Vol.31, No.6, pp.393-400, December, 2019



충격계수 평가를 위한 단순보의 이동하중 응답 해석

최준혁^{1*}

'교수, 부천대학교, 토목공학과

Analysis on the Dynamic Response of Simple Beams by Moving Loads for Evaluation of Impact Factor

Choi, Jun Hyeok^{1*}

¹Professor, Dept. of Civil Engineering, Bucheon University, Bucheon, 14632, Korea

Abstract - The purpose of this study is to evaluate the impact factor indicating the dynamic behavior of the structure. The analytic solutions for structural displacement, strain, moment and shear force were derived using the variables such as the speed of load and the damping ratio of the structure. The response of the structure is analytically obtained by separating between static and dynamic components, and dynamic response analysis is performed under the assumed analysis conditions. In the analysis, the influence of the response of the structure according to the damping ratio of the structure and the moving speed of the load and the maximum response occurrence position were analyzed. From the analysis results, it is compared to the static response and the quasi-static response and the impact factor used for the evaluation of the structure. The analysis was results by a simple and limited conditions with a single concentrated load. However, it can be used as a research data to measure or define the factor of impact under limited measurement conditions such as railway bridges.

Keywords - Dynamic analysis, Impact factor, Railway bridge, Quasi-static, Moving load

1.서론

우리나라의 교량구조물의 안전성 평가는 설계시 적용된 설계 개념과 조건을 기초로 기본내하력을 산정한 후 현장 재 하시험 결과에 의한 구조물의 정적 및 동적응답의 보정계 수를 곱하여 구조물의 안전성을 평가하고 있으며 구조물의 유지관리를 위한 지표로 사용하고 있다. 국내 교량구조물의 내하력 평가는 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침^[8] 에 제시된 방법에 따라 이루어지지만 이 방법은 내하력평가 방법이 법령으로 제정되기 이전부터 적용된 방법과 큰 차이 가 없이 그대로 유지되고 있다. 교량구조물의 안전성 평가에

Copyright © 2019 by Korean Society of Steel Construction *Corresponding author.

Tel. +82-32-610-3311 Fax. +82-32-610-3224 E-mail. cjunh0213@daum.net

서 구조물의 동적거동을 평가하는 지표는 구조물의 충격계 수가 대표적이다. 충격계수는 차량의 주행으로 인한 구조물 의 동적 증폭효과를 나타내는 것으로 구조물의 정적응답과 동적응답의 비율로 구해진다. 이 동적응답 효과는 일반적으 로 속도에 크게 영향을 받으므로 속도가 거의 없는 의사정 적상태에서의 주행에 따른 응답과 속도별 응답의 효과로부 터 구해지며, 현장재하시험 단계에서 시험차량의 주행시험 에 의해 얻어진다. 그러나 현장재하시험은 차량의 통제나 야 간시간 측정 등 제약조건이 많아 안전성과 실용성이 낮다는 문제가 제기되고 있다. 특히, 철도교량의 경우는 열차 차단 시간이 새벽시간으로 한정되어 있고 안전사고, 열차운행 지 장 발생 가능성 등 현장계측 작업에 상당한 어려움이 있다. 따라서, 구조물의 내하력 평가방법, 충격계수를 비롯한 여러 가지 평가지표의 적정성과 실구조물의 거동을 나타낼 수 있 는데이터의 획득 및 계측방법 등 구조물의 안전성 평가방법 에 대한 좀더 실용적인 방법에 대한 논의가 대두되고 있다. 구조물의 내하력에 영향을 미치는 변수들에 대한 연구는 철도교나 도로교와 관계없이 동일한 개념이 적용되고 있으

Note.-Discussion open until June 30, 2020. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 22, 2019; revised November 04, 2019; approved on November 05, 2019.

