

TMD를 이용한 고속철도교량의 진동감소에 관한 연구

Vibration Reduction of High-Speed Railway Bridges by Tuned Mass Dampers

오종환*
Oh, Jong-Hawn

김연태**
Kim, Yun-Tae

ABSTRACT

At this paper Dynamic responses of bridges for the Korean high-speed railway are analyzed by a modal analysis. To control vibration of bridges, Tuned Mass Damper(TMD) that is passive type control device is used. Optimize and prove it.

Newmark method is used for a numerical analysis. In case of vehicle is modeled for moving mass that considers the effects of the moving. Also this paper is assumed as the simple supported

Bernoulli-Euler beam and considered two dimensional Interaction motion between vehicle and bridge.

1. 서론

과학기술의 눈부신 발달로 인하여 토목구조재료는 더욱더 경량화 및 고강도화 되어가고 있다. 그러나 이들 재료는 강도의 증가에 비해 강성의 증가는 턱없이 부족하므로 구조물은 더 강해졌지만 진동에 약해 더 잘 휘는 경향이 있다.

또 운송수단의 대형화 고속화 장경간 교량의 가설중대로 더욱 심각해진 이동하중의 동적 효과는 과도한 처짐을 발생시키고 피로의 효과를 증대시켜 구조물의 사용성을 저하시킴과 동시에 사람들에게 불안감을 주는 경우가 많이 발생하고 있어 심리적인 불안감을 유발시키는 사용성의 문제를 해결하기 위한 방법이 개발되어야 한다.

이동차량으로 발생한 진동을 감소시키는 방법으로는 교량의 구조단면을 증가 시켜서 안전성을 확보하려는 방법이 주로 제시되었지만 이는 비용에 비하여 진동감소율이 미미하며 상재하지 않고 예측할 수 없는 동적 하중에 대하여 항상 그 하중을 견딜 수 있도록 구조물을 설계하는 것은 비효율적이고 비경제적이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근 각광받고 있는 것이 구조물의 진동 제어(vibrational control)이다.

진동제어 장치는 크게 능동제진장치와 수동제어장치로 구분된다. 능동제진장치(Active Vibration Control Device)는 구조물의 응답을 감지한 후 힘을 가하는 장치로서 일반적으로 수동형 진동제어장치에 비해 진동제어 효과가 우수하여 신뢰성이 높고 성능이 상대적으로 더 좋으나 외부로부터 동력을 필요로 하며 설치 후 유지관리가 필요하여 상대적으로 비용이 많이 드는 단점이 있다. 능동형 제어장치에는 AMD(Active Mass Damper), HMD(Hybrid Mass Damper), Active

* 서울산업대학교 석사과정, 학생회원

** , 정회원

Tendon 등이 있다.

수동제진장치(Passive Vibration Control Device)는 능동형 진동제어장치에 비해 제어 능력은 떨어지지만 수명이 영구적이고 설치 후 외부동력이 필요치 않아 유지관리가 수월한 장점이 있다. 수동제어장치는 강진 보다는 중약진이 많은 우리나라 실정에 비추어 볼 때 상당히 유리한 조건을 갖추고 있음을 알 수 있다. 수동형 제어장치에는 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper), 에너지 흡수기구 등이 있다.

주어진 하중에 대해서만 잘 반응을 보이는 동조질량 감쇠기는 일정한 경로로 주행하는 열차하중에 대하여 좋은 제진 효과를 가져 올 것으로 기대되며 외부동력이 필요하고 유지관리비가 많이 드는 능동형 제어장치 보다는 40m 교량이 대부분인 중간 교량에 제진장치로 사용하기에 수동형 제어장치인 동조질량감쇠기를 사용하는 것이 용이할 것으로 판단되어진다.

또 고속철도의 경우 350km 설계속도 내에서 공진이 일어나고 있는데 만약 수직 처짐과 단부회전각을 제어할 수 있다면, 제어 장치를 이용하여 과 설계를 방지할 수 있을 뿐 아니라 기본설계와 실시 설계시 단면 축소와 그에 따른 비용절감을 기대할 수 있어 보다 폭 넓은 설계를 할 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문에서는 수치적이 방법을 통하여 수동형 진동제어 장치인 동조질량 감쇠기를 설치한 후 교량의 동적 응답을 구해, 이를 제어전의 교량 동적 응답과 비교함으로써 진동제어의 효과를 입증하고자 한다.

