

고속전철차량모형화에 따른 교량의 동적거동에 관한 연구

Study on Dynamic Responses of Bridges Using High-speed Railway Vehicle Models

김 상 효*
Kim, Sang-Hyo

박 흥 석**
Park, Hung-Suk

허 진 영***
Huh, Jin-Young

요 지

본 연구에서는 고속철도에서 차량·교량 구조물의 상호작용을 가능한 정밀하게 취급할 수 있는 3차원 해석모형을 개발하였다. 경부고속철도 교량형식인 PSC 박스거더 교량을 40 m 단순교와 25-40-25 m 3경간 연속교에 대해 뼈대요소를 사용하여 3차원으로 모형화하였으며, 궤도의 불규칙성은 정상확률과정으로 가정하고, 지수스펙트럴 밀도함수를 사용하여 궤도의 형상을 생성시켰다. 열차는 경부고속철도차량중 하중효과가 가장 큰 동력차만을 대상으로 17 자유도 모형과 38 자유도 모형으로 분리하여 개발하였다. 다양한 조건에 대한 분석결과를 검토하면 여러 가지 상황에서 38 자유도 모형의 필수성이 보여지고 있다. 특히 교량의 솟음 및 장기처짐에 의한 궤도형상변화가 있는 경우에는 반드시 38 자유도 모형이 적용되어야 하는 것으로 분석되었다. 또한 제동하중이 작용할 때 슴림효과에 의한 영향이 큰 것으로 평가되어, 제동에 의한 교량의 동적거동은 종변위에 대한 자유도를 고려할 수 있는 주행차량모형으로 해석되어야 함이 규명되었다.

핵심용어 : 고속전철차량, 동력차, 동적거동, 슴림효과

Abstract

In this study, to investigate a better analytical model for the estimation of the dynamic responses of high-speed railway bridges to moving vehicles, the high-speed railway vehicle (power car of K-TGV) is modeled as either 17- or 38-degree of freedom system and the results from two different vehicle models are compared in various traffic and track conditions. The bridges of prestressed concrete box girder (40m simple span and 25-40-25m 3-span continuous types) are modeled with 3 dimensional frame elements. Track irregularity is assumed to be a stationary random process based on the given spectral density function. Based on the results of this study, the superiority and necessity of the 38-degree of freedom model is proven, especially when the train is traveling at high speed on the bridges with the camber or creep deflection, or the track roughness. The overturning effect of the car body due to the braking friction of wheels is found to be remarkable.

Keywords : high-speed railway vehicle, power car, dynamic response, overturning effect

* 정회원 · 연세대학교 사회환경·건축공학부, 교수

** 한국건설기술연구원, 토목연구부 구조안전그룹장, 선임연구원

*** 연세대학교 토목공학과, 박사과정

· 이 논문에 대한 토론을 2000년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2000년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

철도는 여객과 화물의 수송효율이 도로보다 8배 정도 높기 때문에 국토가 협소한 우리나라 일본, 유럽 등지에서 중요한 운송수단이 되어 왔다. 그리고 고속철도는 에너지 효율이 2.5~4.2배나 좋은 첨단교통수단이므로 최근 신간선, TGV, ICE 등 고속철도의 상용화를 계기로 국내에서도 고속철도가 도입되고 있는 실정이다. 하지만 작년에 발생하여 100여명의 사망자를 낳은 독일의 ICE 사고로 인해 고속전철의 안전성에 대한 기술개발 필요성이 대두되고 있으며, 이로 인해 철도교에 대한 고급기술 축적이 시급히 요구되고 있다. 주행열차에 의한 철도교의 동적영향을 평가하는 분야의 연구는 19C 중반부터 연구되어 왔으며, 최근에는 철도차량 제작기술과 컴퓨터 기술의 발달로 인해 보다 다양하고 정밀한 해석이 수행되고 있다. 교량과 열차의 상호작용 효과를 고려한 교량의 동적거동을 연구할 때 열차하중은 크게 주행하중, 주행질량 및 주행차량의 3가지로 모형화될 수 있다. 1979년 Chu 등은 4축 기관차를 11 자유도로 모형화하여, 한 대 또는 일련의 일반 철도차량이 통과하는 동안 거더교와 트러스교의 동적거동을 해석하였다¹⁾. 1980년 Garivaltis 등은 6축 화물기관차를 39자유도로 모형화하여 차량의 동적응답에 관해 연구하였다²⁾. 1985년 Garg 등은 화차를 21자유도로 모형화하여 차량/궤도/교량

의 상호작용으로 인한 강트러스 철도교 부재의 동적응답을 연직방향 및 횡방향의 궤도불규칙성, 접근로의 궤도상태 및 교량감쇠 효과에 대해 연구하였다³⁾. 1991년 Wang 등은 화차모형을 23자유도로 개선하여 강트러스 철도교의 동적거동에 관해 연구하였다⁴⁾.

주행열차에 의한 철도교의 동적분석에서는 주행열차의 모형화기법이 매우 중요하나, 모형이 너무 사실적인 측면에 중점을 두어 이루어지면 해석과정이 복잡해지고 과도한 계산량이 요구되므로, 분석하고자 하는 열차나 동적응답의 특성에 따라 합리적인 수준의 모형화가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 한국형 고속전철의 기관차를 17과 38자유도로 모형화하여 비교·분석함으로써 합리적인 열차모형화 방안을 제시하고자 한다. 대상교량으로는 단경간 PSC 박스거더 교량을 빼대요소를 사용하여 3차원으로 모형화하였으며, 궤도는 FRA에서 제시한 각각의 등급으로 형상을 모형화하였으며 교량의 솟음과 장기처짐에 의한 수직변위의 변화도 고려하였다.

