2차원 상호작용 해석법을 이용한 한국고속철도 교량의 성능평가
Performance Evaluation of KHSR Bridges Using 2-D Train/Track/Bridge Interaction Analysis Method

김 만 철* · 심 성 택** · 이 희 연***
Kim, Man-Cheol · Shim, Seong-Taek · Lee, Hee-Hyun

ABSTRACT

This paper represents the results carried out to determine the dynamic response characteristics of Korea High Speed Rail(KHSR) bridges. The responses of the KHSR bridges subjected to the moving train loading are obtained through the simplified method for the 2-dimensional train/track/bridge interaction analysis in which the eccentricity of axle loads and the effect of the torsional forces acting on the bridge are included for the more accurate train/track/bridge interaction analysis. The results of the analyses are compared with the field test data to verify the performance of the 2-dimensional train/track/bridge interaction analysis method.

1. 서 론

중량의 차량이 시속 300km 이상으로 교량을 주행할 경우 열차와 교량의 상호작용으로 인하여 교량의 각부에는 과도한 응력과 변위 및 가속도가 발생한다. 이러한 차량과 교량의 상호작용으로 인한 과도한 응답은 교량의 구조적 안전성 및 차량의 주행 안전성의 저하에 중요한 요인으로 작용하므로 교량설계시 충분히 검토되어야 할 것이다. 또한 고속철도 차량을 개발하기 위해서는 개발차량의 특성 및 운행조건을 고려한 시험선로의 모의해석을 통한 사전 성능검증은 반드시 검토해야하는 필수적인 과정이다. 이를 위해서는 차량/궤도/교량의 상호작용을 고려한 교량의 성능평가 해석기술 개발과 개발된 해석기술과 계측 결과와의 정량적인 비교·분석이 필요하다.

철도교량에 대한 주행안전성을 파악하기 위한 해석기술은 19세기 중반부터 Willis Stokes에 의해 시작되었으며 Kryloff, Timoshenko, Inglis[1] 등에 의해 발전되었다. 이러한 연구자들은 Single Smooth-Running Mass, Single Moving-Pulsating Force 등과 같이 열차를 단순화하여 모형화 하였다. 그 후 Chu 등[2]과 Wiriyachai 등[3]은 화차를 1개의 차체, 2개의 가로대 및 2개의 대차부로 모델링 하였다. 차체에는 연직변위(Vertical Displacement), 횡변위(Lateral Displacement), 피칭(Piching), 롤링(Rolling) 및 요잉(Yawing)의 5개의 자유도를 고려하였고, 각 가로대는 연직변위, 횡변위 및 롤링의 3개의 자유도를 고려하였다. 또한 각 대차부에는 횡변위와 요잉의 2개의 자유도

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
** 한국철도기술연구원 연구원
*** 한국구조안전기술원 대표이사, 정회원

