

PSC 교량 위를 고속주행 중인 KTX 전동차의 중심회전각 동적해석

A Dynamic Analysis of Rotations at the center of Vehicle Running High Speed KTX Train on the PSC Box Bridges

오 순 택¹⁾ 이 등 준^{2)*}
Soon-Tack Oh Dong-Jun Lee

Abstract

A dynamic analysis is carried out to provide an evaluation method of running safety for a PSC box bridge located on the Gyeong-Bu high speed railway. The numerical models of bridge and train vehicle are developed in detail with corresponding interaction system. Three dimensional skeleton element model of PSC box bridge and 38-degree-of-freedom of vehicle are adopted from the existing properties of KTX bridge and train vehicle. Analysed three direction rotations of vehicle on the bridge and ground tracks are compared for running speeds up to 500 km/h with 10 km/h constant increments. The comparison of the rotations will be an improved evaluation method of Running Safety in stead of the existing standard method.

Keywords : Dynamic analysis, High speed railway, PSC box bridge, Rotation of vehicle, Running safety

1. 서 론

현재 공용중인 고속철 PSC 박스 교량의 구조설계기준인 충격계수와 고유진동수 제한 외에 KTX 차량의 주행안정성을 확보하기 위한 적용된 설계기준은 4가지 항목을 적용하고 있다. 기존 고속철구간에서 공용 중인 PSC 박스 교량에서 동적응답이 최대로 발생하는 40 m 단경간인 경우에 적용하면 주행안정성을 위한 설계기준은 교량의 경간 중앙부에서 발생하는 23.5 mm 최대 허용수직변위, 0.35 g 허용 최대 가속도, 973.7 μ radian 단부회전각과 1.2 mm/3 m 이내의 연직면 궤도형상을 만족시켜야 한다. 한편, 3월 31일 울산-고모 68.8 km 구간을 최고속도 421.4 km/h의 시험운행에 성공한 동력분산형 고속철 HEMU-430X가 상용화될 경우 기존의 교량구조물을 최대한 활용하기 위한 보다 엄밀한 설계기준의 적용이 요구된다. 따라서 증가될 주행속도에 대한 설계기준은 UIC 하중을 적용하여 교량의 거동만을 제한한 기존의 구조설계기준과 차량의 주행안정성을 위한 차량의 연

직치짐과 치짐가속도 그리고 교량의 단부회전각과 먼틀림의 제한 조건 외에도 보다 엄격한 설계기준이 요구되어 국내외에서 현장실험과 정밀 삼차원 차량모델을 적용한 수치해석 등이 활발히 연구된다 (Seo et al., 2013; Oh et al., 2008; Xia and Zhang, 2005). 이를 바탕으로 고속주행 시 승차감과 관련된 차량 중심에서의 피칭, 롤링, 요잉 회전각의 변화 추이를 연구하여 주행안정성에 요구될 허용한계와 평가기준으로 개발되어야 한다.

2. 수치해석을 위한 모형화

기존의 KTX 동력차를 차체, 대차 그리고 윤축장치로 각각의 질량을 실제 설치된 스프링과 댐퍼 물성치를 적용하여 38 자유도로 정밀 모델링하고 증가될 최대속도 500 km/h까지 10 km/h 증분으로 수치해석하여 교량의 동적응답과 통합된 차량의 동적거동을 분석함으로써 이를 경부고속철에서 공용 중인 PSC 박스 교량을 대상으로 유한요소법으로 모형

1) 정회원, 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 교수
2) 정회원, 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 강사, 교신저자

* Corresponding author : djlee@snut.ac.kr
• 본 논문에 대한 토의를 2014년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2014년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

화 하여 차량과 교량구조물의 상호작용을 4차 Runge-Kutta 기법으로 직접 적분하여 해석하였다 (Oh et al., 2011). 차량 중심의 회전각 추이를 교량과 일반도상에서의 차이점을 비교하기 위하여 교량의 전면 진입부 일반도상을 170 m 확장하여 급 발진된 차량의 초기 진동이 안정된 결과만 취하여 주행속도별 교량 상 최대/최소 회전각 추이와 교량/일반도상의 차이 그리고 최대/최소 회전각 증분에 대한 해석 결과를 분석하였다.

2.1 PSC 박스 교량의 모형화

경부고속철구간에 공용중인 40 m 단순지간의 변단면 복선 PSC 박스 교량을 대상으로 유한요소법 3차원 뼈대요소로 모형화 하였다. 변단면을 기준으로 40개의 절점과 빔요소를 4 m간격으로 11개 횡방향 단면을 편성하고 교축방향으로 각각 16개 보요소를 박스단면의 헌치부를 고려하여 배치하였다. 총 440개의 절점과 600개의 보요소로 구성하였다. 교량의 질량은 일관성질량 (Consistent Mass)을 적용하고 감쇠는 Rayleigh 감쇠를 적용하였다.

차량의 운동방정식에 의한 거동을 궤도의 스프링강성과 감쇠를 고려하여 상대변위함수로 전달하여 교량의 운동방정식으로 교량의 변위를 산출하였다. 교량의 정적변위와 궤도의 불규칙성을 발생시킨 후 단위시간당 차량의 위치를 계산하고 교량과 차량사이의 상호작용력을 계산한 후 교량의 운동방정식이 해석된다. 이때 계산된 새로운 변위를 가정한 변위와의 차이가 0.0001 허용오차를 만족할 때까지 Runge-Kutta 4차 수치해석방법으로 반복계산하여 교량의 변위를 결정하였다.

2.2 KTX 동력차량의 회전각 모형

차량의 동적거동을 위한 수학적 모형을 위하여 시스템의 구성요소는 강체로 가정하면 6개의 동적 자유도는 수직, 횡, 종방향의 3방향 변위와 회전성분 (피칭, 롤링, 요잉)으로 표현된다. 각각의 동적 자유도는 second-order coupled differential equation을 발생한다.