나 철도교의 경우 궤도구조에 대한 영향이 크게 작용하므로 이를 고려하는 방법에 대한 연구가 제안되었으며, 동적성능 검증기준 및 검토절차, 동해석 모델 등에 의한 충격계수 등 철도교량의 전반적 동적거동에 대한 연구도 보고되었다. Kang et al.[1]은 PSC I형 단순 철도교량을 대상으로 고속 및 일반열차 하중으로 인한 동적 사용성을 평가하였으며 가속 도와 단부 꺾임각에 대한 설계기준 만족여부를 평가하였다. Roh et al.^[2]은 기존 내하력 평가방법의 개선을 위하여 단순 보 교량을 대상으로 동적응답을 주파수 응답으로 나타낼 수 있는 내하력 평가 모델을 제시하였다. Hong et al.^[3]은 단순 교량을 대상으로 지간길이와 이동하중 축수를 달리하여 구 조물의 충격계수를 해석적으로 분석하였다. Jeon et al.^[4]은 철도교량의 주행안전성에 영향을 미치는 연직가속도, 연직 처짐 등 여러 가지 인자들에 대한 기존의 평가방법의 적정 성을 분석하고 재하시험 결과에 의한 결과와 해석모델을 이 용하여 민감도 해석을 실시하였다.

본 연구에서는 구조물의 동적거동을 나타내는 충격계수 의 평가를 목적으로 하중의 이동 속도, 구조물의 감쇠비를 주 요 변수로 하여 구조물 변위과 변형률, 모멘트와 전단력에 대한 구조물의 동적응답 해석 해를 유도하였다. 구조물의 응 답은 정적성분과 동적성분을 구분하여 해석적으로 구하고 가정된 해석조건에 대해 동적응답해석을 하였다. 또한, 구 조물의 감쇠비, 하중의 이동속도에 따른 구조물의 응답의 영향과 최대응답 발생위치에 대해 분석하였다. 구조물의 동 적응답에 대한 분석결과에서는 정적응답과 의사정적응답의 차이에 대해 분석하였고 구조물의 안전성 평가에 활용되는 충격계수를 평가하기 위한 방법을 제안하였다.

2. 본론

2.1 해석이론

2.1.1 이동하중에 의한 구조물의 동적변위

단순지간 교량구조물에서 집중하중에 의한 이동하중의 구조물 응답 해석이론은 여러 연구자들에 의해 해석 해가 제 안되었다. 특히, 철도교량을 대상으로 한 Frýba^[5], Yang and Lin^[6]의 연구는 궤도와 교량구조물간의 상호장용에 대해 실 용적인 개념과 해법을 많이 제시하고 있다. 본 연구에서는 최 근의 연구결과와 연관성을 높일 수 있도록 하기 위하여 실 무적 적용성이 높은 Yang *et al.*^[7]의 접근방법을 주로 인용 하였으며, 사용되는 기호도 그의 연구결과에 준하여 사용하였다.

Fig. 1은 단순지간 보구조물에서 집중하중 *p*가 *v*의 속도 로 이동할 때를 나타낸 것으로 위치 *x*와 시간 *t*에서 *y*축의 대 한 보의 변위 *u*(*x*,*t*)는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{u} + c_e\dot{u} + c_iI\dot{u}^{''''} + EIu^{''''} = p\delta(x - vt)$$
(1)

여기서, *m*은 단위길이당 질량, *c*_e는 외부감쇠계수, *c*_i는 내부 감쇠계수, *E*는 탄성계수, *I*는 보의 단면2차모멘트이다. (′) 와 (′)는 각각 좌표 *x*와 시간 *t*에 의한 미분 첨자를 나타내고 δ는 Dirac delta함수이며, 0 ≤ *vt* ≤ *L*의 범위에서 유효하다.



Fig. 1. A simply supported beam subjected to a moving load

교량의 변위 u(x,t) = n차의 진동모드로 가정하고 보의 경계조건을 만족하는 진동모드 $\phi_n(x)$ 와 일반함수 $q_n(t) = 0$ 용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(x,t) = \phi_n(x)q_n(t) \tag{2}$$

n차 구조물의 진동수 ω_n 와 ξ_n 을 다음과 같이 각각 정의 하고, 단순보의 진동 형상함수 $\phi_n(x)$ 를 sine 함수로 가정하 여 정리하면 식 (6)을 얻는다.