외에, 4개의 윤축장치의 연직변위가 합해져 6개의 자유도를 고려한 23자유도를 갖는 차량모델을 구성하였다. 국내에서는 장승필 등[4], 유철수 등[5]과 박홍성[6] 등이 철도차량을 고려한 동적해석 연구를 수행하였다. 최창근, 양신추 등[7]은 G7 선로구축물 시스템엔지니어링 기술개발 1단계 2차년도에서는 차량을 2차원으로 모형화하고 교량을 3차원적 모형화의 중간 단계로서 교량에 대한 차량의 편심재하 영향을 고려한 2차원 차량/교량 해석방법을 개발하였다. 이 방법은 차량을 주행차량으로 모델링하였으며, 해석에 궤도 불규칙성(Rail Irregularity)을 포함하였으나 궤도의 강성 및 차륜과 궤도의 접촉모델을 해석에 포함하지 않고 있다. 또한 해석알고리즘 상에서 차량과 교량을 모두 고려한 질량, 감쇠 및 강성행렬을 구성하고 있다. 그러나 이 알고리즘은 차량의 진행위치에 따라 시스템 행렬들이 바뀌기 때문에 해석단계마다 이를 재구성, 행렬분해를 필요로 하는 비효율성을 가지고 있다. G7 선로구축물 시스템엔지니어링 기술개발 1단계 3차년도에서는 1단계 2차년도에서 개발한 2차원 차량/교량 상호작용해석 프로그램에 궤도의 영향을 고려하고 기타 기능향상 및 해석 알고리즘의 비효율성을 제거한 새로운 해석 알고리즘을 적용하여 2차원 차량/궤도/교량 및 3차원 차량/궤도/교량 상호작용 해석기법을 개발하였다. 2차원 차량/궤도/교량 상호작용해석기법은 차량을 연직 운동과 피칭, 대차의 중앙점에서 연직 운동과 피칭을 그리고 윤축에서 연직 운동을 차량의 자유도로 고려하였다. 차량과 대차는 질량을 갖는 강체로 가정하였고, 열차는 등속직선운동을 하는 것으로 하였다. 또한 차륜과 레일의 접촉을 고려할 수 있도록 차량의 모델에 접촉스프링을 포함하였으며, 궤도의 영향을 고려할 수 있도록 2차원 윈클러 요소를 개발하여 레일 및 궤도의 상호작용에 대한 영향을 고려할 수 있도록 하였다. 3차원 차량/궤도/교량 상호작용 해석기법에서 차체와 대차는 6개의 자유도 즉, 연직·횡·종방향의 3가지 변위와 피칭·롤링·요잉의 3가지 회전변위를 고려하였으며, 윤축장치에서는 5개의 자유도 연직·횡·종방향의 3가지 변위와 롤링·요잉의 2가지 회전변위를 고려하였다. 즉 각각의 차량은 38자유도를 가지며, 각 자유도들은 강체의 무게중심에서 발생한다고 가정하였다. 또한 3차원 트러스교량, 라멘교량, 강합성교량 등을 모형화 할 수 있도록 하기 위하여 쉘요소(Shell Element)와 3차원 보요소(Frame Element)를 사용하였으며, 궤도의 자갈도상을 모형화하기 위하여 3차원 윈클러스프링요소(Winkler Spring Element)를 개발하여 도입하였다.

본 연구에서는 2차원 차량/궤도/교량 상호작용해석 프로그램의 모의해석 결과와 KTX 차량의 주행시 교량의 거동 계측을 통한 성능평가 결과를 비교·분석하였다.

2. 주행시험 및 수치해석

2.1 주행시험

교량의 구조적 안전성 및 차량의 주행안전성과 승차감에 관련된 항목들과 그에 관련된 기준은 표 1과 같다. 표 1에서 i_{max}는 실제 차량의 주행에 의해서 발생하는 변위에 대한 동적증폭계수를 의미하며 i_{spec}은 시방서 기준을 의미한다. 표 1에서 알 수 있듯이 구조적 안전성 기준 및 주행안전성 기준과 승차감 기준에 가장 중요한 항목은 중앙 지점에서의 수직 변위 및 가속도이다. 따라서 본 연구에서는 단경간으로 지간이 40m인 궁현2교에 대해서 중앙지점의 수직 변위 및 가속도를 측정하였다. 궁현

표 1. 고속철도 교량 안전성 기준

구조안전성 기준	동적증폭계수	$i_{max} \leq i_{spec}$
주행안전성 기준	상판의 최대 수직가속도	$a_{max} \leq 0.35g$
	상판의 최대 회전변위	$\theta_{max} \leq 50 \times 10^{-5} rad$
	상판의 최대 비틂변위	$\psi_{max} \leq 0.4mm/m(Transverse)$ // $3m(Longitudinal)$
승차감 기준	최대 수직변위	$\Delta_{max}/L \leq 1/1700$
	승객의 최대 수직가속도	$a_{max} \leq 0.05g$

2교는 시험선 구간내의 5-2공구 내에 위치하며, 총연장이 1,190m이고, FSM공법으로 시공되었으며 PSC박스형태의 지간장 40m인 1경간 형식교량 1개소, 지간장 40m인 2경간 연속형식교량 10개소, 지간장 25m인 2, 3경간 연속형식 교량 각각 4개소, 1개소로 구성되어 있다.

