed Railway Bridge Under Moving Train Loads

고현무 *
Koh, Hyun Moo

하동호 **
Ha, Dong Ho

조근희 ***
Cho, Keunhee

이경환 ****
Lee, Kyung Hwan

ABSTRACT

The vibration control of bridge is studied considering the vibration characteristics of the Korean-type high-speed railway bridge. Fast nonlinear analysis is adopted as time integration method and the bridge and the train are modeled by FEM and sequentially moving constant forces, respectively. Additional damping mechanism is indispensable to the Korean-type high-speed railway bridge because resonance vibration is excited under the maximum design speed. The optimal position and capacity of the damper is studied through the parametric studies. Transient vibration of the bridge is effectively controlled by such additional dampers, which means that dampers play a role as structural damping. And also the maximum response of the bridge is reduced. Therefore it is verified that the increase of expected service life and the improvement of serviceability can be obtained through dampers.

1. 서론

공진 하중에 의한 구조계의 큰 진동은 중요한 구조적 문제점을 야기해왔다. 일반적인 철도차량의 경우와는 달리 고속으로 주행하는 전철은 교량의 공진을 일으키고, 그것은 또한 열차주행의 안전성과 교량 부재의 수명에 악영향을 미치게 된다. 따라서, 이러한 공진은 적절한 방법에 의해 반드시 제어되어야 한다. 한국에서는 1992년부터 고속전철교량을 건설하기 시작하여 현재 한국형 고속전철교량 2 세대를 개발 중에 있다. 프리스트레스트 콘크리트 박스거더교(PC-box girder 교)로 건설된 1 세대와는 달리 2 세대 고속전철교량으로는 강합성형 교량이 긍정적으로 고려되고 있다. PC-box girder 교와 비교하여 강합성형 교량은 경제성 및 시공성 측면에서 보다 유리한 점을 가지며 외관상으로도 더욱 경쟁력이 있다. 그러나, 강합성형 교량은 PC-box girder 교에 비교하여 강성에 비해 자중이 가볍기 때문에 고속철도하중 하에서 보다 큰 진동을 겪는 단점을 가진다. 게다가

* 서울대학교 토목공학과 교수, 정회원
** 서울대학교 토목공학과 초빙조교수
*** 서울대학교 토목공학과 박사과정
**** 서울대학교 토목공학과 석사과정

설계속도인 350 Km/h 하에서 공진속도가 존재하므로 주행 중 공진을 가질 수 있게 된다.

공진을 비롯한 구조물의 진동에 대해 많은 제어 시스템이 연구되어 왔고 실제 구조물에 적용되기도 하였다. 이런 적용 사례 중 점성과 점탄성 감쇠기가 지진하중에 대한 빌딩과 교량 등의 진동 제어를 위하여 주로 쓰여 왔으나 사용하중 하에서는 아직 그 예가 드물다. 이 연구에서는 고속 동하중을 갖는 한국형 고속철도교량의 진동특성을 규명하고 여기에 점성, 점탄성 감쇠기를 장착한 수치모사를 통해 진동제어의 가능성을 타진하며, 제어성능에 대한 최적위치와 용량의 결정을 위한 매개변수연구를 수행한다.

2. 비선형 동적 구조

교량은 뼈대요소를 이용한 유한요소로 모델링 하였으며, 사용하중하의 구조물은 탄성적으로 거동하므로 교량의 재료는 선형탄성이라고 가정하였다.

점성 감쇠기는 높은 점성을 갖는 유체 속의 피스톤의 운동을 통하여 에너지를 소산시키는 장치이다. 항공기나 군사적인 용도로 널리 쓰이는 점성 감쇠기는 최근에는 구조물에도 적용되어 오고 있다. 구조물에 적용되는 경우 이 장치의 특성은 넓은 범위의 주파수 영역에서 선형적인 점성 응답을 가진다는 것이다. 일반적으로 4 Hz 이하의 주파수 영역에서는 점성 감쇠력은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$F_{viscous} = CV_{rel} \quad (식 1)$$

여기서 C 는 주파수에 독립적이나 부근 온도에 대해 종속적인 상수이며 V_{rel} 은 감쇠기를 관통하는 상대속도를 의미한다.