$$w_{n} = \frac{EI}{m} \frac{\int_{0}^{L} \phi_{n}^{(4)}(x) \phi_{n}(x) dx}{\int_{0}^{L} [\phi_{n}(x)]^{2} dx}$$
(3)

$$\xi_n = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_e}{\omega_n} + \alpha_i \omega_n \right) \tag{4}$$

$$\phi_n(x) = \sin \frac{n\pi x}{L} \tag{5}$$

$$\ddot{q}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = \frac{2p}{mL} \sin \frac{n\pi v t}{L}$$
(6)

식(6)으로부터 q_n(t)를 구하고 식(5)를 식(2)에 대입하면 n차 진동모드에 대해 구조물의 응답변위 u(x,t)는 다음과 같 이 구해진다.

$$u(x,t) = \frac{2pL^3}{EI\pi^4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4} \frac{1}{(1-S_n^2)^2 + (2\xi_n S_n)^2} \\ \times \left[(1-S_n^2) \sin \Omega_n t - 2\xi_n S_n \cos \Omega_n t \right. \\ \left. + e^{-\xi_n \omega_n t} \left(2\xi_n S_n \cos w_{dn} t + \frac{S_n}{\sqrt{1-\xi_n^2}} \right.$$
(7)
$$\left. (2\xi_n^2 + S_n^2 - 1) \sin w_{dn} t \right) \right] \times \sin \frac{n\pi x}{L} \\ = u_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4} \{T\} \sin \frac{n\pi x}{L}$$

여기서, 보의 감쇠진동수 ω_{dn} , 가진진동수 Ω_n , 보의 진동수 에 대한 가진진동수의 비로 무차원값인 속도변수 S"은 다 음과 같다. 또한 u0와 {T}은 최대변위와 시간에 따른 동적 성분을 나타낸다.

$$w_{dn} = w_n \sqrt{1 - \xi_n^2} \tag{8}$$

$$\Omega_n = \frac{n\pi\upsilon}{L} \tag{9}$$

$$S_n = \frac{\Omega_n}{w_n} = \frac{n\pi v}{w_n L} \tag{10}$$

$$u_0 = \frac{2pL^3}{EI\pi^4}$$
(11)

$$\{T\} = \frac{1}{\left(1 - S_n^2\right)^2 + \left(2\xi_n^2 S_n\right)^2} \\ \times \left[\left(1 - S_n^2\right)\right] \sin \Omega_n t - 2\xi_n S_n \cos \Omega_n t \\ + e^{-\xi_n \omega_n t} \left(2\xi_n S_n \cos w_{dn} t\right) \\ + \frac{S_n}{\sqrt{1 - \xi_n^2}} \left(2\xi_n^2 + S_n^2 - 1\right) \sin w_{dn} t\right)$$
(12)

식 (7)에서 구조물의 응답변위의 최대값을 u₀라고 하고 정적변위와 동적변위로 구분하여 각각 us, ud라고 하면 다음 과 같이 나타낼 수 있다.

J

$$u(x,t) = u_s(x,t) + u_d(x,t)$$
(13)

정적변위를 속도 $v \simeq 0$ 인 것으로 가정하면 $S_n = 0$ 이 되고 이를 다시 식 (7)에 대입하면 정적변위를 구할 수 있다. 또한 동적변위는 식 (13)의 u_d = u - u_s로부터 다음과 같이 구해진 다. 여기서 {S}와 {D}는 정적 및 동적변위 성분을 나타낸 것 이다.

$$u_{s}(x,t) = u_{0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{4}} \sin(\Omega_{n}t) \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$
(14)
$$= u_{0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{4}} \{S\} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$
(14)
$$u_{d}(x,t) = u_{0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{4}} \frac{1}{\left(1 - S_{n}^{2}\right)^{2} + (2\xi_{n}S_{n})^{2}}$$
$$\times \left[\left\{ S_{n}^{2} \left(1 - S_{n}^{2}\right) - (2\xi_{n}S_{n})^{2} \right\} \sin\Omega_{n}t$$
$$- 2\xi_{n}S_{n} \cos\Omega_{n}t + e^{-\xi_{n}\omega_{n}t} (2\xi_{n}S_{n} \cos w_{dn}t) (15)$$
$$+ \frac{S_{n}}{\sqrt{1 - \xi_{n}^{2}}} \left(2\xi_{n}^{2} + S_{n}^{2} - 1 \right) \sin w_{dn}t \right]$$
$$\times \sin\frac{n\pi x}{L} = u_{0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{4}} \{D\} \sin\frac{n\pi x}{L}$$