표 2. 계측 속도 및 횟수

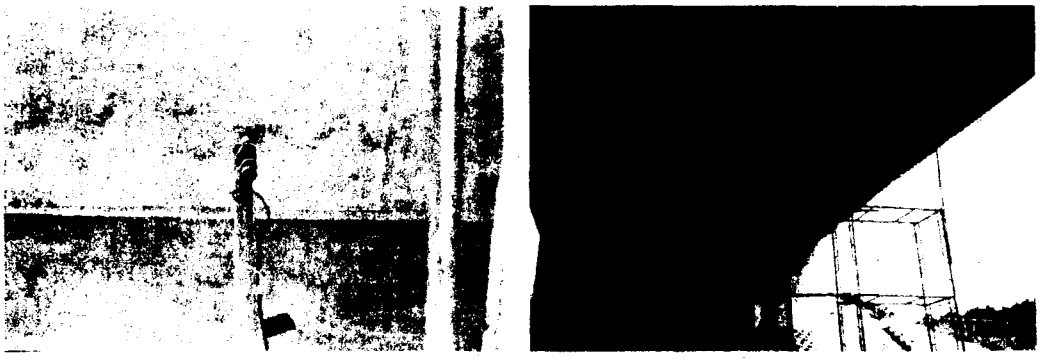
구조물명	주행방향	주행속도(km/h)	횟수
궁현2교 (1@40m=40m)	부산→서울	50	1
		70	1
		80	2
		200	1
	서울→부산	70	3
		195	1

차량의 주행속도를 저속에서부터 최고속도까지 임계속도 및 부임계속도를 포함하여 일정한 간격으로 증가시키면서 주행시험을 하는 것이 속도변화에 따른 변위 및 가속도의 변화를 살펴볼 수 있으나 현장여건이 조성되지 않아 KTX의 시운전 속도에 따라 표 2와 같은 속도에서 측정하였다.

현장계측을 위해 사용한 주요장비는 아래의 표 3과 같다. 일반적으로 중량의 차량이 고속으로 주행할 경우 차량과 교량의 상호작용에 의해 유발되는 교량의 거동에 영향을 미치는 탁월 주파수(Dorminant Frequency) 및 저차 주파수는 50Hz 이하이다. 따라서 앨리어징(Aliasing)을 고려하여 초당 200개의 데이터로 샘플링 하였다. 그림 1은 궁현2교의 현장계측 사진을 보여주고 있다.

표 3. 계측장비

교량명	규 격	장 비 명	제 조 회 사
궁현2교 (1@40m=40m)	동적응답 측정기	Vision Data Acquisition System	Nicolet(미국)
	처짐계	CDP-50	Tokyo Sokki(일본)
	가속도계	AR-1F	Tokyo Sokki(일본)



(a) 가속도 및 변위계 (b) 가속도 및 변위계 설치전경

그림 1. 궁현2교 현장계측 사진

2.2 차량의 모델링

KTX차량은 다음 그림 2와 같이 2차원으로 모델링하였다. 차체와 대차는 수직과 회전, 즉 2자유도를 각각 가지고 있으며 윤축은 수직자유도를 가지고 있다. KTX차량은 2개의 동력차와 2개의 동력객차 16개의 객차로 총 20량(1P+1M+16T+1M+1P)으로 구성되어 있고 총 132개의 자유도를 갖는다.