2. 철도교량의 동적해석을 위한 모형화

2.1 교량의 모형화

본 연구에서는 경부고속전철 주 교량형식인 PSC 박스거더 교량을 연구대상 교량으로 선정하여, 고속 주행하중을 받는 교량의 동적거동을 분석하였다. PSC 박스거더 교량의 형식은 그림 1(a)와 같은 40m 단

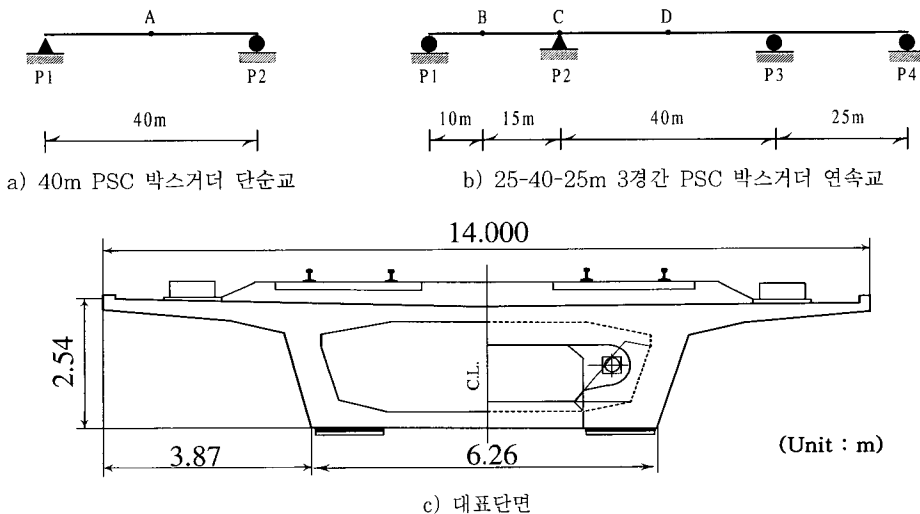


그림 1 연구대상 PSC 박스거더 교량의 제원

순교와 그림 1(b)와 같은 25-40-25m 3경간 연속교를 선정하였다. 변단변을 가진 PSC 박스거더 교량의 대표단면은 그림 1(c)에 나타내었다. 사용된 교량의 폭은 14m이고, 복선을 가진 유도상교량이다. 해석모형에서는 휨, 전단, 비틀림 모두를 파악할 수 있고 교량을 보요소가 강결절점에 의하여 상호 연결된 것으로 근사화하는 3차원 뼈대요소모형을 사용하였다. 교량의 횡방향요소는 4m간격으로 배치하였으며 종방향요소는 박스단면의 현치부를 고려하여 보다 합리적으로 나타낼 수 있도록 배치하였다. 교량의 질량은 일관성질량(consistent mass)으로 모형화하였다. 그리고 교량의 감쇠는 Rayleigh 감쇠로 모형화하였으며, 감쇠비는 2%를 사용하여 교량의 동적특성을 분석하였다. 사용된 철근콘크리트의 단위중량은 2.5t/m³이다. 그림 2에는 이러한 PSC 박스거더 교량을 3차원 뼈대요소로 모형화한 것을 나타내었다.

고속주행하중을 받는 철도교의 동적거동을 분석하기 위한 본 연구에서는, 40m PSC 박스거더 단순교(그림 1-a)의 지간중양점(A) 및 3경간 연속교(그림 1-b)의 B, C, D에서 휨모멘트에 대한 증폭계수를 분석하였다. 또한 단순교에서 제동하중이 작용될 경우 종방향 반력은 P1 지점부에서 계산하였다.

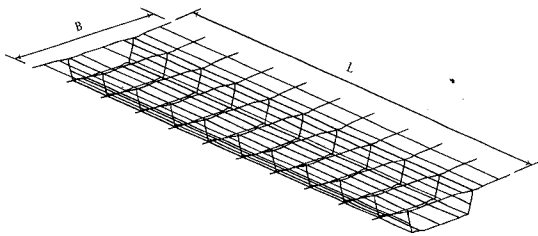


그림 2 PSC 박스거더 교량의 모형화

2.2 궤도형상 모형화

궤도형상(geometry)은 레일차량의 주요한 동적 영향인자이다. 차량-궤도 상호작용을 연구하고 차량 거동을 예측하기 위해서는, 궤도 형상과 궤도불규칙성에 대한 해석적 모형화가 요구된다. 이러한 모형화는 궤도의 품질, 차량성능, 승객 쾌적, 적재손상을 평가하는데도 필요하다. 공용중인 궤도를 완벽하게 해석적 모형으로 재현한다는 것은 불가능하므로,

통계적 모형을 사용하는 것이 바람직하다.

철도차량-궤도의 상호작용을 연구하기 위해 궤도는 정량적으로 기술되어야 하는데, 일반적으로 다음 4가지 불규칙성이 궤도형상을 정의하는데 사용된다.

