

# 경부고속철도 교량의 과도한 가속도의 저감방안에 대한 연구

## A Study on the Solution of Excessive Accelerations on the Bridge for Gyeongbu High-speed Railway

곽종원\*                      진원중\*\*                      최은석\*\*\*                      조정래\*\*\*\*                      이정우\*\*\*\*\*  
Kwark, Jong-Won              Chin, Won-Jong              Choi, Eun-Suk              Cho, Jeong-Rae              Lee, Jung-Woo

### ABSTRACT

When Korean High Speed Train (KTX) runs over a high-speed railway bridge, the high-speed railway bridge gives quite large acceleration response. Local vibration at the large cross section, the impact from equally spaced sleepers, the vibration due to elastomeric bearings, and the vibration from the train itself are the causes of this acceleration response. Maximum peaks of the accelerations measured at the bridges are sometimes going over the limit value. Although it is smaller than 0.35G, the limit from the Korean Bridge Design Manual(BRDM), this acceleration response should be reduced for the safety of running trains with high speed. In this paper, to reduce the acceleration response by controlling excessive local vibration at the large cross section, vibration reduction method is studied. The result shows that the effect of elastomeric bearings on the vibration of the bridge is very large and that the vibration reduction device is effective against wing mode local vibration PSC box girder bridge for the high-speed railway, which usually has very large cross section, although it has little effect on global vibration modes such as flexural and twisting modes. The test of the vibration reduction device on the bridge in service has been performed in this study.

### 1. 서 론

2004년 4월 1일에 개통된 경부고속철도의 전체 노선 중에서 약 1/3이 교량으로 구성되어있다. 고가 구조물인 교량의 형식으로는 특별한 구간(예를 들어서 역사, 고속도로 와 국도의 횡단구간, 접속을 위한 소구간 등)을 제외하고는 2@40 m 또는 3@25 m의 PSC 박스거더 교량이 채택되어 건설되었다. 설계초기에 공사비가 적게드는 PSC beam 을 비롯한 preflex교량, T형거더교량, 라멘교량 그리고 PSC박스거더교량 등 다양한 형식이 검토되었으나 동적응답이 가장 안정적인 PSC교량으로 형식이 결정되었다. 설계 및 시공된 PSC박스거더교량 중에서도 2@40 m 교량은 경부고속철도 구간에서 가장 대표적인 교량형식으로 대변된다. 시공방식은 각 건설사와 현장여건에 따라 다양하게 시도되었으나 단일 박스형이고 14 m의 교량폭과 3.5 m에 이르는 형고 등의 형식 및 제원은 동일하게 적용되었다. 이러한 단면형상에 따라 교량의 단면이 매우 커서 박스거더의 복부판사이의 바닥판이 약 7 m에 이르는 장경간이고 양측 내민보의 길이가 3 m를 초과하는 형상이다.

\* 한국건설기술연구원, 구조연구부, 정회원

E-mail : [origilon@kict.re.kr](mailto:origilon@kict.re.kr)

Tel : (031)910-0575 FAX : (031) 910-0578

\*\* 한국건설기술연구원

\*\*\* 한국건설기술연구원

\*\*\*\* 한국건설기술연구원

\*\*\*\*\* 한국건설기술연구원

가변적인 차선에 불확정적인 차륜이 통과하게 되는 일반 도로교와 달리 열차는 교량 위의 정해진 선로를 따라 진행하므로 확정적인 하중조건을 갖고있다. 또한 교량의 임의점에 불규칙적이면서 단발적인 동적하중으로 작용하게 되는 도로교의 주행차량에 비하여 철도의 경우에는 일정한 간격을 갖는 차륜이 정해진 선로를 따라 이동하면서 교량에 반복적인 동적하중 즉, 가력 진동수를 갖는 하중으로 작용하게 된다. 이러한 가력진동수가 교량의 고유진동수와 일치하게 되는 경우에 공진이 발생하게 되며 이때 교량의 과도한 응답으로 운행 중인 열차의 주행 안전성에 심각한 영향을 미치게된다. 교량의 고유진동모드들과 열차의 가력진동수 사이의 관계에 따라 교량의 동적응답 특성이 달라지게 되므로 고속철도교량의 형식을 결정할 때 열차의 주행 안전확보를 위해서 교량의 동적거동 검토가 필수적이다. 경부고속철도의 경우에는 이를 위해서 유럽의 UIC에 근거한 BRDM에 각종 기준치를 설정해두고 있다. 주요 규정으로는 도상의 안정성확보를 위한 교량 상판의 가속도(0.35 g)를 비롯하여 처짐(L/1700), 단부격임각( $5 \times 10^{-4}$  rad)등이 있다.

