

# 열차의 제동 및 궤도의 조도가 교량의 동적 거동에 미치는 영향

The Effects of Braking of Trains and Roughness of Rails on the Dynamic Behaviors of Bridges

김 두 기<sup>1)\*</sup>

양 신 추<sup>2)</sup>

Kim, Doo kie

Yang, Sin Chu

## Abstract

The effects of braking of trains and roughness of rails on the dynamic behavior of bridges are studied. The train-bridge interaction is considered by solving Lagrange's equation of motions. Newmark's direct integration is used to solve the governing equations. Dynamic train loads acting on piers at each time step are evaluated, and the wheel-rail roughness effect is considered by using the PSD curve of the rail. The model of braking forces in bridge section is based on the change of deceleration mentioned in ASTM(American Society for Testing and Materials) E503-82. Only skidding frictions without considering rolling frictions are modeled, and the friction coefficient of 0.25 is assumed. Parametric studies in a simply supported PC Box girder bridge are carried out to verify the present method and to analyze the effects of train speed, wheel-rail roughness, braking forces on dynamic train loads.

**Keywords** : train-bridge Interaction, dynamic train loads acting on piers, roughness, braking effect

## 1. 서론

교통하중에 의한 환경진동은 오래 전부터 도심지의 시설물 또는 진동원 주위의 주거지역 조성시에 주요 관심 중에 하나였다. 일반적으로 교통하중에 의한 진동의 경로는 차량 → 구조물 → 기초 → 지반 → 대상구조물로 전파하며, 인접구조물에 대한 환경진동의 평가와 분석, 그리고 적절한 진동저감대책을 세우는데 있어서 교통하중의 정확한 산정은 매우 중요한 과제이다(윤정방 등, 1997). 이 연구에서는 교량에 인접한 구조물의 환경진동 해석을 위해, 열차와 교량의 상호작용을 고려한 교각에 작용하는 열차의 동하중에 대하여 레일의 조도성분과 제동하중을 고려한 연구를 수행하였다.

지금까지 차량의 주행으로 인한 교량의 동적거동에 관한 연구는 1847년 Willias가 보의 질량을 무시하고 차량을 단일질량으로 가정하여 운동방정식을 유도한 이래 상당히 진행되어 왔으며, 이러한 교량 위를 주행하는 이동하중에 관한 연구는 교량에 작용하는 차량하중을 재하하는 방법에 따라 크게 이동하중모형(Moving Force

Model)과 이동질량모형(Moving Mass Model)로 구분할 수 있다(Fryba, 1999). 이동하중모형은 차량의 등가 정적하중을 사용하므로 비교적 쉽게 해를 구할 수 있다는 장점은 있으나 주행차량과 교량의 상호작용에 의한 동적 효과를 고려할 수 없다. 이동질량모형은 시간에 따라 위치가 변하는 주행차량의 질량을 고려한 방법으로 차량과 교량의 동적인 상호작용을 고려할 수 있으나 이동하중모형에 비해 상당히 복잡한 해석과정을 거쳐야 한다. 열차의 경우에는 다른 차량에 비해 상대적으로 중량이 무거우며, 연행하중에 대한 효과가 크므로 열차와 교량의 상호작용을 고려한 동적해석이 필요하다.

여러 이론적인 연구와 현장실험을 통해 열차가 주행할 경우에 교량의 동적거동은 주행속도, 차륜과 레일의 조도 성분 등을 포함한 여러 가지 인자들에 의해 영향을 받는 것으로 보고되었다(Machidai et al., 1983).

주행중인 차량의 제동하중이 교량의 동적응답을 증가시킨다는 것은 잘 알려져 있는 사실로서, 급제동으로 인한 교량의 동적 효과에 관한 연구는 1962년에 ASSHO 시험도로 조사에 포함된 이래, 많은 연구가들에 의해 연

1) 군산대학교 토목공학과 부교수

2) 한국철도기술연구원 차륜궤도연구실 수석연구원

\* Corresponding author : kim2kie@chol.com 063-469-4770

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2010년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

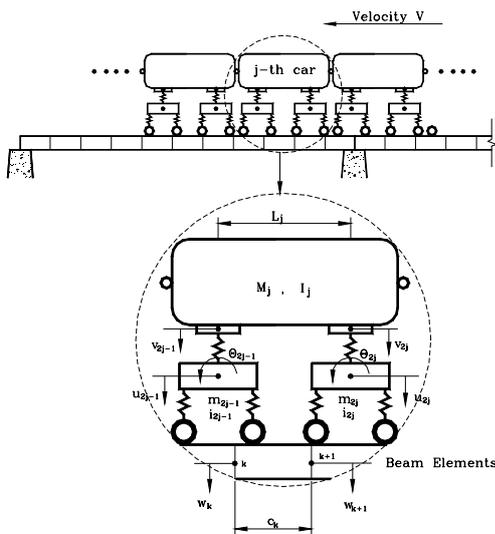


Fig. 1 Train-Bridge Interaction Model (윤정방 등, 1997)

구되어져 왔으며, 이들 중 Kishan(1977) 등의 연구에 의하면 제동하중에 의한 차량의 제동효과는 여러 시방서에 공통적으로 규정한 최대허용 충격계수에 버금가는 것으로 나타났다.