- ① gauge($2\xi_g$) : 레일 사이의 수평거리
- ② crosslevel($2\xi_c$) : 두 레일의 높이차
- ③ alignment(ξ_a) : 레일의 횡방향 위치의 평균 (중양선이라고도 함)
- ④ vertical profile(ξ_v) : 두 레일 높이의 평균

x, y, z 좌표계의 향으로 이러한 불규칙성을 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \xi_v &= \frac{z_1 + z_2}{2}, & \xi_c &= \frac{z_1 - z_2}{2} \\ \xi_a &= \frac{x_1 + x_2}{2}, & \xi_g &= \frac{x_1 - x_2}{2} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, 첨자 1, 2는 각각 우측과 좌측 레일을 나타낸다. 4개의 궤도불규칙성은 궤도에 따른 거리 y 의 함수로 고려된다. 즉, $\xi = \xi(y)$. 이렇게 불규칙성의 향을 궤도좌표로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} z_1 &= \xi_v + \xi_c, & z_2 &= \xi_v - \xi_c \\ x_1 &= \xi_a + \xi_g, & x_2 &= \xi_a - \xi_g \end{aligned} \quad (2)$$

3.0~304.8m 범위의 파장에 대해 Hamid 등에 의해 개발되어 미국 FRA(Federal Railway Association)에 규정된 궤도불규칙성에 대한 PSD (power spectral density)함수 $S(\phi)$ 는 다음과 같다⁵⁾.

- vertical profile과 alignment 불규칙성에 대한 PSD 함수 :

$$S(\phi) = \frac{A\phi_2^2(\phi^2 + \phi_1^2)}{\phi^4(\phi^2 + \phi_2^2)} \quad (3)$$

- cross level과 gage 불규칙성에 대한 PSD 함수 :

$$S(\phi) = \frac{A\phi_2^2}{(\phi^2 + \phi_1^2)(\phi^2 + \phi_2^2)} \quad (4)$$

표 2 FRA 궤도등급에 따른 지수스펙트럴 밀도함수의 매개변수값

불규칙성	매개변수	궤도등급					
		1	2	3	4	5	6
궤간 틀림	A	9.83	5.51	3.15	1.77	0.98	0.59
	ϕ_1	29.2					
	ϕ_2	23.3					
수평 틀림	A	4.52	3.15	2.16	1.38	0.98	0.59
	ϕ_1	23.3					
	ϕ_2	13.1					
고저 틀림	A	15.53	8.85	4.92	2.75	1.57	0.98
	ϕ_1	23.3					
	ϕ_2	13.1					
줄 틀림	A	9.83	5.51	3.15	1.77	0.98	0.59
	ϕ_1	32.8					
	ϕ_2	18.4					

(단위) $A : 10^8 \times m^2 \cdot c/m$,

$\phi_1 : 10^3 \times c/m$, $\phi_2 : 10^2 \times c/m$

여기서, ϕ_1 와 ϕ_2 는 굴절(break) 파수, ϕ 는 파수이고 A 는 조도 매개변수이다.

표 1에는 FRA의 6개 궤도등급에 따른 이러한 계수값을 4가지 궤도불규칙성에 대해 나타낸 것이다. 여기서 6등급은 가장 좋은 궤도의 상태, 1등급은 가장 안 좋은 상태를 나타낸다. 노면형상은 모의 발생기법을 이용하여 생성하였으며, 사용된 식은 다음과 같다.

$$R_z(y) = \sum_{i=1}^N C_i \cos(2\pi\phi s + \theta_i) \quad (5)$$

여기서 $C_i = \sqrt{4S(\phi) \cdot \Delta t}$, θ_i 는 위상각($0, 2\pi$)으로 균등분포(uniform distribution)를 가진 확률변수이다. 또한 본 연구에서는 교량의 솟음과 장기처짐에 의해 형상이 변화된 궤도를 열차가 고속주행할 경우를 분석하기 위해 궤도형상을 모형화하였다. 솟음과 장기처짐에 의한 궤도의 연직방향 형상은 식 6에 의해 모형화하였다⁶⁾.

$$z(y) = A_s \sin \pi \left(y + \frac{1}{2k_s} \right) \quad (6)$$

여기서, A_s 는 지간 중앙점의 최대변화량이며, k_s 는 발생구간관련 매개변수로서 $1/k_s$ 은 교량의 지간을 나타낸다.

3. 고속전철차량의 자유도에 따른 모형화

본 연구에서는 고속전철차량 중 교량의 거동에 가장 영향이 큰 동력차를 모형화하였다. 동력차의 질량요소는 1개의 차체, 2개의 동력차대차 및 4개의 윤축장치로 구성되어 있으며, 동력객차는 동력객차대차와 객차대차에 의해 지지된다. 객차는 2개의 객차대차에 의해 지지되며, 모든 대차는 2개의 윤축장치로 그 하중을 전달한다. 표 2에는 경부고속철도 차량의 질량요소별 특성값을 나타내었는데, 무게중심높이는 레일두면에서의 높이이다⁷⁾. 동력차의 첫 번째 축과 마지막 축 사이의 거리는 17 m 이고, 동력객차대차와 객차대차의 중심간 거리는 18.7 m 이며, 모든 대차내 진후축간거리는 3 m 이다.

표 2 경부고속철도차량의 질량요소별 특성값

질량요소	중량 (Mg)	무게 중심 높이 (m)	관성모멘트 ($Mg \cdot m^2$)		
			I_x	I_y	I_z
동력차 차체	54.916	1.72	1131.9	59.4	1112.0
동력차대차	2.446	0.56	2.593	1.645	3.068
동력차대차 윤축장치	2.048	0.46	0.11	1.03	1.03

대차의 현가장치는 윤축장치와 대차 사이에 설치된 1차 현가장치(primary suspension)와 대차와 차체 사이에 설치된 2차 현가장치(secondary suspension)로 구성되어 있다. 1차 현가장치의 기능은 주행시 차륜과 레일의 접촉에 따른 충격, 진동 및 불균일성을 흡수하고, 열차의 중량을 윤축에 균등히 전달하는 것이다. 2차 현가장치는 대차와 관련된 차체의 움직임을 감소시킴으로써 차체를 안정시키고, 차체의 중량을 대차에 전달한다.