고속철도 교량의 동적거동에 관한 연구는 미진하며, 특히 실험적인 연구는 극히 제한적이었으며, 최근에 들어서 고속철도를 운행하는 국가들인 아시아의 대한민국, 일본, 대만과 유럽의 프랑스, 독일, 이태리를 중심으로 도상과 교량에 관한 다양한 연구가 시도되고 있다. 국내에서는 고속철도 교량의 동적거동에 관한 연구는 1990년대 초반에 시작되었다. 장승필 등은 관절형대차를 갖는 고속철도 차량의 바운싱과 피칭을 고려하는 2차원 모델을 적용한 교량의 동적거동 해석에 관한 연구를 수행하였다(장승필 등 1998). 여기서는 도상을 탄성지반위의 보이론을 적용하여 모사하였다. 2000년에 접어들어서 김 등은 교량의 경간장에 따른 공진소멸 현상에 대해서 연구하였다(김성일 2000). 광종원 등은 2003년부터 경부고속철도 열차의 주행에 의한 콘크리트 박스거더의 동적거동에 대한 실험적연구와 이론적연구를 광범위하게 수행하였다(광종원 등 2003).

## 2. 경부고속철도 교량의 동적응답 계측

2004년 개통을 앞두고 개통 전 차량, 구조물, 각종 시설의 점검을 위해서 시험선로에서 각종 주행 시험이 실시 되었다. 프랑스의 TGV와 같은 형식인 경부고속철도 차량인 KTX의 주행에 의한 시험 선로에 위치한 2@40 m PSC 박스거더교량인 연제교의 동적응답을 2002년부터 계측하였다. 연제교는 경부고속도로 시험선로 구간에 위치하고 있으며 그림 1은 대상교량의 전경과 계측 스테이션의 전경을 보여주고 있다.

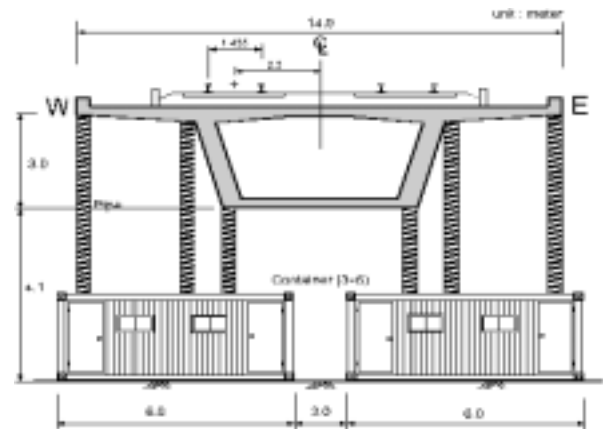


그림 1. 연제교 전경과 계측시스템의 설치개념도

현장 계측을 위하여 연제교에 변위계, 가속도계, 그리고 단부회전각 측정 장치 등 각종 센서를 설치

하고 시험주행 시에는 부정기적으로 계측을 수행하고 상용운전이 개시된 이후에는 정기적으로 현장계측을 진행하였다.

설치된 현장 계측 시스템을 이용하여 KTX의 주행에 의한 각종교량응답을 측정한 결과 가속도를 제외한 각종 응답은 열차의 주행 안전성이 확보될 수있는 수준으로 판단되었다. 그러나, 가속도응답의 경우에 실험치와 BRDM에 규정된 제한치를 비교해 보면 과도한 응답이 계측되었을 뿐만 아니라, 심지어 제한치를 초과하기도 하였다.

