PSC 교량 위를 고속주행 중인 KTX 전동차의 윤하중 동적해석

Dynamic Analysis of Wheel Forces of KTX Vehicle Running with High-Speed on the PSC Bridge

오순택* · 이동준** · 이정훈***

Oh, Soon-Taek · Lee, Dong Jun · Lee, Jung Hoon

Abstract

Dynamic analysis of wheel forces of KTX vehicle was carried out to compare the differences of wheel force (D.W.F.) and wheel force ratios (W.F.R.) on the road and bridge up to 450 km/h running speed, considering the interactions among vehicle/rail/bridge. An evaluation method of running safety of vehicles, lateral wheel force, derail factor, and offload factor are adopted for traffic safety of bridges.

Key words : PSC bridge, Wheel force ratio, Interaction, Running Safety of Vehicles, Traffic safety of bridges

요 지

PSC 철도교량의 동적거동과 관련하여 차량/궤도/교량의 상호 작용력을 고려한 KTX 전동차의 윤하중을 주행속도 450 km/h 범위까지 해석하고, 전면대차의 4개 차륜의 윤하중 최대 값과 최소 값의 차이와 윤하중비를 일반도상과 교량 상 응답으로 나누어 비교 분석하였다. 차량안정성을 평가하는 기준으로 적용하여 횡압과 탈선계수 그리고 윤중감소율을 적용하여 교량의 주행안정성을 평가하였다.

핵심용어 : 고속철 PSC 교량, 윤하중비, 상호작용력, 차량안정성, 교량주행안정성

1. 서 론

국내 고속철 도입 당시 철도교량의 동적안정성을 검토한 결과, 교량형식의 설계를 변경하는 경제적 시행착오 과정을 겪었다. 그 이후 한국철도기술연구원에서 수행한 “철도교량의 동적안정성 및 동적 설계기준에 관한 연구” (2006~2008) 결과를 바탕으로 “호남고속철도 설계지침” (2007)과 “철도설계기준” (2011)으로 반영하였다. 최근 “차세대 고속철도 기술개발 사업” 등 심층연구가 진행되어 교량/열차 상호작용 해석을 위한 정밀 해석모델을 마련하고 주행안정성을 평가하기 위한 기준 개발에 관련된 연구가 집중적으로 진행되고 있다. 유럽에서는 “철도교량의 동적거동 한계기준”과 UIC 776-3R, 779-8R, Eurocode를 마련하였고 일본 역시 “속도를 고려한 충격계수를 포함한 설계기준개정” (2002) 및 “열차/주행속도별 안전성/사용성 변위기준” (2006)을 활용하여 관련분야에 대한 많은 연구를 진행하고 있다.

현재 기존의 국내외 설계기준에서 반영되고 있는 주행안정성은 차량의 응답에 의한 직접적인 방법을 적용하고 있다. 교량해석용 상용프로그램의 경우 열차하중은 단순히 이동집중하중을 적용하여 교량의 응답만 산정할 수 있다. 따라서 제한된 교량의 주행안정성기준은 보다 현실에 부합된 기준으로 확대되어야 한다.

반면에 차량/교량의 상호작용을 고려한 정밀 수치모델을 구성한 심도 깊은 연구가 Dinh *et al.* (2009), Xia *et al.* (2005) 국내에서 Park (1998), Kim (2000), Sim (2012)에 의해 이루어 졌다. 본 연구에서도 차량/교량의 상호작용을 고려한 수치모델을 이용한 차량안정성과 관련된 차량의 윤축에 작용하는 횡압과 동적 수직 윤하중의 비율인 탈선계수와 윤중변동율의 한계기준을 적용하고자 한다.

현재 공용 중인 고속철 KTX 동력차량과 고속철용 불규칙조도 궤도 그리고 국내 고속철 PSC 교량 중 최대 처짐이 발생하는 경간 40 m 단순지지 PSC 교량을 총괄적으로 고려

*정회원. 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 교수(E-mail: alicia@snut.ac.kr)

Member. Professor, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

**교신저자. 정회원. 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 연구원(Tel: +82-2-970-6576, Fax: +82-2-948-0043, E-mail: djlee@snut.co.kr)

Corresponding Author. Member. Researcher, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

***서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 학부과정

Undergraduate student, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

한 해석모델을 개발하여 해석된 차량의 윤하중으로 차량안정성 기준을 적용하고자 한다. 고속철 KTX 동력차를 38 자유도 정밀 모형을 적용하고 궤도의 불규칙성은 정상확률과정을 가정한 지수스펙트럼 밀도함수를 사용하여 생성하였다. 차량과 교량의 상호작용력은 각각의 Hamilton 운동방정식을 고차진동 해석에 적절한 4차 Runge-Kutta 수치해석법을 적용하여 해석하였다(Oh *et al.*, 2011).

