

## 3경간 연속 Extradosed PSC 철도교의 동적거동에 관한 연구

### A Study on the Dynamic Behavior of a 3 Span Continuous Extradosed PSC Railway Bridge

길태수<sup>†</sup> · 김성일<sup>\*</sup> · 김연태<sup>\*\*</sup>

Tae-Soo Gill · Sung-Il Kim · Yun-Tae Kim

#### Abstract

The Extradosed PSC bridge is one of the best alternates which not only covers the longer span than PSC box girder and also performs the role of landmark facility with much cheaper cost than cable stayed bridge. Since the cable-stayed long span bridge is more flexible than general medium span bridges and railway bridges can be experienced resonance phenomenon by repeated equidistant axle loading of the train, it is inevitable to consider the dynamic behavior on impact, deflection and so on. In the present study, the dynamic behavior of an Extradosed PSC railway bridge subjected to moving train forces is analyzed. As well as trains which operate in conventional railway lines, KTX train is also considered. For the estimation of dynamic performances of the Extradosed PSC bridge, vertical deflection, accelerations of the slab, end rotation of the girder and impact on pylons and cables are discussed.

**Keywords :** Extradosed PSC Bridge(케이블지지장경간교량), Dynamic Behaviors(동적거동), Moving Train Forces(이동 열차하중)

## 1. 서 론

### 1.1 개요

토목 설계 및 시공기술, 신소재의 발달로 상부구조의 경량화 및 교량의 장대화를 위한 지속적인 기술 개발과 보완이 이루어져 왔으며, 그 일환으로 긴장재를 단면 밖으로 연장하는 대편심 케이블교가 도입되었다. 대편심 케이블 교량인 Extradosed PSC교는 부모멘트 구간에서 PS 강재로 인해 단면에 도입되는 축력과 정모멘트를 증가시키기 위해 PS 강재를 낮은 주탑의 정부에 external tendon의 형태로 부재의 유효높이 이상으로 배치시켜 편심량을 증가시킨 장경간 교량이다. 이러한 신형식 케이블 지지 장경간 교량은 상대적으로 유연한 구조로 충격계수 및 처짐 등 사용성 측면에서 취약할 수 있으므로 동적거동에 대한 검토가 필수적이나 현재 케이블 지지 장경간 교량의 주행열차하중에 대한 동적

거동 분석에 대한 상세연구가 미비한 실정이다. 특히 철도교의 경우, 도로교와 달리 지속적으로 반복되는 고속 중량의 열차 주행으로 인한 진동특성 및 처짐, 가속도 등 동적응답에 대한 검토가 반드시 필요하다.

본 연구에서는 국내 일반철도 구간에 건설 예정인 1급선 Extradosed PSC 철도교에 대하여 상용유한요소해석 프로그램인 Midas/Civil을 이용하여 일반철도 구간을 운행 중인 새마을호, 화물열차와 추가적으로 고속열차인 KTX 주행에 대하여 이동집중하중 연행 모델(constant forces)에 의한 시간이력해석(time history analysis)을 수행하여 국내 기준 및 국외의 관련 규정과의 비교·검토를 통하여 Extradosed PSC 철도교의 동적거동 특성 및 성능을 검토하였다.

### 1.2 동적성능 검증기준

교량설계 시, 동적거동에 대한 검토는 단순히 충격계수를 적용하여 안전율 개념에서 정적검토를 수행함으로써 포함시키고 있다. 그러나 이러한 충격계수는 단순히 지간장 등에 대한 합수일 뿐이며 다양한 하중 조건 및 불규칙성 등이 포함되어 있지 않다. 철도교량의 경우 특정한 축간격을 가

<sup>†</sup> 책임저자 : 학생회원, (주)수성엔지니어링 구조부

E-mail : gtszzang@empal.com

TEL : (016)244-7284 FAX : (02)974-6145

<sup>\*</sup> 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원

<sup>\*\*</sup> 정회원, 서울산업대학교, 교수

진 열차가 주행함으로써 공진의 발생 가능성이 크며, 중량의 하중이 고속으로 주행함에 따라 충격계수 외에 다양한 동적성능 항목에 대한 검토가 필연적이다.

본 연구에서는 동적 성능검증 기준과 관련된 국내외 규정을 조사하였으며, Extradosed PSC 철도교 동적해석 결과를 국내 기준과 비교하는 것을 원칙으로 하였다[1-3]. 또한 국내 규정에 언급되지 않은 규정은 국외의 규정을 참고치로 제시하고, 이를 규정과 동적해석 결과를 비교하였다.

동적성능을 평가하기 위한 기준으로 거더 중앙부의 처짐을 기준으로 한 충격계수, 최대수직처짐, 상판의 최대 가속도, 단부회전각 등에 대한 검토를 하였다[4].