### 3. 고속철도에 의한 교량의 응답

2002년부터 실시된 KTX의 시험주행에 의한 교량의 동적응답 계측을 위한 현장실험을 통해서 PSC 단일 박스거더 교량의 과도한 가속도 응답 발생이 발견되었다. 상용운전 이전이므로 열차의하중에 변화가 없는 상황에서 측정 시점에 따라 그러한 현상이 나타남이 밝혀졌고, 이에 장기간에 걸친 현장 계측을 수행하게 되었다. 그러한 장기계측을 통해서 기온이 추워지는 겨울 동안에 과도한 가속도가 발생함이 밝혀졌다. 그림 2는 장기계측을 통해서 얻어진 연제교의 가속도응답의 최대값을 실험시점에 따라 도시하고 있다.

한편, 제한치를 상회하는 과도한 가속도가 기온이 매우 낮을 때 발생하기도 하였으나 일상적인 기온에서도 제한치인 0.35g를 상회하지는 않지만 이에 근접하는 매우 큰 가속도 응답이 발생하였다. 이러한 큰 가속도 발생의 원인은 편마모와 같은 차륜 상태, 레일의 상태, 침목과 도상 사이의 접촉 조건, 도상의 유지관리 상태 그리고 교량의 형식 등이 있다. 이러한 원인의 대부분은 교량과는 상관없는 도상과 차량의 상태에 따른 조건이다. 현장 계측을 통해서 밝혀진 바로는 침목과 도상 사이가 완전한 밀착이 이루어지지 않아서 차륜이 침목위를 통과할 때 교량에 충격으로 작용하고, 따라서 등간격으로 연속 배치된 침목간격과 지나가는 차륜의 속도가 교량의 가속도 응답에 영향을 미친다. 또한, 본 연구에서 대상으로 하는 연제교의 경우에 단면이 매우 큰 단일 박스거더교량이므로 국부적인 진동이 예상되었다. 현장 계측 시스템의 이용한 실험을 통해서 이러한 국부진동과 연속 배치된 침목의 영향을 확인할 수 있었으며 그림 3은 이를 보여주고 있다. 그림 3은 일정간격으로 배치된 침목과 주행 열차의 속도에 의해서 결정되는 차륜의 가진 진동수를 기준으로 저역역필터(Low-pass filter)를 이용한 응답과 그렇지 않은 응답을 비교하여 도시하고 있다.