이 논문에서는 열차의 주행에 따른 교각에 작용하는 열차의 동하중에 대하여 연구하였으며, 열차속도, 조도성분, 제동하중 등의 영향에 대하여 매개변수해석을 하였다. 교량구간에서의 열차와 교량의 상호작용을 라그랑주 운동방정식을 사용하여 고려하였으며, 유도한 운동방정식의 해를 뉴마크 직접적분법을 사용하여 구하였다. 레일의 조도성분에 대한 고려는 철도에서 널리 사용 중인 조도성분에 대한 PSD 함수 관계식(Sato, 1976)을 사용하였으며, 열차의 급제동에 따른 제동효과에 대한 고려는 ASTM E503-82에서의 감속도의 변화량을 근간으로 미끄럼저항을 모형화하였으며, 제동시의 구름저항은 고려치 않았다.

## 2. 운동방정식

교량구간에서의 열차와 교량의 상호작용해석을 위하여 교량을 통과하는 차량을 Fig. 1과 같이 모형화 하였다. 교량을 통과하는 차량은 일반적인 열차와 지하철을 기본으로 모형화 했으며, 열차 1량은 1개의 차체, 2개의 대차(bogie), 4개의 차륜(wheel)과 2종류의 현가장치(suspension)로 구성된다(윤정방 등, 1997).

n개의 차량에 대하여 운동, 위치, 감쇠에너지와 상호작용력을 구한 후, 라그랑주 운동방정식을 사용하면 다음과 같은 형태의 차량과 교량의 상호작용을 고려한 운동방정

식을 구할 수 있다.

$$[M_t(t)]\{\ddot{U}_t(t)\} + [C_t(t)]\{\dot{U}_t(t)\} + [K_t(t)]\{U_t(t)\} = \{F_t(t)\} \quad (1)$$

여기서  $[M_t(t)]$ ,  $[C_t(t)]$ ,  $[K_t(t)]$  와  $\{F_t(t)\}$ 는 시간에 따라 변화하는 차량-교량시스템의 전체질량행렬, 전체 감쇠행렬 및 전체강성행렬과 상호작용력벡터이며,  $\{U_t(t)\}$ 는 교량과 차량에서의 수직 및 회전변위이다. 교량에서의 감쇠행렬은 교량의 첫 번째 고유진동수  $\omega_1$ 와 0.05의 임계감쇠비  $c_b$ 를 사용하여 아래와 같이 정의하였다(Bhatti, 1982).

$$[C_b] = c_b \omega_1 [M_b] \quad (2)$$

여기서  $[M_b]$ 는 보요소를 사용하여 구성한 교량의 질량행렬이다. 차량-교량시스템 운동방정식의 해를 구하기 위해 뉴마크 직접적분법을 사용하였다.

## 3. 조도성분의 모형화

열차의 차륜은 레일의 마모, 차륜의 평상화(wheel flat), 용접불량, 레일의 주름(corrugation) 등으로 불규칙한 레일표면을 주행하는 것과 같은 상태가 되며, 이러한 불규칙한 레일표면을 주행할 경우에 레일의 조도성분(roughness,  $w_b$ )에 의해 추가적인 상호작용력( $F_R$ )이 차량-교량시스템에 발생한다. 이 경우에 앞서 운동방정식에서 구한 차량-교량의 상호작용력에서 대차와 교량바닥면과의 상대 변위 성분인  $y$ 에 레일의 조도성분을 더하면  $(2j-1)$ 번째 대차의 첫 번째 차륜에 작용하는 추가적인 상호작용력  $F_R$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_{R(2j-1)}^{(1)} = k_{p(2j-1)} w_{b(2j-1)}^{(1)} \quad (3)$$

차륜-레일표면에 대한 조도성분( $w_b$ )을 구하기 위해 여러가지 PSD 제안식(Pollard, 1962; Kraemer, 1984)이 있으나, 여기서는 아래와 같은 일본 및 프랑스 국철에서 사용하는 PSD에 관한 제안식(Sato, 1976)을 사용하였다.

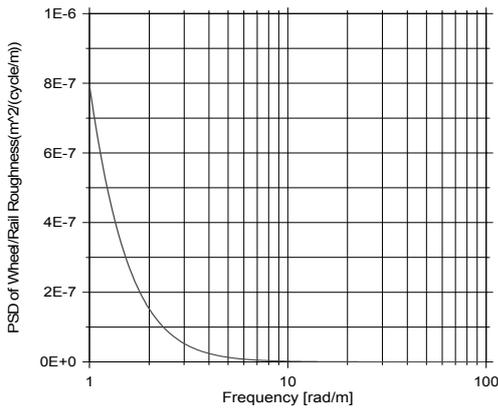


Fig. 2 PSD of Roughness

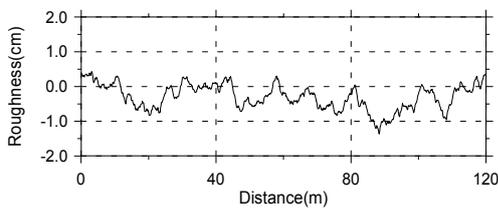


Fig. 3 Roughness along the rail

$$S_d(\omega) = \frac{A}{(B + \omega)^3} \quad (4)$$

조도성분을 PSD의 정의와 정상 램덤 프로세스라는 가정을 사용하고, 푸리에역변환을 적용하여 조도성분을 차량의 이동거리에 대하여 나타내면 다음과 같다(Rice, 1945).

$$w_b(x) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^N C_k \cos(\omega_k x + \phi_k) \quad (5)$$

$$C_k = \sqrt{2 S_d(\omega_k) \delta\omega} \quad (6)$$

여기서  $\phi_k$ 는 위상각으로  $0 \sim 2\pi$  사이에서 등분포된 랜덤 변수다.