## 2. 주행열차하중에 의한 공진 및 공진소멸현상

열차하중에 의한 교량의 동적거동은 교량의 동적특성과 차량의 동적운동에 의해 결정되어진다. 즉, 교량의 고유진동수(natural frequency), 차량의 속도와 유효타격간격(effective beating interval)에 의해 교량의 공진현상을 예측할 수 있다. 즉, 식 (1)과 같이 교량의 고유진동수와 차량의 가진진동수(exciting frequency)가 일치할 경우 공진현상이 발생하게 되며 매우 불안정한 동적거동을 유발하며, 이는 승객의 승차감에도 나쁜 영향을 준다. Fig. 1은 등간격의 연행하중이 진행할 경우의 공진현상과 그에 따른 임계속도를 보여준다.

$$\Omega(\text{Hz}) = V / S_{eff} = \omega_1 (\text{Hz}) \quad (1)$$

여기서,  $\Omega$ 는 열차의 가진주파수,  $V$ 는 차량의 속도이며  $S_{eff}$ 는 열차의 유효타격간격,  $\omega_1$ 는 교량의 첫 번째 흔 고유진동수를 나타낸다.

그러므로, 공진을 유발하는 차량의 임계속도(critical speed)는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며, 교량의 고유진동수와 열차의 유효타격간격을 알면 공진을 유발하는 임계속도를 미리 예상할 수 있다. 임의의 차량이 임의의 간격으로 통과하는 도로교량과 달리 철도교량은 특정 열차만 주행하게 되므로 식 (2)와 같이 공진을 발생시키는 임계속도의 파악이

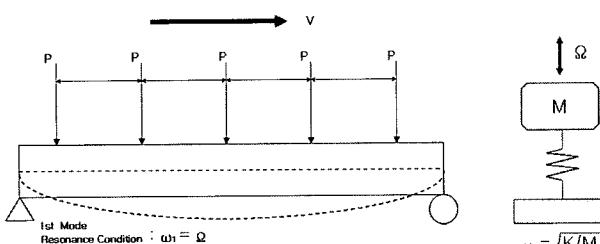


Fig. 1. Concept of Resonance under the Equidistant Loads Condition

가능하다.

$$V_{cr} = \omega_1 \times S_{eff}$$

$$V_{scr} = \frac{\omega_1}{n} \times S_{eff} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

여기서,  $V_{cr}$ 는 열차의 임계속도이며,  $V_{scr}$ 은 열차의 부임계속도이다.

열차의 부임계속도(subcritical speed)는 열차의 주행속도에 대하여 교량의 진동주기가  $n$  배로 반응하는 경향을 나타내며, 공진이 발생하는 임계속도에 비하여 정수배만큼 나누어주어 구하게 된다.

한편, H.Wakui(1992), Yang 등(1997)은 단순보와 연행이동집중하중에 대하여 수학적 정식화에 의한 해석적 해를 통하여 연행 이동하중에 의한 단순보의 공진소멸현상을 언급하였다.

교량의 운행 열차하중에 의한 동적응답은 특정시간에서 교량 위에 위치한 축하중에 의한 동적응답과 이미 교량을 통과한 축하중에 의한 자유진동 효과가 합해져 결정된다. 공진현상은 교량을 통과한 하중에 의한 자유진동 효과가 무한대로 발산하면서 결정되는 것으로 식 (2)와 동일하다. 공진소멸현상은 이와 달리 교량을 통과한 이동하중의 자유진동효과가 모두 소멸되는 향이 존재함으로써 교량의 동적응답이 현재 교량에 위치한 하중에 의해서만 결정될 때 발생하는 현상이다. 즉, 공진을 발생시키는 임계속도나 소멸조건이 발산조건에 비해 우선됨으로써 안정적인 동적응답을 나타내는 것으로 수학적으로 식 (3)과 같다.

$$L(m) = S_{eff} \times (i + 0.5) \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

여기서,  $L$ 은 교량의 시간이다.

위 식에서 주목할 점은 열차의 속도, 교량의 물성치 및 고유진동수 등과 관계없이 열차의 유효타격간격과 교량의 시간만으로 나타내어진다는 점이다. 즉, 열차의 유효타격간격이 결정되면 다른 어떠한 매개변수와 관계없이 교량의 특정 시간을 결정해 공진소멸을 유도하여 안정적인 동적거동을 확보할 수 있는 교량의 설계가 가능하다는 점이다[5,6].

## 3. 수치 해석

### 3.1 대상교량의 제원

상용유한요소프로그램인 Midas/Civil을 이용하여 국내 일반철도 구간에 건설 예정인 Extradosed PSC 철도교를 모델링 하였다. PSC거더와 주탑부는 beam 요소로 모델링 하였

으며, cable은 cable - tension only 기능을 사용하여 모델링하였다. 동적해석에 사용한 고유진동수는 100차 진동모드까지 고려하였다.

Table 1은 대상 교량의 제원을 나타낸다.