1차 현가장치는 견인 및 제동력을 전달하기 위한 축상(axle box)당 2개의 고무로 된 가이드스프링과

1세트의 코일스프링 및 수직오일댐퍼로 구성되어 있다. 2차 현가장치는 가로대가 없는(bolsterless) 형식으로 코일스프링과 탄성베어링의 조합과 수직오일댐퍼, 좌우오일댐퍼 및 요댐퍼로 구성되어 있다. 차체와 대차간 연결부는 견인 및 제동력을 전달하기 위한 견인링크(종방향 등가스프링)와 좌우 횡방향운동을 제한하기 위한 고무스토퍼(bump stop)로 구성되어 있다. 표 3에는 경부고속철도차량 중 동력차의 현가장치 특성값을 나타내었다⁷⁾.

표 3 경부고속철도차량 중 동력차의 현가장치 특성값

대차종류	스프링계수 (MN/m)	감쇠계수 (MN · s/m)
동력차 대차	$K_{px} = 9.0$	$D_{px} = 0.01$
	$K_{py} = 40.0$	$D_{py} = 0.022$
	$K_{pz} = 1.225$	$D_{pz} = 0.01$
	$K_{sx} = 0.302$	$D_{sz} = 0.02$
	$K_{sy} = 0.302$	$D_{sx} = 0.03$
	$K_{sz} = 1.268$	$D_{yaw} = 4.23$
	$K_{sey} = 10.29$	

3.1 17 자유도 모형화

열차의 연직방향 거동에는 횡방향 및 종방향 운동의 영향이 작다는 가정하에 2개의 동력차대차를 가진 K-TGV 동력차를 연직변위와 피칭, 롤링만을 고려하여 모형화하였다. K-TGV 동력차의 강체질량은 1개의 차체질량 (m_c), 2개의 대차질량 (m_{ti})

및 4개의 윤축장치질량 (m_{ai})으로 나타내었다. 차체에는 연직변위 (z_c), 피칭 (θ_c) 및 롤링 (ϕ_c)을 고려하였고, 2개의 전후대차에도 각각 연직변위 (z_{ti}), 피칭 (θ_{ti}) 및 롤링 (ϕ_{ti})을 고려하였다. 4개의 윤축장치에는 각각 연직변위 (z_{ai}) 및 롤링 (ϕ_{ai})만을 고려하여, K-TGV 동력차의 전체 자유도 수는 17이다. 열차모형과 자유도는 그림 3에 나타내었으며, 식 7과 같은 운동에너지 (T), 위치에너지 (V) 및 분산에너지 (D)에 의한 Lagrange 방정식을 사용하여 운동방정식을 유도하였다.

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right] + \frac{\partial V}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \quad (7)$$

3.2 38 자유도 모형화

경부고속철도의 도입으로 고속으로 통과하는 열차에 의한 동적거동해석이 필수적으로 대두됨에 따라, 본 절에서는 보다 정밀하게 열차하중을 모형화하여 17자유도 모형에서 고려되지 않은 동적응답의 변화를 분석하였다. 즉, 연직변위, 피칭, 롤링 뿐만 아니라 횡변위, 종변위 및 요잉에 의한 운동효과도 동시에 고려할 수 있도록 열차를 모형화하였다. K-TGV 동력차의 강체질량은 17 자유도 모형과 같이 1개의 차체질량 (m_c), 2개의 대차질량 (m_{ti}) 및 4개의 윤축장치질량 (m_{ai})으로 나타내었다. 차체에는 연직변위 (z_c), 횡변위 (x_c), 종변위 (y_c), 피칭 (θ_c), 롤링 (ϕ_c) 및 요잉 (φ_c)을 고려하였고, 2개