Fig. 2는 이 연구의 예제로 사용한 조도성분의 PSD이며, Fig. 3에 이 조도성분을 120m 교량구간에 대하여 나타냈다.

#### 4. 제동하중의 모형화

열차가 교량 위를 주행할 때에 교량의 접촉면으로부터

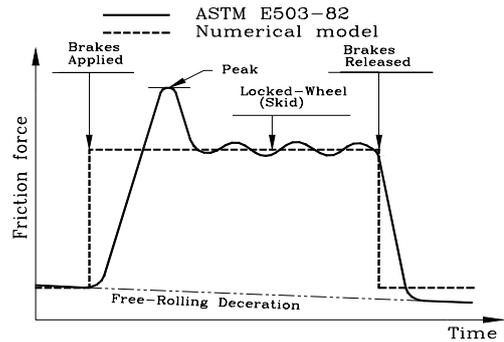


Fig. 4 Model of Braking Force

Table 1 Sliding Friction Coefficient of Rails

레일의 표면상태	미끄럼 마찰계수	
	보통의 환경	마모된 환경
깨끗하고 건조할 때	0.25-0.30	0.25-0.40
습윤할 때	0.18-0.20	0.22-0.25
서리가 있을 때	0.15-0.18	0.22
진눈깨비가 덮혀 있을 때	0.15	0.20
기름기가 있을 때	0.10	0.15

저항을 받게 되며, 이러한 저항은 크게 구름저항(rolling friction)과 미끄럼저항(sliding friction)으로 나눈다. 열차가 교량 위에서 제동을 하면, 그 가속도에 대한 반작용으로 선로방향의 힘이 차량진행과 반대방향으로 작용한다. 또한, 제동력이 충분이 큰 경우에는 미끄럼저항이 지배적이며, 이때의 미끄럼 저항력과 축중의 비를 미끄럼 마찰계수라고 하며, 차륜이나 레일의 재질, 접촉면의 부착물의 종류, 축중의 크기, 속도 등에 의해 영향을 받는다(한국강구조학회, 1995). 일반적인 레일의 표면상태와 미끄럼 마찰계수는 Table 1과 같다(한국강구조학회, 1995). 이 연구에서는 ASTM(American Society for Testing and Materials) E503-82에서의 감속도의 변화량을 근간으로 Fig. 4와 같이 미끄럼 저항을 모형화 하였으며, 제동시의 구름저항은 고려치 않았다.

위에서 열거한 기본가정을 사용하면, 교량 위를  $v_0$ 의 등속도로 주행하는 열차가 급제동을 하였을 경우에 열차는 완전히 정지할 때까지 균일한 가속도로 감속운동을 하며, 이로 인해 열차의 진행방향과는 반대방향으로 제동하중이 작용한다. 이때의 열차가 완전히 정지할 때까지의 열차의 제동거리( $d_{bk}$ ), 제동시간( $t_{bk}$ ), 그리고  $(2j - 1)$  번째 대차의 첫 번째 차륜에 수평방향으로 작용하는 제동하중( $F_{bk(2j-1)}^{(1)}$ )은 다음과 같다.

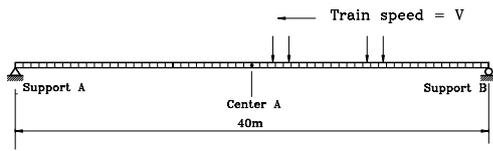


Fig. 5 Simple Beam Model

Table 2 Material of the Bridge

구조형식		1경간 PC박스거더교
제원	폭원	B = 14.0m
	형고	h = 3.50m
	궤도	1.435m(복선, 궤도중심간격 5.0m)
활 하 중		열차(부수차 2량, 구동차, 객차 2량)
재료 물성	탄성계수	E = 36,000 MPa
	감쇠계수	5% 모드감쇠
	질 량	$\rho = 490 \text{ kg/m}^3$
	포아송비	$\nu = 0.2$

$$d_{bk} = \frac{v_0^2}{2\mu g} \quad (7)$$

$$t_{bk} = \frac{v_0}{\mu g} \quad (8)$$

$$F_{bk(2j-1)}^{(1)} = \mu (M_{u(2j-1)}^{(1)} + M_{s(2j-1)}^{(1)})g \quad (9)$$

여기서  $\mu$ 와  $g$ 는 각각 미끄럼 마찰계수와 중력가속도이다. 또한, 열차가 등감속도운동을 할 경우에  $(2j-1)$  번째 대차의 첫 번째 차륜과 교량의 상호작용력( $F_{b(2j-1)}^{(1)}$ )은 다음과 같다.

$$\overline{F_{b(2j-1)}^{(1)}} = F_{b(2j-1)}^{(1)} + F_{bk(2j-1)}^{(1)} \quad (10)$$

여기서  $F_{b(2j-1)}^{(1)}$ 는 수직방향으로 작용하는 차량과 교량의 상호작용력이다.