2. 고속철 교량의 주행안정성

해석대상 PSC 교량의 동적 최대 처짐을 최대 450 km/h 주행속도까지 해석하였다. 교량의 동적/정적 해석 비율은 동적확대계수 D.A.F.(Dynamic Amplification factor)로 3차 회귀분석식과 함께 Fig. 1에 나타내었다(Oh *et al.*, 2011).

Fig. 1. D.A.F. of PSC bridge for KTX

2.1 윤하중 차이 분석

고속철 주행속도 해석범위인 450 km/h까지 KTX 동력차 전면대차의 4바퀴에 작용하는 윤하중을 계산하고 교량 상 윤하중 최대/최소 차이를 비교 분석하였다. 해석대상인 PSC 교량을 통과하는 동안 구조적 동적거동과 연동하여 발생된 차량의 윤하중 차이 D.W.F.(Difference of Wheel force)와 변동계수 C.V.(Coefficient Variation; 표준편차/평균(%))를 주행속도 별로 Fig. 2에 나타내었다. 윤하중 차이(D.W.F.)는 해석된 윤하중의 최대 값과 최소 값의 차이로 하였으며, 변동계

Fig. 2. Difference of Wheel Forces, Average, & C.V.

수 C.V.는 해석된 주행속도에서의 4개 윤하중의 표준편차 값을 평균값으로 나누어 산출하였다.

해석범위(50 km/h~450 km/h)에서 KTX 동력차의 전면대차 4바퀴에 작용하는 윤하중의 평균값은 26.5 kN으로 해석되었으며, 윤하중의 평균값은 주행속도의 변화와 관계없이 일정하게 유지되었다. 그러나 고속철의 주행속도가 증가함에 따라 교량 상 윤하중 차이(D.W.F.)도 함께 증가하였다. 특히 초고속 주행속도 구간(340 km/h~450 km/h)에서는 평균 윤하중을 상회하였다. 윤하중의 차이를 회귀분석 하여 신뢰도 78.1%의 R2값으로 다음과 같은 3차 함수의 추세선식을 구하였다.

$$DWF = -2 \times 10^{-7} x^3 + 1 \times 10^{-4} x^2 - 0.0125x \quad (1)$$

여기에서, 윤하중차이의 단위는 tonf이고 x 는 고속철의 주행속도(km/h)이다.

윤하중 차이의 한계응답을 이용한 회귀식 (1) $DWF = -2 \times 10^{-7} x^3 + 1 \times 10^{-4} x^2 - 0.0125x$ 은 교량의 최대처짐을 이용한 동적확대계수의 회귀분석 식 $DWF = -2 \times 10^{-8} x^3 + 1 \times 10^{-5} x^2 - 0.0011x + 1$ 과 유사한 응답을 보여주고 있어 해석된 윤하중 차이의 변동추이와 동적확대계수 간에 연관성이 존재함을 보여주고 있다. 따라서 고속철의 주행속도는 교량 동적거동을 증가시키고 차량의 윤하중간 차이 역시 확대시키는 것으로 판단된다.

2.2 윤하중비 분석

Fig. 3에서는 해석범위 내 계산된 윤하중의 평균값을 이용하여 주행속도 별로 PSC 교량상에서 발생하는 전면대차의 윤하중비를 누적그래프로 표시하였다.

윤하중비 W.F.R.(Wheel force ratio)는 다음 식에 의해 산하였다.

$$W.F.R. = (\text{해석된 윤하중}/\text{평균값}) - 1 \quad (2)$$

KTX 전면대차의 윤하중은 주행속도 250 km/h 이후 큰 폭으로 차이를 나타내며 차량속도의 증가에 따라 증가되어 특히 주행속도 360 km/h에서 최대 차이를 발생하였다.