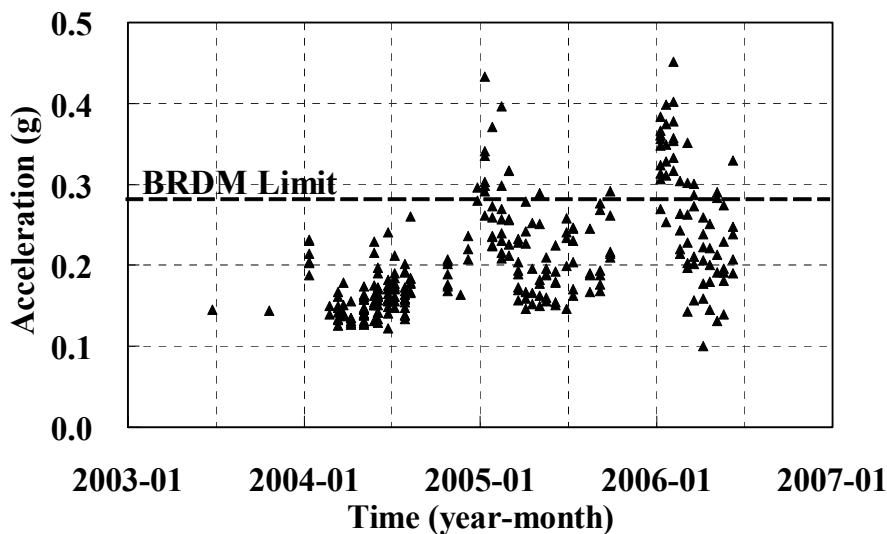


그림 2. 시간에 따른 가속도 최대값의 변화

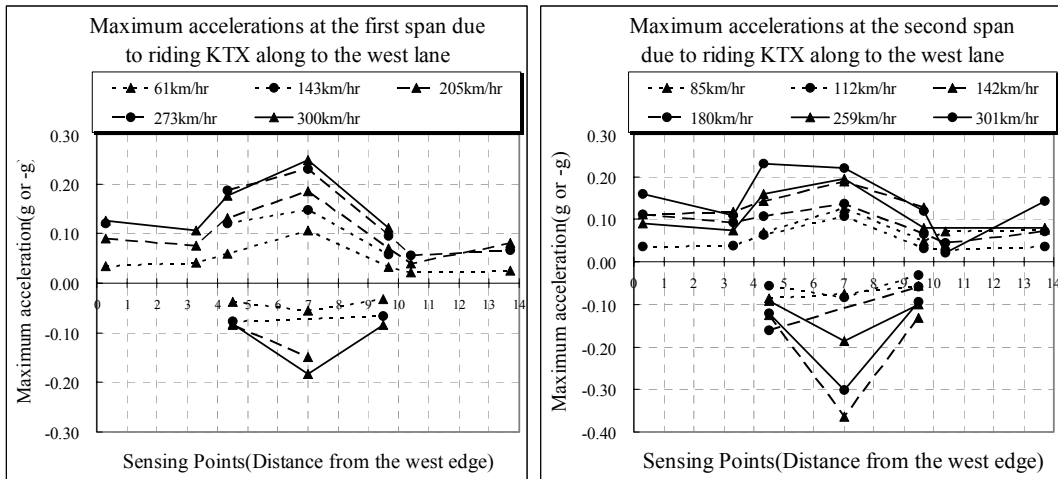


그림 3. 연제교 박스거더 단면내 가속도 최대값의 분포

#### 4. 감쇠기를 적용한 가속도의 저감

대상 교량은 단일 박스거더교량으로 그림 6과 같은 고유모드를 갖고 있다. 연제교에서 발생하는 가속도는 교량의 공진상태에서 매우 크게 나타나는데 이러한 공진 진동수는 교량의 1차 횡모드에 해당하는 공진속도에서 발생하게 된다. 과도한 가속도를 방지하거나 저감하기 위해서는 그러한 공진이 발생하지 않게 하거나 그러한 공진이 발생하는 전체 시스템에 감진장치를 설치 하는 방법이 있다. 공진이 발생하지 않도록 하기 위해서는 교량의 강성을 조정해서 공진을 회피하는 방법과 최근에 밝혀진 공진 소멸 지간장을 이용할 수 있으나, 전자는 매우 비경제적인 방법이고 후자는 현재 시공이 완료된 교량에는 적용할 수 없는 한계가 있다. 건설되어 있는 교량의 감진을 위한 방법인 전체 시스템에 감진장치를 적용하는 방법은 교량의 처짐이 일정 수준이상 발생하여 감진장치의 성능이 발휘될 수 있어야 하나 대상교량과 같이 강성이 매우 커서 처짐이 수 mm 수준인 경우에는 장치가 성능을 발휘할 수 없다. 언급된 바와 같이 대상 교량에 국부적인 진동이 발생하고 있으며 전체 가속도가 큰 경우이므로 그러한 국부진동을 저감시킴으로써 교량의 과도한 가속도 응답을 저감시킬 수 있을 것이다.