## 5. 예제해석

Fig. 5에 나타난 단순보 교량에 대하여 각각 열차 1량을 주행시키면서 매개변수해석을 수행하였다. 교량을 40개의 보요소로 모형화 했으며 교량과 1량의 통과 차량에 대한 제원은 Table 2와 3과 다음과 같다.

열차의 차륜에 작용하는 정적 축하중인 97kN(=7.89ton)을 작용시켜 교량의 중앙점에 놓고 SAP90을 사용하여

Table 3 Material of the Train

차체	길이	L=18m
	질량(M)	부수차 : 2,500kg 구동차 : 3,600kg 객 차 : 2,400kg
	pitch 관성 모멘트(I)	부수차 : 643kN·m <sup>2</sup> 구동차 : 790kN·m <sup>2</sup> 객 차 : 597kN·m <sup>2</sup>
대차	길이	l = 2.1m
	질량	m = 324kg
감쇠 장치	pitch 관성 모멘트	i = 1.47kN·m <sup>2</sup>
	1차	kp = 1,275kN/m, cp = 20kN·sec/m
	2차	ks = 68.7kN/m, cs = 10kN·sec/m

Table 4 Results of Static Analyses

	중앙점 A		수직반력(kN)	
	수직처짐 (mm)	휨모멘트 (kN·m)	지점 A	지점 B
현재 연구	0.5903	2,297	15.72	15.82
SAP 90	0.5905	2,298	15.78	15.78

Table 5 Natural Frequencies of the Bridge

	고유진동수(Hz)		
	1st	2nd	3rd
현재 연구	3.35	13.39	30.12
SAP 90	3.35	13.39	30.12

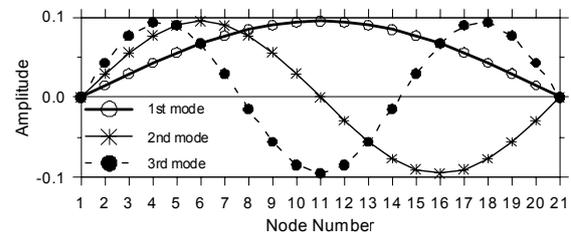


Fig. 6 Mode Shapes of the Bridge

해석한 결과를 열차속도가 5km/h일 경우일 때에 열차가 중앙점 근방에 도달했을 때의 결과와 비교했을 때 Table 4와 같이 두 해석결과가 잘 일치하였다. 따라서 추후 교량의 동적특성을 판단하기 위한 기준이 되는 정적자료로서 열차속도 5km/h일 때의 결과를 사용하기로 하였다. 또한, 교량의 고유진동수와 모드형상을 SAP90의 결과와 비교했으며, Table 5와 Fig. 6에 보인 바와 같이 두 결과가 거의 일치하였다.

열차의 차륜에 97kN의 축하중을 가한 후에 열차를 100km/h의 속도로 주행시켰을 때의 교량의 중앙점에서의 변위는, Fig. 7에서와 같이 이동하중효과를 고려한

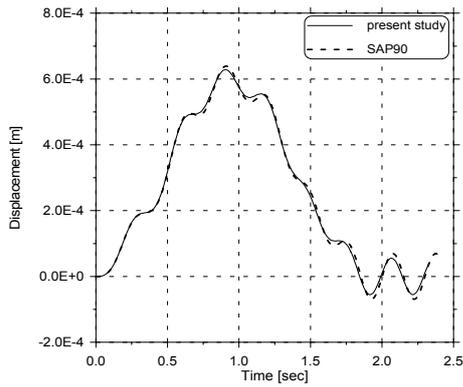
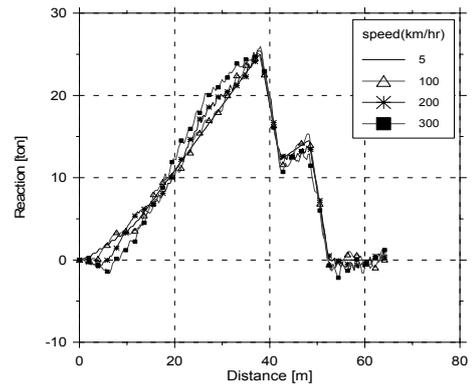
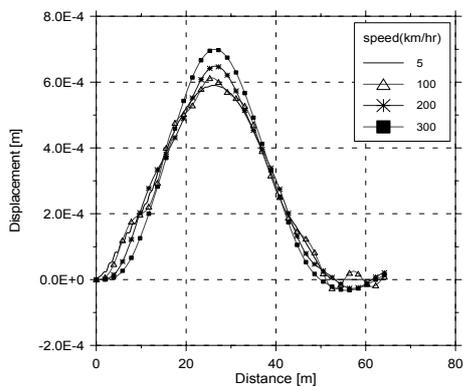