Fig. 3. Wheel Force Ratio on Bridge

2.3 토공/교량 구간의 윤하중 분석

KTX 동력차 1개 차량과 2개 대차 그리고 8개 윤축을 정밀하게 38자유도로 모델링하고 PSC 교량 진입구간은 수직변위를 허용하지 않는 일반 토공 도상 구간 170 m와 차량길이 17 m를 포함한 57 m를 교량 상 구간으로 연결하여 주행속도 별로 해석한 차량 윤하중을 비교하고 그 차이를 분석하였다. 일반도상과 교량구간에서의 윤하중을 주행속도 별로 추이를 분석하기 위하여 변수 축은 일반 토공 상 170 m와 교량 상 40+17 m 중 교량 상 통과시간을 기준으로 1.0으로 일반화하고 일반 토공 상 구간의 통과를 위한 상대시간은 (-)3.0을 적용하였다. 함수 축은 윤하중차이로 고속 주행속도(220 km/h~330 km/h) 중 동적확대계수가 크게 증폭된 280 km/h의 임계 주행속도 시 교량 상 최대 윤하중 44.63 kN을 기준으로 한 비율로 나타내었다. 주행속도 별 비교를 위하여 각 주행속도구간 중 대표속도를 선정하여 Fig. 4에 표시하였다. 일반 주행속도(100 km/h~210 km/h) 구간에서 150 km/h를 선택하고, 고속철 상용 주행속도(220 km/h~330 km/h)에서 공진이

발생하는 임계속도 280 km/h를 선택하였으며, 초고속철 주행속도(340 km/h~450 km/h) 구간에서는 윤하중차이가 최대 발생하는 360 km/h를 대표 주행속도로 선정하여 나타내었다.

일반 토공 상은 궤도의 불규칙성만을 반영하고 토공 상에서의 변위를 허용하지 않는 이상적인 상태로 가정하여 해석한 결과, 주행속도의 증감과 거의 무관하게 일정한 패턴의 응답을 얻을 수 있었다. 따라서 각 윤하중간의 최대 값과 최소 값은 유형이 교차되며 증감을 거듭하여 궤도의 불규칙 조도모형(Park, 1998)과 유사한 추이를 나타내나 교량 상 윤하중의 차이를 초고속 주행속도에서 크게 증가시키는 것으로 조사 되었다. 윤하중의 차이는 일반 토공 상 170 m 전 구간에서 2~3 군데의 피크 값을 나타내고는 있으나 전반적으로 일정한 유형과 크기를 나타내고 있다. 단, 초고속 주행속도의 경우에는 정지 상태에서 순간적으로 해석상 목표속도로 급증한 초기부분의 윤하중 차이는 무시하여야 한다. 일반 토공 상에서의 윤하중 차이는 해석간격 내에서 균일하지 않은 매우 다양한 변화를 나타내고 있어 궤도의 불규칙성과 차체하중의 38 자유도 모델링(Oh *et al.*, 2011)이 상호 작용력을 잘 반영하여 현실성 있는 정밀한 해석결과를 나타내고 있는 것으로 판단된다.

주행속도에 민감하게 영향을 받는 교량상 구간의 윤하중 분포유형과 비교하여 일반토공 구간의 분포유형은 주행속도의 증감과 무관하게 일정한 패턴을 유지하고 있다. 윤하중의 최대/최소 값 뿐만 아니라 윤하중간의 표준편차 역시 일정한 값을 유지하여 나타나므로 일반토공 상에서는 주행속도의 증감과 상관관계가 없는 것으로 판단된다.

일반도상의 해석결과인 윤하중을 1 tonf 간격으로 빈도로 나타내었다. 1~2 tonf 범위내의 윤하중 차이는 Fig. 5에서 나타난 주행속도 360 km/h, 280 km/h, 150 km/h 해석구간에서 각각 35%, 36%, 48%로 최대 빈도를 나타내고 있다. Fig. 4에서 기록된 교량 상에서 발생하는 고속주행속도 360 km/h와 280 km/h에서 교량 상 윤하중 차이는 6.85 tonf와 3.47 tonf이며 매우 적은 빈도를 나타내며 이 값보다 큰 경우도 역시 발생빈도가 매우 미미한 것을 알 수 있다. 따라서 교량 상에서 발생하는 윤하중과 윤하중의 차이는 증가되는 주행속도에 따라 크게 증가되는 교량의 구조적 거동과 밀접한 관계가 있음을 보여주고 있다.

