설계다이아그램을 이용한 KTX와 HEMU 차량 주행시 단경간 단순지지 교량의 동특성 분석

Dynamic Characteristics of Simply Supported Single Span Bridges for KTX and HEMU using Design Diagram

조정래* · 조근희 · 곽종원 · 김영진

Jeong-Rae Cho · Keunhee Cho · Jong-Won Kwark · Young Jin Kim

Abstract This paper presents the ERRI design diagrams of KTX and HEMU applicable to simply supported single span bridges, and analyzes the dynamic characteristics and design considerations of the bridges under KTX and HEMU using the diagrams. The design diagrams of KTX and HEMU are calculated for the bridges with 25m, 30m, 35m and 40m span lengths, which are widely used for simple bridge in Korea. From the design diagrams, the dynamic characteristics of the bridges with the selected span lengths are analyzed. In addition, the design consideration is discussed to satisfy the design requirement of acceleration. It is desirable for the bridge with 25m span length to avoid resonance both for KTX and HEMU. Since larger responses are expected for HEMU in the bridge with 30m span length, and for KTX in the bridge with 35m and 40m span length, the bridges should be planned to have enough mass satisfying acceleration requirement at resonance, or to avoid the resonance.

Keywords : High speed railway bridge, Design diagram, KTX, HEMU

초 록 본 논문에서는 KTX와 HEMU 차량 주행시 단경간 단순지지교량의 간편한 동적 해석을 위한 ERRI 설계다이아그램을 제시하고, 이를 통해 교량의 동적응답특성과 설계시 고려사항을 분석하였다. 국내에서 많이 적용되는 25m, 30m, 35m, 40m 지간장을 갖는 단경간 단순지지 교량에 대해 KTX 및 HEMU 차량 주행시 설계다이아그램을 계산하였다. 이를 통해 선택된 4개 지간장 교량을 대상으로 각 열차하중에 대한 동특성을 분석하였다. 또한 공진시 가속도 응답을 만족하는 최소한의 단위길이당 질량을 지간길이, 차량유형, 감쇠비 등에 따라 제시하였고 설계시 고려사항을 분석하였다. 25m 교량은 HEMU와 KTX 차량 모두 공진시 응답이 증폭되므로 공진이 발생하지 않도록 설계하는 것이 경제적이다. 30m 교량은 HEMU 차량, 35m와 40m 교량은 KTX 차량이 주행할 때 응답이 증폭될 수 있으며 공진을 회피하거나 최소한의 단위길이당 질량을 배치하도록 설계해야 한다.

주요어 : 고속철도교량, 설계다이아그램, KTX, HEMU

1. 서 론

HEMU-430X(Highspeed Electric Multiple Unit-430km/hr eXperiment, 이하 HEMU) 차량은 한국철도기술연구원 주도로 2015년 상용화를 목표로 개발중인 차기 고속철 차량으로, 설계최고속도 430km/hr, 영업운전속도 400km/hr이다. KTX 차량에 비해 축중이 가볍고, 10량 편성, 12량 편성 등 수요에 따른 편성이 가능한 장점을 지니고 있다[1]. 기존의 고속철도교량은 KTX를 기준으로 설계되었기 때문에 HEMU 차량 주행시 교량의 동적응답특성을 분석할 필요가 있다. 또한 두 차량이 병행할 경우를 대비하여 주요 지간장을 갖는 교량에 대한 동적응답특성을 분석할 필요가 있다.

Fryba[2,3], Kurihara 등[4], Yang과 동료 연구자들[5-9], Yang 등[10], Pan 등[11], Kwark 등[12], Yoshimura 등[13], Dinh 등[14,15] 등 수많은 연구자들이 고속철도교량의 동적응답에 대한 이론적인 연구를 수행하였다. 이들 연구 중에서 Yang등[7]은 단순지지된 보에 대해 공진과 소멸현상을 해석적으로 유도하였다. 소멸현상은 공진과 더불어 철도교량의 규칙적이고 반복적인 하중조건으로 인해 발생하는 현상이다. 물리적으로는 특정 조건하에서 개별 하중이 교량을 지나고 난 후 이로 인한 자유진동응답이 소거되는 현상을 의미한다. 소멸현상은 공진시 응답을 억제할 수 있기 때문에 초기 설계 단계에서 적용할 경우 최적 설계 지간장을 결정하는 데 활용할 수 있다. 단순보에 대해서는 이동하중 간격의 1.5배로 제한하였다. Yang등[8]은 탄성반침을 갖는 단순보에 공진과 소멸현상을 유도하였다. 탄성반침을 갖는 단순보는 탄성반침의 연직강성에 따라 그 지간장이 변화된다. 한국에서는 호남고속철도의 초기 설계 단계에서 공진시 소멸현상을 이용하여 지간장을 적용하려 시도한 바 있으며, 일

*Corresponding author.