교량의 감쇠는 공진 발생 시 구조물의 응답에 매우 지배적인 영향을 끼치므로 신중하여야 한다. 콘크리트 교량의 경우 일반적으로 2.5~5%의 감쇠비를 사용하나, 일본의 경우 이에 대한 다양한 연구를 통하여 5%의 감쇠비는 실제 구조물에 대하여 과다하다는 결론을 도출한 바 있다. 본 연구에서는 최근 PSC교에 대하여 eurocode[2]에서 제안하는 매우 엄격한 감쇠비인 1%의 감쇠비를 적용하여 동적해석을 수행하였으며 도상자같은 질량효과를 고려하여 교량의 모델링 시 포함시켰다.

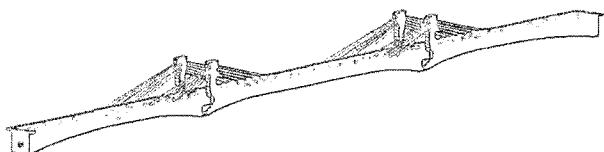


Fig. 2. Finite Element Model for Extradosed PSC Bridge

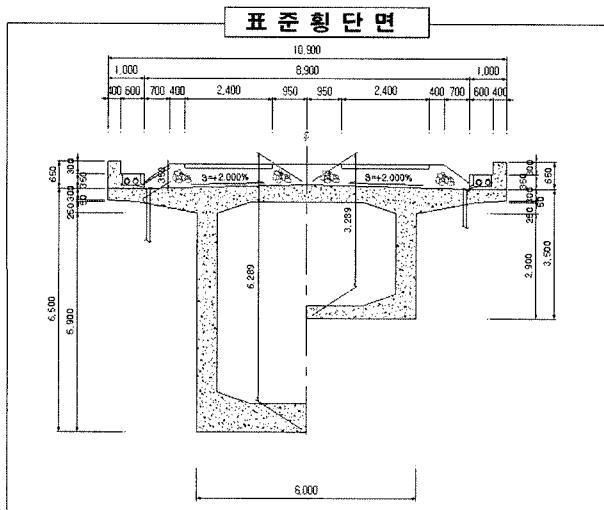


Fig. 3. Cross Section of Extradosed PSC Railway Bridge

Table 1. Properties of Extradosed PSC Railway Bridge

상부 형식	9경간 연속 Extradosed PSC Box Girder
교량 연장	675m(47.5+3@80+100+3@80+47.5)
해석 구간	260m(80+100+80) - Extradosed 구간
교량 등급	1급선(설계속도 150km/h)
교 폭	B = 10.9m ~ 12.1m
단면 형상	1 Cell PSC Box
주영 높이	3.5m ~ 6.5m
주탑 높이	10m

### 3.2 열차의 제원

본 연구에서는 일반철도 구간을 운행 중인 열차 중 새마을호 8량 편성과 화물열차 20량 편성, 경부고속철도를 운행 중인 KTX 20량 편성에 대하여 대상 교량인 Extradosed PSC 철도교에 대한 이동집중하중 연행 모델(constant forces)의 동적시뮬레이션을 수행하였다.

선정차량의 하중을 시간경과에 따라 일정한 속도로 주행하면서 교량 상판의 레일 중심을 따라 작용하는 것으로 하였으며, 하중은 단선 및 복선 재하 하였고, 복선 주행 시 열차가 교량에 동시에 진입하는 것으로 가정하였다.

차량의 주행속도는 위험요소에 대한 검토와 향후 대차성능 개선 등을 고려하여 실제 운행속도보다 높은 속도로 새마을호의 경우 200km/hr까지 10km/hr씩 증속시키며 동적 해석을 수행하였고, 화물열차의 경우 150km/hr, KTX의 경우 350km/hr 주행까지 고려하여 해석을 수행하였다.

Fig. 4~Fig. 6는 각 열차별 하중선도의 축중크기와 축배치를 나타낸다.

## 4. 해석 결과

### 4.1 고유진동수 분석

교량의 자유진동해석(free vibration analysis)을 수행하여 지배적인 첫 번째 흔 고유진동수를 구하면 특정 축 간격을 가

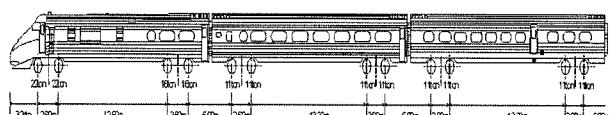


Fig. 4. Axe Load & Distance of Saemaul Train

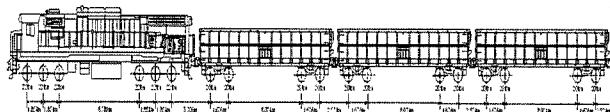


Fig. 5. Axe Load & Distance of Freight Train

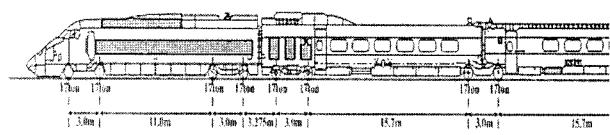


Fig. 6. Axe Load & Distance of KTX



Fig. 7. 1st Bending Mode of Extradosed PSC Bridge ( $f_1 = 0.73$  Hz)

Table 2. Critical Speed of Each Train

차종	유효타격거리 ( $d_{eff}$ )	임계속도 (km/h)
새마을호	23.5	61.76
화물차	13.95	36.66
KTX	18.7	49.15

Table 3. The Span of Resonance Suppression for Each Train (m)

차종	유효타격거리 ( $d_{eff}$ )	i			
		3	4	5	6
새마을호	23.5	82.25	105.75	129.25	-
화물차	13.95	-	62.78	76.73	104.63
KTX	18.7	65.45	84.15	102.85	121.55

진 열차하중에 대한 공진(resonance) 및 공진소멸(resonance suppression)을 예상할 수 있는 열차 속도를 구할 수 있다.