$$\begin{aligned} & (17) \\ & \{S\} \ end{tabular} \\ & \{S\} = \sin(\Omega_n t) \\ & \{D\} = \frac{1}{\left(1 - S_n^2\right)^2 + (2\xi_n S_n)^2} \\ & \times \left[\left\{ S_n^2 \left(1 - S_n^2\right) - (2\xi_n S_n)^2 \right\} \sin \Omega_n t \right. \\ & \left. - 2\xi_n S_n \cos \Omega_n t + e^{-\xi_n \omega_n t} \left(2\xi_n S_n \cos w_{dn} t \right) \right. \\ & \left. + \frac{S_n}{\sqrt{1 - \xi_n^2}} \left(2\xi_n^2 + S_n^2 - 1 \right) \sin w_{dn} t \right) \right] \end{aligned}$$

따라서, 구조물의 변위 u(x,t)를 정적변위와 동적변위로 나 타내면 각각 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$u_{s}(x,t) = u_{0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{4}} \{S\} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$
(18)

$$u_d(x,t) = u_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4} \{D\} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$
(19)

2.1.2 이동하중에 의한 단면 변형률

이동하중에 의한 구조물의 단면 변형률은 단면의 중립축 으로부터의 거리에 비례하는 것으로 가정하면 식 (20)과 같 다. 여기서, *h*g는 단면의 중립축으로부터 구하고자 하는 변 형률 위치까지의 거리이다.

$$\epsilon(x,t) = -h_g \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}$$
(20)

식 (7)을 식 (20)에 대입하고 정리하면 이동하중에 따른 단면의 변형률은 다음과 같이 얻어진다.

$$\epsilon(x,t) = \epsilon_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \{T\} \sin \frac{n\pi x}{L}$$
(21)

여기서, $\epsilon_0 = \frac{2pL}{EI\pi^2}h_g$ 이다.

변형률 $\epsilon(x,t)$ 를 식 (22)와 같이 정적변형률과 동적변형 률의 합으로 가정하고 변위의 경우와 동일한 방법으로 구하 면 정적변형률과 동적변형률 응답을 구할 수 있다.

$$\epsilon(x,t) = \epsilon_s(x,t) + \epsilon_d(x,t) \tag{22}$$

$$\epsilon_s(x,t) = \epsilon_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \{S\} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$
(23)

$$\epsilon_d(x,t) = \epsilon_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \{D\} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$
(24)

2.1.3 이동하중에 의한 부재 휨모멘트

이동하중에 의한 부재 휨모멘트 *M* = -*Elu*"(*x*,*t*)로 나타낼 수 있고 식 (7)을 이용하면 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$M(x,t) = M_s(x,t) + M_d(x,t)$$
 (25)

$$M_{s}(x,t) = M_{0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{2}} \{S\} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$
(26)

$$M_{d}(x,t) = M_{0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{2}} \{D\} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$
(27)

2.1.4 이동하중에 의한 부재 전단력

이동하중에 의한 부재 전단력 *V* = *Elu*"(*x*,*t*)로 나타낼 수 있고 식 (7)을 이용하여 모멘트와 동일한 방법으로 정리하 면 다음과 같다.

$$V(x,t) = V_s(x,t) + V_d(x,t)$$
 (28)

$$V_s(x,t) = V_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \{S\} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$
(29)

$$V_d(x,t) = V_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \{D\} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$
(30)

여기서,
$$V_0 = \frac{2p}{\pi}$$
이다.