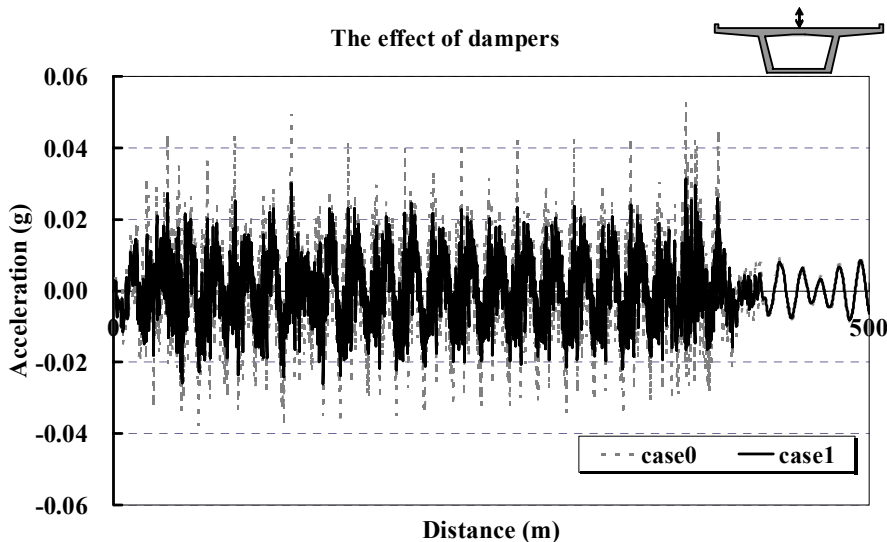


그림 4. Case 0(감쇠기 없음)와 Case 1(감쇠기 1개 설치됨)의 가속도 이력 비교

본 연구에서는 휨, 비틀 그리고 날개짓모드에 해당하는 가력 진동수를 가지는 외력을 대상교량의 열차 주행 위치에 가력하고 국부진동 모드의 저감 효과를 조사하였다. 적용되는 감진 장치로는 현재 점성감쇠기로서 교량의 단면 중앙부 상하부 플랜지 사이에 지지되도록 고안되었다. 감쇠기의 점성감쇠값은 상용화된 감진기의 값으로  $5 \times 10^8$  N sec/m이 사용되었다.

교량의 진동저감방법에 관한 연구를 위해서 고속열차의 주행에 의한 교량의 동적해석이 가능한 전산 프로그램이 박스거더의 3차원 국부거동과 감쇠기가 고려될 수 있도록 개발되었다. 진동저감에 대한 감쇠기의 적용성 검토를 위해서 개발된 프로그램을 이용한 수치해석이 수행되었다. 150km/hr부터 400 km/hr의 다양한 주행속도에 따른 동적응답을 감쇠기가 설치되지 않은 교량(Case 0)과 감쇠기가 1개(Case 1)와 3개(Case 3)가 설치된 교량에 대해서 구하였다. 그림 4는 감쇠기의 설치 유무에 따른 가속도의 전형적인 시간이력으로서 고속철도가 275 km/hr의 주행속도로 통과할 때 Case 0와 Case 3에 대해서 함께 도시하고 있다. 그림 5는 열차의 주행속도에 따른 감쇠기에 의한 가속도 저감의 최대값을 도시하고 있다.