점탄성 고체재료는 모든 변형영역에 대한 에너지 소산 재료로서 사용될 수 있다. 그러므로, 점탄성 감쇠기가 빌딩의 진동제어에 사용된 예는 많이 찾아볼 수 있다. 전형적인 점탄성 감쇠기는 강철판에 점탄성층이 접착된 형태로 구성되어 있으며, 이 판의 전단변형에 의해서 에너지를 소산시킨다. 동하중을 받는 점탄성 감쇠기의 거동은 진동주파수, 변형율, 그리고 부근 온도에 종속적이다. 전단 변형력은 제안된 많은 방법에 의해서 계산할 수가 있는데, 이 중에서 실험과 잘 일치할 뿐만 아니라 시간이력해석에도 쉽게 적용이 가능한 수정 분수 도함수 점탄성 모델(Modified fractional derivative viscoelastic model - Tsai et al, 1993)을 선택하였다.

$$\tau(t) = G_0\gamma(t) + G_1D^\alpha[\gamma(t)] \quad (식 2)$$

여기서

$$D^\alpha[\gamma(t)] = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{\gamma(\tau)}{(t-\tau)^\alpha} d\tau, \quad 0 < \alpha < 1 \quad (식 3)$$

$$G_0 = G_1 = A_0 \left\{ 1 + \mu e^{-\beta[\tau_0\gamma + \theta(T-T_0)]} \right\} \quad (식 4)$$

여기서 $\tau(t)$, $\gamma(t)$ 는 각각 전단응력과 전단변형율을 의미한다. G_0 와 G_1 는 구성식에 사용되는 모델 매개변수이며 α , β , A_0 , μ 와 θ 는 실험적으로 얻어진 재료에 관한 상수이다. T 와 T_0 는 각각 실제 장착 공간과 실험 시의 온도를 의미한다.

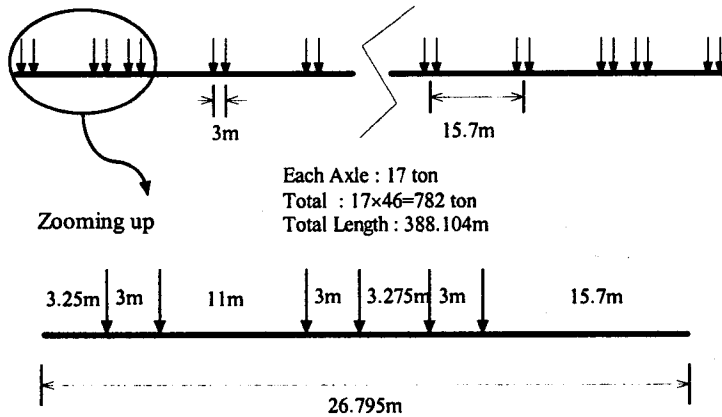


그림 1. TGV-K의 열차하중선도

움직이는 물체의 동적하중은 이동집중하중, 단순이동질량, 현가장치를 포함한 이동질량 등 여러 가지 방법으로 모델링 할 수 있다. 상세모델을 쓰면 열차의 움직임을 더욱 정확히 표현할 수 있는 반면, 그에 따른 수치적인 효율성은 떨어지므로 해석목적에 맞는 수치모델을 선택하여야 한다. 본 연구에서는 교량의 공진을 일으킬 수 있는 이동집중하중으로 열차하중을 모델링 하였다. 그림 1은 현재 도입된 고속전철 TGV-K의 열차하중선도이다.