2.2 수치해석

2.2.1 감쇠비의 영향

구조물의 변위 및 변형률에 대한 충격계수와 그것에 미 치는 영향을 분석하기 위하여 양단힌지 단순보를 대상으로 집중하중의 이동하중에 의한 해석을 하였다. 해석시 사용된 값은 Yang *et al.*^[7]에 사용된 해석조건으로 지간 L = 20 m, 단위질량 m = 3,000 kg/m, 휨강성 $EI = 10^6$ Nm²이며, 집중 하중은 p = 6 kN, 보의 중립축으로부터의 거리 $h_g = 1.0$ m으 로 하였다.

감쇠비는 교량구조물의 경우 대략 5 % 내외이므로 비감 쇠인 경우와 5 %인 경우로 구분하고 시간 간격은 속도에 따 른 교량구간 통과시간의 1/100로 하였다.

Table 1은 속도에 따른 감쇠비의 영향을 나타낸 것이다. 감쇠비가 없는 경우(u_{0%})에 대한 감쇠비 5 %(u_{5%})의 보의 변 위의 최대값은 이동하중의 속도와 감쇠비에 따라 비례하지 는 않고 조건에 따라 다른 것으로 나타났다. 해석 예에서 감 쇠가 없는 경우는 속도가 300 km/hr인 경우에 최대 변위를 나타내었으나 감쇠비가 5 %인 경우는 400 km/hm인 경우에 최대 변위가 발생하였다. 또한 Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같 이 최대 변위는 이동하중이 보의 중앙이 아닌 경우에도 발생 할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 속도별 최대변위는 속도와 감쇠비, 이동하중의 위치에 따라 달라질 수 있으며 그러한 영향에 대해 여러 가지 검토가 필요하다.

Table 1. Damping effect of the beam

Speed (km/hr)	Maximum displacement (mm)		<i>u</i> 5%
	$u_{0\%} (\xi = 0 \%)$	$u_{5\%} (\xi = 5 \%)$	$\overline{u_{0\%}}$
50	1.0091	0.9867	2.22
100	1.0330	0.9964	3.54
200	1.0828	0.9856	8.98
300	1.1566	0.9858	14.77
400	1.0666	1.0260	3.81



Fig. 2. The effect of damping on midpoint deflection of the beam

2.2.2 속도변수의 영향

구조물의 진동수 대비 하중의 가진 진동수의 비를 나타내 는 속도변수 S에 대한 동적응답을 Fig. 3에 나타내었다. 그 결과 속도변수 S가 커질수록 구조물의 변위응답이 비례하 여 증가하는 것은 아니지만 증가하는 경향을 나타내었고, 진 동 파형은 비대칭 형태로 나타나는 경향을 볼 수 있다.



Fig. 3. The effect of speed parameter on midpoint deflection of the beam ($\xi = 5$ %)

2.2.3 구조물의 변위

Fig. 4는 구조물의 변위응답을 정적변위와 동적변위로 구분하여 나타낸 것이다. 여기서 감쇠비는 5 %이다. 정적변 위는 속도가 거의 0이므로 감쇠비 영향이 고려되지 않게 되 어 가정된 형상함수인 sine 함수를 나타낸다. 동적성분은 감 쇠비의 영향을 받아 하중이 지남에 따라 점차 감소하는 것 으로 나타났다. 또한, 주어진 해석조건에서 *vt/L*이 0.52일 때 최대 정적변위가 발생하였으며 전체 응답은 정적응답 최대 값의 약 112 %로 나타났다. 이는 구조물의 동적거동에 의한 증폭 정도인 충격계수를 의미하는 것으로 전체 변위응답에 서 정적성분을 제외하면 보 전체 구간에서의 동적성분 및 최대값, 최대값의 발생위치를 구할 수 있으며, 정적변위의 최대값과 전체응답의 최대값의 발생 위치는 다를 수 있음을 알 수 있다.