Fig. 1에서 피칭에 의해 A점에서 B점으로 발생하는 수직방향과 종방향 변위를 각각 나타내었다. 여기에서 y축은 차량의 진행방향이고 z축은 수직하향을 나타낸다. 피칭에 의한 수직방향 운동성분은 피칭의 회전방향에 따라 수직방향 운

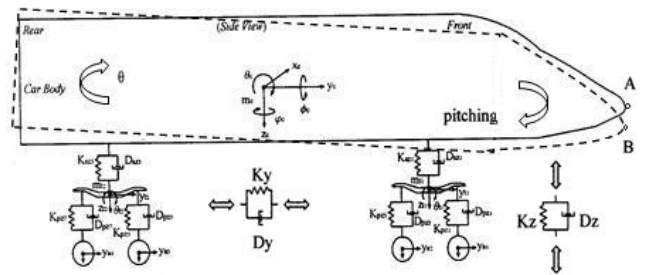


Fig. 1 Vertical and longitudinal displacement due to pitching rotation

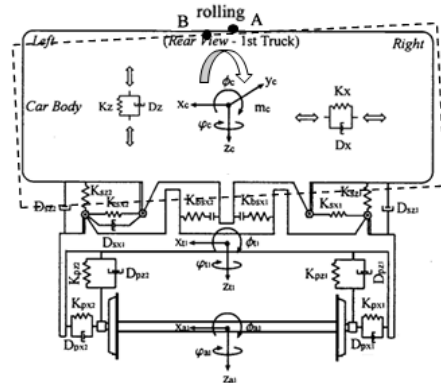


Fig. 2 Transverse and vertical displacement due to rolling rotation

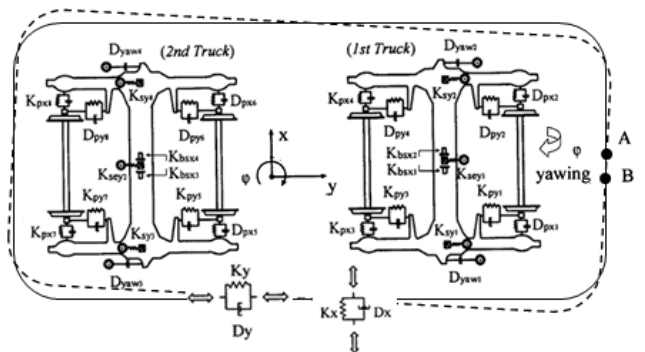


Fig. 3 Transverse and longitudinal displacement due to yawing rotation

동성분은 스프링 (Kz)과 댐퍼 (Dz)에 대하여 축력으로 작용한다. 마찬가지로 종방향 운동성분 역시 스프링 (Ky)과 댐퍼 (Dy)에 대하여 축력으로 작용한다.

이와 같은 원리로 Fig. 2와 Fig. 3과 같이 롤링과 요잉에 의해 발생하는 운동성분 역시 각각에 해당되는 스프링과 댐퍼에 대하여 축력으로 작용한다.

3. 해석결과 분석

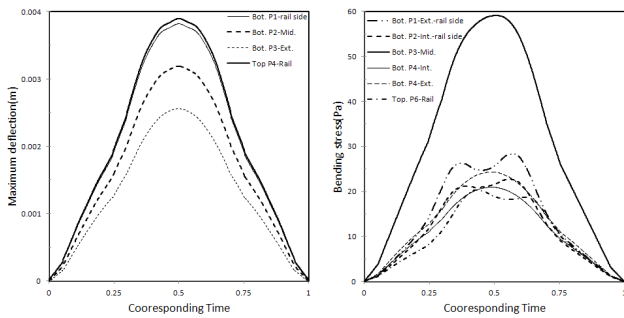
수치해석결과는 주행속도별로 PSC 박스 교량의 최대처짐과 최대 휨응력을 동적/정적 해석하여 비교하였고, 차량중심부의 연직/교축/횡 방향 피칭/요잉/롤링 회전각은 주행속도 280 Km/h의 해석결과를 기준으로 비교하고 일반도상과 교량상의 최대/최소 값을 분석하였다.

3.1 PSC 박스 교량의 동적거동

Fig. 4에 나타낸바와 같이 해석대상 PSC 박스 교량의 정적해석 최대 처짐은 3.90 mm로 단순지간 중앙경간에서 차량통과 외곽 궤도위치에서 발생하였고, PSC 박스 하면슬래브의 처짐은 최대처짐에 비하여 외곽 궤도위치의 하면, 중앙부 그리고 반대 궤도위치의 하에서 각각 98.0%, 81.8%, 65.7% 해석결과를 나타내었다. 교량의 휨응력은 처짐 해석결과와 다르게 단면계수가 적은 하면슬래브에서 최대응력이 계산되어 이를 적용하였다. 휨응력의 경우 정적해석한 결과 하면슬래브 중앙부에서 최대응력이 59.08 MPa이 발생하였고 하면슬래브의 차량통과 궤도측부터 중앙부를 포함하여 다섯 절점의 최대 응력비가 48.1%, 38.5%, 100.0%, 35.5%, 41.2%이었고 궤도위치의 상면슬래브에서 34.4%의 응력분포가 계산되었다.

3.1.1 동적확대계수 (Dynamic Amplification Factors)

교량의 동적확대계수는 동적/정적 최대변위비로 주행속도별 수치해석 결과를 Fig. 5에 나타내고 Peak 값을 회귀분석식으로 나타내었다. 본 논문에서는 기존에 발표된 현장실험결과 (Seo et al., 2013)와의 비교를 위하여 차량통과 외측궤도 하면 슬래브의 해석결과만을 적용하여 분석하였다.



(a) Deflection (b) Bending stress

Fig. 4 Static responses of PSC box bridge

3.1.2 동적 최대 변위의 동적확대계수

교량의 동적변위는 정적변위에 비하여 크게 계산되었다. 대표적 주행속도별로 교량의 동적거동은 Fig. 6에서 나타낸 바와 같이 다양한 유형을 나타내었다. 동적/정적 최대변위비는 대부분 정적해석결과를 상회하여 주행속도 430 km/h에서 2.16을 기록하였고 기존 상용속도범위에서는 280 km/h에서 1.86으로 계산되었다.