사용하중 하에서 감쇠기는 비선형거동을 보이지만 교량은 선형탄성적으로 거동한다. 제한된 수의 비선형 요소를 포함하는 구조계는 고속 비선형 해석법(Fast Nonlinear Analysis; FNA - E.L.Wilson, 1997)으로 효과적으로 해석될 수 있다. 이 방법에서, 탄성구조계의 강성도행렬과 질량행렬에 직교하는 하중 종속적 리츠벡터들은 해석되어야 할 비선형 계의 크기를 줄여주는 역할을 한다. 비선형 요소에서의 힘은 각 시간단계의 끝에서 반복작업으로 계산되며, 따라서 독립적인 모달 방정식(Uncoupled Modal Equation)은 각 시간단계마다 정확하게 해석되어진다.

3. 수치예제

3.1 교량모델과 감쇠기 장착위치

각 경간의 길이가 40m와 25m인 2경간, 3경간 교량이 한국형 고속철도 교량의 표준형이다. 이 연구에서는 각 경간의 길이가 40m인 2경간 교량을 선택하여 2m의 길이를 가지는 40개의 유한 요소로 모델링 하였다(그림 2). 각 경간의 중앙부에 점성, 점탄성감쇠기를 장착하여 감쇠기의 장착 길이와 용량의 변화를 통한 매개변수를 수행한다. 강합성형 교량은 일반적으로 1~3%의 구조감쇠비를 가지므로 1.5%의 구조감쇠비를 적용하였다. 교량모델의 단면은 그림 3에 나타나있고, 단면치들은 도표 1에 나와있다.

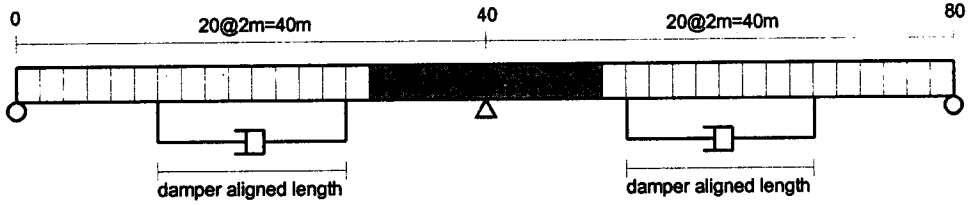


그림 2. 감쇠기를 장착한 교량의 유한요소모델링

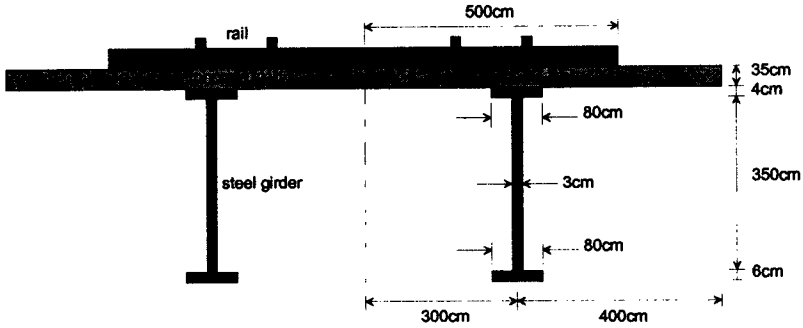


그림 3. 교량의 단면

도표 1. 교량재료의 물성치

중량	
선로	0.8 ton/m
도상	1.9 ton/m ³
콘크리트슬래브 b	2.5 ton/m ³
강주형	7.85 ton/m ³

탄성계수	
콘크리트슬래브	2.94×10 ¹⁰ Pa
강주형	2.058×10 ¹¹ Pa

해석예제에서 사용된 환산단면의 재료 및 단면 물성치

요소	탄성계수	면적	단면 2 차모멘트	총 중량
0~35m, 45~80m	2.058×10 ¹¹ Pa	0.535 m ²	0.903 m ⁴	22.014 ton/m ³
35~45m	2.058×10 ¹¹ Pa	0.220 m ²	0.488 m ⁴	53.533 ton/m ³