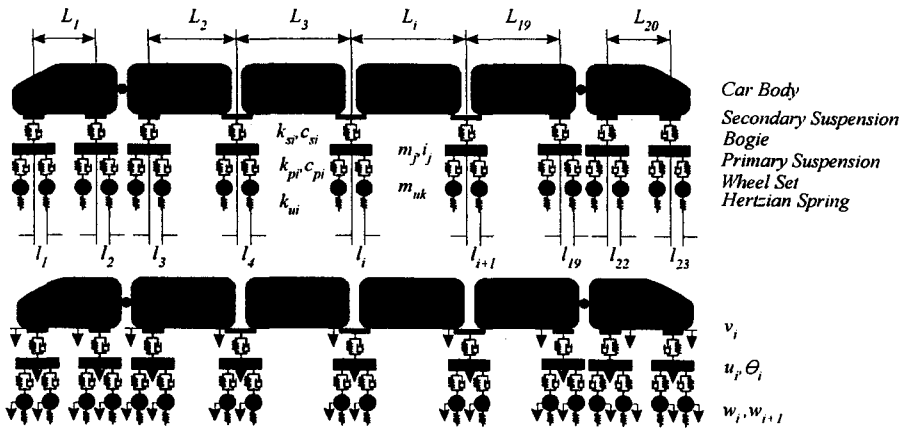


그림 2. 2차원 KTX모델

차량의 운동방정식은 라그란지안 방정식을 이용하여 유도하였다. KTX차량의 물성치는 다음 표 4과 같다.

표 4. 차량의 물성치(단위: tonf, m)

세부항목	동력차	동력객차	객차
차체질량	5.60	4.36	2.69
대차질량	0.25	0.31	0.31
윤축질량	0.21	0.21	0.21
차체관성모멘트	115.50	167.72	100.14
대차관성모멘트	0.265	0.333	0.327
현가장치의 물성치			
2차스프링	258.78	75.51	61.22
1차스프링	250	250	168.37
2차감쇠기	4.082	4.082	4.082
1차감쇠기	4.08	4.08	4.08
접촉스프링	285714.29	285714.29	285714.29

2.3 교량의 모델링

2차원 차량/궤도/교량 상호작용 해석프로그램에서는 2차원 보요소를 이용하여 레일을 모델링하고, 궤도는 2차원 윈클러요소를 이용하여 모델링 한다. 그리고 교량은 2차원 보요소를 이용하여 모델링하여 해석을 수행한다. 2차원 차량/궤도/교량 상호작용 해석프로그램은 2차원 해석이지만, 차량이 교량상에서 편심을 가지고 주행하는 3차원 편심효과를 해석에서 고려할 수 있도록 하였다. 궁현2교의 일반도면 단면은 아래의 그림 3, 4 및 5와 같다. 궁현2교는 중앙부와 지점부의 2개의 단면으로 정의하여 단면을 모델링 하였다(그림 6). 교량에 대한 물성치는 표 5~7에 정리하였다. 궤도는 윈클러요소를 이용하여 강성과 감쇠로 모델링 하고 있기 때문에 윈클러요소는 궤도의 질량효과를 포함하고 있지 않는다. 그러므로 궤도의 질량효과를 모델링에 포함하기 위하여 궤도의 단위길이당 질량과 교량 각각의 단면의 단위길이당 질량을 더한 값을 교량의 단면적으로 환산한 등가의 단위질량값을 교량의 단면에 따른 단위질량으로 고려하였다. 또한 2개가 한쌍으로 구성되

는 레일을 하나의 2차원 보요소로 등가화하기 위하여 단면적 및 단면2차 모멘트를 2배로 증가한 값을 이용하여 모델링하였다.

2차원 차량/궤도/교량 상호작용해석 프로그램을 이용하여 궁현2교에 대한 고유진동수를 해석한 결과 3.75Hz에서 첫 번째 고유진동수가 해석되었다. 본 연구에서는 계측결과와 다양한 형태의 물성 변화에 따른 관계를 살펴보기 위하여 교량의 1차 고유진동수가 $1.0f_1$, $0.8f_1$가 되도록 강성값을 변화시키고 또한 각각의 고유진동수에 대해 감쇠를 5%와 2%로 변화시켜가면서 4가지 방법에 대해 수치해석을 수행하였다.