차량이 교량의 중앙부를 통과할 때 최대변위가 발생하는

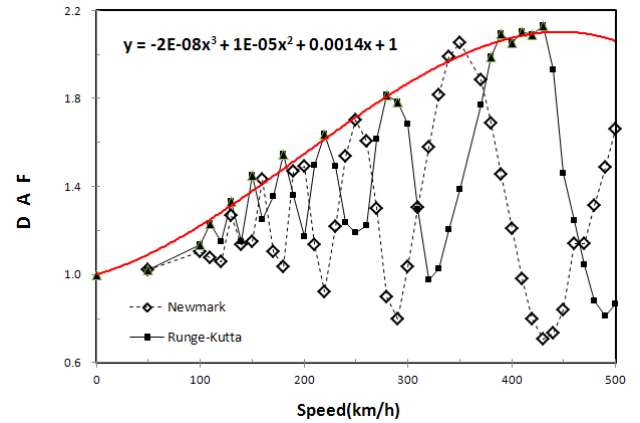


Fig. 5 Proposed regression equation of D.A.F.

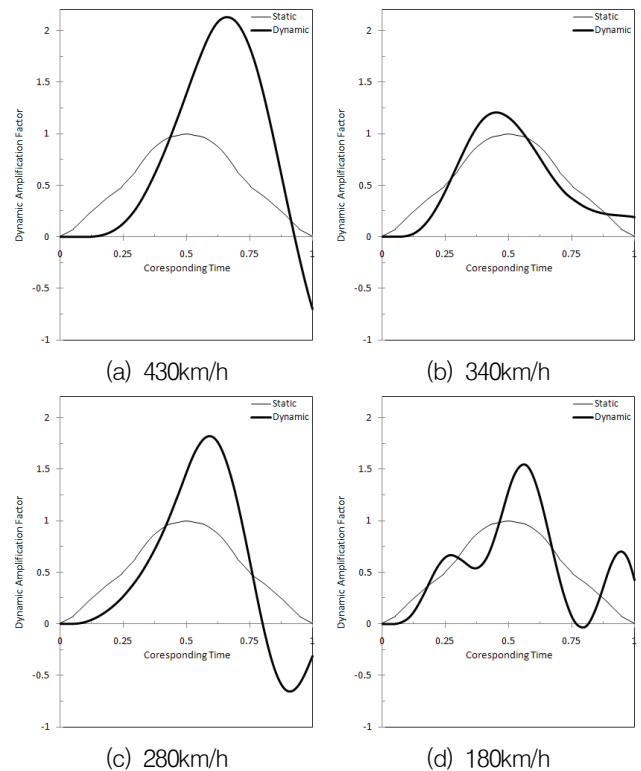


Fig. 6 D.A.F. of vertical displacement by Runge-Kutta method

정적해석 결과와 달리 주행속도 340 km/h의 경우를 제외하고 대부분의 경우 차량이 교량의 중앙부를 통과한 이후 Peak 값에 도달하고 교량을 완전히 통과한 이후 잔류 변형이 발생되는 것을 알 수 있었다.

3.1.3 동적 최대 휨응력의 동적확대계수

최대 휨응력은 중앙경간에서 최소단면계수인 하면슬래브 중심에서 발생하였다. 교량의 동적 휨응력은 정적 휨응력에 비하여 크게 계산되었다. 대표적 주행속도별로 교량의 동적 거동을 Fig. 7에서 변위 결과와 유사한 유형으로 나타냈다. 동적/정적 최대 휨응력비는 대부분 정적해석결과를 상회하여 주행속도 430 km/h에서 2.13을 기록하였고 기존 상용속도범위에서는 280 km/h에서 1.82로 계산되었다. 차량이 교량의 중앙부를 통과할 때 최대변위가 발생하는 정적해석 결과와 달리 주행속도 340 km/h의 경우를 제외하고 대부분의 경우 차량이 교량의 중앙부를 통과한 이후 Peak 값에 도달하고 교량을 완전히 통과한 이후 잔류 휨응력이 발생되는 것을 알 수 있었다. 대부분의 해석결과가 변위값을 이용한 해석결과와 유사하게 계산되었다.

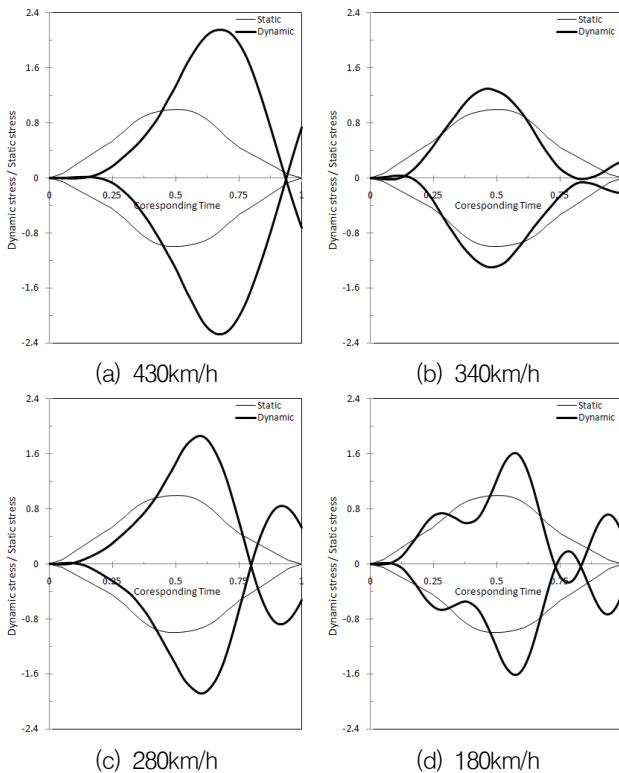


Fig. 7 D.A.F. of bending stress by Runge-Kutta method

3.2 차량의 동적거동

40 m 경간 고속철 교량의 주행안정성 설계기준에 의한 주행속도 330 km/h에 대한 차량의 동적거동은 수직 처짐과 수직 가속도의 허용 값이 각각 21.1 mm와 2.0 m/s²이다. 이러한 허용 상수값은 공용 중인 PSC교량의 실제 거동하는 변위 값이 미소하므로 대부분의 경우 만족시킬 수 있다.