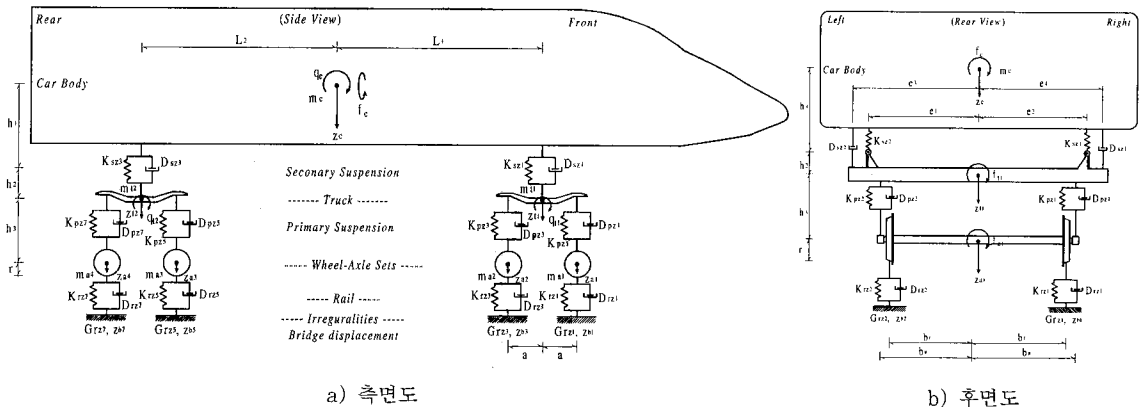


그림 3 17 자유도 열차모형

의 전후대차에도 각각 연직변위 (z_{ti}), 횡변위 (x_{ti}), 종변위 (y_{ti}), 피칭 (θ_{ti}), 롤링 (ϕ_{ti}) 및 요잉 (φ_{ti})을 고려하였다. 4개의 윤축장치에는 각각 연직변위 (z_{ai}), 횡변위 (x_{ai}), 종변위 (y_{ai}), 롤링 (ϕ_{ai}) 및 요잉 (φ_{ai})만을 고려하였다. 차륜의 회전만으로 인해 발생하는 차체의 동적응답은 미미하므로 윤축장치에서의 피칭에 대한 자유도를 고려하지 않았다. 즉, 차체와 대차에는 각각 6개의 자유도, 윤축장치에는 5개의 자유도가 할당되어, K-TGV 동력차의 전체 자유도 수는 38이다. 이러한 38 자유도의 열차모형과 자유도를 그림 4에 나타내었다.

3.3 제동 모형

열차가 등속주행할 때는 회전마찰에 의해 차륜에서 교량으로 전달되는 종방향력의 크기가 매우 작은 편이다. 그러나 제동이 작용할 경우, 즉 속도가 변하게 될 때에는 종방향력이 커지게 된다. 이 경우 열차의 제동에 요구되는 상당한 크기의 마찰력이 차

륜과 레일 사이에서 작용한다. 일반적으로 마찰계수는 정지의 경우에 최대값을 취하고, 차량속도가 커짐에 따라 점차로 감소하는 것으로 알려져 있다.

열차 제동의 영향으로 차륜과 궤도사이의 마찰이 발생하며, 이는 결국 열차 주행방향과는 반대방향으로 교량에 작용하게 된다. 이때 발생하는 마찰력은 마찰계수와 윤하중에 비례한다. 마찰에 의해 발생하는 종방향력은 식 8과 같이 열차의 관성력으로 작용하게 되고, 속도의 감소로 나타나게 된다.

$$F_B(v) = F_i \mu(v) \tag{8}$$

$$= ma$$

여기서, a 는 마찰력에 의해 발생하는 종방향 가속도, v 는 열차의 종방향속도이며 F_i 는 열차의 동윤중이고, $\mu(v)$ 는 다음과 같다⁸⁾.

$$\mu(v) = 0.326 \frac{1 + 0.279 v}{1 + 0.369 v} \tag{9}$$

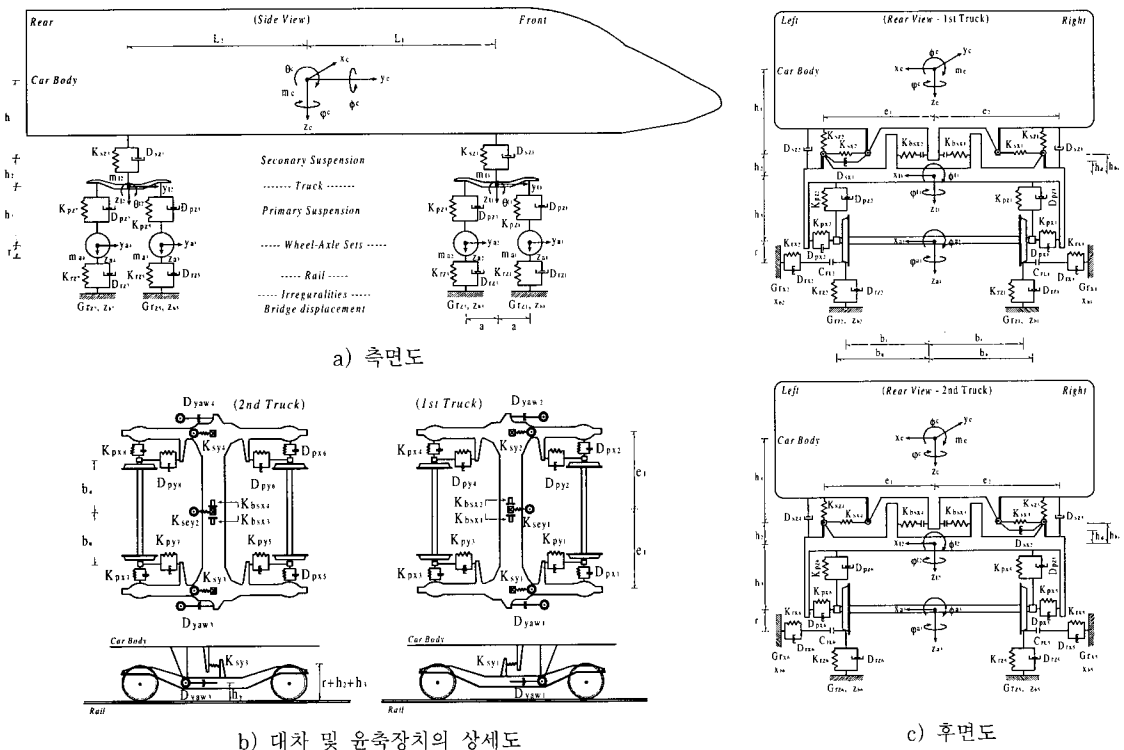


그림 4 38 자유도 열차모형

3.4 교량과 열차의 상호작용력

교량과 열차 사이의 상호작용에 의한 차륜과 교량 사이의 상호작용력은 궤도의 스프링강성 및 감쇠와 상대변위의 함수가 되며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{ii}(t) = K_{ii} \cdot u_{ii} + D_{ii} \cdot \dot{u}_{ii} \quad (10)$$

여기서, $F_{ii}(t)$ 는 상호작용력, K_{ii} 는 궤도의 스프링 강성이고 D_{ii} 는 궤도의 감쇠이다. u_{ii} 는 차륜과 교량 사이의 상대변위이고 식 11과 같이 표현된다.

$$u_{ii} = z_i - (z_{bi} + G_n) \quad (11)$$

여기서, z_i 는 i 번째 차륜의 연직변위이고, z_{bi} 는 교량의 연직변위이다. \dot{u}_{ii} 는 시간에 대한 변위의 미분으로 상대속도를 나타낸다.