2. 모우드 중첩법

2.1 교량의 운동방정식

고속철도 교량에서 차량의 통과로 인한 수직방향의 동적효과는 등가의 강성을 갖는 Bernoulli-Euler단순보 모형을 이용하더라도 안전축의 교량거동을 충분히 파악할 수 있다고 보고 되고 있다. 본 연구에서도 교량을 등가의 강성을 갖는Bernoulli-Euler보로 간략화 하여 그 거동을 해석하였다.

보는 선형 탄성거동을 하는 연속체로서 휨 강성과 질량이 그 길이를 따라 균등하게 분포되어 있으며 감쇠력은 처짐 속도에 비례하는 것으로 가정하였고, 비틀림과 축 및 전단 변형은 무시하였다

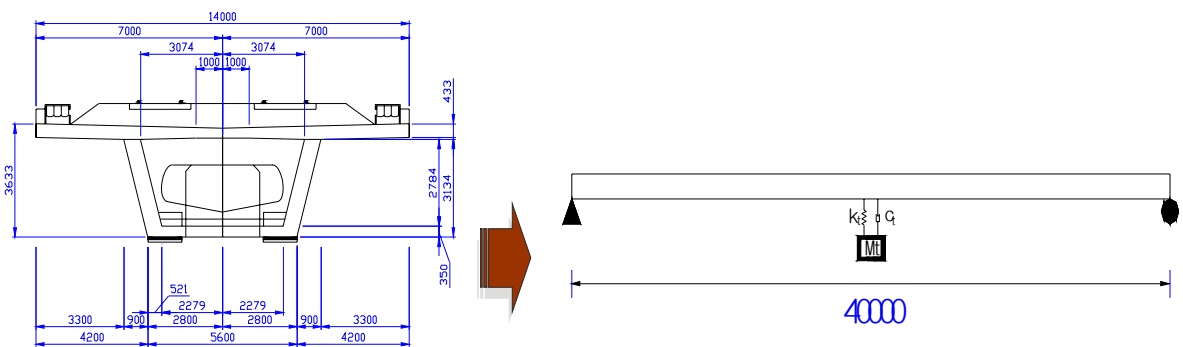


그림 1. PSC 박스거더교의 대표단면(단위:mm) 그림 2. 교량의 중앙점에 설치된 TMD(단위:mm)

본 연구에서는 경부고속철도의 궤도불규칙성을 무시하기로 하였으며 차량하중은 단일 하중(DB-24)을 사용하였고 연행하중은 실제 운행중인 고속열차와 동일한 KTX의 20량 편성 모형을 사용하였다. 해석에 적용된 교량의 물성치는 다음과 같다.

표 1. 환산단면 교량의 제원

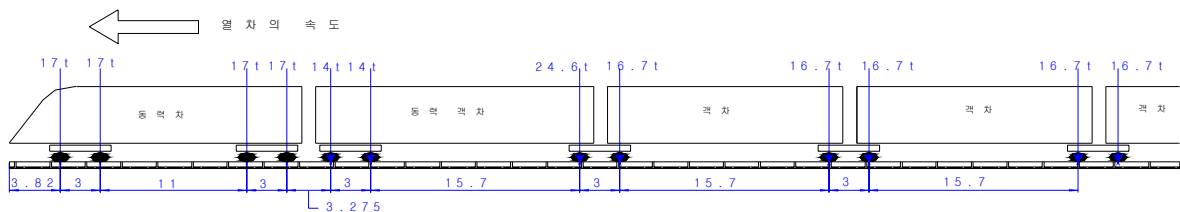
Steel Box 교량		PC Box 교량	
구분	물성치	구분	물성치
단위길이당 질량	4.3ton/m ³	단위길이당 질량	4.3ton/m ³
경간장	40m	경간장	40m
탄성계수	2150000N/m	탄성계수	2950000N/m
단면 2차 모멘트	12.490m ⁴	단면 2차 모멘트	17.494m ⁴
교량의 감쇠비	0.03	교량의 감쇠비	0.03