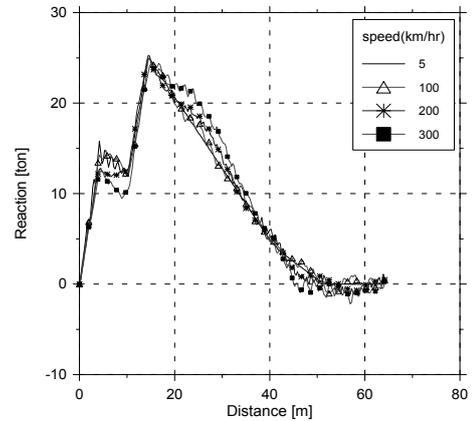
Fig. 7 Displacement in the middle of the Bridge



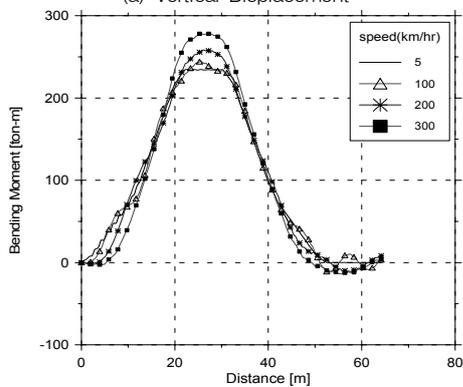
(a) Pier A



(a) Vertical Displacement



(b) Pier B



(b) Bending Moment

Fig. 8. Responses at the position of the train

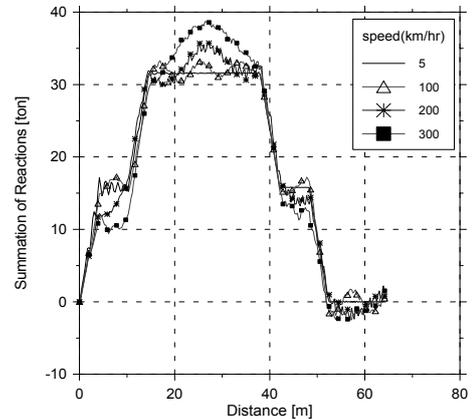


Fig. 10 Summation of Vertical Reactions on Piers

SAP90의 결과와 거의 일치하였다. 여기서 SAP90에서 삼각형의 분포하중을 도착시간을 고려하여 각 절점에 작용시켜 이동하중효과를 각 차륜에 대하여 계산한 후에, 이것을 차륜당 지연시간을 고려하여 변위의 선형함수로 연행하중효과를 고려하였다.

구동차 1량을 5km/h, 100km/h, 200km/h, 300km/h 및 350km/h의 속도로 증가시키면서 단순지지된 교량을 통과시켰을 때, 열차의 진행거리에 따른 중앙점 A에서 발

생하는 처짐과 휨모멘트 값, 그리고 교각 A와 B에서 발생한 수직반력은 Figs. 8-11과 같다. 중앙점 A에서의 변위와 휨모멘트는 열차가 교량의 중앙점 근방에 도달하였 때 최대값을 가졌으며, 열차의 속도가 증가함에 따라 최대값이 증가하였으나, 교각 A와 B에서의 수직반력은 열차가 교량의 양끝단에 도달하였을 때 최대값을 가졌으며,

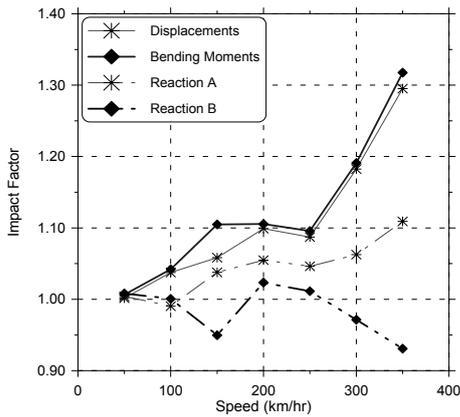


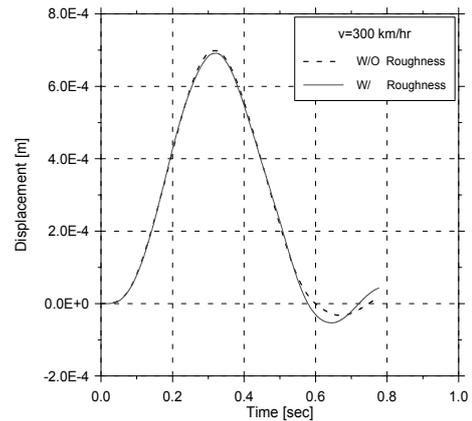
Fig. 11 Impact Factors depending on Train Velocities

열차의 속도와 관계없이 최대값은 거의 일정하였으나, Fig. 11에 나타난 바와 같이 두 반력 값들의 합은 최대값은 속도에 따라 증가하였다. 여기서 차량속도의 증가에 따른 교량의 동적거동을 파악하기 위해서 아래와 같은 충격계수(impact factor)를 사용하였다.

