

## 차세대고속열차 운행에 따른 호남고속선 강합성교의 동특성 분석

김은성<sup>1\*</sup>, 박종웅<sup>2</sup>, 심성헌<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한국유지관리(주) SI사업부, <sup>2</sup>KAIST 건설환경공학부, <sup>3</sup>UNIST 도시환경공학부

### Dynamic Behavior of Composite Steel Girder Bridge Exceeding Train Speed 350km/h

Eunsung Kim<sup>1\*</sup>, JongWoong Park<sup>2</sup> and SungHan Sim<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Division of System Integration, Korea Maintenance Co.

<sup>2</sup>Korea Advanced Institute of Science and Technology

<sup>3</sup>Ulsan National Institute of Science and Technology

**요 약** 새로 개발된 차세대고속열차(HEMU-430X)가 400km/h 이상의 고속운행을 앞두고 있으나, 우리나라 철도설계 기준은 350km/h이하의 운행속도에 대한 지침을 제시하고 있으며, 호남고속선도 350km/h이하의 기준을 적용하여 설계되었다. 350km/h를 초과하는 고속운행에 대해 기존 인프라의 성능을 검토하고, 고속운행을 대비한 설계기준 마련이 시급한 바, 이 연구에서는 증속에 대한 경부선 가야고가에 대해 시뮬레이션하고, 차세대고속열차(HEMU-430X) 시험 운행 중 측정된 가야고가의 가속도, 변위 데이터를 비교, 검토하여 350km/h이상의 열차운행에 대한 강합성 소수주형 교의 동적거동을 분석하였다. 경부고속선 가야고가 분석결과를 토대로 내년도 완공을 앞두고 있는 호남고속선 연장교에 대해 수치해석을 통해 실제 HEMU 시범운행시 발생할 수 있는 동적 거동을 예측하였다.

**Abstract** The new developed train(HEMU-430X) faces running at high speed over 400km/h. But The Korea railway design code gives guidelines below 350km/h speed. Honam HighSpeed Railway was also designed based on the design standard below 350km/h. Existing infra structures have to be reviewed at high speed running and the design guideline for the speed over 350km/h should be prepared as soon as possible. This paper presents (1) the simulation results of composite steel girder bridge(Kaya Bridge of Seoul-Pusan HighSpeed Railway), (2) values measured at this bridge and the comparison with simulation results, and (3) the prediction of Yonjung bridge being constructed in Honam HighSpeed Railway.

**Key Words** : Composite steel girder bridge, Dynamic analysis, HEMU-430x, high speed train

### 1. 서론

교량을 주행하는 열차의 주행안전성과 승차감 확보를 위해 철도설계기준에서는 철도교량의 연직변위, 연직가속도, 면틀림 등의 항목을 제한하고 있다.

열차 주행속도가 200km/h 이상인 고속철도 교량은 일정간격의 연행하중 작용에 의한 공진위험 등이 항상 존재하므로 기본적으로 모든 교량에 대하여 이 규정에 의

한 동적거동 검토가 필요하다.

Eurocode에서는 설계속도 200km/h를 지표로 동적해석의 필요여부를 판단할 수 있는 지표를 제시하고 있으나, 설계속도가 350km/h에 이르는 고속철도 교량의 경우 설계속도 내에서 공진의 가능성을 필연적으로 포함하고 있으므로 본 기준에서는 이에 대하여 반드시 동적거동 분석을 수행하도록 규정하고 있다.

설계속도 200km/h 이하의 일반철도 교량에 대해서는

본 논문은 "400km/h급 고속철도 인프라 시범적용 기술개발" 사업(국토해양부)의 일환으로 수행되었음.

\*Corresponding Author : Eunsung Kim(Korea Maintenance Co.)

Tel: +82-70-4391-5618 email: caelumiter@gmail.com

Received June 7, 2013

Revised July 10, 2013

Accepted July 11, 2013

교량의 첫 번째 휨 고유진동수가 3Hz이하일 경우에 동적 거동에 대한 검토를 수행한다. 단, 이는 KTX, 새마을열차, 무궁화열차, 티핑열차가 200km/h 이하로 운행할 경우와 화물열차가 150km/h이하로 운행할 경우에 해당된다. 이 이상의 속도로 운행되거나 위에 서술한 열차 외에 다른 축간격을 갖는 열차가 운행될 경우에는 동적해석에 의한 검토를 반드시 수행하여야 한다.

새마을호, 무궁화호, KTX가 200km/h 이하로 운행하거나, 화물열차가 150km/h 이하로 운행하는 일반철도의 경우에는 교량의 첫 번째 휨고유진동수가 3Hz를 초과할 경우에는 공진발생위험이 없다. 따라서, 속도별 동적응답에 대한 검토가 필요없다. 기존의 Eurocode, 철도설계기준(2011)에 나타나 있는 고유진동수 하한치에 대한 규정보다는 국내 운행열차의 특성을 감안해 3Hz의 규정을 적용하는 것이 합리적이다[1].

차세대고속열차(HEMU-430X)가 400km/h를 초과하는 증속시험에 성공했다. 울산~동대구역 증속시험 구간 중 울산발 열차가 동대구역 도착 전 경산에 위치한 가야고가 인근에서 최고속도를 냈으며, 이 속도는 철도설계기준에서 규정하고 있는 속도인 350km/h를 초과하는 바, 증속에 영향을 받는 설계기준에 대한 검토가 필요하며, 필요시 새로운 설계기준이 마련되어야 하는 시점에 이르렀다. 본 연구에서는 철도설계기준에 언급된 열차들과는 또 다른 특성을 가지는 차세대고속열차의 축간격과 열차속도를 기준으로 경부선 가야고가 구간중 50m 강합성교에 대해 수치해석과 현장계측을 통해 350km/h초과 구간에 대한 구조검토를 수행하였다. 또한 건설중인 호남고속선에 대해서도 동적거동을 해석을 통해 검토하였다.