3.2 공진속도의 결정

공진은 열차의 속도에 따른 진동수와 교량의 진동수가 일치할 때 일어난다. 열차의 진동수 Ω_{train} 은 유효타격간격 S_{eff} 와 열차의 속도 V_{train} 에 의해 결정된다.

$$\Omega_{train} = \frac{V_{train}}{S_{eff}} \quad (식 5)$$

그러므로, 교량이 공진을 겪는 열차의 공진속도는 다음과 같이 결정된다.

$$V_{cr} = \omega_{bridge} \times S_{eff} \quad (식 6)$$

이 식에 한국형 고속전철 TGV-K 의 유효타격간격 18.7m(그림 1)와 설계속도 350km/h 를 대입하면 공진을 피하기 위한 고유진동수는 5.2Hz 이상이 되어야 하며 이를 위한 교량의 설계는 비경제적임

을 알 수 있다. 따라서 고속전철교량에 있어서 공진에 대한 교량의 거동 해석 및 제어는 필수적이라 할 수 있다.

3.3 감쇠기 장착길이에 따른 비교연구

프랑스에서 주어진 교량설계지침(Bridge Design Manual, BRDM)에 따르면 교량의 처짐, 단부회전각, 수직가속도에 대한 동적제한조건은 각각 $L/2700$ (L : 경간의 길이), 5×10^{-4} rad 그리고 $0.35g$ 이다.

그림 2, 3의 교량모델은 감쇠기를 장착하지 않은 경우에도 모든 동적제한조건을 만족하나 특히 최대 단부회전각은 4.930×10^{-4} rad로 동적제한조건에 매우 근접한 값을 갖는 특징을 가진다. 점탄성감쇠기의 경우 감쇠기 장착길이가 증가함에 따라 교량의 최대처짐(그림 4), 최대수직가속도(그림 5)는 모두 서서히 감소한다. 그러나 점성감쇠기의 경우에는 장착길이가 16m 이상이 되면 거동이 더 이상 감소하지 않는다. 최대단부회전각은 최대처짐과 비슷한 양상을 보인다. 제한조건들에 대한 점성과 점탄성감쇠기의 감소율은 장착길이의 증가에 따라 서서히 줄어든다. 그러므로, 경제성 및 시공가능성을 고려하여 최적의 장착길이가 결정되어야 함을 알 수 있으며, 본 연구는 그림 5에서 곡선의 시작부분과 끝부분의 연장선의 교차점인 16m로 선정하였다.

3.4 감쇠기 용량에 따른 비교연구

그림 6, 7에서 보는 바와 같이, 감쇠기의 용량이 증가함에 따라 진동은 감소한다. 점탄성감쇠기의 경우 최대수직처짐은 30%가량 제어되며, 점성감쇠기의 경우에는 25~30%가량 제어된다. 그러나 점성감쇠기는 감쇠기의 용량이 증가함에 따라 성능의 차이가 거의 나타나지 않는다. 이것은 3.3절에서 언급한 감쇠기 장착길이의 경우와 같은 결과이며 점성감쇠기의 경우 최대 진동을 제어하는 데는 한계가 있음을 의미한다. 반면에, 점탄성감쇠기는 용량이 증가함에 따라 최대 진동을 계속적으로 감소시킨다. 장착길이 변화와 마찬가지로 최대 처짐의 감소율은 줄어들며 이것은 최대단부회전각과 최대수직가속도의 경우에도 마찬가지이다. 3.3절에서와 마찬가지로 점탄성감쇠기의 최적 용량은 $6m^2$ 로 선정하였다.