4바퀴의 윤하중을 해석한 결과를 검토해 보면 일반 토공 상 170 m를 주행하는 동안 주행속도의 증감과 무관하게 2 Cycle의 최대 압축/인장력을 나타내고 있는데 윤하중의 차이에서 최대 압축력이 발생하는 구간에서 피크 값의 윤하중차이를 나타내며 매우 순간적으로 생성과 소멸을 반복하고 있음을 알 수 있다.

반면에, 교량 상에서 윤하중은 이러한 변화가 나타나지 않고 교량 통과구간 내내 일정한 윤하중을 나타내며 윤하중의 차이도 교량구간 내에서 항상 일정한 값을 나타내어 윤하중 차이가 증폭되는 초고속 주행속도에서 교량의 전체 구간 내내 확대된 윤하중차이가 유지되고 있다. 이는 궤도와 차량의 바퀴에 편마모 현상을 확대하고 나아가서 궤도를 탈선할 수 있는 상황을 추론할 수 있으며 이러한 차별되는 윤하중의 변

(a) Speed 360 km/h-6.85 tonf on bridge

(b) Speed 280 km/h-3.47 tonf on bridge

(c) Speed 150 km/h-0.71 tonf on bridge

Fig. 4. Difference of Wheel Forces

(a) Speed 360 km/h-2.0 tonf<; 35%

(b) Speed 280 km/h-2.0 tonf<; 36%

(c) Speed 150 km/h-2.0 tonf<; 48%

Fig. 5. Difference Distributions of Wheel Forces on Railroad

화는 차량을 운전하는 운전자와 승객에게 불안감을 느낄 수 있게 할 것으로 판단된다.

2.4 주행속도별 윤하중비 비교 분석

KTX 주행속도가 증가하면 해석대상구간 227 m의 일반 토공 상 170 m와 40 m 단경간 PSC 교량 그리고 동력차 대차 간 거리 17 m에 대한 통과시간이 단축된다. 주행속도 100 km/h에서 일반 토공 상 구간 통과시간이 6.12 초, 교량 구간 통과시간이 2.05 초로 총 8.17 초, 주행속도 280 km/h에서는 일반 토공 상에서 2.19 초와 교량구간에서 0.73 초 총 2.92 초, 최대주행속도 450 km/h에서는 일반 토공 상 1.36 초와 교량구간 0.46 초로 총 1.82 초가 소요 된다. Fig. 6은 각 주행속도별 해석결과를 비교하기 위하여 해석시간변수를 57 m 교량통과시간을 기준으로 설정하고 토공 상 통과시간은 음(-) 값으로 일반화하여 표현하였다. 종축에 표현되는 윤하중비는 해석결과인 윤하중을 주행속도 280 km/h에서 교량 상 최대윤하중 44.63 kN을 기준으로 윤하중비로 표시하였다.

(a) Speed 450 km/h/
WFR1.06/0.16/0.59/0.57

(b) Speed 360 km/h/
WFR1.38/-0.16/0.44/0.72

(c) Speed 280 km/h/
WFR1.00/0.22/0.46/0.70

(d) Speed 150 km/h/
WFR0.57/0.65/0.50/0.66

Fig. 6. Wheel Forces Ratios for Speeds

자체의 중량을 제외하고 평균 26.5 kN의 윤하중이 작용하였고 전체 해석대상 주행속도에서 일정하게 나타났다. 그러나

윤하중의 차이는 주행속도가 증가함에 따라 급격하게 증가하였다. 특히 초고속 주행속도에서 그 차이가 크게 확대되었으며, 360 km/h에서 68.5 kN까지 증폭되었다. 이러한 윤하중의 불균형은 교량/차량의 공진현상과 교량의 동적 횡변위 거동이 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다.

고속철 동력차의 총 하중은 차체 549.2 kN, 각 대차 하중 24.5 kN 그리고 현가장치를 포함한 윤축마다 20.5 kN이 작용하여 정적윤하중은 85 kN이 재하된다. 따라서 윤하중 차이가 재하하중과 근접하여 동력차량의 탈선상태에는 미치지 않고 있으나 차량의 주행안정성 및 궤도의 편마모 등 유지관리 비용의 상승 원인으로 발전될 것으로 우려된다. 일반 토공상 구간의 경우 주행속도가 증가함에 따라 윤하중 차이 값이 교량구간에서 보다 더 큰 것으로 나타났으나 이는 일시적인 증감으로 판단되고 이에 대한 원인분석을 위해서 향후 심도 깊은 연구가 필요 할 것으로 사료된다.