본 연구에서는 차량의 회전각의 변화를 주행속도별로 비교 분석해 보고 일반도상구간과 교량구간에서의 차이를 비교하여 구간 상호간 변화율을 비교하였다.

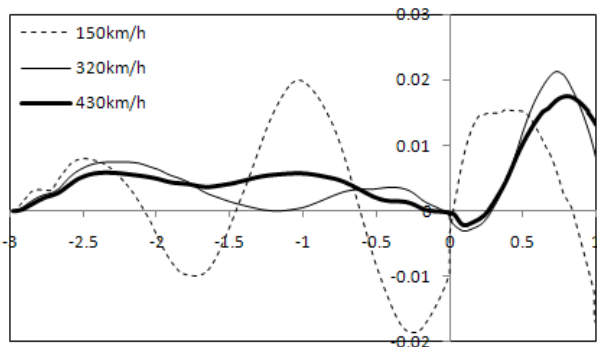
3.2.1 대표속도별 차량회전각 추이

대표적인 주행속도별 각 차량회전각의 추이를 40 m 교량 경간거리 +17 m 차량거리를 기준하여 진입구간 170 m를 합성하여 Fig. 8에 나타내었다.

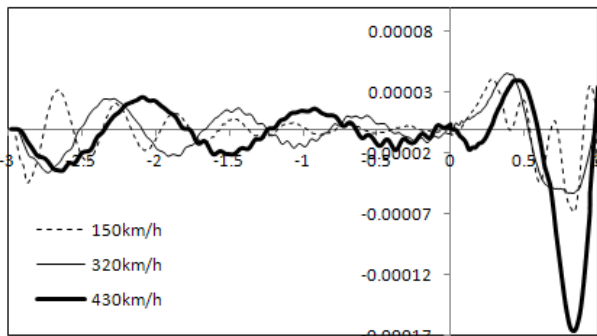
Fig. 7에서 표현된 수직/차량진행방향 회전성분인 피칭회전각은 해석대상 주행속도 중 중간속도 구간에서 Peak값을 나타내어 일반도상에서 주행속도 170 km/h에서 최대/최소 회전각 0.021/-0.019 radian이 계산되었고, 교량구간에서는 주행속도 200 km/h에서 0.031/-0.025 radian이 기록되었다. 그러나 주행속도가 증가할수록 일반도상에서의 피칭회전각은 급속하게 감소하고 있으나 교량상의 피칭회전각이 큰 변화가 없어 교량을 진입한 차량이 중앙부 통과시점에서 상대적으로 큰 변위차가 차량의 주행안정성을 저해할 것으로 판단된다.

Fig. 8에 나타난 횡/수직방향의 롤링회전성분은 일반도상에서 주행속도 480 km/h에서 최대/최소 회전각 2.09×10^{-5} / -1.83×10^{-5} radian이 계산되었고, 교량구간에서는 주행속도 430 km/h에서 1.01×10^{-4} / -1.66×10^{-4} radian이 기록되었다. 롤링회전각은 절대 값이 다른 회전성분에 비하여 매우 미소하나 주행속도가 증가됨에 따라 교량 상 발생하는 회전성분이 급속하게 증가되는 것을 알 수 있었다.

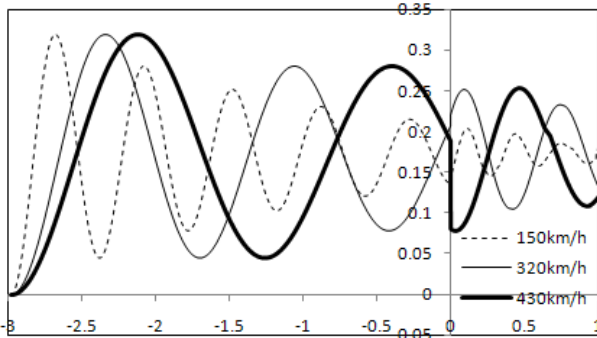
Fig. 8에 나타난 횡/차량진행방향의 요잉회전성분은 일반도상에서 주행속도 400 km/h에서 최대/최소 회전각 0.280/-0.280 radian이 계산되었고, 교량구간에서는 주행속도 500 km/h에서 0.280/0.080 radian이 기록되었다. 요잉회전각은 절대 값이 다른 회전성분에 비하여 큰 값을 나타내고 있고 주행속도가 증가됨에 따라 교량 상 발생하는 회전성분이 증가되나 일반도상에서 발생하는 회전각에 비하여 감소되고 있어 요잉회전각의 큰 절대값에도 불구하고 교량을 통과하는 차량의 주행안정성은 확보되어 있는 것으로 판단된다.



(a) Pitching rotation (radian)



(b) Rolling rotation (radian)



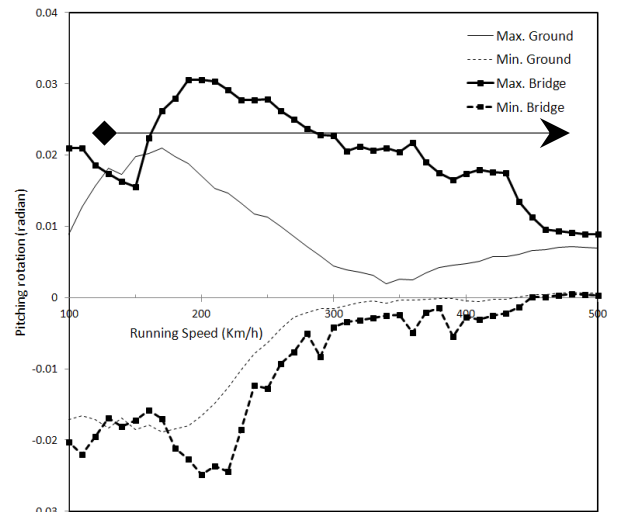
(c) Yawing rotation (radian)