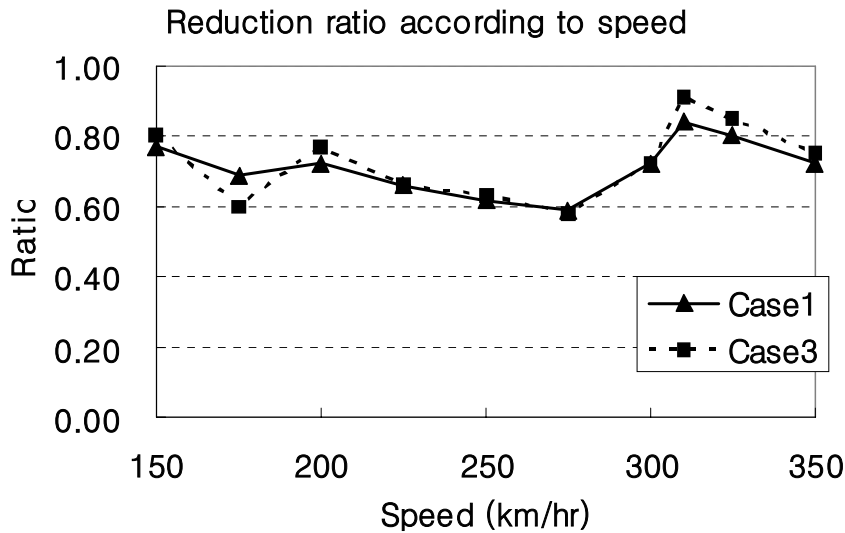


그림 5. 열차의 주행속도에 따른 가속도비의 변화

감쇠기를 이용한 국부진동 저감장치의 성능을 검증하기 위해서 2@40m PSC 박스거더 교량에 다양한 감쇠기를 설치하고 주행실험을 실시하였다. 그림 6은 감쇠기의 설치 개념도이고 1개경간에 1개의 감쇠기 만을 적용하였다.

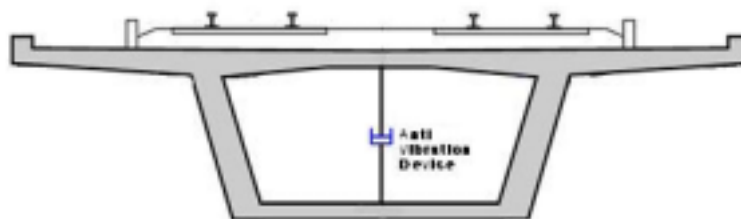


그림 6. 국부진동 저감장치의 설치 개념도



그림 7. 국부진동 저감장치의 설치 모습과 사용된 저감기구들

하중경우는 총 8가지이며 그림 7은 실제 진동저감장치의 설치된 모습과 사용된 저감기구들의 사진이다. 표 1은 이러한 저감장치를 적용해서 실제 고속철도 차량의 주행에 의한 진동의 저감율을 표시하고 있다.

현장실험 결과에 의하면 국부진동 저감기구에 의해서 최대 26%의 진동저감 효과가 확인되었다.

표 1. 저감기구에 따른 진동저감율

Case	2 <sup>nd</sup> span	1 <sup>st</sup> span
Orifice damper $\Phi$ 0.5	4.17 %	7.32 %
Orifice damper $\Phi$ 1.0	25.85 %	11.12 %
Orifice damper $\Phi$ 1.5	6.88 %	2.72 %
Orifice damper $\Phi$ 2.0	13.65 %	10.68 %
Turnbuckle	-0.12 %	11.16 %
Rigid linkage	5.39 %	15.43 %
Urethane	8.91 %	10.15 %
Rubber	8.81 %	23.53 %

## 5. 부가질량을 이용한 가속도의 저감방안

교량의 진동을 저감하기 위한 방안으로 제시된 국부진동 저감장치는 현장실험 결과 어느 정도 효과가 있는 것으로 보여지나 진동저감효과의 일관성이 부족하고, 특히 유지관리에 난점이 있는 등 장기적인 관점에서 효율적인 저감방안은 아닌 것으로 판단된다. 현재 경부고속철도 교량의 진동 가속도가 설계 제한치를 약간 상회하거나 근접한 수준이므로 약간의 진동저감 효과 만을 얻으면서 유지관리에

효과적인 경제적 방안 마련이 요구되고 있다. 이러한 방안으로 교량의 강성의 변화없이 질량만을 증가시켜 가속도를 저감하는 방안이 제시되었다. 경부고속철도 교량은 대부분 박스거더형 교량으로 내부에 충분한 작업 여유공간이 확보되어 있으므로 이 내부통로를 이용하여 교량의 질량을 증가시켰다. 2007년 중반에 실제 교량에 시험 시공을 계획하고 있으며, 현재는 해석적인 방법에 의한 이론적인 연구를 수행하여 그 효과를 확인하였다.

그림 8은 부가질량을 포설하는 개념도이며 포설되는 부가질량은 박스거더 내부의 하부플랜지 상에 길이 10m, 두께 25cm(T25)와 50cm(T50)를 갖는 일반 콘크리트 로서 강성이 발생하지 않도록 2개 경간에 공히 설치된다.