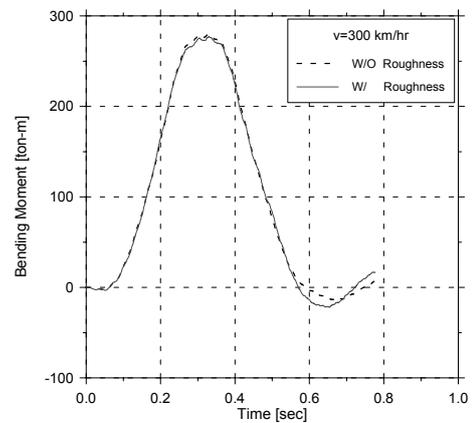
$$i = \frac{(X_{dyn})_{max}}{(X_{static})_{max}} \quad (11)$$

여기서 X=변위, 휨모멘트 및 반력이다. 차량 속도의 변화에 따른 변위, 휨모멘트, 그리고 반력에 대한 충격계수는 Fig. 11과 같이, 휨모멘트와 변위에 대한 충격계수는 거의 동일한 경향을 보였으며, 그 증가량이 수직반력에 대한 충격계수에 비하여 두드러졌으며, 열차속도 250km/h 이상에서 급격히 증가하였다. 참고로 이 교량의 첫 번째 모드 형상에 대한 임계속도( $c_{cr} = 2L/T_1$ )는 268km/h이다. 아울러 교각 A에서의 수직반력에 대한 충격계수가 교각 B에서의 수직반력에 대한 충격계수보다 두드러지게 증가하였는데, 이는 차량의 진행방향에 따른 관성력 때문인 것으로 판단된다.

차륜과 레일표면에 대한 조도성분을 고려하여 매개변수해석을 수행하였다. 열차속도 300km/h일때의 교량의 중앙점에서의 수직처짐과 휨모멘트, 그리고 양지점에서의 수직반력은 Figs. 12-14와 같다. 전반적으로 고주파수의 진동성분이 더해진 결과를 나타냈다. 또한, Fig. 14에 보인 바와 같이 열차속도가 증가함에 따라 중앙점에서의 변위 및 휨모멘트와 교각에서의 수직반력에 대한 충격계수는 조도성분을 고려하지 않았을 경우에 비해 변



(a) Vertical Displacement

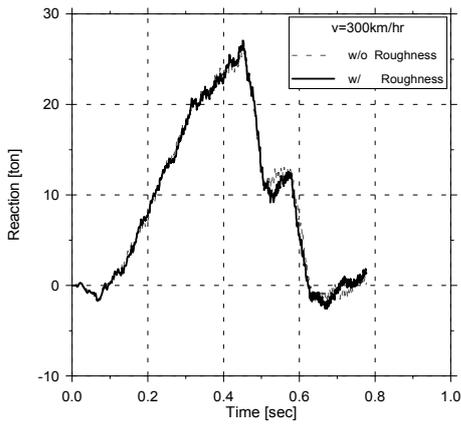


(b) Bending Moment

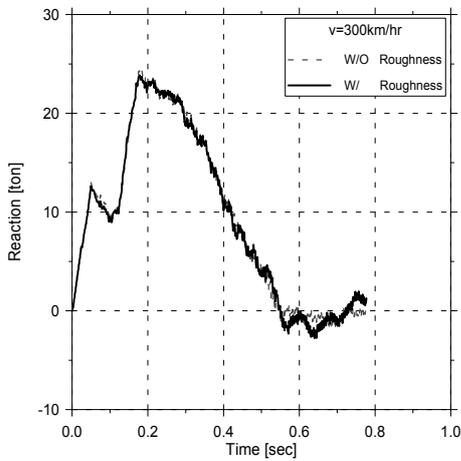
Fig. 12. Responses at the position of the train

화가 작았다.

이 연구에서는 미끄럼 마찰계수를 0.25로 가정하여 제동하중에 의한 교량의 동적거동과 교각에 작용하는 하중에 대하여 매개변수해석을 하였다. 교각에서의 최대수직반력이 발생하도록 하는 열차의 제동위치를 결정하기 위하여 열차속도 100km/h로 주행시 열차의 제동위치를 변화시켜 가면서 교량의 교각에서의 수직반력과 중앙점에서의 변위와 휨모멘트를 Fig. 15에 나타냈다. 여기서 가로축은 교량위에서 차량이 제동할 때의 열차위치를 교량의 지간으로 나눈 무차원 값이다. 교각에서의 반력의 최대값은 열차가 교량에 진입한 후 지간의 1/4이 되는 교각에 도달하였을 때 최대값을 가졌으므로, 이 논문에서는 이 제동위치를 근간으로 매개변수해석을 하였다. 열차속도 100km/h일 경우에 제동하중에 따른 교량의 중앙점에서 변위와 휨모멘트와 교각에서의 수직반력을 Figs. 16-17에 나타냈다. 제동을 걸기 시작한 0.36초부터는 변위, 휨모멘트와 수직반력은 시간축상에서 통과시간이