Fig. 4. Displacement components at midpoint of the beam ($\xi = 5$ %)

2.2.4 단면 변형률

구조물 단면의 변형률은식 (23)과식 (24)로부터 계산되 어지며 정적변형률과 동적변형률을 나타내면 Fig. 5와 같다. 변형률은 구조물의 미소길이에 대한 변위의 변화량이 므로 기본적으로 변위응답의 변화와 같다. 따라서, 구조물 단면의 정적변형률과 동적변형률의 비는 변위에 대한 것과 거의 유사한 경향을 나타낸다. 그러나 모드 차수의 영향은 변위의 경우 n⁴, 변형률의 경우 n²로서 다르기 때문에 구조 물의 응답이 복잡할 경우 변위 충격계수와 변형률 충격계 수의 영향은 달라질 수 있다. 이 예제의 경우는 교량이 단순 지간이고 양단 힌지 조건이므로 1차 모드에서 동적영향이 대부분 반영되므로 변형률과 변위의 응답비 차이는 거의 없다.



Fig. 5. Strain components for a section at midpoin of the beam ($\xi = 5$ %)

2.2.5 구조물의 최대 정적응답

구조물의 변위에서 정적응답의 최대값은 각각의 정적 응답함수의 최대값으로 얻어질 수 있으며, 집중하중이 보의 중앙에 재하되었을 때 보이론에 의한 최대값과 비교하여 Table 2에 나타내었다. 정적응답 함수의 최대값은 동적운동 방정식의 근사값으로부터 구해진 값으로서 동적모드를 15 차까지 더한 값으로 보의 중앙에서 계산한 것이다. 그 결과 를 보 이론에 의한 값과 비교하면 변위의 경우는 거의 일치 하는 것으로 나타났으나 변형률과 모멘트는 이론값에 대해 11.3%, 전단력은 16.2% 로 차이가 비교적 크게 나타남을 알 수 있다. 여기서 변형률은 모멘트 곡률로부터 계산된 값이므 로 동일한 결과를 나타낸다. 최대값에서 이러한 차이는 모드 형상함수를 sine함수로 가정한 것에 기인하는 것으로 판단 되며, 모멘트나 전단력의 최대값에서 차이가 발생하기 때문 인 것으로 판단된다. 따라서, 정적응답의 최대치를 근사식으 로부터 구할 경우 변위응답은 이론값과 거의 동일하지만 모 멘트나 전단력에 대해서는 오차가 크게 발생할 수 있으므로 충격계수의 산정시 주의할 필요가 있다.

한편, 현장 재하시험에서 의사정적이라고 하는 속도가 낮은 경우에 대해 최대 응답의 변화를 확인하기 위하여 식(19)를 이용하여 최대응답변위를 구하였으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 그 결과 속도가 20 km/hr 이하의 낮은 속도에

서는 동적증폭비가 약1% 이내로 속도의 영향이 크지 않다.

Response	Maximum value (a)	Beam theory (b)	a/b (n = 15)
Displ.	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{48.17} \frac{pL^3}{n^4 EI}$	$\frac{1}{48} \frac{pL^3}{n^4 EI}$	0.996 (0.4 %)
Strain	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\pi^2} \frac{pL}{n^2 EI} h_g$	$\frac{1}{4}\frac{pL}{n^2 EI}h_g$	0.886 (11.3 %)
Bending moment	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\pi^2} \frac{pL}{n^2}$	$\frac{1}{4}\frac{pL}{n^2}$	0.886 (11.3 %)
Shear force	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\pi} \frac{p}{n}$	$\frac{1}{2}\frac{p}{n}$	0.838 (16.2 %)

Table 2. Comparison maximum value and theoretical value for each response of the beam (x = L/2, $h_g = 1.0$ m)

Table 3. Maximum	displacement of the	beam at a	low speed
$(\xi = 0 \%)$			

Speed (km/hr)	Maximum displacement (mm)	$\frac{u_{5\%}}{u_{0\%}}$ (%)
0	1.0000	Static
1	1.0000	100.00
2	1.0000	100.00
5	1.0025	100.25
10	1.0048	100.48
20	1.0100	101.00
50	1.0249	102.49

2.2.6 구조물의 동적응답비

구조물의 변위와 단면 변형률에서의 동적응답 성분은 정 적변위와 정적변형률의 최대값에 대한 동적변위 또는 동적 변형률의 비로 표현될 수 있다. 변위와 변형률은 고려하는 모드차수의 영향만 있고 동일한 형태이다. 예제에서와 같이 모드 1차가 주모드인 경우는 변위응답은 감쇠비의 영향과 속도변수만 영향이 있다. Fig. 6은 동적응답의 감쇠비의 영 향을 나타낸 것으로 감쇠비의 영향이 크게 작용하고 있음을 알 수 있다.