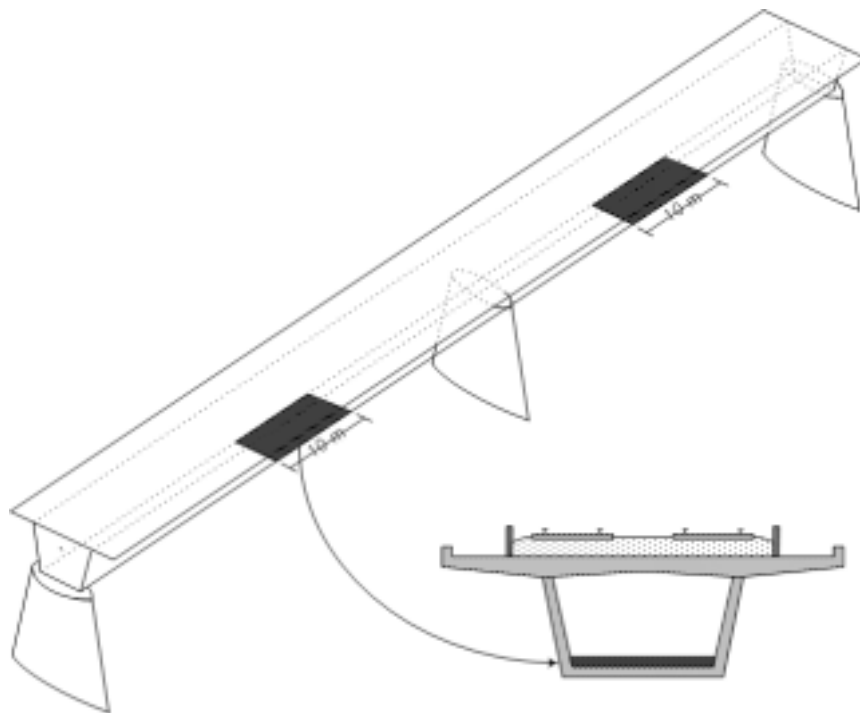


그림 8. 부가질량을 이용한 기존 교량의 성능개선 개념도

표 2 부가질량을 적용한 해석 모델

모델	고유진동수 (hz)	추가 질량비(%)	비고
T0	4.49	0	
T25	3.87	1.3	
T50	3.81	2.6	

표 2는 부가질량을 이용한 교량의 진동저감 효과를 확인하기 위해서 수행된 해석대상 교량의 모델링을 나타내고 있으며 25cm 두께로 포설되는 경우에 전체 자중에 대한 부가질량의 비는 약 1.3%이고 첫번째 휨모드 진동수는 약 14 %정도 증가하는 반면에 사하중은 매우 작게증가함을 알 수 있다.

그림 9는 300 km/hr의 속도로 고속철도가 주행할 때 경간중앙단면의 상부플랜지에서 부가질량에 따른 가속도의 응답비를 도시하고 있다. 그림에서 보여주듯이 T25와 T50 모델의 응답비가 최대 37 %와 43 %까지 감소됨을 알 수 있다. 표 3은 각 모델에 따른 최대 저감율을 나타내고 있다.