## 2. 수치해석을 통한 동특성 분석

### 2.1 설계기준

철도설계기준은 철도교량에 대해 주행안전성(traffic safety)과 승차감(passenger comfort)에 대해 고려하여 설계하도록 규정하고 있다. 평가 항목은 교량의 연직변위, 연직가속도, 면틀림 등 열차주행시 교량의 응답이다.

350km/h를 초과하는 속도대역에서는 열차에서의 응답에 의한 직접적인 평가가 요구된다[1].

철도설계기준은 운영을 위한 한계조건으로 주행안전성과 승차감을 검토하고 있으며, 구체적으로는 교량상판의 연직가속도, 연직처짐, 면틀림에 대해 검토하도록 규정하고 있다. 본 연구의 대상 교량(경간장 50m)에 대한 기준값은 Table 1과 같다. 여기서, 승차감 기준 연직처짐

검토기준은 설계속도 350km/h이하에 대해 규정하고 있으므로, 이를 초과하는 속도에 대해서는 해당 기준을 적용할 수 없으며, 새로운 기준의 마련이 필요하다.

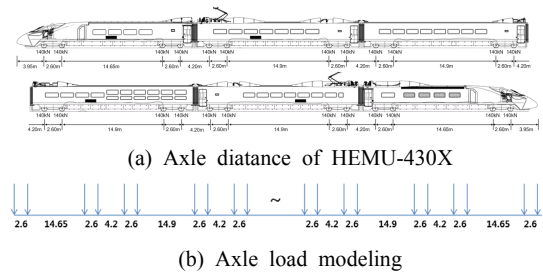
[Table 1] Design Criteria for Railroad: Bridges

Review factor	Criteria	Note
Vertical acceleration	0.5g	for concrete track
Displacement as safety	82mm	under 350km/h
Displacement as comfort	22mm	under 350km/h
Track twist	0.4mm/m	by dynamic analysis

## 2.2 HEMU-430X의 특징

### 2.2.1 열차제원

차세대고속열차는 4M 2PC로 편성되며, 축간격은 Fig. 1과 같다.



[Fig. 1] HEMU-430X specification for FE analysis

호남고속선은 최고속도 350km/h를 고려하여 설계되었으나, 차세대고속열차(HEMU-430X) 개발과 함께 운행속도 400km/h이상의 증속이 예상되고 있어 고속운행에 대한 검토가 필요하다. 교량의 동적거동에 직접적인 영향을 주는 타격간을 고려할 때, KTX의 지배적 유효타격간격이 18.7m임에 반해, HEMU-430X의 지배적 유효타격간격은 24.3m 이므로, 임계속도가 틀리지게 되어 실제거동에 영향을 미치게 된다. HEMU-430X의 지배적 유효타격간격은 24.3m로서 일반적인 철도교량의 1차 고유진동수가 3Hz인 점을 감안하면, 공진가능한 임계속도가 250 ~ 300km/h이므로 대상 교량에 대한 동적성능검토가 필요하다.

### 2.2.2 열차하중 모델링

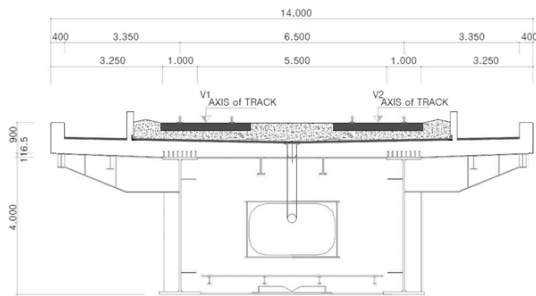
철도교에서 열차하중은 레일→침목→콘크리트 슬래브 순으로 전달된다. 차륜이 레일상 이동함에 따라 침목에 작용하는 하중은 근사적으로 삼각형 함수식을 갖게 된다. 시간이력해석에 의할 때, 하중은 Δt만큼씩 이동하는 집중

하중으로 모델링할 수 있으며, 인접한 침목에 대해 침목 간 거리에 따라 배분되는 집중하중으로 근사화하였다. 면틀림 영향을 확인하기 위해 축중 재하가 아닌 윤중 재하로 모델링하였다. 윤중감소율은 고려하지 않았다.

### 2.3 가야고가 강합성 소수주형교 수치해석

#### 2.3.1 대상교량 설계사항 검토 및 모델링

수치해석 대상은 경부고속선 가야고가 구간중 강합성 소수주형교이며, 경간장 50m의 단순교이다. 단면의 형상은 Fig. 2와 같다.



[Fig. 2] Cross section of composite steel girder bridge(L=50m) at Kaya bridge in Seoul-Pusan Line

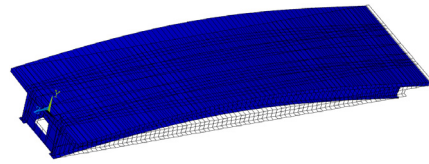
강부재는 4절점 shell(6 DOFs/node)요소로 모델링하였고, 콘크리트 슬래브는 8절점 solid(6 DOFs/node)로 모델링하였다. 캔틸레버 보강재는 3D beam(6 DOFs/node)요소를 이용하였다. 콘크리트 슬래브와 강거더는 완전합성으로 가정하였으며, 탄성받침의 영향은 고려하지 않았다. 종방향 절점간격은 침목간격을 고려하여 640mm로 하였다.

#### 2.3.2 모드해석

모드해석 결과, 1차 휨모드시 고유진동수는 3.186Hz 이고, 지배적 유효타격간격(24.3m)에 대한 공진가능 임계속도는 약 278.7km/h이므로, 열차속도 약280km/h 전후로 응답이 증폭될 것이 예상된다.