Fig. 8 Rotations of car-bogie

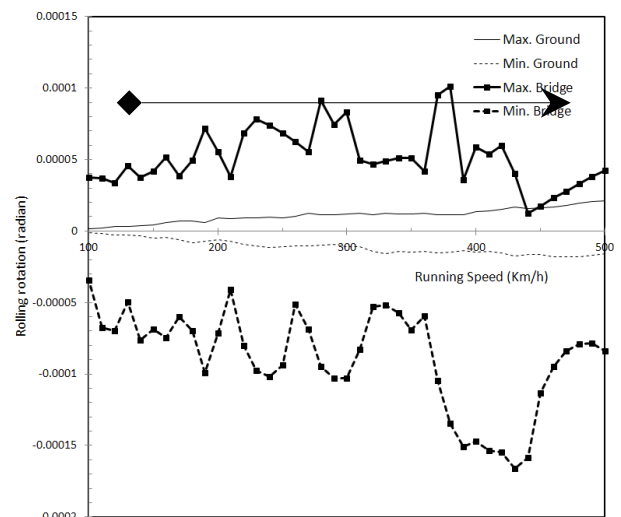
3.2.2 주행속도별 최대회전각 추이

교량길이와 동일한 거리의 일반 진입도상에서의 차량응답을 교량도상에서의 최대/최소 회전각 추이를 주행속도별로 Fig. 9에 각각 나타내었다. 전절에서 논의된 내용이 도식을 통하여 명쾌히 표현된 것으로 사료된다. 교량상 안정성을 확보되는 요잉 회전각의 경우와 달리 피칭과 롤링 회전각의 경우 일반도상의 응답에 비하여 교량도상의 응답이 고속 주행시 확대되는 것이 알 수 있다. 또한 기존 상용속도구간 중 최대 동적확대계수를 나타낸 주행속도 280 km/h에서의 교량상 최대 응답을 기준으로 각 주행속도의 회전각을 비교하였다.

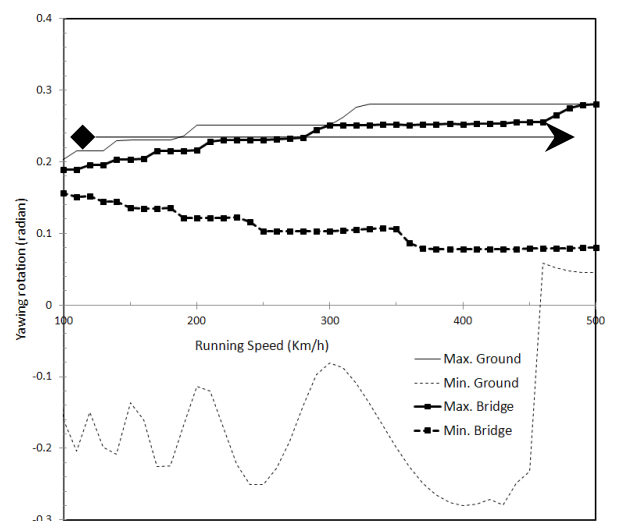
피칭회전각의 경우 교량/일반도상의 정 (+)비가 주행속도



(a) Pitching



(b) Rolling



(c) Yawing rotation (radian)

Fig. 9 Maximum/Minimum rotations of cargo

260~430 km/h 구간에서 250% 이상, 300~370 km/h 구간에서 500% 이상을 나타내고 있어 기존의 경부고속철 구간에 증속된 차량이 투입될 경우 최대 피칭회전각의 교량/일반도상간 차이가 급격하게 발생하여 이에 대한 대책과 정확한 평가가 요구 된다.

롤링회전각은 미소한 일반도상에서의 응답이 교량상 응답을 크게 확대되는 것으로 평가하게 한다. 교량/일반도상에서 각 주행속도별 최대/최소 롤링회전각비의 최대값은 각각 1128%/16441%로 응답이 미소한 저속구간에서 계산되었으나 고속주행속도 380~440 km/h 구간에서 부 (-) 회전각 부분의 비율이 9배를 상회하여 롤링회전각이 이 주행속도구간에서 교량상에서 크게 확대되어 주행안정성에 영향을 주는 것을 알 수 있다.

요잉회전각은 전체적인 해석결과가 다른 회전각 응답에 비하여 매우 크게 나타나고 있으나 교량상과 일반도상의 응답비가 대부분 정 (+), 부 (-) 응답비 모두 100% 이내로 계산되어 주행안정성에 영향이 없는 것으로 판단된다. 또한 본 해석 모델링에서 최대 응답을 도출하기 위하여 전체 20량 차량모델이 아닌 동력차 1량의 주행 시뮬레이션으로 실제 차량에서는 각각의 차량 간 요옴퍼로 인하여 요잉회전각을 충분히 제어되고 있는 것으로 판단된다.

3.2.3 대표적 주행속도에서 주행속도 280 km/h의 최대응답에 대한 회전각비

교량상에서의 피칭회전각을 최대 동적확대계수가 발생한 280 km/h 주행속도의 최대값을 기준으로 비교하여 보면 Fig. 10에서 보이는 바와 같이 210 km/h 주행속도 구간에서 128% 비율을 나타내고 있으나, 고속주행 시 응답비가 감소되어 차량의 주행안정성이 유지되고 있는듯하다. 그러나 실제 차량 주행상황을 고려하면 주행속도간의 비교보다 진입 일반도상에서 교량으로 진입될 때의 구조응답의 차이가 주행안정성을 결정할 것으로 판단된다.

Fig. 11에 나타낸 바와 같이 롤링회전각의 경우 주행속도가 370 km/h를 넘어서는 경우부터 부 (-) 회전각 응답이 크게 확대되는 것으로 판단된다. 특히 이 부분은 정 (+) 응답을 기준으로 하는 경우 최대 20배 이상 급속하게 변화되는 것을 볼 수 있다.