Tel.: +82-31-9100-663, E-mail : chojr@kict.re.kr

©The Korean Society for Railway 2012

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2012.15.5.498>

본에서는 초전도자기부상열차의 야마나시 시험선로에서는 차량 중심간격이 24.3m이고 이로 인한 공진소멸을 위한 순지간장은 36.45m인 점을 고려하여 경간을 37.5m로 결정하여 시공되었다.

ERRI는 다양한 연구를 통해 Eurocode의 토대를 구축하였다[16]. ERRI의 연구 중 단순보를 대상으로 동적응답을 간단히 계산할 수 있는 몇가지 방법이 제시되어 있다. 차량하중을 이동하중으로 가정하는 방법 중에는 DER법, RIL법, 설계다이어그램법 등이 있다[17]. 이중 DER법과 RIL법은 공진시 응답을 근사적으로 예측할 수 있는 방법이다. 설계다이어그램법에서는 ETR Y500, ICE 2, Eurostar Capital Sets, Double Thalys2 등 4종의 고속철도차량과 0.5%, 1%, 2%, 4% 등 4종의 감쇠비, 5m~40m에서 선택된 10종의 교량 길이에 대해 설계다이어그램을 제공한다. 설계다이어그램은 교량 길이에 따라 미리 설정된 질량과 고유진동수를 갖는 기준계를 사전 계산을 통해 최대 변위와 최대 가속도 응답을 차량속도와 1차 고유진동수의 비로 나타낸 것이다. 임의 교량의 차량 속도별 최대 동적 응답은 설계다이어그램으로부터 차량 속도와 고유진동수의 비에 해당하는 최대응답값을 읽은 후, 해석대상교량의 질량과 고유진동수를 감안한 변환식을 적용하여 별도의 계산없이 구할 수 있다.

본 논문에서는 KTX와 HEMU 차량 주행시 단경간 단순지지교량의 간편한 동적 해석을 위한 ERRI 설계다이어그램을 제시하고, 이를 통해 교량의 동적응답특성과 설계시 고려사항을 분석하였다. 국내에서 많이 적용되는 25m, 30m, 35m, 40m 지간장을 갖는 단경간 단순지지 교량에 대해 KTX 및 HEMU 차량 주행시 설계다이어그램을 계산하였다. 이를 통해 선택된 4개 지간장 교량을 대상으로 각 열차하중에 대한 동특성을 분석하였다. 또한 공진시 가속도 응답을 만족하는 최소한의 단위길이당 질량을 지간길이, 차량유형, 감쇠비 등에 따라 제시하였고 설계시 고려사항을 분석하였다.

2. ERRI의 설계다이어그램[17]

ERRI의 설계다이어그램법에서는 ETR Y500, ICE 2, Eurostar

Capital Sets, Double Thalys2 등 4종의 고속철도차량과 0.5%, 1%, 2%, 4% 등 4종의 감쇠비, 지간장 5m~40m에서 선택된 10종의 교량 길이에 대상으로 최대변위, 최대가속도, 동적응답확대계수에 대한 설계다이어그램을 제공한다. 이들 설계다이어그램으로부터 속도별 최대변위, 최대 가속도, 동적응답확대계수를 별도의 계산없이 구할 수 있다. 본 논문에서는 최대변위 및 최대가속도에 주안점을 두고 기술하도록 한다.