[Table 2] Natural frequencies from mode analysis

Mode	Natural Frequency
1 <sup>st</sup> mode	3.186
2 <sup>nd</sup> mode	3.689
3 <sup>rd</sup> mode	5.913
4 <sup>th</sup> mode	8.894
5 <sup>th</sup> mode	9.553

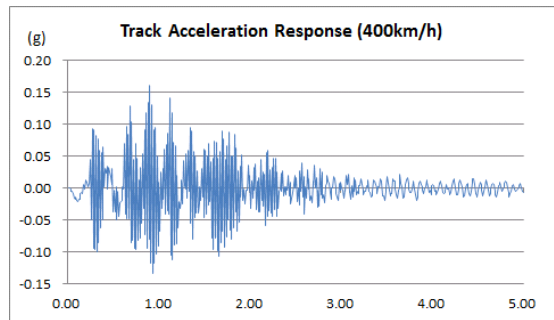


[Fig. 3] 1<sup>st</sup> mode deformed shape of bending

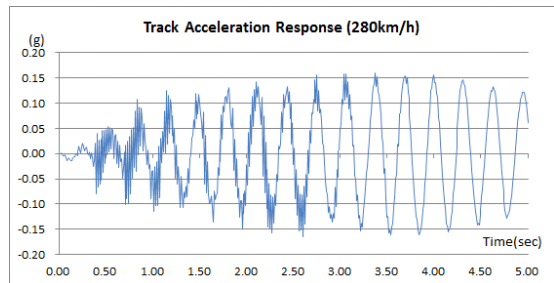
#### 2.3.3 시간이력해석

열차의 윤중을 이동집중하중으로 재하하였고, 해석시간이력 간격은 0.005초로 하였다. 열차의 속도별로는 200, 250, 300, 350, 400, 430, 450km/h에 대해 검토했으며, 목표 설계속도로 선정한 400km/h를 중심으로 검토하였다.

열차의 운행속도별 대상교량의 가속도 응답 특성은 열차속도 400km/h에서 Fig. 4와 같다.



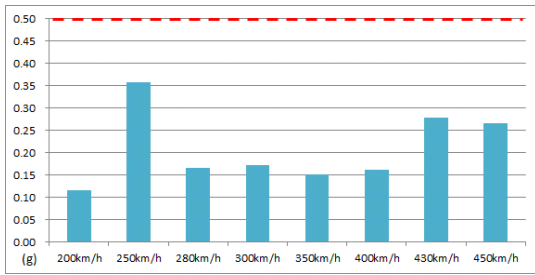
[Fig. 4] Vertical acceleration of track at 400km/h (unit: g)



[Fig. 5] Vertical acceleration of track at 250km/h (unit: g)

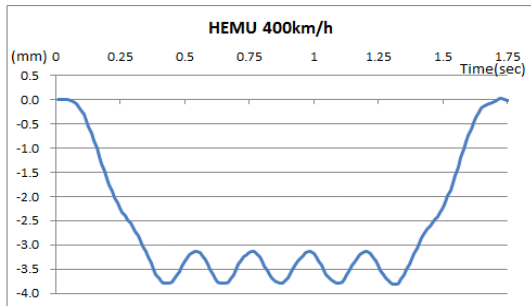
열차속도 280km/h에서의 가속도 해석값을 시간이력에 따라 검토하면 Fig. 5와 같이 공진효과에 의한 응답을 확인할 수 있다.

전 속도 영역에서의 가속도 해석값을 살펴보면, 승차감 기준 가속도 기준에는 못 미치나(Fig. 6), 임계속도에서는 연직처짐과 면틀림에 증폭으로 인한 영향이 있게 된다.

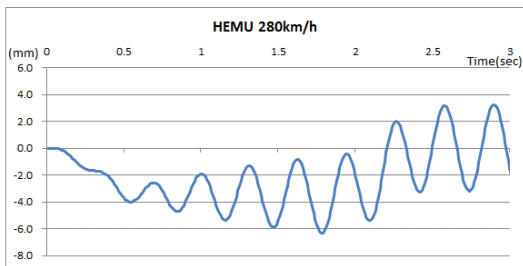


[Fig. 6] Maximum vertical acceleration of track (unit: g)

연직처짐 해석결과를 보면, 열차속도 400km/h의 경우, 시간이력에 따라 Fig. 7과 같은 형상으로 동적처짐이 발생함을 확인할 수 있다. 또한, 임계속도(250 km/h, 300km/h)에서의 연직처짐은 400km/h 속도에서의 처짐값의 약 50% 가까이 증폭됨을 알 수 있다(Fig. 8). 경간 중앙부의 최대처짐값을 속도별로 비교하면 Fig. 9와 같이 열차속도 280km/h일때 처짐이 6mm 이상 발생함을 확인할 수 있다.

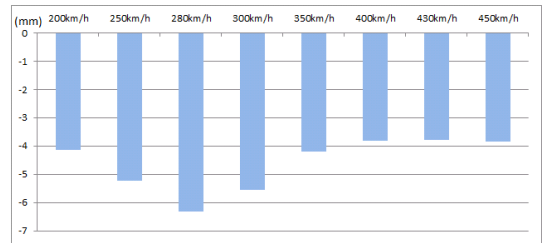


[Fig. 7] Time history deflection at 400km/h



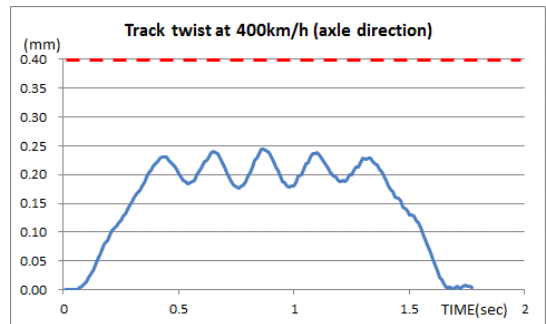
[Fig. 8] Time history deflection at critical speed 250m/h

철도설계기준은 설계속도 350km/h를 초과하는 경우에 대해 처짐 상한선을 규정하고 있지는 않지만, 규정된 수식을 확장하였을 때, 주행안전성 기준 83mm, 승차감 기준으로 약 21mm라고 볼 수 있으므로, 상당히 안전측에 속한다고 볼 수 있다.