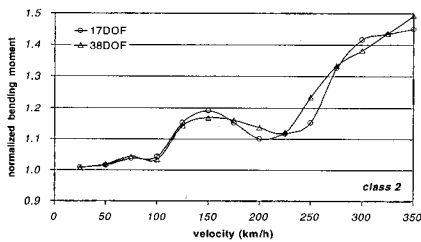
4. 차량모형에 따른 철도교 동적거동분석

4.1 궤도등급 변화에 따른 교량의 동적거동

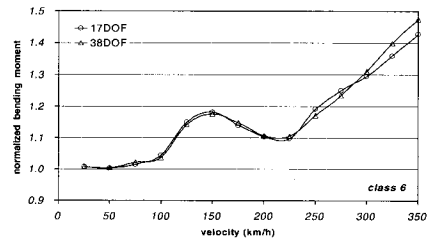
궤도의 불규칙성은 교량의 동적응답에 영향을 주는 중요한 인자중의 하나이다. 따라서 본 절에서는 각각 다른 자유도에 의해 모형화된 차량에 의한 궤도

불규칙성의 변화에 따른 교량의 동적증폭계수를 분석하였다. 대상교량은 PC 박스교(지간 40 m)이고, 지간 중앙점의 휨모멘트에 대한 증폭계수를 속도에 따라 나타내었다. 비교대상 궤도등급은 궤도불규칙성이 전혀 없는 완전평탄궤도와 FRA 기준으로 가장 좋은 상태를 나타내는 6등급 궤도와 상태가 아주 좋지 않은 2등급 궤도를 선정하였다. FRA에서 제시한 궤도등급의 제한 속도가 고속전철에 적용하기엔 현실적으로 부적절한 면이 있으나, 현재까지 고속전철에서의 궤도불규칙성에 대한 모형화방법이 규명되지 않고 있으며 또한 본 논문은 차량의 동적거동을 파악하여 보다 개선된 차량모형을 제시하는데 목적이 있으므로 이를 위한 매개변수연구를 위해 현재 가장 많이 쓰이고 있는 FRA의 궤도등급을 사용하였다.

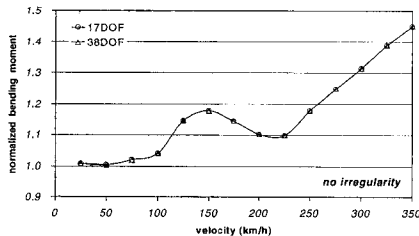
자유도 모형에 따른 각 궤도등급별 교량동적거동의 차이는 그림 5에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 주행속도가 고속일 때 38 자유도 모형과 17 자유도 모형은 궤도등급에 따라 현격한 차이를 나타내고 있다. 즉, 상태가 매우 좋은 궤도에서는 자유도 모형에 따른 차이가 크게 발생되지 않지만, 궤도의 상태가 상대적으로 좋지 않은 6등급 궤도에서는 300 km/h 이상의 고속에서 자유도 모형에 따른 차이가 발생되고 있다. 또한 상태가 아주 나쁜 2등급 궤도의 경우, 38 자유도 모형이 고속부에서



a) 2등급 주행조건

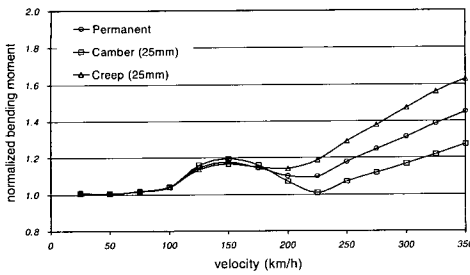


b) 6등급 주행조건

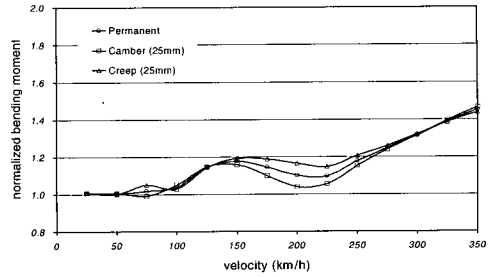


c) 평탄 주행조건

그림 5 궤도등급별 휨모멘트의 증폭계수



a) 17 자유도 열차모형



b) 38 자유도 열차모형

그림 6 솟음과 장기처짐에 의한 휨모멘트의 증폭계수

전반적으로 큰 동적거동을 보이고 있으며 반면, 17 자유도 모형은 상대적으로 불안정한 동적거동을 보여 주고 있다. 즉, 고속영역에서 궤도상태의 변화를 38 자유도 모형은 잘 반영하고 있지만, 17 자유도 모형은 충분히 반영하지 못하는 것으로 판단되었다. 이것은 차량 모형화 기법상 고려되는 자유도의 한계 때문인 것으로 분석되며, 특히 17 자유도 모형에선 차량의 종방향과 횡방향으로 있는 스프링과 감쇠를 고려되지 못함으로 인해 피칭이나 롤링에 대해 38 자유도 모형에 비해 불안정하게 나타난 것으로 판단된다. 따라서 100~130 km/h의 주행속도를 가진 기존 열차는 17 자유도로 모형화를 해도 상관 없지만, 300 km/h에 이르는 고속철도에서는 38 자유도로 모형화할 필요성이 있는 것으로 판단된다.