설계다이어그램은 단순교량을 대상으로 열차하중(T), 교량길이(L), 감쇠비(ξ)에 따라 미리 설정된 단위길이당 질량(m)과 1차 고유진동수(f_1)를 갖는 기준계를 사전 계산을 통해 최대변위(u_{max})와 최대가속도(a_{max}) 응답을 차량속도(v)와 1차 고유진동수의 비(v/f_1)로 나타낸 다이어그램이다. Fig. 1은 $T=KTX$, $L=35m$, $\xi=1\%$ 인 경우의 설계다이어그램을 나타낸 것으로 사용된 기준계는 $m=27,000kg/m$, $f_1=3.5Hz$ 이다.

임의 교량의 차량 속도별 최대 동적 응답은 열차하중, 교량길이, 감쇠비가 동일한 설계다이어그램으로부터 v/f_1 에 해당하는 응답값을 읽은 후, 다음의 변환식을 통해 별도의 계산없이 구할 수 있다[17].

$$a_{max}\left(\frac{v}{f_1}; m, f_1, \xi^r, L^r, T^r\right) = \frac{m^r}{m} a_{max}^r\left(\frac{v}{f_1}; m^r, f_1^r, \xi^r, L^r, T^r\right) \quad (1)$$

$$u_{max}\left(\frac{v}{f_1}; m, f_1, \xi^r, L^r, T^r\right) = \frac{m^r}{m} \left(\frac{f_1}{f_1^r}\right)^2 u_{max}^r\left(\frac{v}{f_1}; m^r, f_1^r, \xi^r, L^r, T^r\right) \quad (2)$$

여기에서 위첨자 r 은 기준계를 의미한다. 식 (1)과 식 (2)은 최대가속도 및 최대변위 등의 최대응답이 열차하중, 지간장, 감쇠비, 단위길이당 질량, 1차 고유진동수가 주어진 상태에서 v/f_1 에 의존하고 있고 있다는 점을 나타내고 있다. 또한, 열차하중, 지간장, 감쇠비가 동일할 경우, 단위길이당 질량과 1차 고유진동수가 다른 시스템의 최대응답은 서로 변환가능함을 나타내고 있다. 예를 들어 $T=KTX$, $L=35m$, $\xi=1\%$, $m=25,000kg/m$, $f_1=3Hz$ 인 경우 $v=300km/hr$ 에서의 최대응답은 Fig. 1의 설계다이어그램을 통해 간단히 계산할 수 있다.

Fig. 1 Example of design diagram: $T=KTX$, $L=35m$, $\xi=1\%$, $m=27,000kg/m$, $f_1=3.5Hz$

$v=300\text{km/hr}=83.3\text{m/sec}$ 에서 $v/f_1=83.3/3=27.8\text{m}$ 이고, 이때의 기준계의 최대응답은 다이어그램으로부터 최대변위 4.04mm , 최대가속도 0.559m/sec^2 이다. 식 (1), (2)를 통해 변환하면 해석하고자 하는 시스템의 $v=300\text{km/hr}$ 에서의 최대응답은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$a_{\max} = \frac{m^r}{m} a_{\max}^r = \frac{27,000}{25,000} \times 0.559 = 0.604 \text{ m/sec}^2 \quad (3)$$

$$u_{\max} = \frac{m^r}{m} \left(\frac{f_1}{f_1} \right)^2 u_{\max}^r = \frac{27,000}{25,000} \left(\frac{3.5}{3} \right)^2 \times 4.04 = 5.94 \text{ mm} \quad (4)$$

한편 설계다이어그램으로부터 차량하중의 공진 특성을 이해할 수 있다. Fig. 1에서 관찰할 수 있듯이 KTX 차량의 경우 v/f_1 이 18.7m 일 때 공진이 발생함을 알 수 있으며, 18.7m 는 KTX 차량의 유효타격간격(d)이다.

3. HEMU와 KTX의 설계다이어그램

설계다이어그램은 교량의 속도별 최대동적응답을 간단하게 계산할 수 있을 뿐만 아니라 열차하중에 대한 교량의 동

적응답특성을 분석하는데도 사용될 수 있다. 이 절에서는 KTX와 차세대 고속철 차량인 HEMU에 대해 국내에서 단순지지교량 설계에 가장 많이 사용되는 4개 지간장에 대한 설계다이어그램을 제시하고 각 열차하중에 대한 교량의 동특성을 비교하였다.