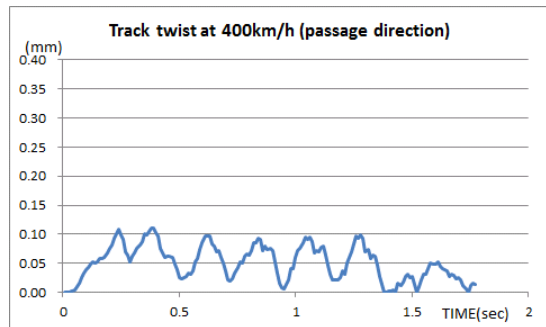


[Fig. 9] Maximum vertical displacements of track by train speed (mm)

면틀림 검토는 최대값이 예상되는 경간 중앙부에서 4개 절점에서의 상대적 연직처짐값을 비교하였다.

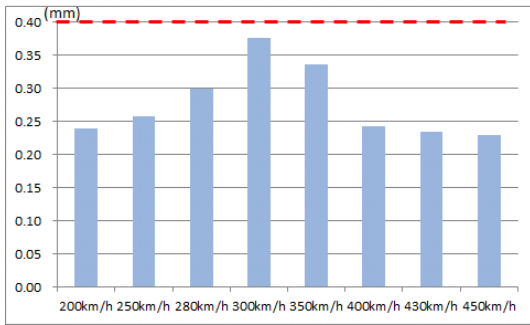


[Fig. 10] Time history track twist at 400km/h (axle direction, 0.4mm/m)



[Fig. 11] Time history track twist at 400km/h (passage direction, 1.2mm/3m)

200 ~ 450km/h 구간에서 열차진행방향 면틀림은 철도 설계기준이 정하고 있는 상한치에 크게 못미치나(Fig. 11), 시간에 따른 차축방향 면틀림 값을 구하면 Fig. 10과 같이 열차속도 400km/h에서 약 0.25mm정도로 계산된다. 열차속도별로 차축방향 면틀림을 비교해볼 때 열차속도 300km/h에서 규정된 상한치 근처까지 근접함을 확인할 수 있다(Fig. 12).



[Fig. 12] Maximum axle direction track twist by train speed (mm/m)

## 2.4 실측을 통한 검증

### 2.4.1 멀티메트릭 데이터 융합(Multimetric Data Fusion)기반 변위추정 기법

일반적으로 교량의 최대처짐을 구하기 위해서 사용하는 측정장비로는 레이저처짐계가 있으며, 센서는 LVDT, 링게이지 등을 이용한다. 레이저처짐계는 상당한 고가의 장비로서 모니터링 시스템 구축 시 경제성이 떨어지며, LVDT 또는 링게이지를 이용하려면 경간중앙 하부에 동바리 등을 설치하여 센서를 고정시켜야 하는데, 교량 하부가 도로로 이용되고 있거나 교량 하부에 하천이 존재하는 경우에는 센서의 설치가 불가능하다.

본 연구에서는 교량 모니터링의 경제성도 만족하고, 설치의 용이성도 높일 수 있는 멀티메트릭 데이터 융합 기법을 도입하였다. 가속도로부터 변위를 추정하는 방법은 일반적으로 동적인 변위는 잘 추정하나, 센서의 특성 및 저주파 잡음으로 인해 유사정적인 변위의 추정은 매우 어렵다. 변형률로부터 변위를 추정할 경우, 유사정적인 변위는 정확도가 높지만, 센서의 잡음으로 인해 동적인 변위는 정확도가 떨어진다.

가속도와 변형률로부터 추정된 변위를 융합하기 위하여 Lee 등, 2010 [3] 이 제안한 변위 추정 기법을 확장하면 (1)과 최소화 함수를 구성할 수 있다.

$$\text{Min}_{\mathbf{u}} \Pi = \frac{1}{2} \|L_a(L_c \mathbf{u} - \Delta t^2 \bar{\mathbf{a}})\|_2^2 + \frac{\lambda^2}{2} \|\mathbf{u} - \mathbf{u}_{strain}\|_2^2 \quad (1)$$

여기서,  $L_a$ 는 사다리꼴 적분 행렬,  $L_c$ 는 이차미분연산 행렬,  $\|\cdot\|_2$ 는 벡터의 2-norm,  $\lambda$ 는 최적화 파라미터다. 식 (1)은 최종 예측되는 변위의 이차미분이 가속도 계측값과 최소의 차이를 가지며, 또한 변형률로부터 추정되는 변위와의 최소의 차이를 가지게 됨을 의미한다. 이 식은 최적화 파라미터  $\lambda$ 를 통해 변형률로부터 추정된 변위의 정적

변위 성분과 가속도로부터 추정된 변위로부터의 동적성분을 상호보완적으로 융합한다. 식 (1)에서  $\mathbf{u}_{strain}$ 은 다음과 같은 유한개의 모드형상을 이용하여 구할 수 있다. Shin 등[4]은 단순보형상의 교량 모형에 대하여, 소수의 계측된 변형률을 이용하여 변위를 구하는 식(2)를 제안하였다. 단순보 교량 모형에 적용성을 쉽게 하기 위하여 변형률-변위 관계식에 단순보의 변위 및 변형률 모드형상을 이용하였다. 식 (2)에서  $L$ 은 교량의 길이,  $y$ 는 교량의 중립축을 의미한다.

$$\{\mathbf{u}_{strain}\} = D\{\boldsymbol{\varepsilon}\}$$

$$D = \frac{L^2}{y\pi^2} \Phi \begin{bmatrix} \sin \frac{\pi x_1}{L} & \cdots & r \sin \frac{r\pi x_1}{L} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sin \frac{\pi x_n}{L} & \cdots & r \sin \frac{r\pi x_n}{L} \end{bmatrix}^+ \quad (2)$$

$$= \begin{bmatrix} C_a \Delta t^2 & C_\varepsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{a}}_i \\ \{\boldsymbol{\varepsilon}\} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서,  $C_\varepsilon = (L^T L + \lambda^2 I)^{-1} \lambda^2 D$ .

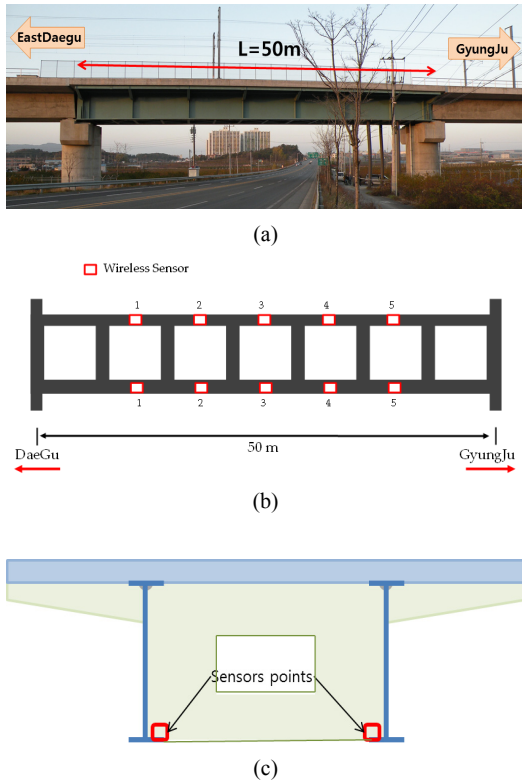
식 (3)과 같이 재구성된 변위  $\mathbf{u}_i$ 는 측정된 가속도와 변형률을 통해 표현된다. 하지만 식(2)에서 변형률로부터 변위를 구하기 위해서는 중립축  $y$ 의 값이 필수적으로 알아야 한다. 실제적인 교량의 중립축 계산은 설계도를 이용하거나, 교량의 상하면에 변형률 계를 설치하여 구해야 하지만 설계도와 실제 중립축이 잘 맞지 않는 경우도 있으며, 변형률계를 교량 상하면에 설치하는 일은 쉽지 않다. 중립축 계산 과정을 간단히 하기 위하여 가속도와 변형률을 이용한 방법이 식(3)에 제시되었다. 가속도를 통해 구한 변위는 실제동적인 변위를 잘 나타내며, 변형률을 통해 구한 변위는 정적 및 1차 동적모드를 잘 표현한다. 두 방법으로부터 추정된 1차 모드의 동적변위의 크기가 일치한다는 점을 이용하여 (3)와 같이 중립축을 구할 수 있다.

$$y = \sqrt{S_{d,acc}(f_n) / S_{d,strain}(f_n)} \quad (3)$$

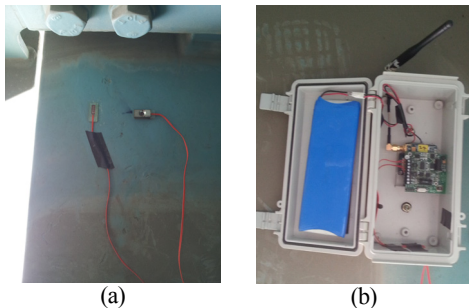
여기서,  $S_{d,acc}$ ,  $S_{d,strain}$ 는 가속도 및 변형률로부터 변위를 구하였을 때 각각의 파워 스펙트럼 밀도이다.

### 2.4.2 교량 응답 모니터링

열차운행시 교량의 응답을 확인하기 위하여, 가야고가 강합성부(서기(현)292K665)에 Fig. 13과 같이 10개소에 가속도와 변형률 측정이 가능한 무선센서를 설치하였다.



[Fig. 13] In-situ sensors setting at Kaya bridge in Kyungbu Line (a) Kaya bridge (b)(c) Sensor layout



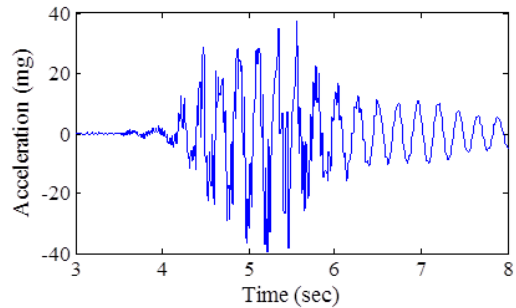
[Fig. 14] Acceleration sensor and strain gauge installation (a) Sensors (b) Wireless DAQ

주구조체인 거더의 하부플랜지에 가속도계와 변형률계를 같은 위치에 부착하였다[Fig. 14]. 측정시 열차는

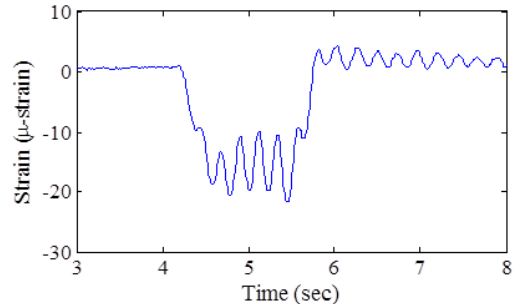
400km/h로 주행하였으며 모든 데이터는 100Hz로 계측되었다.

### 2.4.3 교량 응답 특성

400km/h 열차의 통과시의 주행선로 측 가속도와 변형률의 계측값은 Fig. 15, 16과 같다. 가속도 및 변형률의 최대값은 각각 37.15mg, 21.45 $\mu$ -strain 이며, 두 계측값은 멀티메트릭 데이터 융합의 기초 데이터가 된다.

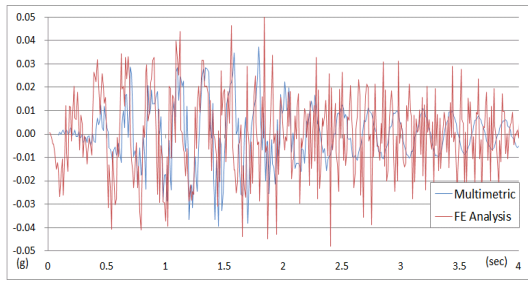


[Fig. 15] Acceleration Responses at point 3 left

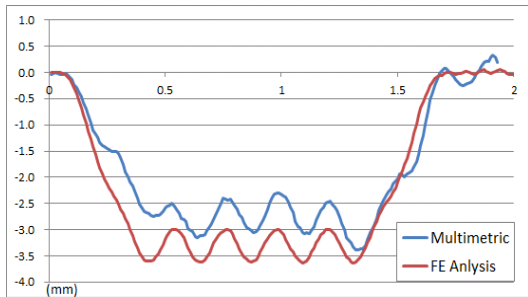


[Fig. 16] Strain Responses at point 3 left

일반적으로 가속도는 해석과 계측결과가 상이하나, 최대값 위주로 비교해볼 때, 가속도 계측값은 수치해석결과에 비해 10% 정도 작게 측정되었다[Fig. 17]. 한편, 데이터 융합 기반 기법(Multimetric data fusion)과 수치해석(FE Analysis)으로부터 계산된 변위 값을 비교할 때, 동적인 거동을 상당히 잘 반영함을 확인하였다[Fig. 18]. 열차 속도 400km/h일 때, 멀티메트릭 데이터 융합에 의해 산정된 처짐의 최대값(3.4 mm)은 수치해석으로부터 나온 결과(3.6 mm)와 약 0.2 mm의 차이를 보이며, 이는 열차의 고속주행시 발생하는 윤증감소율의 영향이라고 판단된다. 수해해석시 윤증감소율을 고려한다면 계측치와 해석치의 차이가 상당히 좁혀질 것으로 예상된다.

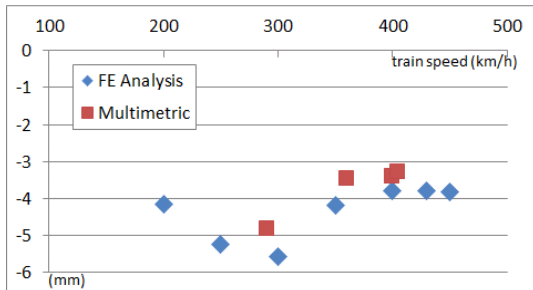


[Fig. 17] Comparison of Acceleration in Time Domain



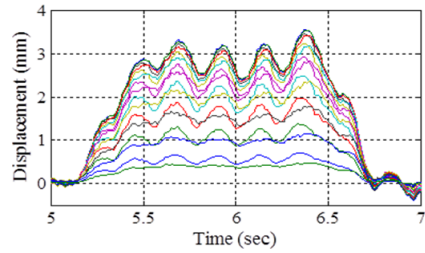
[Fig. 18] Comparison of Displacement at 400km/h

속도별 계측치와 해석에 의한 최대변위값을 비교하면 Fig. 19와 같다. 계측치가 해석치에 조금씩 못 미치는 것을 확인할 수 있다.

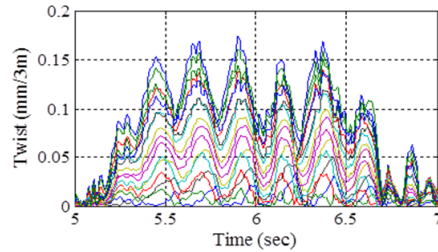


[Fig. 19] Comparison of Displacement by Time speed

데이터 융합 기반 기법의 장점은 단면의 형상이 일정할 경우, 교량 전 구간의 변위를 추정할 수 있다는 것이다. 열차진행방향 면틀림 평가를 위해 3m 간격으로 변위를 구하고(Fig.20), 평면의 비틀림을 산정하였다(Fig. 21). 최대 면틀림은 0.17mm로 계산되었으며, 수치해석값(Fig. 12)과 비교할 때 0.05mm의 차이를 보인다. 상당히 정확하게 산정되었음을 확인할 수 있었다.



[Fig. 20] Displacements in passage side



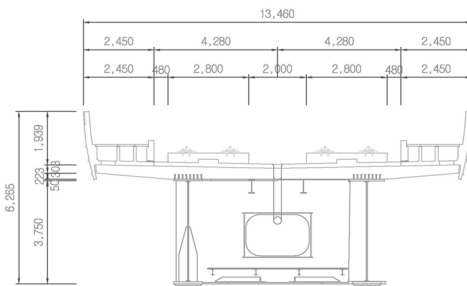
[Fig. 21] Twist in every 3m (train passage side)

### 3. HEMU 운행시 연정교 응답해석

#### 3.1 해석조건

##### 3.1.1 단면

현재 건설중인 호남고속선 연정교 구간 중 강합성 소수주형교를 대상으로 수치해석을 수행하였다. 교량은 경간장 50m의 단순교이다. 단면의 형상은 Fig. 22와 같다. 가야고가의 경우와 마찬가지로, 강부재는 4절점 shell(6 DOFs/node)요소로 모델링하였고, 콘크리트 슬래브는 8절점 solid(6 DOFs/node)로 모델링하였다. 캔틸레버 보강재는 3D beam(6 DOFs/node)요소를 이용하였다. 콘크리트 슬래브와 강거더는 완전합성으로 가정하였으며, 탄성받침의 영향은 고려하지 않았다. 종방향 절점간격은 침목간격을 고려하여 640mm로 하였다.



[Fig. 22] Cross section of composite steel girder bridge(L=50m) at Yonjung bridge in Honam High Speed Rail

### 3.1.2 하중

Fig.1의 차세대고속열차의 윤택중을 이동집중하중으로 모델링하였으며, 0.002초 간격으로 시간이력 해석을 수행하였다. 열차의 속도는 상행 방향에서 예상되는 최대 속도인 400km/h 운행을 기준으로 200km/h~450km/h 구간에서 분석하였다.

### 3.2 요한요소해석을 통한 거동 예측

이미 언급한 경부선 가야고가에 대한 해석과 계측 데이터 검토결과, 해석을 통해 실제거동을 상당히 유사하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 현재 건설중인 호남고속선 연정교에서 차세대고속열차가 400km/h이상으로 운행할 때 교량의 동적응답이 어떻게 변화하는지 수치해석을 통해 분석하였다.

속도별로 열차의 운행을 이동집중하중으로 재하하였고, 시간이력 해석을 수행하였다. 목표 설계속도인 400km/h를 중심으로 검토했다.

#### 3.2.1 모드해석

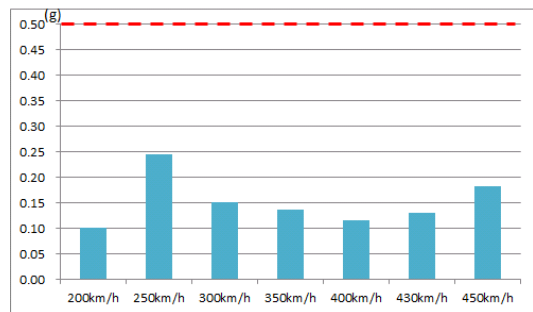
유한요소에 의한 모드해석을 통해, 1차 모드시 고유진동수는 3.065Hz로 산정되었다. HEMU-430X의 지배적 유효타격간격(24.3m)에 대한 공진가능 임계속도는 268km/h가 된다.

[Table 3] Natural frequencies from mode analysis

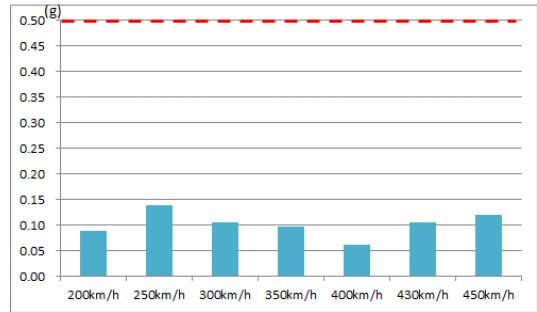
Mode	Natural Frequency
1 <sup>st</sup> mode	3.065
2 <sup>nd</sup> mode	4.015
3 <sup>rd</sup> mode	5.565
4 <sup>th</sup> mode	8.741
5 <sup>th</sup> mode	10.386

#### 3.2.2 가속도

해석결과 교량의 최대응답가속도는 열차속도에 따라 0.1g ~ 0.25g 의 범위에서 발생할 것으로 예상되며, 승차감 기준을 만족한다[Fig. 23, Fig .24].



[Fig. 23] Maximum acceleration at slab

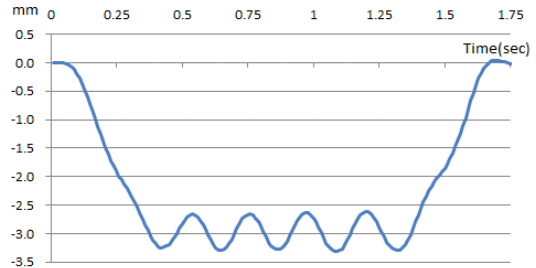


[Fig. 24] Maximum acceleration at main girder

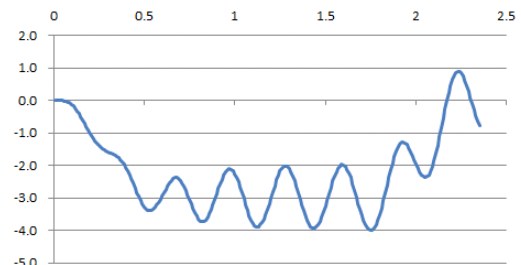
대상 교량의 가속도 응답 특성은 주파수 영역에서 분석하면 고유진동수와 유사한 주파수가 발생되는 실제로 250 ~ 300 km/h의 속도범위에서 변위 증폭이 있을 것으로 예상할 수 있다.

#### 3.2.3 변위

교량의 연직처짐 해석결과를 보면, Fig. 26과 같이 시간에 따른 동적 처짐이 발생함을 확인할 수 있다. 공진이 발생하는 경우, Fig. 26과 같이 열차가 통과한 후에도 잔여변위가 발생하는 것을 알 수 있으며, 최대 변위는 약 5mm가량 발생할 것으로 보인다. 속도별 면틀림 최대값을 비교하면 Fig. 27과 같다.

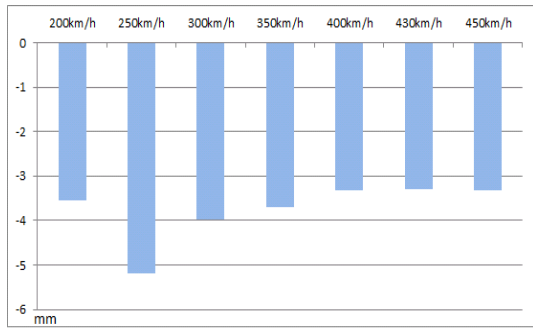


[Fig. 25] Time history deflection at 400km/h



[Fig. 26] Time history deflection at 300km/h

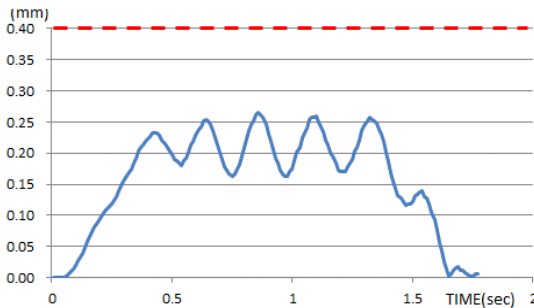




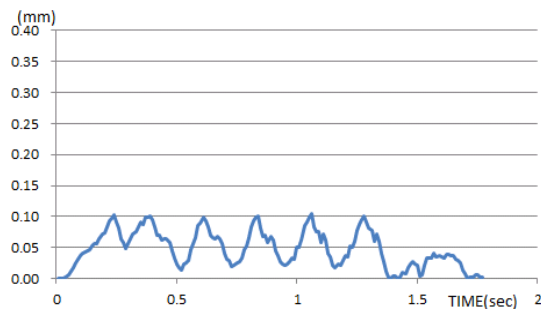
[Fig. 27] Maximum deflection at passage direction