4.2 솟음과 장기처짐에 의한 교량의 동적거동

본 절에서는 교량의 솟음과 장기처짐에 의해 변화된 궤도형상에 대한 동적거동을 분석하였다. 대상교량은 40 m PSC 박스거더 단순교이며, 25 km/h에서 350 km/h까지 25 km/h 간격으로 속도를 증가시키면서 등속주행시켰다. 교량의 솟음에 의한 궤도형상은 최대솟음량이 25mm가 되도록 연직상향으로 발생시켰다. 또한 솟음과 같은 크기의 장기처짐을 가정하여 연직하향으로 발생시켰으며, 궤도의 불규칙성은 반영하지 않았다. 그림 6에는 교량의 솟음과 장기처짐에 의해 궤도형상이 변화된 경우의 시간중앙점의 휨모멘트에 대한 증폭계수를 나타내었다. 38 자유도 모형은 솟음량에 따라 증폭계수가 큰 차이를 나타내지 않지만, 17 자유도 모형은 차이가 크게 발생함을 볼 수 있다. 즉, 38 자유도 모형은 솟음과 같은 완만

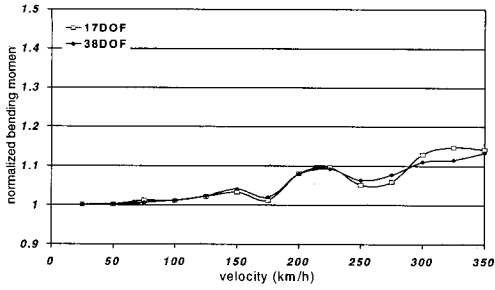
한 궤도형상변화에는 민감하지 않아 솟음량에 따른 변화가 크지 않지만, 17 자유도 모형은 솟음량에 따른 변화가 크게 발생하고 있다. 결과적으로 38 자유도 열차모형은 궤도의 전반적인 형상에 대해 동적거동이 매우 안정적인데 비해 17 자유도 열차모형은 불안정한 동적거동특성을 보이고 있다. 따라서 교량의 솟음과 장기처짐에 의해 변화된 궤도형상과 같이 긴 파장을 가지는 가지는 궤도형상에는 38 자유도 모형이 사용되어야 할 것으로 판단된다.

4.3 연속교의 동적거동

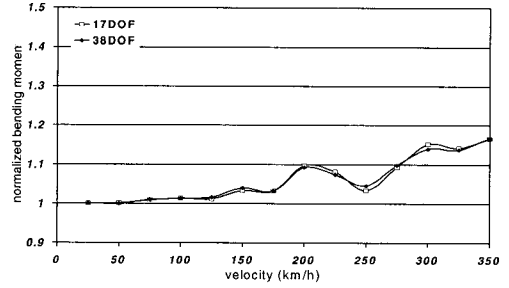
본 절에서는 실제적으로 단순교보다 많이 건설되고 있는 연속교의 동적특성을 분석하기 위해, 그림 1에 나타낸 24-40-25m 3경간 PSC 박스거더 연속교에 대해 17 자유도 모형과 38 자유도 모형을 적용하였다. 그림 7에는 6등급궤도에서의 17 자유도 모형과 38 자유도 모형에 의한 3경간 연속교 동적거동의 차이를 나타내었다. 40m 단경간 교량에서의 결과보다 증폭계수가 상당히 낮아 연속교의 효과가 확실히 나타나는 것으로 판단된다. 또한 단순교의 경우와 마찬가지로 저속에서는 차량모형화 기법에 따른 증폭계수의 차이가 작지만, 고속으로 갈수록 차이가 나타나고 있으므로, 연속교의 동적거동 분석에서도 보다 엄밀한 해석을 위해서는 38 자유도로 열차를 모형화할 필요가 있는 것으로 판단된다.

4.4 제동에 의한 교량의 동적거동

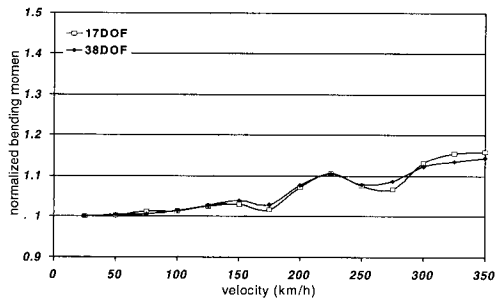
그림 8은 17 자유도 모형과 38 자유도 모형이 등속으로 주행하다 교량진입부로부터 교량길이의 1/10인 4 m 씩 위치를 변화시키면서 제동을 시작하