3.5 최적 점탄성감쇠기를 장착한 교량의 거동

3.3, 3.4절에서 볼 수 있듯이 점탄성감쇠기가 점성감쇠기보다 교량의 최대 진동 제어에 보다 효과적임을 알 수 있으며, 각 경간이 40m인 2경간 한국형 고속철도 교량의 점탄성감쇠기의 최적 장착길이 및 용량은 각각 16m, $6m^2$ 로 선정되었다. 점탄성감쇠기는 교량의 처짐, 단부회전각을 효과적으로 제어하며(그림 8(a,b)), 이는 또한 강함성형 교량에 있어 중요한 문제인 부재의 피로를 감소시키는 역할을 한다. 승객은 열차의 수직가속도가 $0.05g$ 이하일 때 안락함을 느끼게 되는데 그림 8(c)는 감쇠기 장착시 승객의 안락성 기준을 만족하게 됨을 보인다. 그림 8(e)는 감쇠기의 점탄성재료는 겪는 응력-변형도에 대한 이력곡선을 나타낸 것으로 이는 점탄성재료의 극한강도 및 극한변

형도 영역 내에 존재한다. 따라서 해석시 작용된 감쇠력은 점탄성감쇠기에 의해 실제로 가능한 제어력임을 알 수 있다.

4. 결론

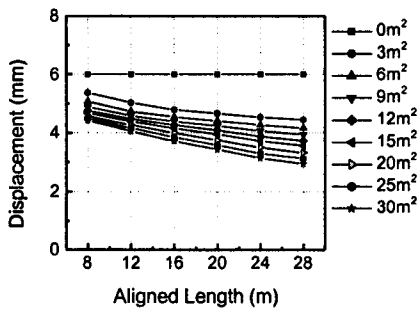
한국형 고속철도 교량의 진동제어에 대한 수동형 에너지 소산장치의 적용성을 검토하였다. 고속철도 교량에 대해서는 공진을 피하는 설계가 비효율적이므로 이에 대한 해석 및 제어는 반드시 필요하다. 점성 및 점탄성감쇠기가 장착된 교량을 비선형 거동을 고려한 유한요소로 모델링 하였으며, 감쇠기의 장착위치별, 장착용량별 매개변수연구를 수행하였다. 점성감쇠기의 경우에는 장착길이 및 용량의 증가에 따라 최대진동 제어성능의 향상이 일정값 이후에는 잘 나타나지 않는 반면, 점탄성감쇠기는 점성감쇠기에 비해 더욱 효과적인 것으로 나타났다. 감쇠기 장착길이와 감쇠기 용량의 증가에 따라 성능의 증가율은 감소하므로, 제어성능의 향상성, 경제성, 시공가능성 등을 종합적으로 고려한 적당한 감쇠기의 최적 장착위치 및 용량의 산출이 필요하다. 수동형 감쇠기는 여진을 효과적으로 제어하며 이것은 수동형 감쇠기가 구조감쇠로서의 역할을 함을 의미한다. 그 결과 사용수명의 증가와 사용성 개선의 효과를 얻을 수 있다고 판단된다. 이 긍정적인 결과를 나타내는 본 연구에 덧붙여 수동형 감쇠기의 피로개선 효과에 대한 정량적인 분석이 요망된다.

감사의 글

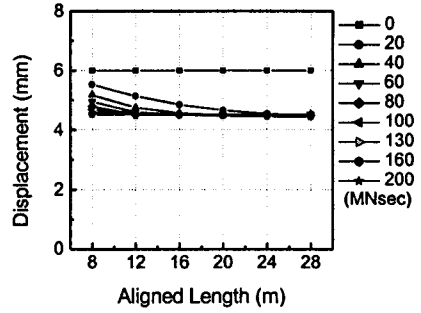
이 연구는 건설기술연구원의 고속철도종합프로젝트의 일환으로 이루어졌다. 이 논문이 나오기까지 도움을 주신 많은 분들께 감사드리며, 특히 건설기술연구원의 구조팀 여러분께 사의를 표한다.

참고문헌

1. A-K. Chopra(1995), "Dynamics of Structures," Prentice Hall.
2. Rist(1998), "Design Manual of Steel-Concrete Composite Bridges in High Speed Railway".
3. C-S. Tsai, H-H. Lee(1993), "Application of Viscoelastic Dampers to High-Rise Building," Journal of Structural Engineering, Vol. 119, No. 4, pp.1222~1233.
4. E-L. Wilson(1997), "Three Dimensional Dynamic Analysis of Structures with Emphasis on Earthquake Engineering," 1st Edition, Computers and Structures, Inc.
5. KHRC(1995), "Bridge Design Manual (BRDM)," Final Report.
6. H-M. Koh, D-H. Ha, K. Cho, K-H. Lee, B-S. Kim, Y-J. Kim(1999), "Vibration control of Korean-Type High-Speed Railway Bridge Using Dampers," Proceedings of the International Post-SMIRT Conference Seminar in Cheju, Korea.
7. G-W. Housner et al.(1997), "Special Issue: Structural Control: Past, Present, And Future," Journal of Engineering Mechanics, Vol. 123, No. 9, pp.899~908.

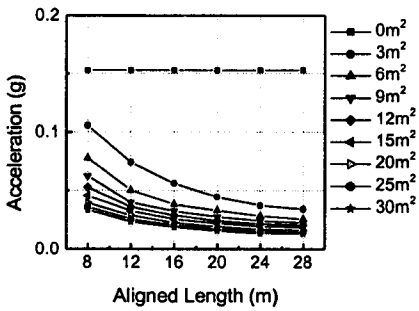


(a) 점탄성감쇠기

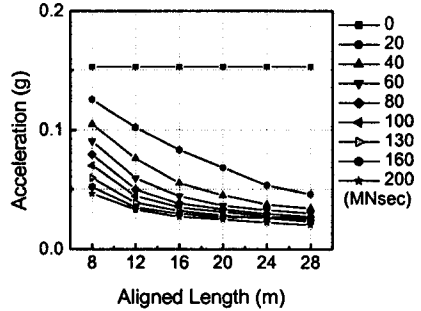


(b) 점성감쇠기

그림 4. 감쇠기 장착길이에 따른 최대수직처짐

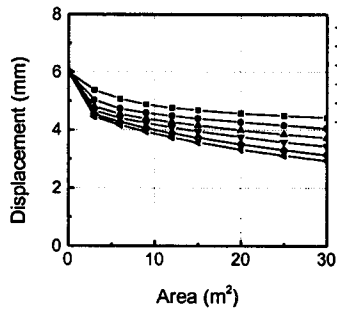


(a) 점탄성감쇠기

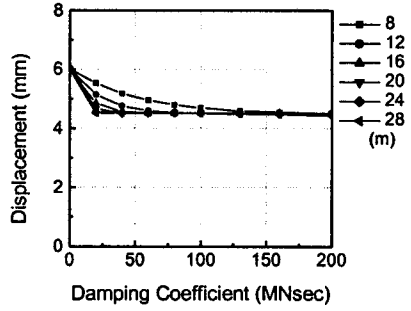


(b) 점성감쇠기

그림 5. 감쇠기 장착위치에 따른 최대수직가속도

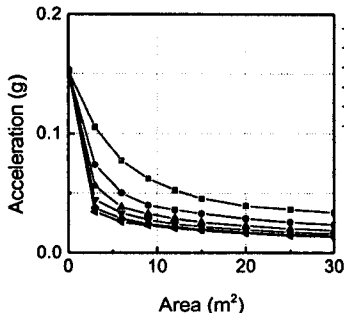


(a) 점탄성감쇠기

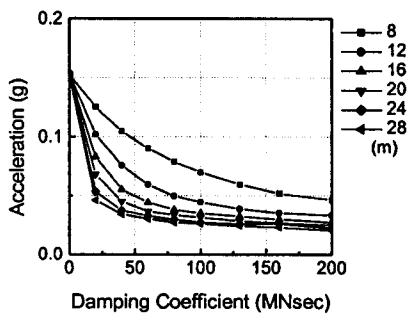


(b) 점성감쇠기

그림 6. 감쇠기 용량에 따른 최대 수직가속도

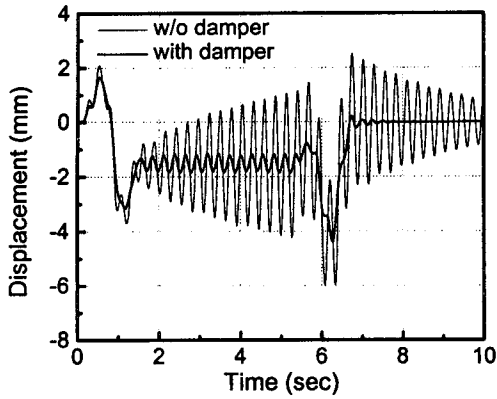


(a) 점탄성감쇠기

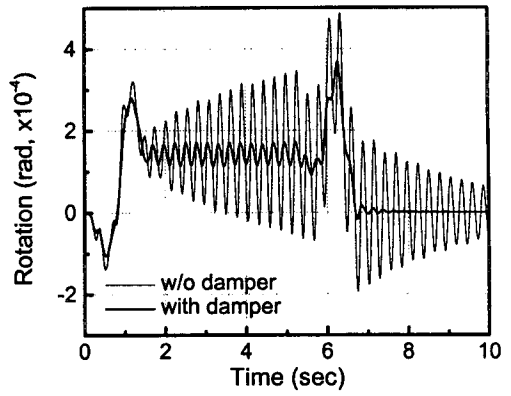


(b) 점성감쇠기

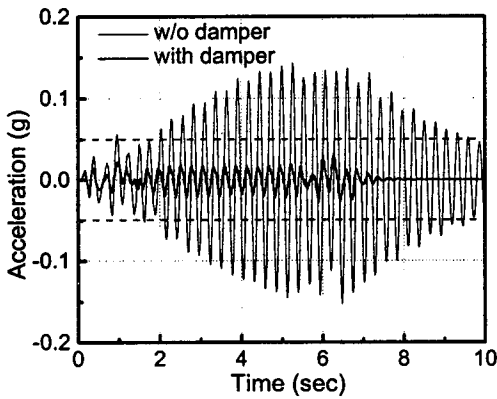
그림 7. 감쇠기 용량에 따른 최대수직가속도



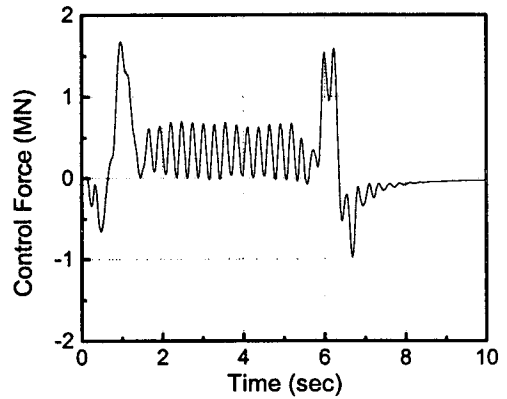
(a)



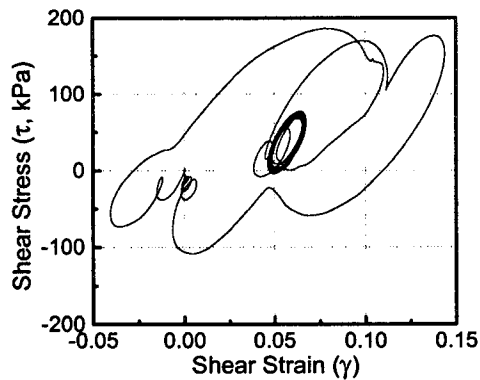
(b)



(c)



(d)



(e)

그림 8. 열차가 공진속도인 248km/h로 운행할 때 점탄성감쇠기를 장착한 교량의 거동. (a) 수직처짐 (b) 단부회전각 (c) 상판수직가속도 (d) 점탄성감쇠기의 제어력 (e) 점탄성 감쇠기의 응력-변형률 시간이력곡선