Table 1와 Fig. 2는 KTX 및 HEMU 차량의 제원을 나타낸 것이다. KTX는 20량 편성이고, 축중은 170kN , 유효타격간격은 18.7m 이다. HEMU는 시제차량의 경우 6량 편성(HEMU-6)이고, 향후 다양한 편성이 예상되므로 10량 편성(HEMU-10), 12량 편성(HEMU-12) 등을 추가로 고려하였다. HEMU의 축중은 KTX에 비해 가벼운 140kN 이고, 유효타격간격은 24.3m 이다.

설계다이어그램으로는 국내에서 단순지지교량의 지간장으로 흔히 사용되는 25m , 30m , 35m , 40m 등 4개의 지간장을 선택하였다. Table 2와 같이 각 지간장에 대해 기준계를 ERRI 보고서[17]를 참조하여 설정하였다. 기준계의 질량과 고유진동수는 변환식인 식(1)과 식(2)의 기준이 되는 값으로 실교량에서 사용되는 대표값을 의미하는 것은 아니다. 감쇠비는 0.5% , 1% , 2% 를 고려하였다.

설계다이어그램 계산을 위해 지간당 20개의 보요소를 적용한 유한요소법을 사용하였다. 해석방법은 모드해석법이며

Table 1 KTX and HEMU trains

Train case	Arrangement of trains	d^* (m)	Wheel load (kN)	Total load (kN)	Total length (m)
KTX	P-M-16R-M-P	18.7	170	7820	387.19
HEMU-6	P-4M-P	24.3	140	3360	149.00
HEMU-10	P-8M-P			5600	246.20
HEMU-12	P-10M-P			6720	294.80

*: Effective beating distance

P : Power Car M : Motorized Trailer R : Passenger Car

P : Power Car M : Motorized Passenger Car

Fig. 2 KTX and HEMU trains

Table 2 Reference system for design diagram

Span L (m)	m (kg/m)	f_1 (Hz)
25m	20,000	4.5
30m	25,000	4.0
35m	27,000	3.5
40m	30,000	3.0

10개의 모드를 사용하였다. 각각의 시간이력해석을 v/f_1 를 0.1m 간격으로 40m까지 변화시키면서 수행하였으며, 각각의 해석 결과로 부터 최대변위와 최대가속도값으로 다이어그램을 계산하였다. 시간이력해석에서 총 해석 시간은 충분한 자유진동해석이 발생하도록 설정하였다. 해석간격 Δt 은 다음과 같이 결정하였다[17].

$$\Delta t = \min\left(\frac{l_E}{3v}, \frac{1}{8f_{\max}}\right) \text{ where, } f_{\max} = \max(30\text{Hz}, 1.5f_1, f_3) \quad (5)$$

여기에서 l_E 는 요소 길이이고, $f_{\max}$ 는 UIC CODE[18]에서 제안하는 현장실험 또는 해석을 수행하는 최대 진동수이다. 식 (5)는 개별 축중이 요소당 3회이상 타격되도록 하고, $f_{\max}$ 내에 있는 모드 함수를 8개 점으로 표현할 수 있을 정도로 해석간격을 설정한다는 의미이다. UIC CODE[18]에서 제안한 대로 $f_{\max}$ 까지의 진동수 대역을 포함하도록 $f_{\max}$ 를 Nyquist 주파수로 설정했을 때 $1/8f_{\max}$ 대신 $1/2f_{\max}$ 를 사용할 수 있으므로, 식 (5)에 사용된 해석간격은 엄밀한 시간간격이다.

Fig. 3은 KTX 차량에 대한 설계다이어그램을 나타내고 있다. KTX 차량의 경우 $L=25\text{m}$, 35m , 40m 인 경우 공진조건($v/f_1=18.7\text{m}$)에서 주변의 속도에 비해 큰 응답을 나타내며, 감쇠비가 커짐에 따라 공진시 응답이 급격히 감소함을 보이고 있다. 하지만 $L=30\text{m}$ 인 경우 공진조건에서 주변의 속도에 비해 상대적으로 응답이 덜 증폭됨을 알 수 있다. 그 이유는 $L=30\text{m}$ 가 공진소멸지간장인 $L=1.5d=28.05\text{m}$ 에 근접하기 때문이다. Fig. 4-6은 HEMU차량에 대한 차량편성에 따른 설계다이어그램을 나타내고 있다. HEMU 차량은 6량, 10량, 12량 등 편성된 차량의 수가 늘어남에 따라 응답의 커지며, 차량편성과 무관하게 $L=25\text{m}$, 30m , 40m 에서 공진조건($v/f_1=24.3\text{m}$)에서 응답이 증폭되는 것을 관찰할 수 있다. $L=35\text{m}$ 인 경우 공진소멸지간장($L=1.5d=36.45\text{m}$)에 근접하기 때문에 공진시 응답이 상대적으로 증폭되지 않는다. 동일한 지간장에서 차량하중을 비교할 경우 $L=25\text{m}$, 30m 일 경우 HEMU가, $L=35\text{m}$, 40m 인 경우 KTX 차량이 큰 응답을 나타낸다.