Fig. 6. Dynamic components of displacement according to the damping ratio at midpoint of the beam (S = 0.15)

2.3 충격계수

구조물의 응답에 대한 충격계수는 동적응답과 정적응답 과의 비로서 *IF* = *u_d/u_s* = *u/u_s* - 1로 나타낼 수 있다. 그런데 앞서 제시한 바와 같이 구조물의 최대 응답값은 감쇠비, 속 도에 따라 최대응답이 발생하는 하중의 위치가 정적응답과 동적응답에서 다를 수 있기 때문에 그 위치를 특정하는 것 은 쉽지 않다. 또한 정적 최대응답을 해석적 근사식으로 구 하는 경우 변형률, 모멘트 전단력의 경우는 오차가 크게 나 타나는 문제가 있다. 따라서, 정적 최대 응답값을 정의함에 있어 구조물의 정적응답에 대한 일관성을 위하여 의사정적 (quasi-static) 상태에서의 최대응답보다는 이론적 정적응답 값을 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

구조물에 대한 현장계측의 상황을 가정하면 정적 최대응 답을 의사정적상태의 주행상태로 하여 응답을 얻고, 속도별 동적 최대응답을 구하여 충격계수를 구하고 있는데 이는 구 조물의 거동에 대한 직접적 응답으로부터 얻는 것이므로 별 문제는 없는 것으로 판단된다. 그러나 정적상태나 의사정적 상태에서 응답치를 얻기 어려운 경우에는 정적응답을 어떻 게 정의하는가가 문제가 된다. 이러한 경우 동적응답이 최대 로 되는 상태에서의 하중재하위치를 정하고 그 하중 위치를 기준으로 구조해석을 수행하여 기준이 되는 응답을 구하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 이 경우 구조해석 모델링에 대 해서는 해석결과의 정확도가 충분히 있어야 할 것이다.

한편, 구조물의 변위에 대한 충격계수를 근사적으로 구하기 위해 이론값에 대한 동적최대응답으로 구하면 식 (31) 로 구해지며, 이는 Yang *et al.*^[7]의 제안식과 동일하다. 그러

나 변형률, 모멘트 및 전단력에 대한 충격계수는 Table 2에 서 알 수 있는 바와 같이 응답의 최대값과 이론적 값과의 차 이가 크게 발생하고 있기 때문에 그의 연구 결과를 적용에 있어서는 추가 검토가 필요하다고 판단된다.

$$IF_{u} = \frac{\sin\Omega_{1}t - S_{1}\sin\omega_{1}t}{\left(1 - S_{1}^{2}\right)} - 1$$
(31)

본 연구에서의 해석결과는 단순보에서 집중하중의 이동 하중 해석에 의한 매우 제한적인 분석결과이나, 철도교량과 같은 제한된 측정조건 하에서 충격계수의 측정 또는 정의를 위한 접근 방법을 제시하였으며, 향후 실제 차량하중과 실 측데이터의 비교를 통한 구조물의 충격계수의 평가방법에 대한 기초자료로 활용될 수 있다고 판단된다.

3.결론

본 연구는 구조물의 내하력 평가 방법 개선의 일환으로 구조물의 동적거동을 나타내는 충격계수의 평가시 영향을 미치는 인자에 대한 해석적 분석을 하였으며, 그 결과를 요 약하면 다음과 같다.