전 절에서도 언급한 바와 같이 이 구간의 일반도상과 교량상 응답비도 10배 이상의 변화를 보이고 있어 초고속 주행속도로 개발되는 과정에서 속도증가를 저해하는 가장 큰 걸림돌이 될 것으로 사료된다. 단, 회전각의 절대응답이 매우 미

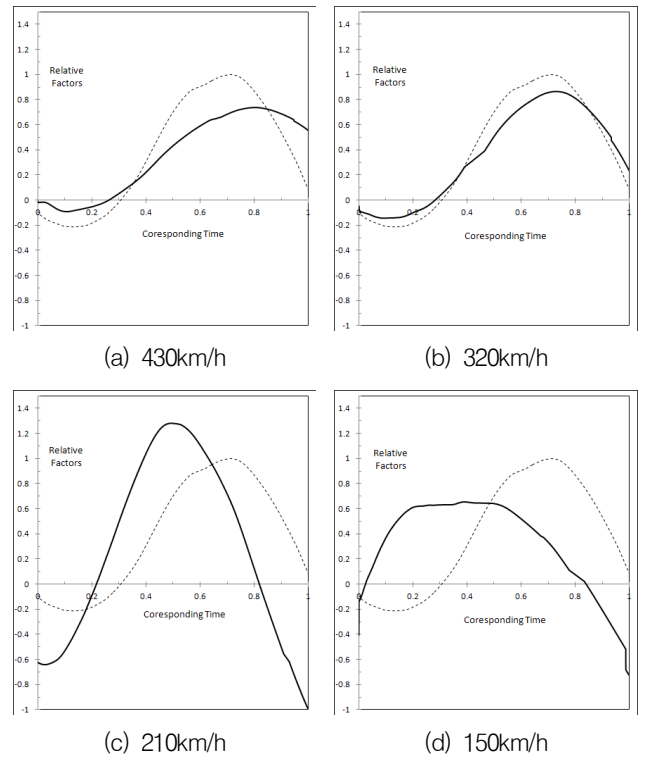


Fig. 10 Pitching rotation ratio for rotation on 280km/h

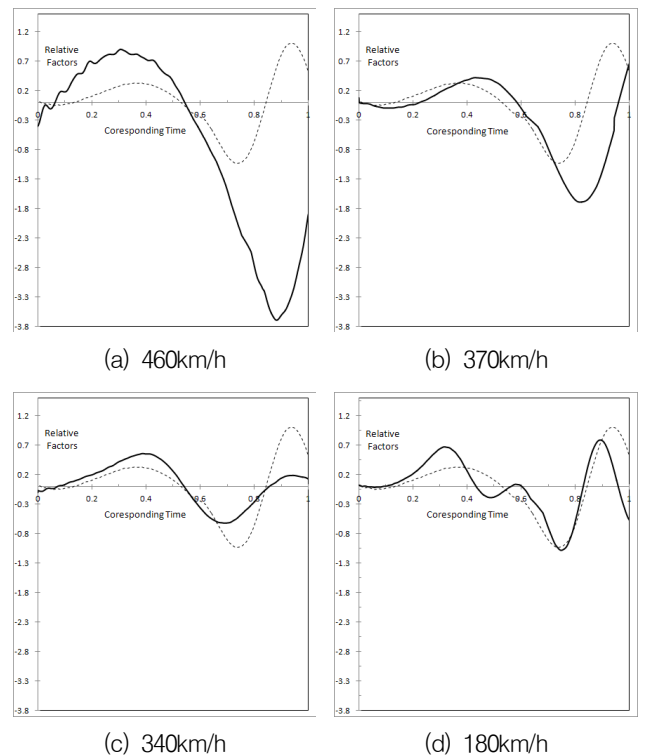


Fig. 11 Rolling rotation ratio for rotation on 280km/h

소하여 실제 승차감에는 영향을 주지 못할 것으로 판단된다.

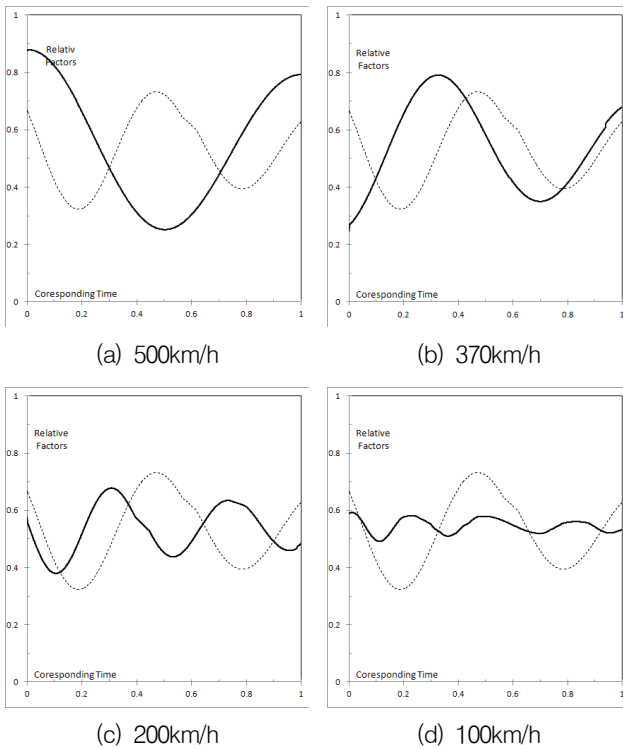


Fig. 12 Yawing rotation ratio for rotation on 280km/h

Fig. 12에서 나타낸 바와 같이 기준 주행속도에 비교하면 수치상으로 주행속도가 증가함에 따라 교량상의 응답비는 꾸준히 증가하고 있다. 최대응답비가 주행속도 500/280 km/h에서 120%로 계산되었다.