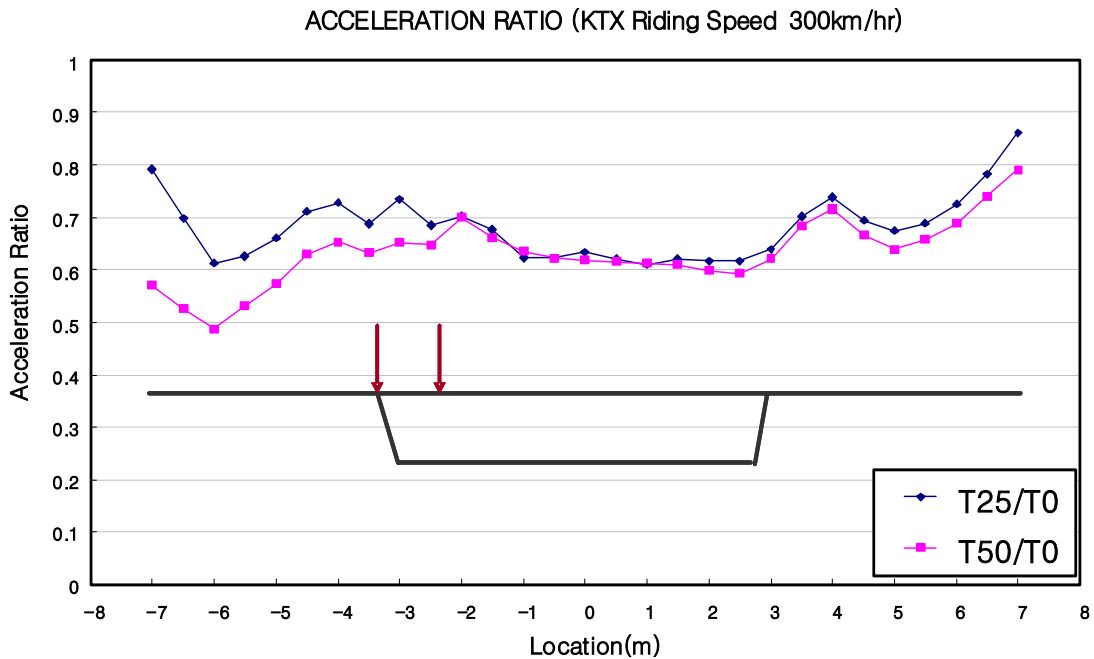


그림 9. 부가질량에 의한 가속도응답의 저감

표 3 부가질량에 따른 가속도의 최대 저감율

모델	속도(km/hr)	저감율(%)	
		캔틸레버	상부플랜지 중앙
T25	300	20.8	36.6
	공진	9.8	7.6
T50	300	42.9	38.2
	공진	11.5	9.4

## 5. 결론

본 연구에서는 소형감쇠기와 부가질량의 설치방법이 열차의 고속주행에 의해서 발생하는 과도한 가속도의 저감이 간단하고 효과적인 방법으로 제안되었다. 감쇠기의 적용성 검토를 위해서 이론적인 연구와 실험적인 연구가 동시에 수행되었으며 감쇠기를 장착한 국부진동 저감방안은 유지관리, 저감효과



의 일관성, 그리고 효용성 측면에서 불리한 측면이 많은 반면, 간단한 질량을 증가시키는 방법으로 과도한 가속도를 저감시키는 부가질량을 이용한 방법은 많은 장점을 갖고 있으며 매우 효과적임이 이론적인 연구를 통해서 확인되었다. 본 연구를 통해서 밝혀진 내용은 다음과 같다.

- (1) 국부진동 저감장치를 이용한 가속도 저감방안은 효과적이긴 하나 유지관리에서 매우 불리하므로 경제적인 방법이 되긴 어렵다.
- (2) 연구결과 국부진동 저감장치에 사용된 방법 중에서 오리피스 감쇠기가 효과적인 것으로 밝혀졌다.
- (3) 부가질량을 이용한 진동저감 방안은 매우 경제적이며 유효한 방법으로 판단된다.
- (4) 부가질량의 크기가 증가함에 따라 저감효과가 크게 증가하진 않으므로 적절한 질량의 선택을 위한 신중한 고려가 요구된다.
- (5) 부가질량을 이용한 저감방안에 대한 현장 실험을 실시할 예정에 있다.

### 감사의 글

본 연구는 건설교통부 국가 R&D과제인 고속철도 선로구축물 시스템안정화 기술개발(5차년도) 연구 결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 장승필, 곽종원, 김성일(1998), “고속철도 교량의 동적거동”, 한국강구조학회 논문집, 제10권 4호, pp. 577-587
2. 김성일(2000), “고속철도 교량의 교량-차량 상호작용해석”, 박사학위논문, 서울대학교
3. 곽종원, 진원중, 김영진, 김병석(2003), “경부고속철도 열차의 주행에 의한 콘크리트 박스거더 교량의 동적거동”, 한국강구조학회 논문집, 제23권 1호, pp. 27-36