(a) Pier A



(b) Pier B

Fig. 13 Vertical Reaction on the Pier

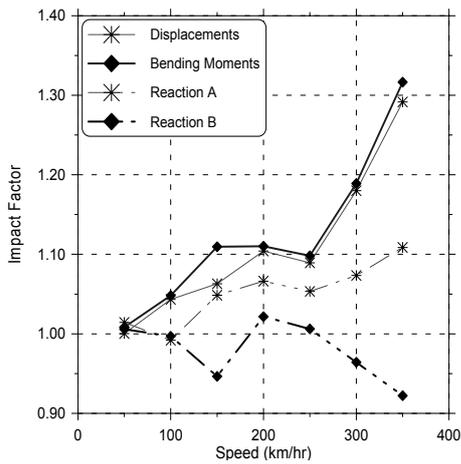


Fig. 14 Impact Factors depending on Train Velocities

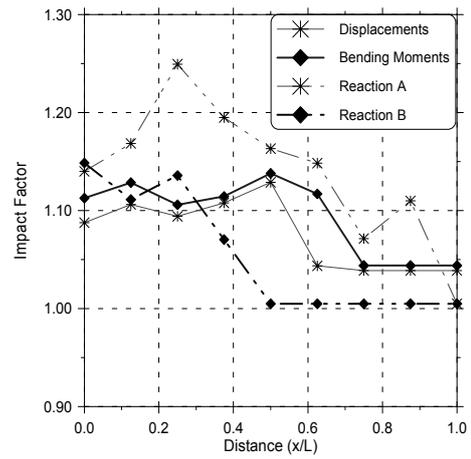
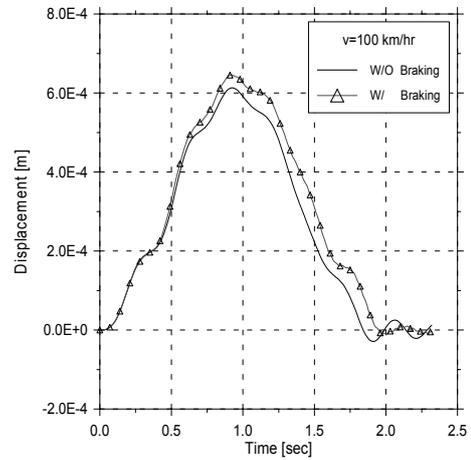
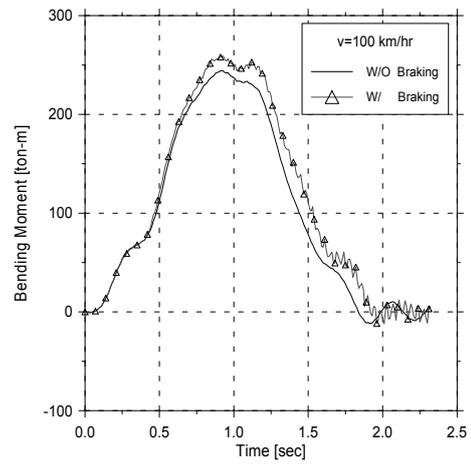


Fig. 15 Impact Factors depending on Braking Locations



(a) Vertical Displacement



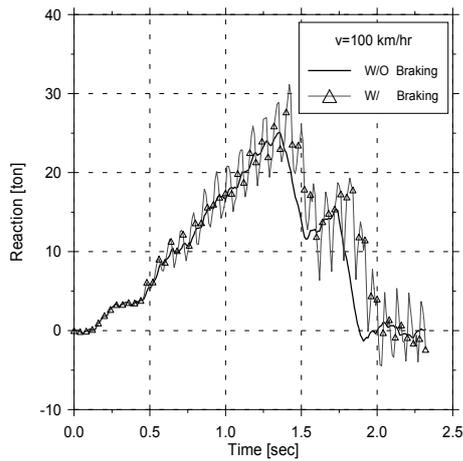
(b) Bending Moment

Fig. 16 Responses in the middle of the bridge

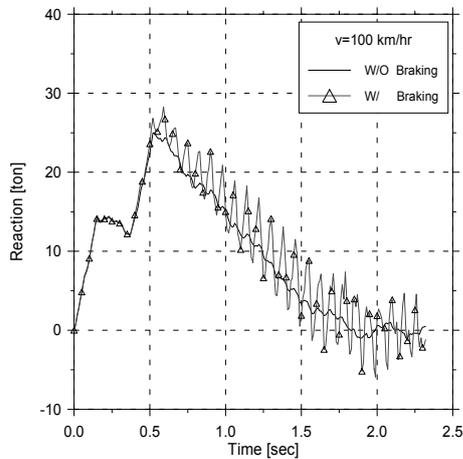
증가함에 따라 오른쪽으로 이동하는 경향을 보였고, 고주파수의 진동성분이 첨가된 형상을 보였다. 여기서 열차의 최저속도가 50km/h 일 경우에 있어서 차량의 제동거리와 제동시간은 39.33m와 5.66초로 차량이 교량을 완전히

통과한다.

또한, 제동하중을 고려했을 경우에 열차속도의 증가에 따른 충격계수를 Fig. 18에 나타냈다. 제동하중을 고려하



(a) Pier A



(b) Pier B

Fig. 17 Vertical Reaction on the Pier

지 않은 경우에 비해 전반적으로 증가한 경향을 보였고, 교각 A에서의 수직반력이 교각 B에서의 수직반력보다 큰 값을 나타냈다. 열차속도 50km/h와 350km/h의 구간에서의 충격계수들의 평균값을 Table 6에 나타냈다. 열차의 속도가 증가함에 따라 변위, 휨모멘트, 그리고 수직반력에 대한 충격계수는 조도성분보다는 제동하중에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

## 6. 결론

이 연구에서는 열차의 제동 및 궤도의 조도가 교량의 동적 거동에 미치는 영향에 대해 연구하였으며, 단경간 PC교량에 대하여 1량의 열차를 주행속도를 증가시켜가면서 열차속도, 조도성분, 제동하중 등에 따른 교량의 거