2.2 차량의 모형화

2.3.1 경부고속열차의 제원

표 2. KTX 20량 편성(2PC+ 2MT+ 16IT)열차의 제원

질량 (ton)	동력차	차체	54.916	현가 장치			동력차	동력객차	객차
		대차	2.446×2개	스프링 상수 (kN/m)	앞대차 전륜	842	571.0	439.0	
	차운 장치	2.048×4개	뒤대차 후륜	842	439.0	439.0			
	동력 객차	차체	42.758	감쇠 계수 (kN-s/m)	앞대차 전륜	16.75	12.52	12.06	
	대차	3.076×1.5개	뒤대차 후륜		16.75	14.64	12.06		
	차운 장치	2.104×3개	차체(키객차)	25.673(26.373)					
	객차	대차	3.018×1개						
		차운 장치	2.014×2개						



$$f_i(x,t) = f_0 \delta(x - s_k)$$

$$\delta = 0 \quad x(vt) \geq L$$

$$\delta = 1 \quad 0 \leq x(vt) \leq L$$

$$F_n(x,t) = m_{sk} g \sum_{k=1}^k \sin \frac{n\pi(x - s_k)}{L}$$

$$\begin{aligned} s_1 &= vt \\ s_2 &= vt - 3 \\ s_3 &= vt - 14 \\ s_4 &= vt - 17 \\ &\vdots \\ s_5 &= vt - 380 \quad .18 \end{aligned}$$

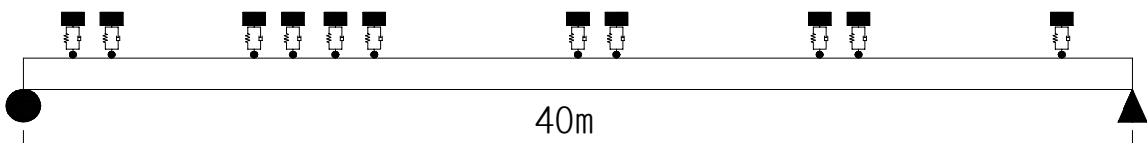


그림 3. KTX 20량 편성(2PC+ 2MT+ 16IT)의 열차 하중

3. 프로그램 검증

본 연구에서 개발한 동적해석 프로그램을 검증하기 위하여 하중이 중앙에 위치하였을 때 교량의 거유 진동수와 연직방향 처짐에 대하여 범용 해석프로그램인 MIDAS의 결과 값과 비교하여 타당한 결과 값을 나타내었다.

표 3. 고유진동수 비교

구분		STEEL BOX 교량 고유진동수(HZ)					PC BOX 교량 고유진동수(HZ)				
모드		1차	2차	3차	4차	5차	1차	2차	3차	4차	5차
해석 결과	본 연구	2.20	8.78	19.76	35.13	54.89	3.28	13.12	29.51	52.47	81.98
	MIDAS	2.20	8.78	19.76	35.13	54.89	3.28	13.12	29.51	52.47	81.98

3.1 해석결과 비교

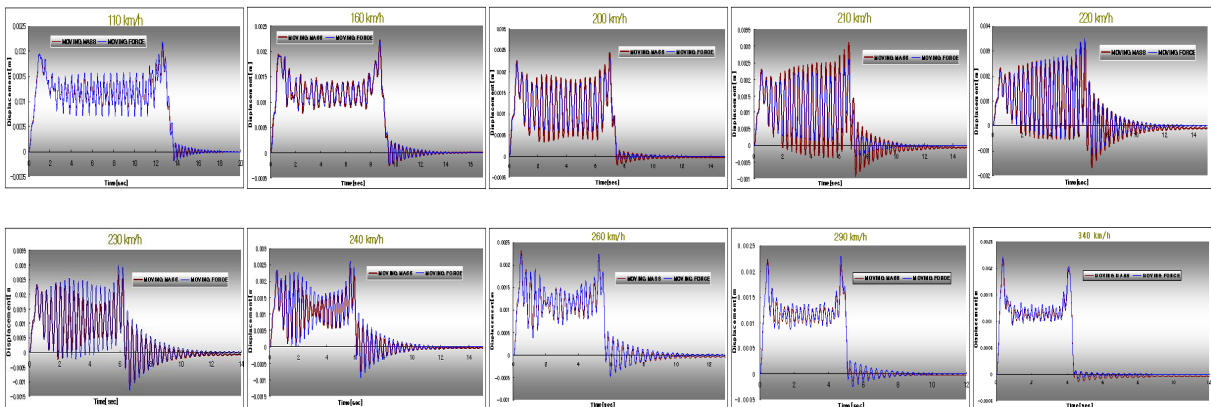


그림 4. 교량 중앙점 속도별 이력 곡선

본 연구에서 개발한 프로그램에 의한 교량의 동적거동은 크기와 경향이 매우 비슷하다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과들을 종합해 볼 때 본 연구에서 개발한 열차모형과 교량 모형의 타당성이 검증된다고 판단된다.