3. 차량 안정성 해석

철도 차량의 안정성 평가기준은 횡압 Q, 탈선계수Q/P 그리고 윤증감소비 P/P를 이용하여 평가한다. 횡압은 정적 수직하중만 레일위에 재하되는 경우에는 발생하지 않지만 차량이 주행하면서 차륜의 플렌지와 레일의 측면 접촉으로 횡방향 반력으로 발생된다. 이때 발생하는 횡압 Q와 윤하중 P의 비를 탈선계수(Derail factor)로서 안전기준은 빈도누적확률 100% 일 때 0.8을 적용하며 0.1%일 때 1.1까지 허용한다. 차량측면에서 탈선계수는 레일의 접촉각과 마찰계수로 계산되어 UIC518 기준에서 차륜과의 등가접면구배 값이 0.15인 경우 허용 주행속도를 350 km/h까지 제한하고 있다. 윤증감소비는 수직 윤하중의 변화 값 P를 정적 윤하중으로 나누어 산정하며 0.6까지 허용하며 동적 윤증감소비는 빈도누적확률 10%까지 동일 값을 적용하며 0.1%에서는 0.8 이하를 허용한다(Cho *et al*, 2010).

3.1 횡압 분석 (Lateral wheel force)

주행속도의 증감에 대하여 일정한 sin 함수 유형을 나타내는 일반도상의 해석결과와 달리 교량 상에서의 윤하중 해석 결과는 전 구간에서 동일한 값을 나타내고 있다. 이는 수직 변위를 허용하지 않는 일반도상의 경우 궤도의 불규칙 조도에 의한 윤하중의 해석결과를 나타내는 반면에 교량의 수직 변위와 횡변위가 궤도의 조도범위를 크게 상회하여 교량의 변위가 차량의 윤하중을 결정하는 것으로 판단된다. 특히 계산된 윤하중값은 횡압으로 전환될 것으로 판단된다. 주행속도의 영향이 크게 미칠 것으로 판단되는 전면대차의 윤하중값은 주행속도 340 km/h부터 410 km/h 해석범위에서 각 윤하중의 최대 값인 -61.5, -28.3, 그리고 -39.3 kN이 발생하고 두 번째 윤축에서 주행속도 360 km/h에서 최소 값인 7.0 kN이 계산되어 최대 윤하중 차이를 나타내고 있다. 따라서 기존의 PSC 교량에서 윤하중의 횡압은 주행속도 360 km/h에서 최대 값을 발생한 후 410 km/h 이후 KTX의 운행속도의 윤하중 값으로 복귀되는 것을 알 수 있다.

3.2 탈선계수 분석(Derail factor)

횡압과 수직 윤하중의 비율인 탈선계수의 경우, 현재 공용 중인 KTX 최대 설계속도 330 km/h 범위에서 최대 윤하중 값 44.6 kN을 기준으로 각각의 주행속도별로 비율을 계산하여 Table 1에 나타내었다.

따라서 기준으로 설정한 주행속도 280 km/h의 첫 번째 윤하중비는 0으로 계산되고 나머지 윤축의 하중비를 살펴보면 허용되는 탈선계수 값 0.8을 주행속도 330 km/h 이상에서 두 번째 윤하중비가 모두 만족하지 못하고 있음을 알 수 있다. 특히 주행속도 360 km/h에서 최대 값인 116%를 나타내어 윤중분석에서 조사된 결과와 일치하고 있다. 따라서 해당