요잉회전각의 경우 역시 교량상 주행속도간의 응답을 비교하는 것보다 일반도상과 교량상의 응답비를 비교하는 것이 보다 효과적인 평가방법으로 판단되며 이 부분의 해석결과를 바탕으로 주행안정성을 확보한 것으로 판단된다.

3.3 주행안정성 평가기준

고속철의 향상되는 주행속도에 대한 경부고속철 공용구간의 PSC 박스 교량의 주행안정성을 평가하는 차량의 수직 처짐과 처짐 가속도의 허용 값 만 규정된 기존의 평가기준에 덧붙여 차량의 구조적 거동 중 회전각의 추이를 고려하여야 한다.

Table 1에 나타낸바와 같이 현재 상용주행속도구간에서 최대 동적확대계수를 나타내고 있는 하이라이트된 주행속도 280 km/h에서의 각 회전각의 최대응답을 기준으로 회전각비를 산정하고 각 회전각비가 하이라이트된 최대값을 보이는 주행속도를 평가하였다.

Table 1 Rotation ratios on Maximum one at 280 km/h

Running speed [km/h]	Pitching	Rolling	Yawing	Remark
50	0.81	0.40	0.75	
60	0.75	0.40	0.76	
70	0.68	0.40	0.76	
80	0.84	0.45	0.78	
90	0.80	0.39	0.79	
100	0.89	0.37	0.81	
110	0.89	0.74	0.81	
120	0.78	0.76	0.84	
130	0.74	0.54	0.84	
140	0.69	0.83	0.87	
150	0.66	0.75	0.87	
160	0.94	0.82	0.88	
170	1.11	0.66	0.92	
180	1.18	0.76	0.92	
190	1.29	1.08	0.92	Pitching
200	1.29	0.78	0.93	
210	1.28	0.45	0.98	
220	1.23	0.88	0.99	
230	1.17	1.06	0.99	
240	1.17	1.11	0.99	
250	1.17	1.02	0.99	
260	1.11	0.56	0.99	
270	1.06	0.75	0.99	
280	1.00	1.04*	1.00	
290	0.96	1.13	1.05	
300	0.96	1.13	1.08	
310	0.87	0.90	1.08	
320	0.89	0.58	1.08	
330	0.87	0.57	1.08	
340	0.88	0.62	1.08	
350	0.86	0.76	1.08	
360	0.92	0.65	1.08	
370	0.80	1.14	1.08	
380	0.74	1.47	1.08	
390	0.70	1.65	1.08	
400	0.73	1.61	1.08	
410	0.76	1.68	1.08	
420	0.75	1.69	1.08	
430	0.74	1.82	1.08	Rolling
440	0.57	1.73	1.09	
450	0.48	1.24	1.10	
460	0.40	1.04	1.09	
470	0.40	0.92	1.14	
480	0.39	0.86	1.18	
490	0.37	0.86	1.20	Yawing
500	0.38	0.92	1.20	

* In case of Rolling rotation ratio, negative responses are presented.

Table 2 Rotation ratios on bridge/ground tracks

Running speed [km/h]	Pitching	Rolling*	Yawing	Remark
50	2.66	164.41	0.98	Rolling
60	1.54	109.88	0.96	
70	1.64	58.61	0.94	
80	2.45	46.87	0.93	
90	2.74	36.22	0.91	
100	2.35	30.87	0.93	
110	1.65	38.86	0.88	
120	1.18	24.44	0.91	
130	0.96	17.12	0.91	
140	0.94	21.28	0.89	
150	0.78	14.47	0.88	
160	1.10	16.14	0.89	
170	1.24	9.73	0.93	
180	1.41	8.45	0.93	
190	1.63	14.23	0.92	
200	1.79	11.53	0.86	
210	1.99	5.84	0.91	
220	1.98	8.58	0.92	
230	2.09	9.13	0.92	
240	2.36	8.93	0.92	
250	2.47	8.44	0.92	
260	2.62	4.97	0.92	
270	2.90	6.57	0.92	
280	3.33	9.78	0.93	
290	3.91	10.86	0.97	
300	5.11	9.46	1.00	
310	5.22	7.70	0.96	
320	5.99	3.72	0.91	
330	6.50	3.26	0.90	
340	11.16	3.95	0.90	Pitching
350	7.93	4.75	0.90	
360	8.74	4.18	0.90	
370	5.49	6.74	0.90	
380	4.17	9.07	0.90	
390	3.60	10.86	0.90	
400	3.64	9.82	0.90	
410	3.53	10.61	0.90	
420	3.08	9.98	0.90	
430	3.05	9.60	0.90	
440	2.21	9.52	0.91	
450	1.72	6.86	0.91	
460	1.42	5.33	0.91	
470	1.34	4.60	0.95	
480	1.29	4.31	0.98	
490	1.26	4.60	1.00	Yawing
500	1.29	5.21	1.00	
Average	2.99	18.27	0.92	
S.D.	2.21	28.76	0.03	

* In case of Rolling rotation ratio, negative responses are presented.

Table 2에서는 동일 거리의 진입구간에서의 최대응답을 기준으로 교량상의 회전각비를 주행속도별로 나타내고 각 평균과 편차를 구하였다. 각 회전각별 최대값을 나타내는 회전각비를 하이라이트하여 위험속도구간을 평가하였다.

이러한 두 가지 평가방법이 각 회전각에 대한 위험주행속도 구간을 평가하는 유용한 기준으로 판단된다.

두 가지 방법에 의한 비교결과를 분석하면 피칭의 경우 첫 번째 방법에 의한 결과는 중간속도구간이 기준속도구간의 응답을 상회하여 나타나고 초고속구간에서는 상대적으로 안정되는 것을 보이고 있으나 진입구간의 응답과 비교한 결과 주행속도 340 km/h에서 11배에 가까운 변화가 계산되어 주행안정성을 크게 영향을 미치고 있다.

반면에 롤링의 경우는 첫 번째 방법으로 부 (-)응답이 주행속도 430 km/h에서 거의 두 배 가까운 증가분을 나타내며 일반도상에서의 응답과 비교한 두 번째 분석결과는 절대응답값이 미소하여 매우 큰 비율을 나타내고 저속부분에서 큰 응답비를 보이고 있으나, 역시 380~440 km/h 주행속도 구간에서 10배 가까운 부 (-) 응답비가 계산되어 위험속도구간으로 보다 깊이 있는 연구가 요구된다.

요잉의 경우에는 두 방법 모두 안정적인 값을 나타내고 교량과 일반도상간의 차이도 감소되는 현상을 나타내고 있다.

4. 결론

PSC 박스교량과 KTX 차량의 정밀수치모델을 이용하여 차량중심의 각 방향 회전각을 해석하여 교량의 주행안정성 평가 방법으로 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 해석 대상 주행속도 범위에서 동적/정적 최대변위비는 대부분 정적해석결과를 상회하며 특히 주행속도 430 km/h에서 최대값인 2.16을 기록하고 기존 상용속도범위에서는 280 km/h에서 1.86으로 조사되었다.
- (2) 동적/정적 최대 휨응력비는 주행속도 430 km/h에서 최대값 2.13을 기록하였고 기존 상용속도범위에서는 280 km/h에서 1.82로 조사되었다.
- (3) 동적해석 결과는 주행속도 340 km/h의 경우를 제외하고 대부분의 경우 차량이 교량의 중앙부를 통과한 이후 Peak 값에 도달하여 차량이 교량을 완전히 통과한 이후에서 잔류 휨응력이 조사되었다.
- (4) 피칭회전각은 일반도상에서 주행속도 170 km/h에서 최대/최소 회전각 0.021/-0.019 radian이 조사되었고,

교량구간에서는 주행속도 200 km/h에서 0.031/-0.025 radian이 기록되어 해석대상 주행속도 중 중간속도 구간에서 최대값을 나타내었다.

- (5) 롤링회전성분은 일반도상에서 주행속도 480 km/h에서 최대/최소 회전각 $2.09 \times 10^{-5} / -1.83 \times 10^{-5}$ radian이 계산되었고, 교량구간에서는 주행속도 430 km/h에서 $1.01 \times 10^{-4} / -1.66 \times 10^{-4}$ radian이 기록되어 증가될 주행속도에 대해 가장 고려되어야 할 연구대상으로 판단된다.
- (6) 요잉회전성분은 일반도상에서 주행속도 400 km/h에서 최대/최소 회전각 0.280/-0.280 radian이 계산되었고, 교량구간에서는 주행속도 500 km/h에서 0.280/0.080 radian이 기록되어 주행속도의 증감에 대하여 안정된 성분으로 판단된다.
- (7) 피칭회전각의 경우 중간속도구간이 기준속도구간의 응답을 상회하여 나타나고 초고속구간에서는 상대적으로 안정되는 것을 보이고 있으나 진입구간의 응답과 비교한 결과 주행속도 340 km/h에서 11배에 가까운 변화가 계산되어 주행안정성을 크게 영향을 미치고 있다.
- (8) 롤링회전각의 경우 부 (-)응답이 주행속도 430 km/h에서 거의 두 배 가까운 증가분을 나타내며 일반도상에서의 응답과 비교하면 응답결과가 미소하나 매우 큰 비율의 변화를 나타내고 저속부분에서 큰 응답비를 보이고 있다. 특히 380~440 km/h 주행속도 구간에서 10 배 가까운 부 (-) 응답비가 계산되어 위험속도구간으로 보다 깊이 있는 연구가 요구된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2013R1A1A2008207)

References

1. Oh, S. T., Lee, D. J. (2011), A Study of Evaluation methods for Running Safety of Prestressed Concrete Box Bridge on the KTX high speed railway, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 11(4), 31-39 (in Korean).
2. Oh, S. T., Lee, D. J., Shim, Y. W., Yun, J. K. (2011), A Dynamic Analysis of PSC Box Bridge Varying Span Lengths for Increased Speeds of KTX, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 15(4), 204-211 (in Korean).
3. Oh, S. T., Shim, Y. W., Lee, D. J. (2010), Dynamic Analysis of PSC Bridge for a High Speed Railway Vehicle Using Improved 38-Degree of Freedom Model, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 22(6), 797-803 (in Korean).
4. Oh, J., Hyeon, G. H., Park, Y. S., Park, S. K. (2008), A Study on Aseismic Performance of Base Isolation Systems Using Resilient Friction Pot Bearing, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 12(1), 127-134 (in Korean).
5. Park, S. K. (2011), An Analytical Evaluation of Vibration Serviceability for Each Bridge Types with Same Span, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 15(1), 271-280 (in Korean).
6. Seo, J. S., Yoo, S. W., Park, J. G., Kim, S. Y. (2013), Example of Loading Test in Gyeongbu High-Speed Railroad Bridges, *Magazine of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 17(1), 74-88 (in Korean).
7. Xia, H., Zhang, N. (2005), Dynamic Analysis of Railway bridge under High-Speed Trains, *Computers and Structures*, 83, 1891-1901.

Received : 07/30/2013
 Revised : 08/23/2013
 Accepted : 08/30/2013

요 지

경부고속철 PSC 박스 교량의 주행안정성 평가방법을 개발하기 위하여 동적 수치해석을 수행하였다. 교량과 차량의 상호작용력을 고려한 수치 모형을 적용하였다. 3차원 유한요소 뼈대요소를 적용한 교량과 38자유도로 상세하게 모형화된 차량은 공용 중인 KTX의 물성 사양을 적용하였다. 주행속도 500 km/h까지 10 km/h 일정 증가분으로 수치해석하여 차량의 각 방향의 회전각을 교량/일반 도상에서 해석하고 비교하였다. 비교된 회전각비는 기존의 주행안정성 설계기준에 보완될 수 있는 평가방법으로 판단된다.

핵심 용어 : 동적해석, 고속철, 프리스트레스 콘크리트 교량, 차량의 회전각, 주행안정성