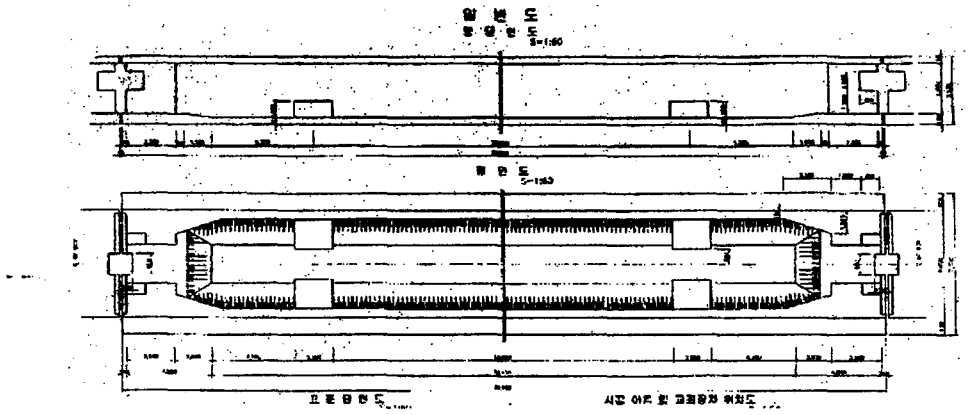


그림 3. 궁현2교(1@40m=40m)

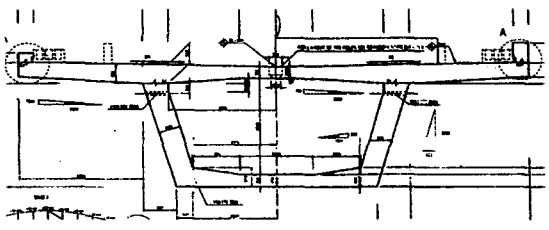


그림 4. 궁현2교 General Cross Section(1-1)

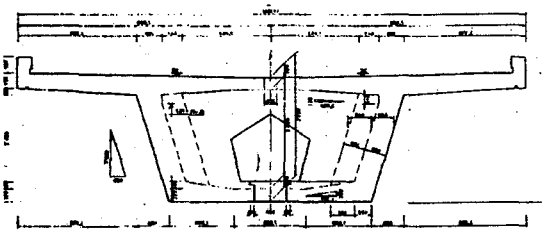


그림 5. 궁현2교 End Diaphragm Section(2-2)

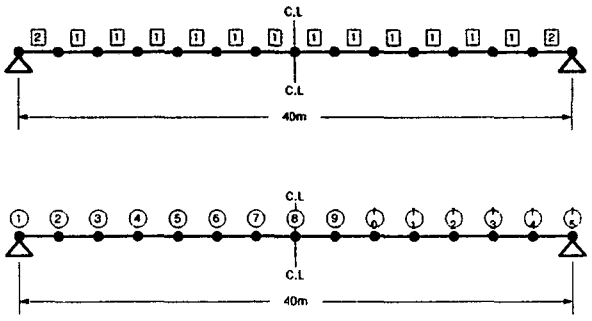


그림 6. 궁현2교(1@40m=40m) 모델링(단면번호 및 절점번호)

표 5. 궁현2교의 단면물성치(단위: tonf, m)

탄성계수(E)		3.0e+06
프와송비(ν)		0.2
단면 1-1	단면적(A)	12.28
	단면2차모멘트(I_{33})	20.41
	단면2차모멘트(I_{22})	1.5e+02
	비틀림상수(J)	37.82
	단위중량(ρ)	0.34
단면 2-2	단면적(A)	23.20
	단면2차모멘트(I_{33})	26.68
	단면2차모멘트(I_{22})	1.83e+02
	비틀림상수(J)	72.53
	단위중량(ρ)	0.300

표 6. 궤도의 물성치(단위: tonf, m)

강성값(K)	8163.27
감소값(C)	24.49

표 7. 레일의 물성치(단위: tonf, m)