Table 1. Derail Factor on PSC Bridge

Speed (km/h)	Max. ratio	W.R.1	W.R.2	W.R.3	W.R.4
100	65%	0.37	0.41	0.54	0.31
110	59%	0.22	0.56	0.59	0.25
120	48%	0.45	0.33	0.48	0.36
130	48%	0.30	0.48	0.46	0.38
140	59%	0.19	0.59	0.53	0.32
150	50%	0.43	0.35	0.50	0.34
160	49%	0.29	0.49	0.43	0.42
170	51%	0.42	0.36	0.51	0.34
180	43%	0.42	0.36	0.43	0.41
190	66%	0.12	0.66	0.48	0.36
200	45%	0.36	0.42	0.45	0.39
210	49%	0.42	0.36	0.49	0.36
220	49%	0.36	0.42	0.49	0.35
230	60%	0.18	0.60	0.41	0.43
240	66%	0.12	0.66	0.42	0.42
250	75%	0.03	0.75	0.37	0.48
260	57%	0.21	0.57	0.46	0.38
270	72%	0.06	0.72	0.50	0.35
280	78%	0.00	0.78	0.54	0.30
290	97%	-0.19	0.97	0.56	0.28
300	78%	0.00	0.78	0.65	0.19
310	71%	0.06	0.71	0.70	0.14
320	78%	0.00	0.78	0.69	0.15
330	81%	-0.03	0.81	0.71	0.14
340	93%	-0.15	0.93	0.72	0.12
350	106%	-0.28	1.06	0.66	0.18
360	116%	-0.38	1.16	0.56	0.28
370	103%	-0.25	1.03	0.47	0.37
380	108%	-0.30	1.08	0.45	0.40
390	106%	-0.28	1.06	0.42	0.42
400	93%	-0.15	0.93	0.37	0.48
410	94%	-0.16	0.94	0.37	0.47
420	92%	-0.14	0.92	0.39	0.46
430	89%	-0.11	0.89	0.38	0.47
440	91%	-0.13	0.91	0.41	0.42
450	84%	-0.06	0.84	0.41	0.43

Table 2. Offload Factor on PSC Bridge

Speed (km/h)	W.F.1	W.F.2	W.F.3	W.F.4
100	33.3%	30.8%	24.4%	36.2%
110	41.1%	23.1%	21.7%	39.2%
120	28.8%	35.3%	27.1%	33.5%
130	37.0%	27.1%	28.1%	32.5%
140	42.4%	21.7%	24.9%	35.7%
150	29.7%	34.4%	26.1%	34.4%
160	37.5%	26.6%	30.2%	30.5%
170	30.3%	33.8%	25.8%	34.8%
180	30.6%	33.5%	29.7%	30.8%
190	46.2%	18.0%	27.3%	33.5%
200	33.6%	30.5%	28.8%	31.8%
210	30.5%	33.6%	27.0%	33.6%
220	33.6%	30.5%	26.6%	34.0%
230	43.3%	20.9%	31.1%	29.8%
240	46.5%	17.6%	30.2%	30.3%
250	50.9%	13.2%	33.2%	27.5%
260	41.3%	22.8%	28.2%	32.4%
270	49.4%	14.7%	26.4%	34.2%
280	52.5%	11.7%	24.2%	36.7%
290	62.4%	1.7%	23.2%	37.6%
300	52.4%	11.7%	18.2%	42.5%
310	49.1%	15.1%	15.6%	45.3%
320	52.7%	11.5%	16.2%	44.7%
330	54.0%	10.1%	15.3%	45.4%
340	60.3%	3.8%	14.5%	46.2%
350	67.4%	-3.2%	17.9%	43.0%
360	72.3%	-8.2%	22.9%	37.7%
370	65.8%	-1.6%	27.6%	33.1%
380	68.3%	-4.2%	29.0%	31.7%
390	67.1%	-2.9%	30.3%	30.7%
400	60.4%	3.7%	32.9%	27.5%
410	61.1%	3.1%	33.3%	27.6%
420	60.0%	4.2%	32.2%	28.6%
430	58.5%	5.7%	32.7%	28.0%
440	59.4%	4.8%	30.8%	30.2%
450	55.6%	8.5%	30.7%	29.8%

주행속도에 대한 보다 심도 깊은 실험적 연구가 요구된다.

3.3 윤중감소율 분석(Offload factor)

본 연구에서 적용한 윤중감소율은 해석으로부터 나온 윤하중과 정적윤하중인 85 kN과의 비율을 산정하고 60%를 상회하는 결과를 Table 2에 나타내었다.

분석결과 첫 번째 윤측에서 주행속도 340 km/h부터 420 km/h까지에서 허용 한계 값 60%를 상회하는 것으로 나타나며 그 이상의 주행속도에서는 한계 값을 초과하지는 않는 것으로 조사되었다.