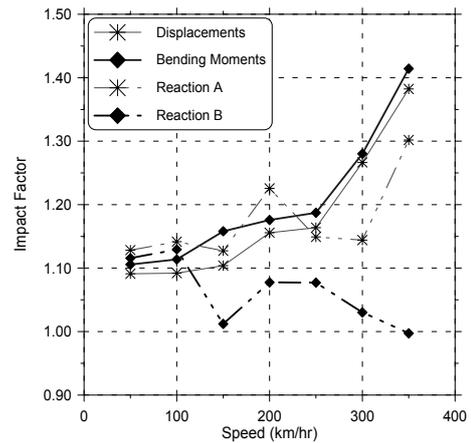


Fig. 18 Impact Factors depending on Train Velocities

Table 6 Average values of Impact Factors(50~350km/h)

	동적상호작용	동적상호작용 + 조도성분	동적상호작용 + 제동하중
변위 (중앙점)	1.109	1.110	1.179
휨모멘트 (중앙점)	1.123	1.126	1.205
수직반력 A	1.043	1.051	1.174
수직반력 B	0.985	0.980	1.063

동 및 교각지점에서의 수직반력에 대해 고찰하였다.

- 1) 열차가 교량의 중앙에 위치했을 때, 교량의 중앙점에서의 최대변위와 휨모멘트가 최대가 되었으며, 열차속도 5km/h일 때의 최대값은 SAP90을 사용하여 구한 정적 및 동적해석결과와 거의 일치하였다.
- 2) 열차속도가 증가함에 따라 중앙점에서의 휨모멘트와 변위에 대한 충격계수는 전반적으로 증가하였으며, 특히 250km/h 이상에서는 급격히 증가하였으나, 교각에 대한 수직반력은 양 끝 교각이 서로 다른 경향을 보였다.
- 3) 열차속도가 증가함에 따라 조도성분을 고려했을 경우 수직반력에 대한 충격계수는 조도성분을 고려치 않았을 경우에 비교했을 때, 매우 유사한 경향을 보였으며, 그 크기의 증가는 미소하였다.
- 4) 열차속도 100km/h로 주행시 열차의 제동위치를 변화시켜 가면서 교량의 내부 교각에서의 수직반력을 고찰하였으며, 열차가 교량에 진입한 후 지간의 1/4이 되는 지점에 도달하였을 때 최대값을 가졌다.
- 5) 열차의 속도가 증가함에 따라 변위, 휨모멘트, 그리

---

고 수직반력에 대한 충격계수는 조도성분보다는 제 동하중에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

이 연구는 국토해양부 도시철도표준화 2단계 연구개발 사업과 한국연구재단의 2009년도 소규모연회회 지원 (KRF-2009-028-D00050)에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. 윤정방, 김두기, 양신추, 오우영, "교량구간에서의 열차하중산정 및 진동의 지반진파해석", 대한토목학회 논문집, 제17권 제 1-4호, 455-467, 1997.07.
2. 한국강구조학회, 강철도교의 설계-강구조편람, 제5권, 1995.
3. Bhatti, M.H., "Vertical and Lateral Dynamic Response of Railway Bridges due to Nonlinear Vehicles and Track Irregularities", Ph.D. dissertation, Illinois Institute of Technology, Chicago, 1982.
4. Fryba L., Vibration of solids and structures under moving loads, Thomas Telford Ltd., 1999.
5. Kishan, H., Traill-Nash, R.W. "A Modal Method for Calculation of Highway Bridge Response with Vehicle Braking", Civil Engrg. Transactions, Inst. of Engrs., Australia, Vol. CE19, No.1, 1977, pp. 44-50.
6. Kraemer, S., "Noise and Vibration in Buildings from Underground Railway Lines", Ph. D. Thesis, University of London, 1984.
7. Machidai, F., Matsuura, A., "Dynamic Response of Concrete Railway Bridges", IABSE Proceeding, 1983.
8. Pollard, M. "Power Spectra of Track Roughness", British Railways Report, 1962.
9. Rice, S.O., "Mathematical Analysis of Random Noise", Bell System Technical Report, No. 24, Jan., 1945, pp.46-108.
10. Sato, Y., "Railway Technical Research Report-Study on High Frequency Vibrations in Track", The Railway Technical Research Institute, Japanese National Railways, No. 1013, 1976.

(접수일자 : 2010년 4월 8일)  
(심사완료일자 : 2010년 4월 27일)

---

## 요 지

열차의 제동 및 궤도의 조도가 교량의 동적 거동에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 교량구간에서 열차와 교량의 상호작용과 연행하중효과를 라그랑주 운동방정식을 사용하여 고려하였다. 뉴마크 직접적분법을 사용하여 유도한 운동방정식의 해를 구하였으며, 조도성분에 대한 고려는 레일의 조도성분에 대한 PSD 제안 곡선을 사용하였다. 열차의 급제동에 따른 제동효과에 대한 고려는 ASTM E503-82에서의 감속도의 변화량을 근간으로 미끄럼저항을 모형화하였으며, 제동시의 구름저항은 고려치 않았다. 단순지지된 교량과 열차 1량에 대한 예제를 통해 이 연구에서 제안된 방법에 대한 수치적 검증과 매개변수해석을 수행하였다.

**핵심 용어** : 차량과 교량의 상호작용, 교각에 작용하는 열차 동하중, 조도성분, 제동효과