a) 중앙경간 중앙점 휨모멘트의 증폭계수

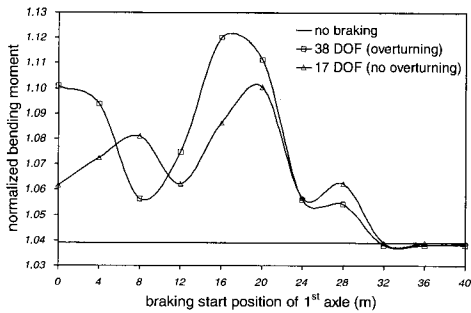


b) 측경간 10 m 지점 휨모멘트의 증폭계수

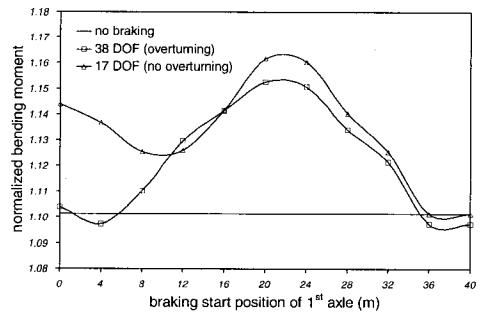


c) 300km/h 주행조건

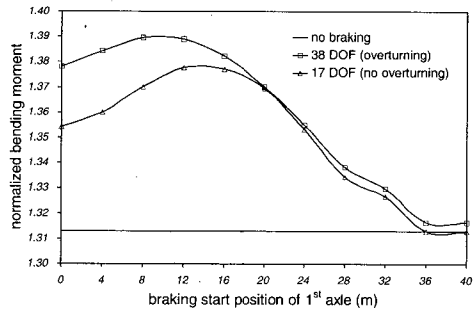
그림 7 3경간 PSC 박스거더 연속교의 열차자유도에 따른 증폭계수



a) 100km/h 주행조건



b) 200km/h 주행조건



c) 지점부 휨모멘트의 증폭계수

그림 8 제동시 휨모멘트에 대한 증폭계수의 변화

였을 때, 40 m PSC 박스거더 단순교 중앙점의 휨 모멘트에 대한 증폭계수를 각각 나타낸 것이다. 그림에서 보면 38 자유도 열차모형의 결과가 17 자유도 열차모형의 결과보다 전반적으로 큰 값을 나타내고 있으며 최고로 충격계수가 41%정도의 차이를 나타내는데, 이는 38 자유도에서 고려된 슐림효과와 영향이라고 판단된다. 즉, 슐림효과를 고려할 수 있는 38 자유도 열차모형이 열차의 제동시 발생하는 윤택중의 집중현상으로 인해 교량의 동적거동에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서 열차·교량구조물의 상호작용을 보다 정밀하게 고려할 수 있는 3차원 교량동적거동 해석모형을 개발하여, 다양한 매개변수 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 열차 모형화 기법에 대한 체계적인 분석으로부터 본 연구에서 개발한 38 자유도 모형의 필요성이 검증되었다. 특히 교량이 솟음이나 장기처짐과 같은 궤도형상을 가지는 경우에는 17 자유도 모형과 같은 단순화된 열차모형은 불안정한 동적응답특성을 보이고 있으며, 열차의 모형화 기법은 저속에서는 영향이 작지만 고속으로 갈수록 교량의 동적거동에 영향이 큰 것으로 확인되었다. 따라서 고속철도교량의 정밀한 동적해석을 위해서는 6가지 운동성분을 모두 고려할 수 있는 열차모형이 적용되어야 하는 것으로 판단된다.

2) 제동시 중변위에 대한 자유도를 고려하여 차체 및 대차의 슐림효과까지 고려할 수 있도록 개발된 38 자유도 열차모형과 중변위에 대한 자유도를 고려하지 않은 17 자유도 열차모형을 이용하여 교량의 동적거동을 비교·분석한 결과, 제동시 슐림효과는 슐리는 방향에 있는 축하중을 7~8% 수준으로 증폭시켜 교량의 동적거동에 큰 영향을 주는 것으로 나타나, 본 연구에서 개발된 38 자유도 열차모형의 타당성을 규명하였다.

3) 연속교의 경우에는 주행속도 및 궤도상태에 따른 증폭계수의 변화가 전체적으로 단순교와 비슷

한 경향을 보이지만, 연속교 효과에 의해 증폭계수는 현저히 작게 나타나는 것으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 한국건설기술연구원 과제인 고속전철 교량기술 개발의 일환으로 수행된 것이고, 연구에 도움을 주신 한국건설기술연구원에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. Chu, K. H., Garg, V. K., and Dhar, C. L., "Railway-Bridge Impact : Simplified Train and Bridge Model", *Journal of Structural Engineering*, Vol.105, No.ST9, 1979.9, pp.1823~1844
2. Garivaltis, D. S., Garg, V. K., and D'Souza, A. F., "Dynamic Response of a Six-axle Locomotive to Random Irregularities", *Vehicle System Dynamics*, Vol.9, No.3, 1980, pp.117~147
3. Garg, V. K., Chu, K. H., and Wang, T. L., "A Study of Railway Bridge/Vehicle Interaction and Evaluation of Fatigue Life", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.13, 1985, pp.689~709
4. Wang, T. L., Garg, V. K., and Chu, K. H., "Railway Bridge/Vehicle Interaction Studies with New Vehicle Model", *Journal of Structural Engineering*, Vol.117, No.7, 1991, pp.2099~2116
5. Garg, V. K. and Dukkipati, R. V., *Dynamics of Railway Vehicle Systems*, Academic Press, Ontario, 1984
6. Frýba, L., *Dynamics of Railway Bridges*, Thomas Telford, London, 1996
7. 이강재, "고속철도 차량의 기존선 속도향상에 관한 연구", 한양대학교 석사학위논문, 1997.12.
8. 이종득, 철도공학, 노혜출판사, 1997
9. 박홍석, "개선된 고속철도열차모형을 사용한 교량의 동적해석에 관한 연구", 연세대학교 박사학위논문, 1998.12

(접수일자 : 1999. 9. 30)