본 연구에서 사용된 PSC BOX의 교량의 경우 공진을 유발하는 공진 속도는 대상 교량의 1차 고유진동수 $3.28Hz$ 와 KTX고속철도 열차의 유효 하중간격인 $S_{eff} = 18.7m$ 를 대입하여 $221km/h$ 의 공진 속도를 갖는다.

공진 속도 부근인 $200km/h$ 에서 $230km/h$ 사이의 교량의 동적 거동은 다른 속도에서와는 달리 열차가 진행함에 따라 교량의 동적 응답이 증폭 되는 것을 볼 수 있으며, 이러한 공진이 발생함으로써 철도 교량은 상당히 불리한 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 임계 속도를 가지고 열차가 교량을 통과할 경우 순간적으로 발생할 수 있는 진동과 이러한 진동을 장시간 노출되어 발생할 수 있는 피로 문제에 대한 대책을 강구 되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 고속철도 교량의 사용성 뿐 아니라 안정성에 심각한 영향을 미치는 공진 현상에 대하여 수동 제어 장치인 동조질량 감쇠기를 설치하여 공진을 감소시킬 수 있도록 하는 것이 연구의 목적이다.

4. 동조질량 감쇠기를 사용한 교량의 동적응답

4.1 임계속도 선정

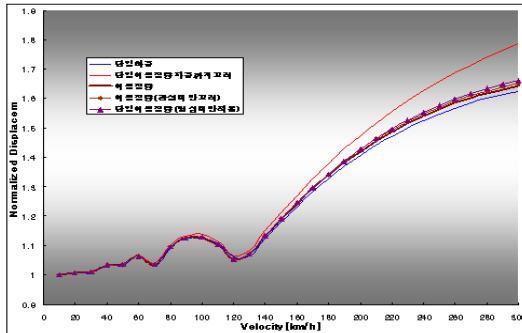


그림 5. (DB-24) 동적 증폭계수

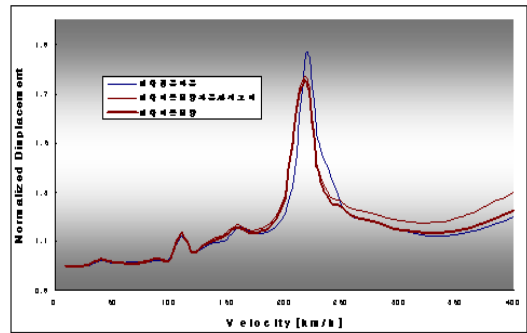
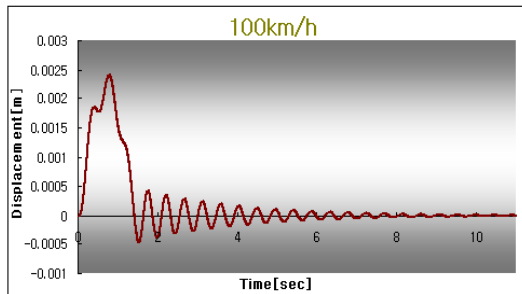
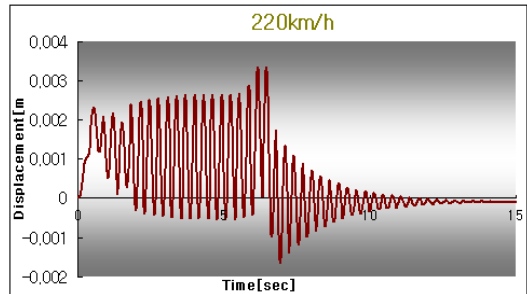


그림 6. (KTX) 동적 증폭계수

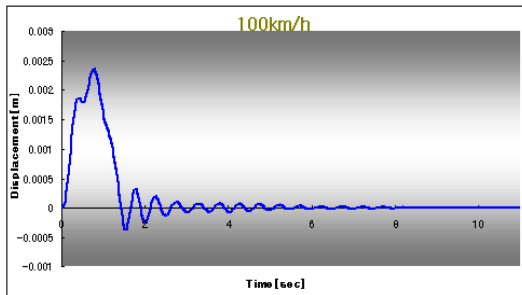
4.2 동조 질량 감쇠기의 동적 응답 분석



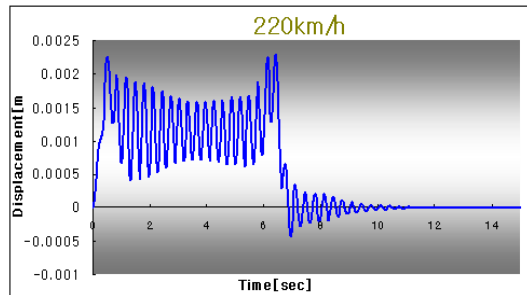
(DB-24) 동조질량 감쇠기 설치전 동적응답



(KTX) 동조질량 감쇠기 설치전 동적응답



(DB-24) 동조질량 감쇠기 설치후 동적응답



(KTX) 동조질량 감쇠기 설치후 동적응답

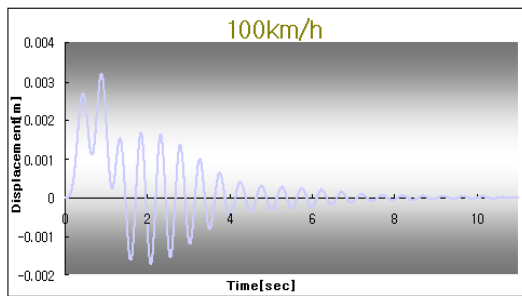


그림 7. (DB-24) 동조질량 감쇠기 동적응답

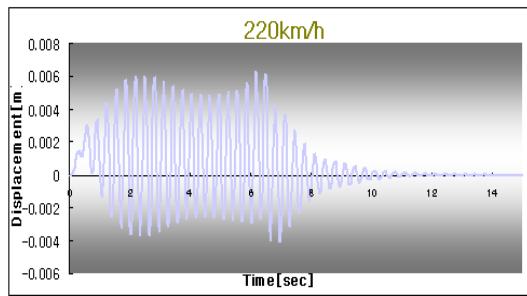


그림 8. (KTX) 동조질량 감쇠기 동적응답

동조질량 감쇠기를 시속 100km/h일 경우 설치 전 최대 변위는 0.242cm이었으나, 동조질량 감쇠기 설치 후 최대변위는 0.235cm로 2.56% 진동제어 효과를 가지고 왔고, 시속 300km/h일 경우는 설치 전 최대변위는 0.352cm이었으나 동조질량 감쇠기 설치 후 최대변위 0.345cm로 1.94%의 제어 효과를 가지고 왔다. 이동속도가 높다고 하여 동조질량 감쇠기의 제진 효과가 증대되는 것은 아니라는 것을 확인할 수 있었고 동조 질량 감쇠기를 설치 후 자유진동 부분이 빠르게 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

표 4.고속도로 설계 지침 (BRDM)

설계제한항목	제한조건	설치전	설치후	제어효과
최대 수직처짐	$L/1700$	0.335cm	0.230cm	31.34%
최대수직 가속도	0.35g	0.08g	0.03g	62.6%
최대단부회전각	$5 \times 10^{-4} rad$	$2.8 \times 10^{-4} rad$	$1.8 \times 10^{-4} rad$	35.71%
수직가속도 (승객의 안락성)	0.05g	0.08g	0.03g	62.6%

철도 교량의 경우 연속적이고 반복적이 열차 하중 재하로 인하여 교량의 통과 시간이 길어 때문에 동조질량 감쇠기의 응답이 커지고 길어지므로 이로 인하여 동조질량 감쇠기의 관성력이 증가하여 제어 효과는 단일 하중의 제어 효과보다 상당히 큰 것으로 나타났다.

본 연구 교량에 동조질량 감쇠기를 사용할 경우 국내의 고속철도 기준인 승객의 승차감을 만족시키는 수직 가속도 0.05g 만족 시키는 결과를 가지고 왔으며, 위의 결과를 바탕으로 공진이 일어날 경우 철도 교량에 심각한 영향을 끼치는 것을 확인하였으며 그에 대한 대책으로 동조 질량 감쇠기를 사용할 경우 과 설계를 방지함과 동시에 보다 폭 넓은 설계를 할 수 있을 것이라 판단 된다.

5. 결 론

본 연구에서는 MATLAB을 이용하여 2차원 동적 상호 작용을 적용하여 동조질량 감쇠기의 성능을 입증 하였고, 수치 해석에 대한 검증은 범용 해석 프로그램인 MIDAS의 해석 결과와 비교하여 그 타당성을 입증하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 이동질량의 효과 고려 시 이동질량의 효과는 관성력을 증대 시켜 동적 처짐을 증대시키고 원심력 또한 강성을 저하 시켜 동적 처짐을 증가시키는 반면 코리올리력은 감쇠효과로 작용하여 동적 처짐을 감소시킨다.
2. 유지 설치비가 많이 들어가고 외부로부터 동력을 필요로 하는 능동제어 장치보다는 40M 교량 이 대부분인 철도 교량에서는 특정 하중에 더 효과적이고 수명이 연구적인 동조 질량 감쇠기를 사용하여 동적제어를 하는 것이 효과적일 것으로 판단되어진다.
3. 동조질량 감쇠기의 경우 단일 하중 보다는 열차하중에 제어효과가 뛰어나며 공진이 일어날 경우 31%의 감소 효과를 보여 동조 질량 감쇠기를 사용시 과설계를 방지하고 보다 폭 넓은 설계를 할 수 있으리라 기대된다.

동조질량 감쇠기의 제어력 효과를 높이기 위해서는 동조질량 감쇠기의 응답은 크게 하여야 하는데 이는 시공을 불가능하게 할 수도 있는 중요한 사항이므로 교량의 응답을 최소로 줄일 수 있는 연구가 추후 연구과제로 수행되어야 하겠다.

6. 참고 문헌

1. Chopra, A. K. "Dynamics of structures", Prentice-Hall International, London, 1995
2. Fryba, L "Vibration of solids and structures under moving loads", Noordhoff International Publishing, 1972
3. 권순덕 “차량하중을 받는 교량의 진동 제어를 위한 TMD의 효과”, 대한토목 학회 논문집 제 18권 제 1-4호, PP457-467, 1998
4. 김성일 “고속철도 교량의 교량-열차 상호작용해석”, 서울대학교 대학원 박사학위 논문, 2000.2
5. 임명훈. “모드중첩법을 이용한 교량-차량 상호작용해석”, 성균관대학교 대학원 석사학위 논문, 2004.4
6. 이윤석. “단순보 교량의 교량-차량 상호작용에 대한 인자 연구”, 서울대학교 대학원 석사학위 논문, 2002.2
7. 장동두, “이동하중을 받는 교량의 진동제어를 위한 개선된 동조질량감쇠시스템”, 한국과학기술원 석사학위 논문, 2003.2
8. 박민석, “차량하중작용시 교량의 동적 진동감소에 관한 연구”, 한양대학교 대학원 석사학위 논문, 1997.2
9. 장태준, “동조질량 시스템의 최적 설계”, 제주대 산업대학교 산업대학원 석사학위 논문, 2003.8
12. 박종선, 보도 육교의 사용성 향상을 위한 진동 제어 방안”, 인하대학교 공학대학원, 2004.8
13. 조석희, “동조질량 감쇠기의 매개변수 변경에 의한 바닥슬래브 진동 저감방안 연구”, 연세대학교 대학원 석사학위 논문, 1996.2
14. 이경환, “고속철도 강합성형 교량을 위한 수동형 진동제어의 최적인자 결정에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 석사학위논문, 2003
16. 금준형, “수정된 King-Post Mechanism을 이용한 교량 구조물의 최적 진동제어”, 한국과학기술원 석사학위논문, 1996.2
17. 장동두, “이동하중을 받는 교량의 진동제어”, 한국과학기술원, 2003.2
18. 김성재, “고속철도 교량의 동적 거동”, 아주대학교 대학원 석사학위 논문, 2000.2
19. 공용식, “이동질량을 받는 단순지지보 진동의 능동제어에 관한 연구”, 한밭대학교 산업대학원, 2002.02