- 이동하중에 의한 단순보의 동적응답해석을 통하여 구조물의 변위, 단면 변형률, 모멘트, 전단력에 대한 정적응답과 동적응답 해를 구하여 제시하였다.
- (2) 구조물의 이동하중에 의한 동적응답에서 감쇠비 및 속도변수에 따른 응답을 구하였으며 그 영향에 대해 분석하였다. 그 결과 구조물의 응답치는 감쇠비와 속 도에 크게 영향을 받으며 최대 응답치는 조건에 따라 달라짐을 확인하였다.
- (3) 구조물의 의사정적 응답의 최대치는 변위의 경우 이 론적 응답치와 거의 같은 값을 나타내지만 변형률과 모멘트, 전단력은 차이가 큰 것으로 나타났다. 따라 서, sine 형상함수의 가정에 의해 유도된 동적응답은 변위의 응답예측에는 사용이 가능하지만 변형률, 모 멘트 및 전단력의 응답 분석에는 적절하지 않음을 알 수 있었다.
- (4) 충격계수의 산정시 구조물의 정적 및 동적응답의 최 대값이 나타나는 하중의 위치는 서로 다를 수 있기 때문에 의사정적 응답의 최대값보다는 이론적 정적

응답 값을 사용하는 것이 충격계수의 평가에서 일관 성 있는 평가가 될 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원 으로 수행되었음(과제번호 19CTAP-C152976-01-000000).

참고문헌(References)

- Kang, S.-H., Choi, T.-G., Park, S.-J., and Kim, S.-I. (2009) Dynamic Serviceability Estimation of the Simple Railway Bridge with PSC I Girder, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol.9, No.1, pp.65-71 (in Korean).
- [2] Roh, H., Ryu, M., and Park, K.-H. (2015) Development of Load Carrying Capacity Evaluation Model Based on Bridge Frequency Response, *Journal of Korean Society* of Hazard Mitigation, KOSHAM, Vol.15, No.4, pp.169-176 (in Korean).

- [3] Hong, S., Park, K.-H., and Roh, H. (2017) Effect of the Number of Vehicle Moving Load Axles on Peak Impact Factor and Response Factors of Simply Supported Bridges, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol.17, No.5, pp.233-240 (in Korean).
- [4] Jeon, J.-C., Kang, J.-K., Shin, B.-G., Park, S.-E., Lee, H.-H., and Lee, Y.-I. (2017) A Study on Evaluation Criteria for Running Safety in Railway Bridges, *Journal of the Korean Society for Railway*, KSR, Vol.20, No.6, pp. 770-783 (in Korean).
- [5] Frýba, L. (1996) Dynamics of Railway Bridges, Thomas Telford, UK.
- [6] Yang, Y.-B., and Lin, B.-H. (1995) Vehicle-Bridge Interaction Analysis by Dynamic Condensation Method, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.121, No.11, pp.1636-1643.
- [7] Yang, Y.B., Yau, J.D., and Wu, Y.S. (2004) Vehicle-Bridge Interaction Dynamics, World Scientific Publishing, Singapore.
- [8] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2018) Specific Guidelines of Safety Inspection and Precise Safety Diagnosis of Facilities, Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation, Korea (in Korean).

핵심용어 : 동적해석, 충격계수, 철도교량, 의사정적, 이동하중

⁹ 약: 본 연구에서는 구조물의 동적거동을 나타내는 충격계수의 평가를 목적으로 하중의 이동 속도, 구조물의 감쇠비를 주요 변 수로 하여 구조물 변위과 변형률, 모멘트와 전단력에 대한 해석 해를 유도하였다. 구조물의 응답은 정적성분과 동적성분을 구분하여 해 석적으로 구하였으며, 가정된 해석조건에 대해 동적응답해석을 수행하였다. 해석에 있어서는 구조물의 감쇠비, 하중의 이동속도에 따 른 구조물의 응답의 영향과 최대응답 발생위치에 대해 분석하였다. 구조물의 응답분석결과에서는 정적응답과 의사정적응답에 대해 분 석하였고 구조물의 안전성 평가에 활용되는 충격계수에 대한 분석결과를 제시하였다. 해석결과는 단순보에서 단일 집중하중의 이동하 중 해석에 의한 매우 제한적인 분석결과이다. 그러나, 철도교량과 같은 제한된 측정조건 하에서 충격계수의 측정 또는 정의를 위한 접근 방법으로 활용할 수 있다.