유효타격거리는 일반적으로 가장 영향이 큰 대차 중심간 거리로 정해지며 객차간의 거리 혹은 대차 내 축간 거리 등이 될 수도 있다. 그러나 기존의 연구결과에 따르면 공진 및 공진소멸과 직접적으로 관계되는 가장 지배적인 유효타격간격은 객차간 거리이며, 이를 이용하여 임계속도를 구하면 Table 2와 같다[6].

#### 4.2 주행열차하중에 의한 동적응답 분석

본 연구에서는 충격계수(dynamic magnification factor)를 다음과 같이 정의한다.

D.M.F = 최대동적응답/최대정적응답

충격계수 = D.M.F - 1

여기서, 최대동적응답 및 최대정적응답은 열차가 교량에 진입 시부터 완전히 통과한 후까지의 시간이력응답 중 최대 동적 및 정적응답을 나타낸다.

##### 1) 치짐 및 충격계수

본 연구대상 교량의 경우 가장 염격한 프랑스와 국내 고속철도 기준인 L/1700을 적용하면 허용 치짐은 Table 4와 같이 주경간이 58.82mm, 측경간이 47.06mm이며, 해석결과 단선 주행 및 복선 주행 시 모두 상기 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

Table 2에서 각 열차별 공진발생 예상속도가 설계속도 (150km/hr) 내에 존재함을 알 수 있다. 그러나 해석결과 임계속도에서 치짐량이 증가하는 경향은 보이나 증가량이 미소함을 알 수 있다. 이는 각 열차별 공진소멸지간장이 본 연

Table 4. Maximum Vertical Deflection (mm)

차종	단선 주행		복선 주행		제한규정
	주경간	측경간	주경간	측경간	
새마을호	13.47	13.32	26.37	18.08	58.82 (주경간)
화물차	30.33	25.86	51.68	37.64	47.06 (측경간)
KTX	27.77	24.85	48.42	37.10	

Table 5. D.M.F of Vertical Displacements

차종	단선 주행		복선 주행		제한규정
	주경간	측경간	주경간	측경간	
새마을호	1.332	1.347	1.394	1.381	1.264 (주경간)
화물차	1.071	1.071	1.072	1.099	1.270 (측경간)
KTX	2.379	1.966	2.319	2.621	

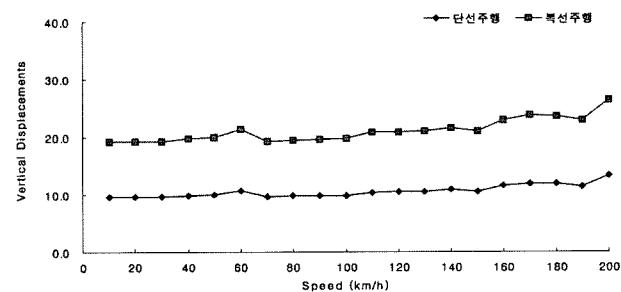


Fig. 8. Vertical Displacement of Saemaul (Center Span)

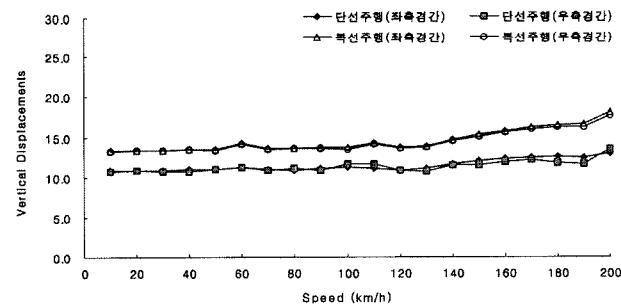


Fig. 9. Vertical of Displacement of Saemaul (Side Span)

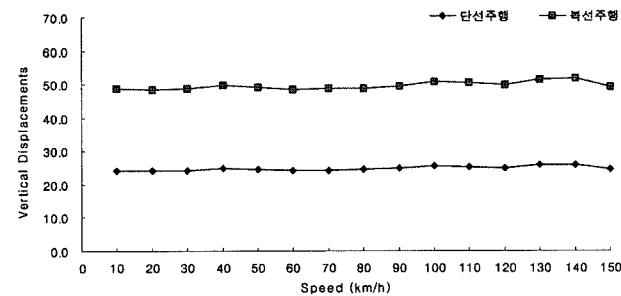


Fig. 10. Vertical of Displacement of Freight Train (Center Span)

구대상 교량의 짧은간장과 거의 일치하기 때문에 공진에 대한 영향이 줄어든 것으로 판단된다.