4. 가속도 설계 조건 분석

국내의 경우 철도설계기준[19]에서 고속철도교량의 주행 안전성을 위한 설계제한치로 자갈궤도의 경우 0.35g, 콘크리트궤도의 경우 0.5g로 교량 바닥판에서의 가속도를 제한

하고 있다. 또한 승차감 향상을 위해 처짐제한조건을 제시하며, 탈선 위험을 최소화하기 위해 궤도의 면틀림을 제한하고 있다. 일반적으로 정적설계를 만족하는 교량은 가속도의 제한규정이 설계시 만족해야하는 중요한 제한조건이 된다. 따라서 여기에서 이전 절에서 제시한 설계다이어그램을 바탕으로 주어진 4개 교량에 대한 설계시 고려사항을 도출하기로 한다.

고속철도 교량의 최대응답은 일반적으로 공진조건($v/f_1 = d$, where $d=18.7\text{m}$ for KTX, $d=24.3\text{m}$ for HEMU)에서 발생하게 된다. 식 (1)은 열차하중, 교량길이, 감쇠비가 동일한 조건하에서 v/f_1 이 같을 경우 두 시스템의 최대가속도는 질량비를 통해 환산할 수 있음을 의미한다. 따라서 $v/f_1=d$ 인 공진조건을 부과하여 임의의 단위길이당 질량을 갖는 교량의 공진시 최대가속도를 기준계의 공진시 최대가속도로부터 계산 가능하며 이 값은 공진을 허용하는 설계에서 설계 제한치보다 작아야 한다. 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$a_{\max}|_{v=f_1d} = \frac{m^r}{m} a'_{\max}|_{v=f_1d} \leq a_d \quad (6)$$

여기에서 a_d 는 자갈궤도의 경우 0.35g, 콘크리트궤도의 경우 0.5g이다[19]. m^r 은 설계다이어그램시 적용된 기준질량이고, $a'_{\max}$ 은 설계다이어그램 상에서 공진조건에서의 최대가속도이다. 따라서 식 (6)에서 가속도설계조건을 만족시키는 최소한의 질량을 계산할 수 있다. Table 3은 열차종류와 궤도 유형에 따라 설계속도 대역내에 공진속도가 존재하는 경우 가속도설계조건을 만족시키는 최소한의 단위길이당 질량을 정리하여 나타낸 것이다. HEMU 차량은 10량 편성(HEMU-10)만을 고려하였다.

Table 3에 의하면 지간길이 25m의 경우의 KTX와 HEMU 모두 다른 지간장에 비해 상대적으로 큰 단위길이당 질량이 필요하다. 따라서 25m 교량은 강성을 키워 설계속도 대역내에서 공진이 발생하지 않도록 설계하는 것이 경제적인 수 있다. Table 4는 설계속도의 1.1배내에서 공진을 회피할 수 있는 최소한의 고유진동수를 나타낸 것이다. 다시말하면 25m교량은 KTX 차량의 경우 5.72Hz, HEMU 차량의 경우 5.41Hz 등 공진을 회피할 수 있는 고유진동수 이상을 갖도록 설계하는 것이 유리하다. 30m 교량은 KTX 차량에 대해 공진소멸지간장 근방에 있으므로 HEMU 차량에 비해 경제적인 설계가 가능하다. 만약 HEMU 차량과 KTX 차량이 병행하여 주행하는 신설노선의 경우에는 Table 4에 주어진 고유진동수 이상을 갖도록 설계하여 공진을 회피하도록 하거나, Table 3에서 주어진 대로 HEMU 차량에 대한 최소한의 질량을 배치하도록 설계해야 한다. 또한 KTX 차량이 공진속도로 주행할 수 있도록 설계된 30m 기준교량의 경우 HEMU의 주행 안정성은 별도의 검토가 필요하다. 35m, 40m 지간장은 30m 지간장과는 반대로 HEMU 차량의 공진소멸지간장에 근접한다. KTX 차량에 대해 가속도 기준을 만족하고 있다면 HEMU 차량에 대해서도 기준을 만족하게 된다.