탄성계수(E)	21,428,571
단위중량(ρ)	0.806
프와송비(ν)	0.3
단면적(A)	0.015388
단면2차모멘트(I_{33})	0.0000611

표 8. 궁현2교의 고유진동수

Mode	1	2	3	4	5
진동수 (Hz)	3.75	14.99	33.66	59.72	93.12

2.4 주행시험과 수치해석결과 비교

그림 7~8은 가속도 및 변위에 대해 설계데이터의 물성치에 의한 첫 번째 고유주기(f_1)에 강성변화($1.0f_1$, $0.8f_1$)와 감쇠변화(5%, 2%)의 총 4가지 경우에 대한 수치해석 결과와 계측 결과의 최대값을 비교한 그래프이다. 수치해석결과에서 저속인 경우에는 강성 및 감쇠의 변화에 대해 최대 가속도 값의 차이가 거의 없으나, 차량이 고속으로 주행하는 경우에는 강성 및 감쇠의 변화에 따라 가속도 최대값이 다르게 나타났다. 이 경우 강성이 큰 값이 상판의 가속도가 적게 해석이 되고, 같은 강성인 경우에는 감쇠값이 큰 값이 적은 가속도를 나타내었다. 상판의 수직 가속도의 최대값을 비교한 그림 7로부터 $1.0f_1$과 5%의 감쇠로 모델링한 수치해석의 결과가 계측결과와 가장 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 저속인 경우에는 가속도값 자체가 적기 때문에 오차가 큰 것으로 나타났으나, 200km/h인 경우에는 계측치와 수치해석의 결과가 정확하게 일치하는 것을 보여주고 있다. 따라서 고속주행에 대한 계측결과 수치해석결과의 비교가 좀 더 수행되어야 할 것이나, 현재의 결과를 기초로 주행안전성 기준 중 상판의 가속도 기준을 2차원 차량/궤도/교량 상호작용해석 프로그램의 결과를 이용할 경우 안전측에서 검토될 것으로 판단된다.

그림 8은 변위의 해석결과와 계측결과를 비교한 것이다. 이 결과로부터 $1.0f_1$인 경우 최대 변위값들은 속도에 관계없이 감쇠의 변화에 거의 영향이 없는 것으로 판정되었으나 $0.8f_1$인 경우에는 저속에서는 최대 변위값들의 차이가 미소하나 고속인 경우에는 차이가 두드러지게 나타났으며 감쇠가 클수록 최대 변위값이 적은 것으로 해석되었다. 최대 변위값도 최대 가속도를 비교한 것과 같이 $1.0f_1$과 5% 감쇠로 모델링한 경우가 계측 결과와 가장 잘 일치하였다. 또한 수치해석의 결과가 계측결과보다 차량이 주행하는 좌측에 대해서는 최고 18%, 차량이 주행하지 않는 우측에 대해서는 35%이상 큰 변위값을 보여 주고 있다. 따라서 때문에 구조적 안전성 및 승차감 기준을 2차원 차량/궤도/교량 상호작용해석법을 이용할 경우 안전측으로 검토될 것으로 판단된다. 그림 9는 수치해석의 결과와 계측 결과의 변위 및 가속도에 대해 비교한 것이다. 이의 그림에서 왼쪽과 오

른쪽은 각각 왼쪽과 오른쪽 하단에 붙인 센서에서 계측된 결과를 의미한다.

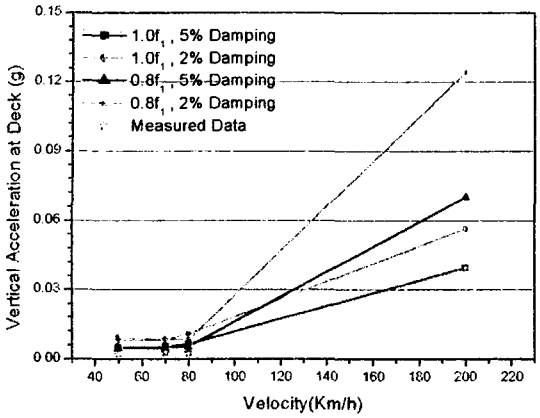


그림 7. 궁현2교 가속도 최대값

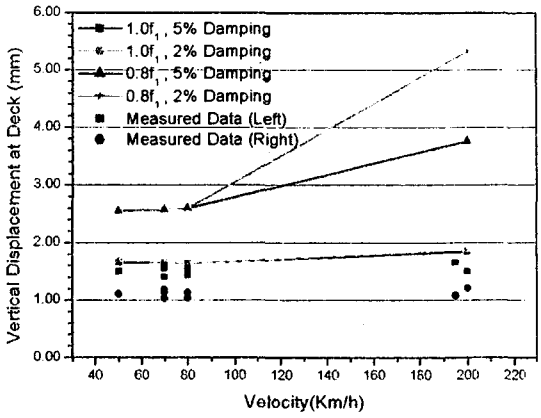
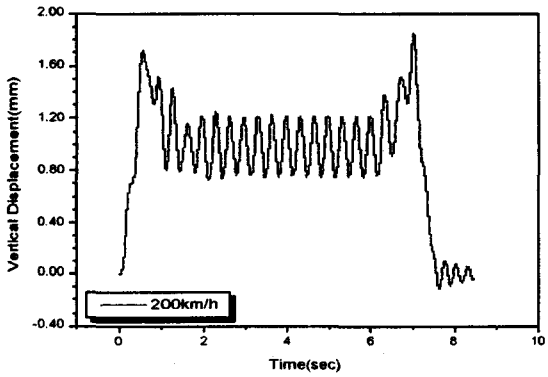
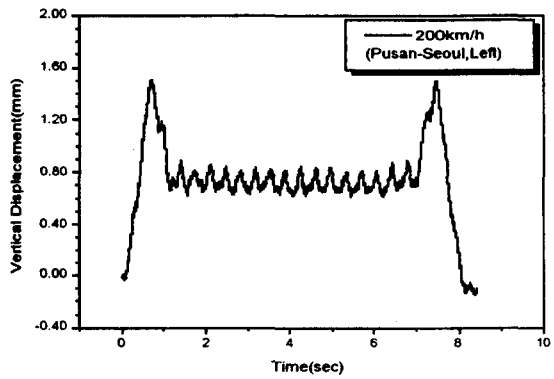


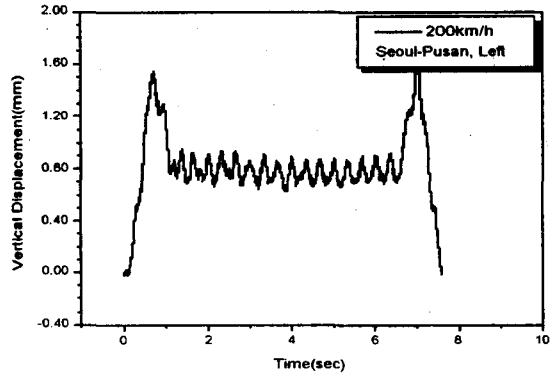
그림 8. 궁현2교 변위 최대값



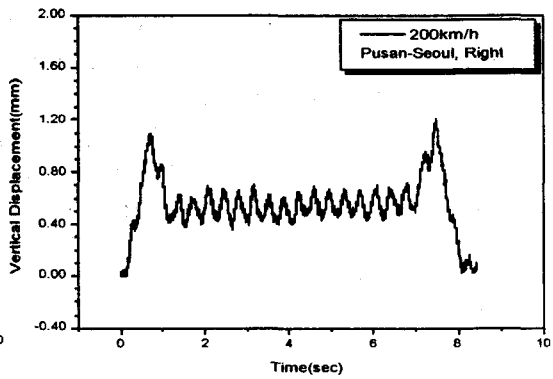
a) 수치해석결과(1.0f1, 5% 감쇠)



b) 계측결과(부산-서울, 왼쪽)

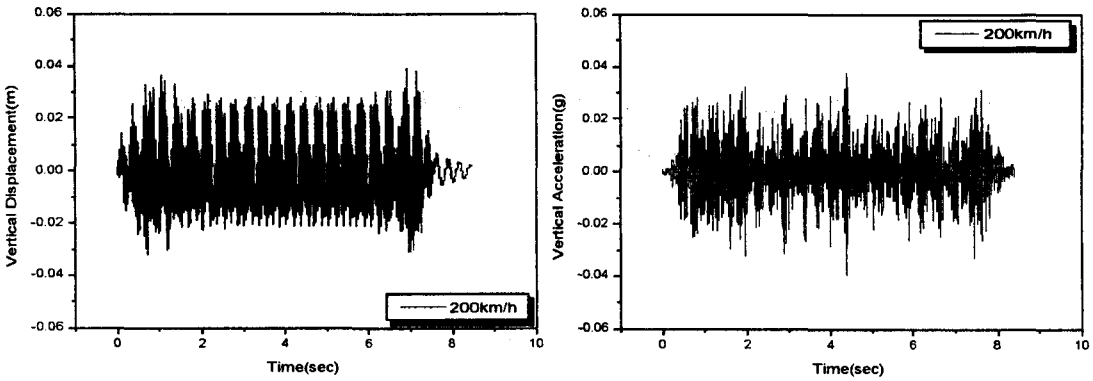


c) 계측결과(서울-부산, 왼쪽)



d) 계측결과(부산-서울, 오른쪽)

그림 9. 8번절점(경간 중앙점, 속도: 200Km/h) 변위



a) 수치해석결과(1.0f1, 5% 감쇠) b) 계측결과

그림 10. 8번절점(경간 중앙점, 속도: 200km/h)의 가속도

3. 결론

중량의 열차가 300km/h의 고속으로 교량을 주행하면 차량과 교량의 상호작용에 의해 교량에 과도한 진동특성이 나타난다. 따라서 교량구간의 구조적 안전성, 주행안전성과 좋은 승차감을 확보하기 위해서는 차량/궤도/교량의 상호작용 해석을 통하여 교량의 정확한 동적특성을 분석하는 것이 필요하다. 또한 개발차량의 시험운행을 위해서는 선로구축물에 대한 구조적 안전성 및 주행안전성과 승차감이 검토되어야 할 것이며 이를 위해서는 개발된 차량/궤도/교량 상호작용 해석법의 검증이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 개발된 2차원 차량/궤도/교량 상호작용해석기법을 해석결과와 계측결과를 비교하였으며, 그 결과 수치해석결과를 이용하여 안전성을 가지고 선로구축물에 대한 요구기준들을 검토할 수 있음을 증명하였다.

참고문헌

1. S.K. Chauduri(1975), "Dynamic Response of Horizontally Curved I-Girder Highway Bridges Due to a Moving Vehicle," Dissertation, The University of Pennsylvania.
2. K.H. Chu, and V.K. Garg(1986), "Impact in Railway Prestressed Concrete Bridges," Journal of Structural Engineering(ASCE), Vol.112, No.5, pp.1036-1051.
3. Y.B. Yang, J.D. Yau, and L.C. Hsu(1997), "Vibration of Simple Beams due to Trains Moving at High Speeds," Engineering Structures, Vol.19, No.11, pp.936-944.
4. 장승필, 곽종원, 하상길, 김성일(1998), "고속열차하중하의 강합성형 철도교의 동적거동에 관한 연구," 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.548-555.
5. 유철수, 강영종, 김종헌, 권재현(1998), "고속철도 차량의 주행이 교량에 미치는 충격효과," 한국강구조학회 논문집, 제10권, 제2호, pp.187-199.
6. 박홍석(1998), "개선된 고속철도열차모형을 사용한 교량의 동적해석에 관한 연구," 박사학위논문, 연세대학교.
7. 한국철도기술연구원(1999), "고속전철 시스템 엔지니어링 기술개발(3차년도 연차보고서)".