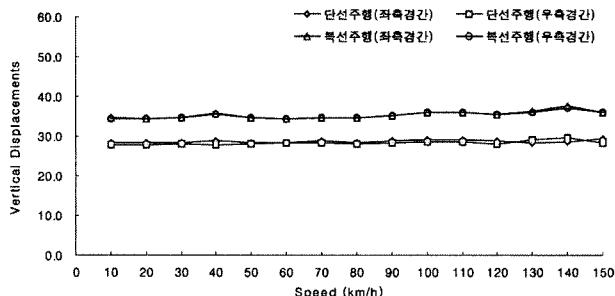


Fig. 11. Vertical of Displacement of Freight Train (Side Span)

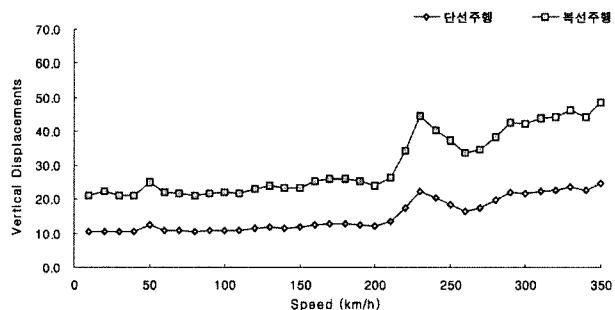


Fig. 12. Vertical Displacement of KTX (Center Span)

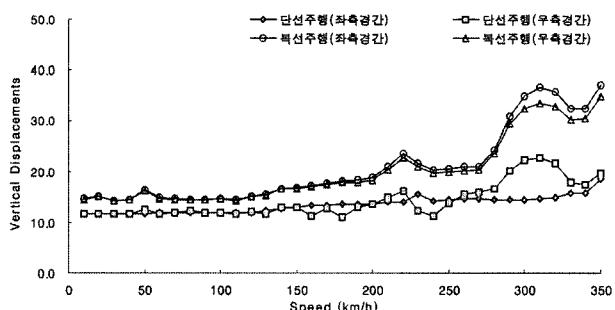


Fig. 13. Vertical Displacement of KTX (Side Span)

또한 KTX의 경우 운행속도가 200km/h를 초과하는 고속 주행 시에는 거더 중앙부 수직처짐은 제한규정을 충분히 만족하나 충격계수(D.M.F)의 값이 크게 증가함을 알 수 있다.

Fig. 8~Fig. 13은 운행속도에 따른 각 열차별 수직처짐을 나타낸다.

## 2) 상판의 수직가속도

상판의 최대 수직가속도는 고속철도 규정과 프랑스 등의 규정에서 0.35g 혹은 0.5g를 규정으로 하고 있다. 본 연구대상 교량에 대한 해석결과 단선 주행 시 새마을호의 경우 0.085g (측경간)~0.105g(주경간), 화물열차의 경우 0.152g~0.189g, KTX의 경우 0.094g~0.11g로 해석 케이스 모두에서 성능 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 복선 주행 시 새마을호의 경우 0.122g~0.218g, 화물열차의 경우 0.22g~0.366g,

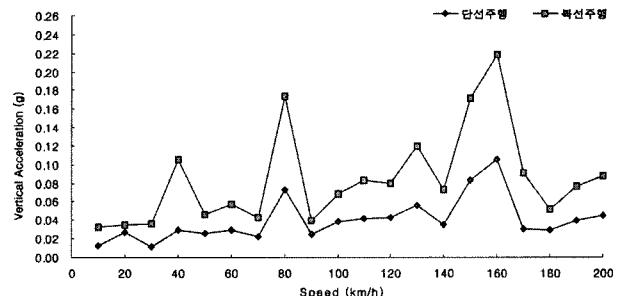


Fig. 14. Vertical Acceleration (Saemaul - Center Span)

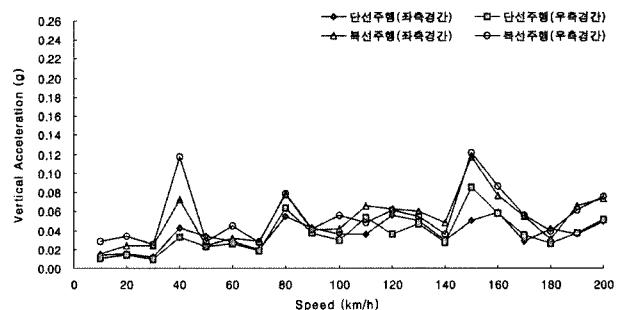


Fig. 15. Vertical Acceleration (Saemaul - Side Span)

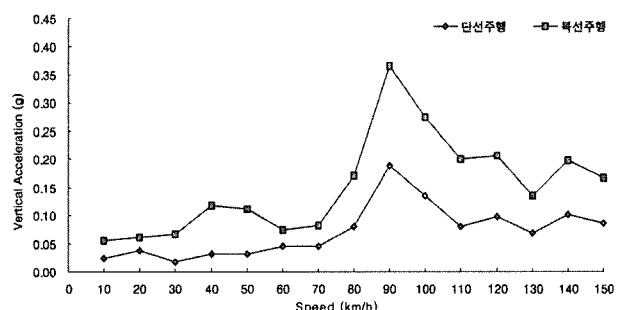


Fig. 16. Vertical Acceleration (Freight Train - Center Span)

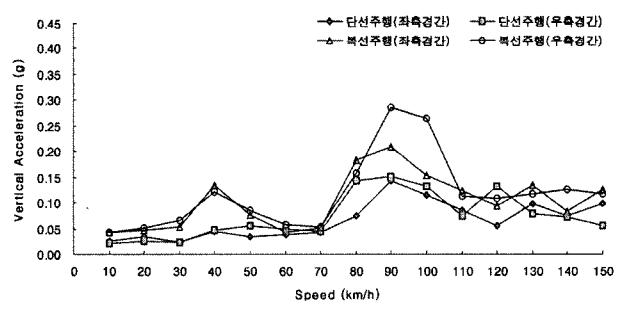


Fig. 17. Vertical Acceleration (Freight Train - Side Span)

KTX의 경우 0.135g~0.179g의 결과가 나타났다. 특히 복선 주행 시 화물열차의 경우 90km/hr의 속도에서 비교적 높은 가속도가 발생할 수 있는 것으로 나타났다.

국내 고속철도 규정인 BRDM이나 유럽의 규정들에서는 상판 가속도에 대한 실열차 동적해석에 의한 동적성능 검증

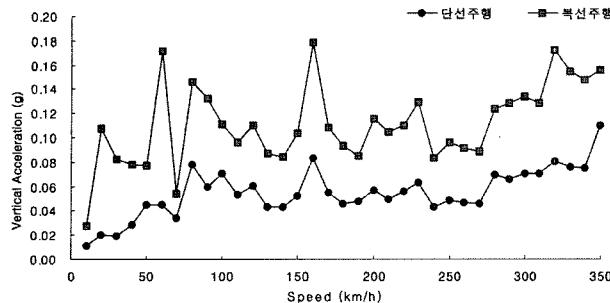


Fig. 18. Vertical Acceleration (KTX - Center Span)

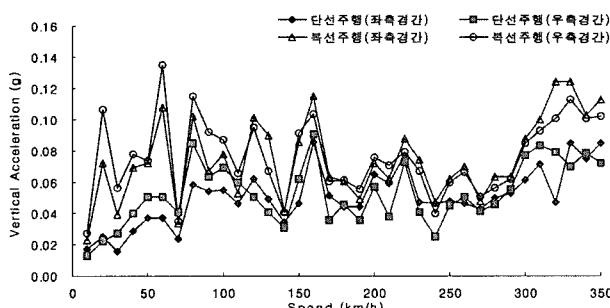


Fig. 19. Vertical Acceleration (KTX - Side Span)

시 단선재하를 기준으로 하고 있다는 면에서 대상 교량은 가속도 측면에서 안정적인 거동을 보이고 있다고 판단된다.

Fig. 14~Fig. 19은 각 속도에 따른 각 열차별 상판 최대 수직가속도를 나타낸다.

### 3) 단부꺾임각

단부꺾임각에 대한 해석결과는 일반철도 기준인  $3.5 \times 10^{-3}$ (rad)은 모두 만족하고 있다. 교량의 처짐과 밀접한 관계에 있는 단부회전각은 일반열차의 경우 가장 중량인 화물열차의 단선주행 시에  $0.837 \times 10^{-3}$ (rad), 복선주행 시  $1.21 \times 10^{-3}$ (rad)의 최대값을 보여 성능기준을 만족함을 알 수 있다.

그러나 고속철도의 경우 주행속도가 200km/h 이상인 경우 기준(BRDM)인  $5 \times 10^{-4}$ (rad)을 만족하지 못하는 결과가 나타났다.

Fig. 20~Fig. 22은 운행 속도에 대한 각 열차별 단부회전각을 나타낸다.

### 4) 케이블 및 주탑의 충격계수

케이블에 대한 충격계수는 각 열차별로 단선 주행 시 케이블의 장력비로 나타내었다. 그 결과, 새마을호와 화물열차의 경우 최대값이 각각 0.17, 0.07로 낮게 나타났으나, KTX의 경우 주행속도 200km/hr 이상에서 충격계수가 크게 증가하는 경향이 나타났다.

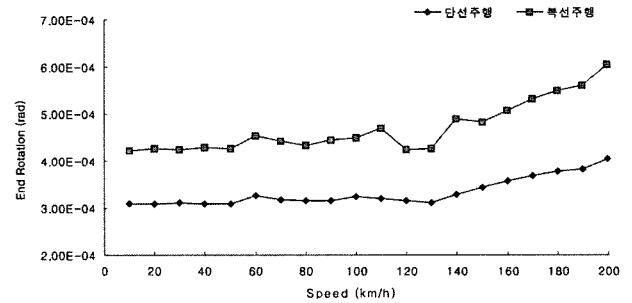


Fig. 20. End Rotation - Saemaul

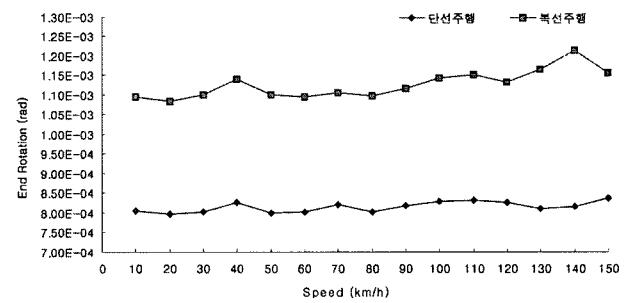


Fig. 21. End Rotation - Freight Train

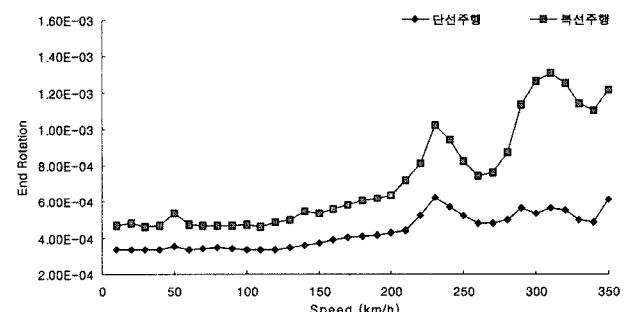


Fig. 22. End Rotation - KTX

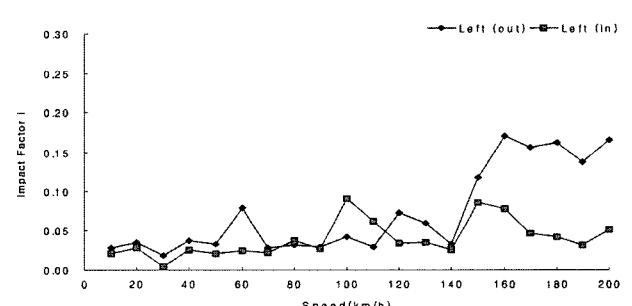


Fig. 23. Impact factor of Cable (Left Main Tower) - Saemaul

Fig. 23~Fig. 25는 각 열차에 대한 속도별 케이블의 충격계수를 나타낸다.

주탑의 경우 하부에서의 정·부모멘트의 모멘트비로 충격계수를 나타냈으며, 그 결과, 새마을호의 경우 정모멘트에 의한 충격계수의 값이 최대 0.29, 부모멘트에 의해 최대 0.38, 화

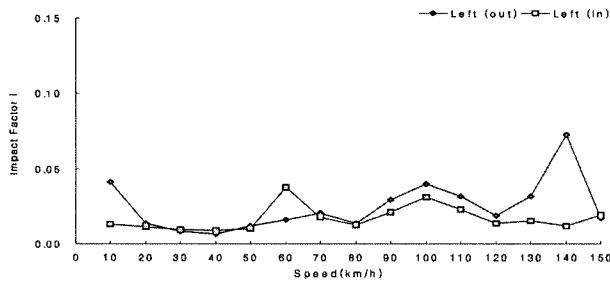


Fig. 24. Impact factor of Cable (Left Main Tower) - Freight Train

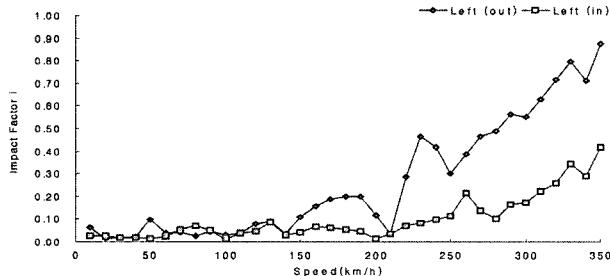


Fig. 25. Impact factor of Cable (Left Main Tower) - KTX

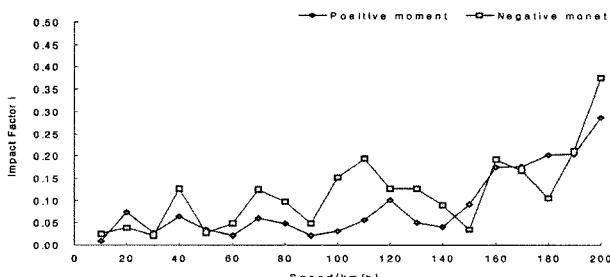


Fig. 26. Impact factor of Main Tower (Left) - Saemaul

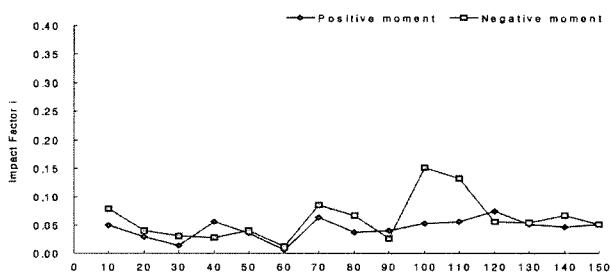


Fig. 27. Impact factor of Main Tower (Left) - Freight Train

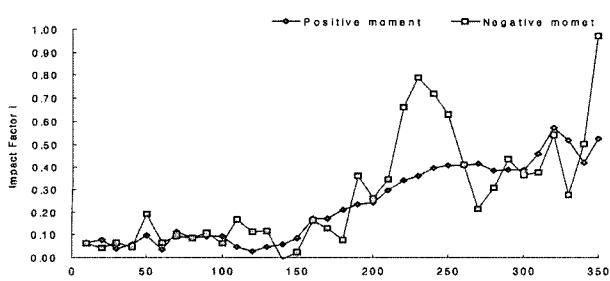


Fig. 28. Impact factor of Main Tower (Left) - KTX

물열차의 경우 정·부모멘트에 대해 각각 0.07, 0.16으로 나타났다. KTX의 경우 위 결과와 마찬가지로 주행속도 200km/hr 이상에서 충격계수가 크게 증가하는 경향이 나타났다.

Fig. 26~Fig. 28은 각 열차에 대한 속도별 케이블의 충격계수를 나타낸다.

## 5. 결론

철도교량은 설계에 적용되는 하중의 크기 및 특성에서 도로교량과 많은 차이가 있으며, 특히 지속적으로 반복되는 고속 중량의 열차하중에 대한 검토가 필연적이다. 더구나 케이블교량과 같은 장대교량은 매우 유연한 구조이므로 동적 이동하중의 반복 작용으로 인한 진동특성 및 처짐과 가속도 등 동적응답과 공진 가능성 및 공진 발생 시 응답에 대한 검토는 필수적이다.

본 연구에서는 일반철도 구간에 건설 예정인 Extradosed PSC 철도교를 대상으로 하여 상용유한요소해석 프로그램인 Midas/Civil을 이용해 주행열차 하중에 대한 이동열차하중 해석을 통하여 동적거동을 분석하고 국내외 시방기준과의 적정성을 검토하여 동적성능을 평가하고자 하는데 있다.

동적성능을 평가하기 위한 기준으로는 거더 중앙부 처짐을 기준으로 한 충격계수, 최대 수직처짐, 상판의 최대 수직가속도, 단부회전각 등을 고려하였다. 상기 항목에 대하여 국내외 관련 규정을 조사한 후 수치해석 결과와 비교한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 각 차종별 임계 속도가 실 주행 속도 내에 존재하지만 공진 소멸현상에 의해 동적처짐의 증가량이 미소하게 나타남을 확인하였다. 공진을 발생시키는 임계속도이나 소멸조건이 발산조건에 비해 우선됨으로서 안정적인 동적응답을 나타낸다는 기준 연구 결과에 부합되는 결과를 도출하였으며, 가장 엄격한 처짐 기준이라고 할 수 있는 L/1700과 비교하였을 때 소요의 안전성 및 사용성을 확보하고 있다고 판단된다.
- (2) 본 연구의 대상 교량은 일반선 구간의 장경간 철도교량으로 해석결과, 상기 동적성능 관련 항목에 대하여 일반 철도 차량의 주행 속도에 있어서 충분히 국내외 제한 규정값 이내의 성능을 보여주고 있다.
- (3) 고속주행(200km/h 이상)에 있어서 충격계수의 값이 크게 증가하는 경향이 있으며, 단부꺾임각이 고속철도 규정을 초과하는 경우가 나타났다. 향후 대차 성능 개선 등으로 인한 기존 열차 속도의 증가 또는 고속철도교량으로의 적용을 위해서는 현재 단면에 대한 수정이나, 단

부 보완 등 동적성능 향상 방안을 고려한 후 이에 대한  
재검토가 필요할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 한국철도시설공단 (2004), 철도설계기준(철도교편), 한국철도시설공단.
2. Eurocode 1 (2001), Actions on Structures : Part 2 General Actions - Traffic Loads on Bridges, European Committee for Standardization.
3. SYSTRA (1995), Bridge Design Manual (BRDM) Final Report, Korea High Speed Rail Construction Authority (KHRC).
4. 김성일 외 (2005), IPC거더 동적거동 분석에 의한 철도교량 적용 성에 관한 연구, 한국철도기술연구원.
5. Y.B. Yang, J.D. Yau & L.C. Hsu, "Vibration of Simple Beams due to Trains Moving at High Speeds", Engineering Structures, 19(11), 1997, pp.936-944.
6. 김성일, 정원석, 최은수, "공진소멸현상을 이용한 기존선 철도교량의 지간 최적화를 위한 연구", 한국철도학회논문집, 제8권 제2호, pp.128-136, 2005.4.