Fig. 3 Design Spectrums of KTX

Fig. 4 Design Spectrums of HEMU-6

Fig. 5 Design Spectrums of HEMU-10

Fig. 6 Design Spectrums of HEMU-12

Table 3 Required mass satisfying acceleration limit in case that operating speed exceeds resonance speed

Span L (m)	Damping ratio	$a_{\max}$ at resonance in reference system (m/sec)		Required m satisfying acceleration limit (kg/m)			
		KTX	HEMU	KTX		HEMU-10	
				Ballast track (0.35g)	Concrete track (0.5g)	Ballast track (0.35g)	Concrete track (0.5g)
25	0.5%	8.094	14.475	47,148	33,003	84,316	59,021
	1%	6.392	12.220	37,235	26,065	71,181	49,827
	2%	4.338	9.390	25,271	17,690	54,697	38,288
30	0.5%	2.582	5.482	18,798	13,159	39,914	27,940
	1%	1.982	4.577	14,433	10,103	33,328	23,329
	2%	1.332	3.501	9,698	6,788	25,491	17,844
35	0.5%	4.731	1.060	37,200	26,040	8,336	5,835
	1%	3.633	0.883	28,569	19,998	6,944	4,861
	2%	2.382	0.678	18,734	13,114	5,330	3,731
40	0.5%	3.288	1.477	28,729	20,110	12,905	9,034
	1%	2.527	1.292	22,077	15,454	11,287	7,901
	2%	1.643	1.000	14,359	10,051	8,741	6,119

Table 4 Minimum natural frequencies avoiding resonance

Trains	Design speed, v_d (km/hr)	d (m)	$f_{1,\min} = 1.1v_d/d$ (Hz)
KTX	350km/hr	18.7m	5.72Hz
HEMU	430km/hr	24.3m	5.41Hz

5. 결 론

본 논문에서는 단경간 단순지지교량을 대상으로 KTX와 HEMU 차량 주행시 동적특성을 ERRI 설계다이어그램을 통해 분석하였다. 국내에서 많이 적용되는 25m, 30m, 35m, 40m 지간장을 갖는 단경간 단순지지 교량에 대해 KTX 및 HEMU 차량 주행시 설계다이어그램을 계산하였다. 설계다이어그램은 휨모드만을 고려하기 때문에 1차 비틀고유진동수가 1차 휨고유진동수보다 작거나 근접하는 경우에는 적용이 불가능하다. 또한 교량 길이가 짧은 경우 궤도 구조를 따라 차량 하중이 종방향으로 분포되는 효과를 반영할 수 없기 때문에 응답을 과대평가할 수 있다. 하지만 이 연구에서도 출된 설계다이어그램은 교량의 초기 설계 단계에서 별도의 계산없이 속도별 응답을 산정하는 데 적용할 수 있기 때문에 실무에서 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 공진시 가속도 응답을 만족하는 최소한의 단위길이당 질량을 지간길이, 차량유형, 감쇠비 등에 따라 제시하였고 이를 통해 설계시 고려사항을 논의하였다. 25m 교량은 공진을 허용할 경우 가속도 응답을 만족하기 위해 KTX와 HEMU 차량 모두 다른 지간장에 비해 상대적으로 큰 단위길이당 질량을 필요로 하기 때문에 설계속도 대역내에서 공진이 발생하지 않도록 설계하는 것이 경제적이다. 30m 교량은 공진

속도로 주행시 KTX 차량에 대해 유리하지만 HEMU 차량에 대해 불리하다. 따라서 KTX 차량에 대해 설계된 기존 30m 교량은 별도의 동적검토가 필요할 수 있다. 반면에 35m 및 40m는 공진시 HEMU 차량에 대해 유리한 지간장이므로 KTX 차량에 대해 가속도 기준을 만족하고 있다면 HEMU 차량 역시 기준을 만족한다. 이러한 분석 결과는 초기 설계 단계에서 유용하게 적용가능하다.