4. 결 론

PSC 고속철도교량과 KTX 동력차의 상호작용력을 고려한 유한요소법 모델을 이용하여 허용된 구조적 변위가 발생한 교량 상을 주행하는 차량의 전면대차의 윤하중을 주행속도별로 해석하고 일반 도상과의 응답을 비교하고 차량분야에서 적용하는 차량안정성 기준을 적용하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 주행속도별 PSC 교량의 동적확대계수를 윤하중차이(D.W.F.)로 비교한 결과 유사한 3차 회귀분석식으로 나타내었으며 특정 주행속도인 360 km/h에서 최대 값 68.5 kN을 나타내었다.
- 2) 윤하중 평균값을 기준으로 계산된 윤하중비(W.F.R.)를 주행속도에 대하여 누적그래프로 나타내어 D.W.F.의 분석결과와 유사한 결과를 얻었다.
- 3) 일반도상과 교량상의 윤하중차이를 분석한 결과, 주행속도 360 km/h에서 교량 상 최대 차이값 68.5 kN을 나타내고 있으며 현재 상용속도 범위 내에서는 280 km/h에서 최대 34.7 kN으로 나타났다. 일반도상에서 계산된 최대차이는 교량 상에서 계산된 값을 상회하고 있으나 빈도분포에서 매우 미소한 1% 이내의 분포를 나타내고 있다.
- 4) 차량안정성 해석에 적용된 윤측 횡압은 -61.5 kN으로 주행속도 360 km/h에서 최대 peak 값을 발생한 후 410 km/h 이후 KTX의 상용주행속도 시 윤하중 값으로 안정되는 것을 알 수 있다.
- 5) 허용되는 탈선계수 값 0.8은 주행속도 330 km/h이상의 해석범위에서 모두 만족하지 못하고 있음을 알 수 있다. 특히 주행속도 360 km/h에서 최대 값인 116%를 나타내어 윤중분석에서 조사된 결과와 일치하고 있다.
- 6) 윤중감소율은 주행속도 340 km/h부터 420 km/h까지에서 허용 한계 값 60%를 상회하는 것으로 나타나며 그 이상의 주행속도에서는 한계 값을 초과하지는 않는 것으로 조사되었다.
- 7) 따라서 KTX의 주행속도가 기존의 설계속도를 상회하는 경우 차량의 안정성 해석기준으로 평가한 결과 한계 값을 초과하여 이에 대한 보다 심도 깊은 실험적 연구가 관련 분야에 집중되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 서울과학기술대학교와 가족회사(주)다산컨설팅의 연구교류회 지원비로 수행 되었습니다.

References

- Cho, J.I., Park, T.W., Yoon, J.W., Kim, J.Y., and Kim, Y.G. (2010) Stability and Safety Analysis on the Next Generation High-Speed Railway Vehicle. *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.13, No.3, pp.245-250.
- Dinh, V.N., Kim, K.D. and Warnitchai, P. (2009) Dynamic Analysis

- of Three-Dimensional Bridge-High Speed Train Interactions using Wheel-Rail Contact Model. *Engineering Structures*, Vol.31, pp.3090-3206.
- Kim, S.Y. (2000) *Bridge-Train Interaction Analysis of High-Speed Railway Bridges*. PhD. dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea.
- Oh, S.T., Lee, D.J. and Kim, H.S. (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*, Vol.11, No. 4, pp.31-39.
- Oh, S.T., Lee, D.J., Shim, Y.W. and 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*, Vol. 15, No. 4, pp. 204-211.
- Oh, S.T., Lee, D.J. and Yun, J.K. (2011) An Improved Integral Method for Dynamic Analysis of Bridge on the High Speed Railway. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No. 5, pp. 99-104.
- Oh, S.T., Shim, Y.W. and 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*, Vol. 22, No. 6, pp. 797-803.
- Park, H.S. (1998) *A Study of Dynamic Analysis of Bridges using High-Speed Train model*. PhD. dissertation, Yonsei University, Seoul, Korea.
- Sim, Y.W. (2012) *An Interface Study of Dynamic Behaviour on High-Speed Train Vehicle/Track/PSC bridge*, PhD. dissertation, Seoul National University of Science and Technology, Graduate School of Railroad, Seoul, Korea.
- Xia, H. and Zhang, N. (2005) Dynamic Analysis of Railway Bridge under High-Speed Trains. *Journal of Computers & Structures*, Vol. 83, pp. 1891-1901.
- Xia, H., Zhang, N. and Gao, R. (2005) Experimental Analysis of Railway Bridge under High-Speed Trains. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 282, pp. 517-528.
-
- © Received August 6, 2013
 © Revised August 9, 2013
 © Accepted September 5, 2013