### 3.2.4 면틀림

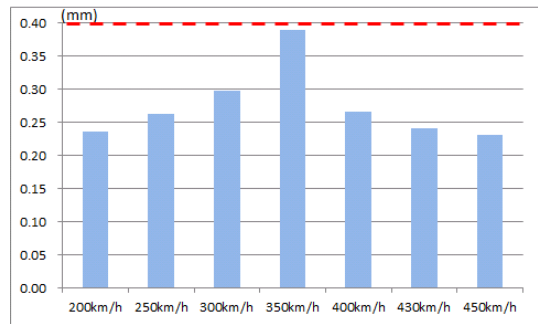
면틀림 검토는 최대값이 예상되는 경간 중앙부에서 4개 절점을 정하여 상대 연직치짐값을 비교하였다. 400km/h 운행시 차측방향 면틀림과 열차진행방향 면틀림의 시간별 추이를 살펴보면 Fig. 29, 30과 같다. 열차진행방향보다는 차측방향으로 면틀림이 크게 발생함을 알 수 있다. 열차속도별 검토결과, 차측방향 최대 면틀림은 열차속도 350km/h에서 발생하며 0.4mm에 근접하는 것으로 해석되었다[Fig. 31].



[Fig. 29] Time history axle direction track twist



[Fig. 30] Time history passage direction track twist



[Fig. 31] Maximum track twist values(mm/m)

내년도 호남고속선 연정교에서 증속시험시 임계속도 인근에서 발생하는 값들을 사전에 검토하여 변위 증폭효과를 예측할 필요가 있다. 열차내 가속도 계측등 보조지표를 활용하여 차측방향 면틀림으로 인한 효과를 확인할 수 있다.

## 4. 결론

차세대고속열차의 시험운행시(경부2단계 울산~동대구 구간) 가야고가 강합성 소수주형교에서 가속도와 변위계측을 수행하였으며, 400km/h 운행시 계측한 데이터를 분석하여 유한요소해석결과와 비교하였다. 동적변위, 면틀림, 가속도 등 계측데이터와 해석결과가 5~10% 이내로 일치한 바, multi-metric 데이터 융합기법의 신뢰성을 확인하고, 다른 계측방법에 비해 동적거동을 정확히 반영함을 알 수 있었다.

교량 실측결과, 차세대고속열차가 400km/h이상 증속 하더라도, 현행 가속도 기준 0.5g의 10%, 현행 변위 기준의 20% 정도의 응답값을 보여, 승차감 기준의 구조 안정성을 만족하는 것으로 판단된다. 열차운행속도를 400km/h으로 올리더라도 현행 설계기준 적용에 크게 문제가 없다고 판단된다. 다만, 공진주파수 대역에서 면틀림 해석값이 철도설계기준의 최대치에 근접하므로 추가적인 검토가 필요하다.

호남고속선 연정교 구간의 강합성 소수주형교는 차세대고속열차가 최대 430km/h 증속을 하더라도 승차감 기준의 가속도(허용치의 50%), 변위(허용치의 25%), 면틀림(허용치 근접) 기준을 만족하는 것으로 해석되었으며, 철도설계기준에 제시하고 있는 최대 열차속도인 350km/h를 초과하는 속도범위에서도 현재의 설계기준을 준용할 수 있는 것으로 판단된다.

건설중인 호남고속선의 공정이 늦어짐에 따라 본 연구

사업의 종료 전에 계측결과를 활용하여 실제 거동을 규명하고 이를 통한 설계기준(안) 도출까지 충분한 기간이 주어지지 않을 것으로 예상된다. 그러나, 이번 연구를 통해 시뮬레이션이 교량의 실제 거동을 표현할 수 있음을 확인하였으며, 400km/h 급 설계기준(안) 도출을 위해 수치해석을 충분히 활용할 수 있다고 판단된다.

## References

- [1] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Railway Design Standard, p.8-83 ~ 8-89, 2011
- [2] Jong-Woong Park, Sung-Han Sim and Hyung-Jo Jung, "Displacement Estimation using Multimetric Data Fusion", submitted to IEEE-ASME Transactions Mechatronics, Accepted, 2013.
- [3] Lee, H.S., Hong, Y.H., Park, H.W., 2010. Design of an FIR filter for the displacement reconstruction using measured acceleration in low-frequency dominant structures. International Journal for Numerical Methods in Engineering 82, 403-434.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/nme.2769>
- [4] Shin, S., Lee, S.-U., Kim, Y., Kim, N.-S., 2012. Estimation of bridge displacement responses using FBG sensors and theoretical mode shapes. Structural Engineering and Mechanics 42, 229-245.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/sem.2012.42.2.229>

### 박 종 응(JongWoong Park)

[정회원]



- 2007년 2월 : 한양대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 2009년 9월 : KAIST 건설및환경공학과 (공학석사)
- 2009년 9월 ~ 현재 : KAIST 건설및환경공학과 박사과정

<관심분야>

구조물 안전성 모니터링, 센서 융합, 구조 동역학

### 심 성 한(Sung-Han Sim)

[정회원]



- 2000년 2월 : KAIST 건설및환경공학과 (공학사)
- 2002년 2월 : KAIST 건설및환경공학과 (공학석사)
- 2011년 5월 : 미국 일리노이 주립대학교 토목환경공학과 (공학박사)
- 2011년 7월 ~ 현재 : 울산과학기술대학교 도시환경공학부 조교수

<관심분야>

구조동역학, 구조물 안전성 모니터링, 스마트 센서

### 김 은 성(Eunsung Kim)

[정회원]



- 1996년 2월 : 연세대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 1998년 2월 : KAIST 토목공학과 (공학석사)
- 1998년 1월 : 삼성물산(주)
- 2000년 11월 : (주)코아텍
- 2006년 12월 ~ 현재 : 한국유지관리(주) SI사업부

<관심분야>

구조물 건전성 모니터링 시스템, 무선 계측