후 기

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(하이브리드 사장교 설계 및 시공시스템 기술 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Korea Institute of Construction Technology (2012), , Research on Competitive Engineering for Railway Construction: Bridge, Research Report(Draft) (in Korean).
- [2] L. Fryba (1971) Vibration of solids and structures under moving loads. Groningen, The Netherlands: Noordhoff International Publishing.
- [3] L. Fryba (2001) A rough assessment of railway bridges for high speed trains, *Engineering Structures*, 23, pp. 548-556.
- [4] M. Kurihara, T. Shimogo (1978) Vibration of an elastic beam subjected to discrete moving loads, *Journal of Mechanical Design*, 100(7), pp. 514-519.
- [5] Y.B. Yang, B.H. Lin (1995) Vehicle-bridge interaction analysis by dynamic condensation method, *Journal of Structural Engineering*, 121(11) pp. 1936-1643.

- [6] Y.B. Yang, J.D. Yau (1997) Vehicle-bridge interaction element for dynamic analysis, *Journal of Structural Engineering*, 123 (11), pp. 1512-1518.
- [7] Y.B. Yang, J.D. Yau, L.C. Hsu (1997) Vibration of simple beams due to trains moving at high speeds, *Engineering Structures*, 19(11), pp. 936-944.
- [8] Y.B. Yang, C.L. Lin, J.D. Yau, D.W. Chang (2004) Mechanism of resonance and cancellation for train-induced vibrations on bridges with elastic bearings, *Journal of Sound and Vibration*, 269(1-2), pp. 345-360.
- [9] Y.B. Yang, J.D. Yau, Y.S. Wu (2004) Vehicle-bridge interaction dynamics: with applications to high-speed railways, World Scientific.
- [10] F. Yang, G.A. Fonder (1996) An iterative solution method for dynamic response of bridge-vehicle systems, *Earthquake Engineering and Structure Dynamics*, 25(2), pp. 195-215.
- [11] T.C. Pan, J. Li, Dynamic vehicle element method for transient response of coupled vehicle-structure systems, *Journal of Structural Engineering*, 128(2), pp. 214-223.
- [12] J.W. Kwark, E.S. Choi, Y.J. Kim, B.S. Kim, S.I. Kim (2004) Dynamic behavior of two-span continuous concrete bridge under mobbing high-speed train, *Comput. Struct.*, 82, pp. 463-474.
- [13] A. Yoshimura, M. Miwa, Y. Kawasaki (2008) Study on numerical simulation methods of the railway vehicle-track dynamic interaction, *PAMM*, Vol. 8, pp. 10833-10834.
- [14] V.N. Dinh, K.D. Kim, P. Warnitchai (2009) Dynamic analysis of three-dimensional bridge-high-speed train interactions using a wheel-rail contact model, *Engineering Structures*, 31(12), pp. 3090-3106.
- [15] V.N. Dinh, K.D. Kim, P. Warnitchai (2009) Simulation procedure for vehicle-substructure dynamic interactions and wheel movements using linearized wheel-rail interfaces, *Finite Elements in Analysis and Design*, 45(5), pp. 341-356.
- [16] J.M. Goicolea, J. Dominguez, J.A. Navarro, F. Gabaldon (2002) New dynamic analysis methods for railway bridges in codes IAPF and EUROCODE 1, *Railway Bridges, Design, Construction and Maintenance*, Madrid.
- [17] ERRI D214 committee (1999) Calculations for bridges with simply-supported beams during passage of train, ERRI D 214/ RP 6.
- [18] UIC(2009), UIC CODE 776-2, 2nd edition
- [19] Korea Railway Network Authority (2011), Design Criteria for Railroad : Road Bed, (in Korean).

접수일(2012년 8월 28일), 수정일(2012년 9월 23일),
게재확정일(2012년 10월 5일)

Jeong-Rae Cho : chojr@kict.re.kr

Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea

Keunhee Cho : kcho@kict.re.kr

Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea

Jong-Won Kwark : origilon@kict.re.kr

Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea

Young Jin Kim : yjkim@kict.re.kr

Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea