

탄성받침을 사용한 도로교의 충격하중특성 분석

Vehicular Impact Loading on Highway Bridge with Laminated Rubber Bearing

김 상 효* 허 진 영** 신 용 준*** 이 용 선**
Kim, Sang-Hyo Huh, Jin-Young Shin, Yong-Joon Lee, Yong-Sun

ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate the dynamic behavior of highway bridge due to moving vehicle load, considering the effect of laminated rubber bearing. Dynamic behaviors of bridge considering the effect of bearings are studied with 3-dimensional bridge and vehicle models. To analyze the effect of bearings on the dynamic behaviors of superstructures of bridges, laminated rubber bearing is modeled as 3-dimensional frame element with equivalent stiffness and damping, and the models are included in the bridge analysis model. The results from the analytical models with laminated rubber bearing show a significant effects on dynamic responses and more complex vibration characteristics compared with the results from the bridge with pot bearings. Generally, larger dynamic amplification factors are obtained in the case of laminated rubber bearing, which is mainly due to the smaller torsional stiffness of the bridge with laminated rubber bearing. It can be recommended that were careful consideration on the vibration of bridges and dynamic load allowance in design are needed when adopting laminated rubber bearing.

1. 서 론

도로교의 동적응답특성을 나타내는 동적증폭계수는 교량의 길이, 형식, 고유진동주기와 같은 교량의 동적 특성, 차량의 속도와 고유진동주기, 노면형상 등에 의해 다양한 변화를 보인다. 차량의 주행으로 인한 동적

* 연세대학교 사회환경건축공학부 교수

** 연세대학교 토목공학과 박사과정

*** (주)만영엔지니어링 사원

효과는 주로 상부구조에서 나타나고 있기 때문에 지금까지의 연구에서는 주로 상부구조만을 모형화하여 교량의 동적응답을 분석하는 경우가 대부분이다. 하지만 이와 같은 연구방법은 교량의 받침과 같은 경계조건을 제대로 반영하지 못하고 있으며, 특히 요즘 많이 설치되고 있는 내진용 탄성받침 등은 특히 교량의 동적응답에 영향을 많이 미치는 것으로 판단되어 받침의 영향을 반영하여 교량의 동적응답을 분석하는 것이 필요하다고 본다. 그러므로 본 연구에서는 여러 종류의 받침에 대하여 주행차량에 의한 교량의 동적응답분석을 수행하여 받침특성에 의한 동적거동의 변화특성을 분석하였다.

2. 해석모형

2.1 교량 및 차량의 모형화

본 연구에서는 여러 가지 모의분석을 위해 설계된 단순교 형식의 지간장 40m인 판형교와 강상자형교를 대상교량으로 선정하였다. 교량은 1등급교로서 도로교 표준시방서의 하중-저항계수 설계법(LRFD, Load and Resistance Factor Design)을 기초로 하여 설계되었다. 대상 교량은 4차선 교량으로 폭원이 16.6m이며, 판형교는 8개의 주형, 강상자형교는 3개의 상자형을 갖고 있으며 각 형식별 교량의 단면은 그림 1과 같다. 각각의 교량은 휨, 전단, 비틀림을 모두 파악할 수 있는 3차원 뼈대요소를 이용하여 부재를 십자형태로 근사화하여 모형화하였다. 특히 판형교의 경우 일반적인 격자모형에서 가로방향부재와 세로방향부재의 도심의 차이가 생기는데, 이 두가지 부재를 휨에 대하여 강성이 큰 수직부재로 연결하여 3차원으로 모형화하였다^[4]. 3차원 뼈대요소로 모형화된 교량들을 그림 2에 나타내었다.

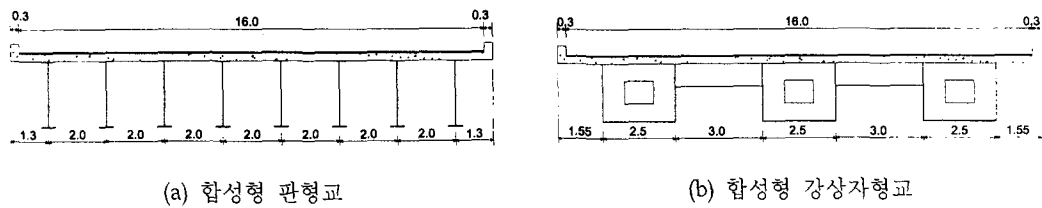


그림 1 대상교량의 단면제원(단위:m)

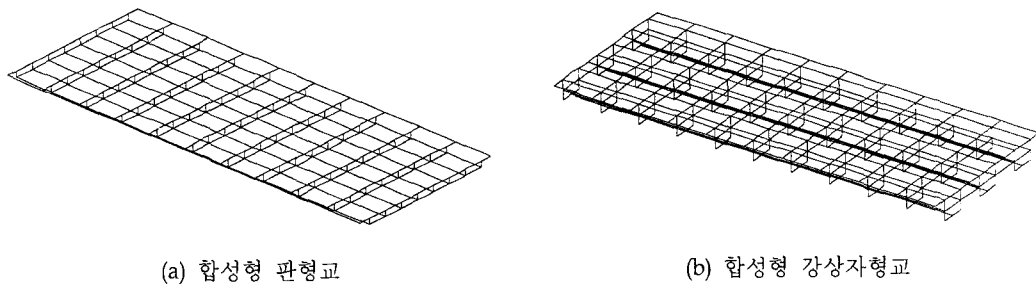
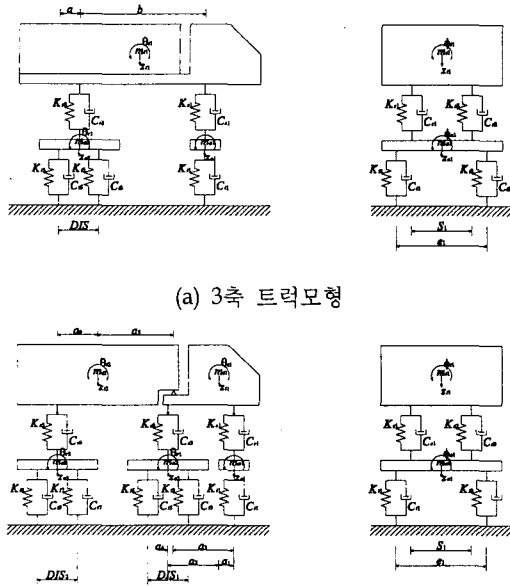


그림 2 교량의 모형화



(a) 3축 트럭모형

(b) 5축 세미-트레일러모형

그림 3 차량의 모형화

또한 본 연구에서 사용한 차량하중은 9자유도로 모형화한 3차원 3축 트럭과 15자유도로 모형화한 3차원 5축 세미-트레일러이다. 각각의 차량모형과 자유도는 그림 3에 나타내었다. 트럭의 차체와 차륜축은 모두 강체로 모형화하였고, 트럭의 차체는 수직변위(z)와 롤링변위(ϕ), 피칭변위(θ)로 3개의 자유도를 갖고, 앞차축과 수직변위와 롤링변위의 2개의 자유도를 갖고 있으며 텐덤은 수직변위와 롤링변위를 갖고, 좌우측에 각각 피칭변위가 있는 4자유도로 모형화하였다. 이와 같이 모형화한 차량을 Lagrange방정식을 이용하여 운동방정식을 유도하였다^[2].

2.2 노면모형

일반적으로 도로교 노면은 요철을 가지게 되며 이는 지수스펙트럴밀도(PSD, Power Spectral Density)함수로 모형화할 수 있다.

$$S(k) = A_r \left(\frac{k}{k_0} \right)^{-2} \tag{1}$$

여기에서, A_r 은 조도계수($m^3/cycle$), k 는 파수($cycle/m$), k_0 는 상수로써 $1/2\pi$ ($cycle/m$)이다. 노면상태는 ISO기준(International Organization for Standardization)에서 매우 양호, 양호, 보통, 불량 등으로 분류되며 각 상태에 대해 제시된 조도계수 A_r 의 값으로부터 본 연구에서는 매우 양호: 5×10^6 , 양호: 20×10^6 , 보통: 80×10^6 을 대표값으로 선정하였다. 노면형상은 모의발생기법을 이용하여 생성하였으며, 생성된 식은 다음과 같다.

$$R(s) = \sum_{i=1}^N C_i \cos(2\pi ks + \theta_i) \tag{2}$$

여기서 $C_i = \sqrt{4S(k) \cdot \Delta t}$, θ_i 는 위상각($0, 2\pi$)으로 일양분포(uniform distribution)를 가진 확률변수이다. 생성된 노면은 노면여과(filtering)기법을 통하여 보정한 후 이용하였다^[3].

3차원으로 모형화된 차량모형에서는 좌우양측 차륜을 위한 2열의 노면모형이 필요하며, 본 연구에서는 양측 노면형상을 상호 독립적인 것으로 가정하여 생성하였다.

2.4 받침의 모형화

받침에 대한 해석모형은 일반받침(포트받침)과 탄성받침에 대해 모형화하였다. 일반 받침의 경계조건은 일반적인 모형기법인 힌지와 롤러를 이용하여 단순지지 형태로 모형화하였다. 탄성받침은 강성과 감쇠를 이용하여 3차원 뼈대요소로 모형화하여 교량의 해석모형에 포함시켰다. 탄성받침은 강성과 감쇠를 이용하여 3차원 뼈대요소로 모형화하여 교량의 해석모형에 포함시켰다. 여기서, 받침의 수직강성과 수평강성은 뼈대요소에서 각각의 자유도에 대한 강성, 즉 축방향강성과 전단강성으로 적용하였다. 탄성받침의 수직강성과 수평강성은 고무의 탄성이론에 근거하여 하중에 의한 고무측면의 부풀림 형상이 포물선이라는 가정에서 다음과 같은 식을 사용하였다⁴⁾.

$$K_H = \frac{A \cdot G}{n \cdot t_R} \quad (3)$$

$$K_V = \frac{A \cdot E_c}{n \cdot t_R} \quad (4)$$

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{E_{ab}} + \frac{1}{E_b} \quad (5)$$

$$E_{ab} = E_0 (1 + 2\chi S_i^2) \quad (6)$$

여기서, A 는 고무 한 층의 지압면적, G 는 고무의 전단탄성계수, E_c 는 고무의 수직탄성계수, E_{ab} 는 겹보기 수직탄성계수, E_b 는 고무의 체적탄성계수, E_0 는 고무의 탄성계수, χ 는 경도보정계수, t_R 은 고무 한 층의 두께, n 은 고무 층수, S_1 은 1차형상계수(고무 한 층의 구속면적/자유표면적)이다. 또한 탄성받침의 감쇠계수는 경도 60인 네오프렌 합성고무의 감쇠값인 $0.85 \text{ N} \times \text{sec/mm}$ 를 사용하였다.

탄성받침의 수평강성은 식 3에서 나타난 것처럼 수직탄성계수에 비례하고, 수직탄성계수는 경도보정계수와 1차 형상계수에 의하여 변화하고 이 값은 고무층의 두께가 얇을수록 고무의 탄성계수보다 매우 큰 값을 갖게 된다. 식 6에 나타난 경도보정계수 χ 는 고무원료에 포함된 카본 등의 첨가제에 따라 달라지며 실험에 의하여 경험적으로 결정된 값으로서 고무재료가 천연고무에 근접하면 1에 접근한다. 고무재료의 전단탄성계수와 경도보정계수의 관계는 표 1, 고무재료의 경도와 전단탄성계수와의 관계는 표 2와 같은 관계가 있다. 사용되는 고무 한 층의 형상에 따라 결정되는 형상계수는 1차 형상계수 및 2차 형상계수로 나눌 수 있다. 1차 형상계수 S_1 은 고무 한 층의 구속면적과 자유표면적의 비로서 정의되며, 회전강성에 관계하는 변수이다.

표 1 전단탄성계수 G 와 경도보정계수 χ 의 관계⁴⁾

전단탄성계수($G, \text{kg/cm}^2$)	3.0	3.7	4.5	5.4	6.4	8.1	10.6
경도보정계수(χ)	0.93	0.89	0.85	0.80	0.73	0.64	0.57

표 2 경도에 따른 고무의 전단탄성계수^[5]

	경 도		
	50	60	70
전단탄성계수(MPa)	0.68~0.93	0.93~1.43	1.43~2.14
25년간 크리이프에 의한 처짐과 순간처짐과의 비	25%	35%	45%
경도보정계수(χ)	0.75	0.60	0.55

3. 받침의 종류에 따른 주행차량에 의한 강교의 동적해석

3.1 동적응답특성에 대한 분석

일반받침과 탄성받침을 사용한 교량의 차량주행에 의한 동적거동을 파악하기 위하여 차량이 주행할 때의 교량의 진동특성을 분석하였다. 교량의 처짐은 판형교의 경우 차량이 진행하는 쪽 외측거더의 중앙지간을 기준으로 하였고, 강상자형교의 경우에는 같은 조건의 외측 상자형을 기준으로 하였다.

각각의 교량에 대해 일반받침을 사용한 경우와 탄성받침을 사용한 경우의 고유진동수의 변화를 표 3에 나타내었다. 각각의 경우 첫번째 모드는 휨모드이고, 두번째 모드는 비틀림모드이며 이 두 가지 모드가 외측 거더의 동적처짐을 지배하게 된다. 탄성받침을 갖는 교량에서의 첫번째 휨모드는 실제로 3차모드에 해당하며 이 때의 1, 2차 모드는 탄성받침의 수평변형에 의한 모드이다. 표에서 전반적으로 탄성받침을 갖는 경우에 대한 교량의 고유진동수가 작아지고 있고, 특히 비틀림 강성이 큰 합성형 강상자형교와 강바닥판 판형교의 비틀림 모드에서의 고유진동수의 감소가 크게 나타나고 있다. 합성형 판형교의 경우 1, 2차 모드에서의 고유진동수 변화는 크게 나타나지 않고 있지만, 고차의 휨과 비틀림 모드인 5, 6차 모드에서 탄성받침을 사용한 경우 5%정도, 12, 13차 모드에서 11%정도 감소하는 경향을 보인다. 따라서 탄성받침을 사용한 경우 일반받침을 사용한 경우에 비하여 차량의 주행으로 인한 동적 처짐이 일반받침을 사용한 경우보다 다소 크게 나타날 것으로 예상된다.

표 3 사용받침에 따른 교량의 고유진동수 변화

mode	합성형 판형교			합성형 강상자형교		
	일반받침(Hz)	탄성받침(Hz)	증가율(%)	일반받침(Hz)	탄성받침(Hz)	증가율(%)
1	3.529	3.481	-1.38	3.025	3.037	+0.42
2	3.578	3.538	-1.12	5.893	5.165	-12.34
3	8.324	8.249	-0.90	9.905	10.047	+1.43
5	13.552	12.870	-5.03	11.110	11.090	-0.18
6	13.730	13.031	-5.09	12.680	12.671	-0.07
12	29.521	26.256	-11.06	15.084	15.083	-0.01
13	29.916	26.410	-11.72	16.834	16.269	-3.36

세미-트레일러의 주행으로 인한 교량의 처짐이력곡선을 주행속도가 60km/h인 경우에 대해서 그림 4에 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 탄성받침이나 탄성받침을 사용한 경우 일반받침을 사용한 경우에 비해 전체적인 동적응답이 좀 더 크게 나타나고 진동특성도 더 복잡하게 나타남을 알 수 있다. 이것은 위에서 언급한 바와 같이 교량의 고유진동수의 감소와 같은 효과에 기인한 결과로 판단된다. 또한 탄성받침을 사용한 경우 생기는 잔파는 스펙트럼 분석결과 외측거더의 국부적인 휨과 비틀림에 의해 발생하는 변위로서 교량전체의 동적거동에는 그다지 크게 기여하지 않는 것으로 판단된다.

FFT(Fast Fourier Transform) 기법을 이용하여 동적처짐응답의 스펙트럼 분석결과는 차량이 60km/h로 주행할 때 각각의 교량형식에 대하여 그림 5에 나타내었다. 그림에서 각 모드에서의 증폭이 탄성받침을 사용한 경우가 일반받침을 사용한 경우보다 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 합성형 판형교의 경우 첫번째 모드와 두번째 모드의 고유진동수의 차이가 크게 나타나지 않기 때문에 그 영향이 중복되어 나타나고 있는 것을 볼 수 있으며, 비틀림 강성이 큰 합성형 강상자형교에서는 두번째 모드에서 탄성받침을 사용한 경우가 크게 증폭되는 것을 알 수 있는데 이것은 탄성받침을 사용한 경우 비틀림 강성의 저하에 의한 영향으로 판단된다.

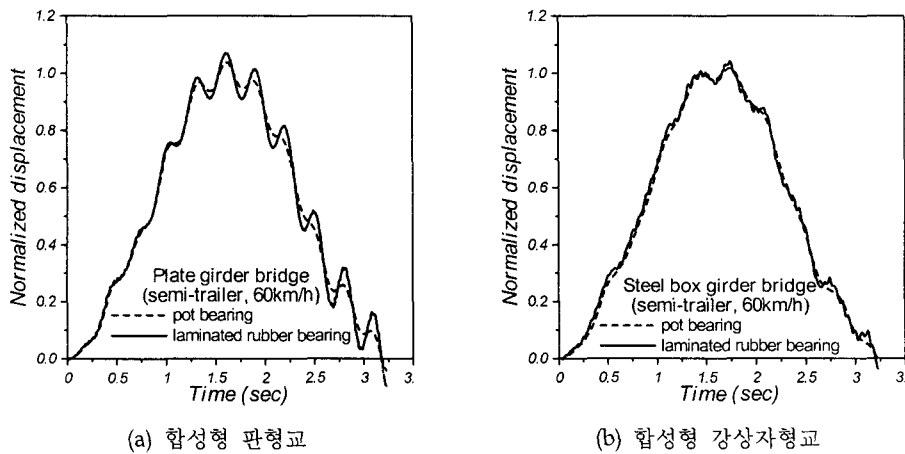


그림 4 받침의 종류에 따른 교량의 처짐이력곡선

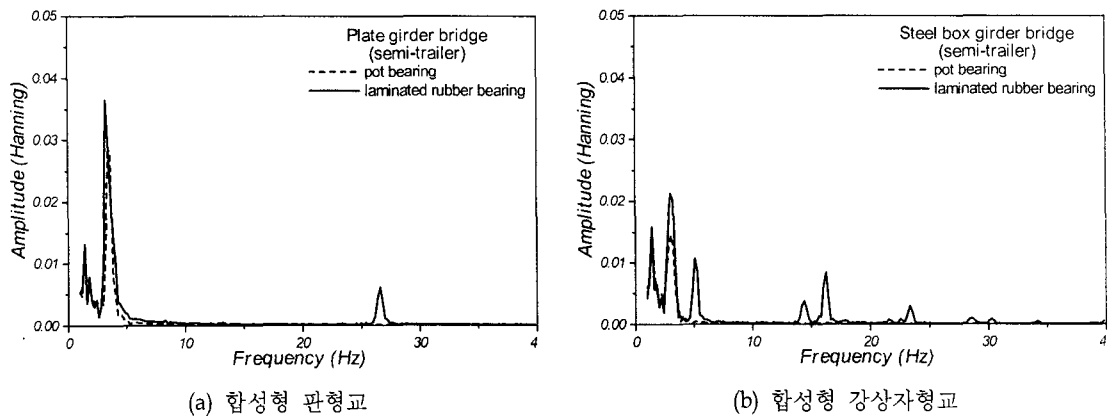


그림 5 받침의 종류에 따른 교량의 동적처짐 스펙트럼

3.2 받침의 종류에 따른 교량의 동적증폭계수 변화

사용받침에 대한 교량의 동적거동특성의 변화를 파악하기 위하여 차량의 주행속도, 노면조도의 변화와 제동에 의한 동적증폭계수의 변화를 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 시간 중앙점의 휨모멘트에 대한 동적증폭계수를 차량의 주행속도, 교량과 차량의 종류에 따라 나타내었다. 비교대상 노면조도는 매우 양호와 양호 그리고 보통의 세 가지 노면을 사용하였고 일정한 수준의 증폭계수값을 구하기 위하여 노면조도가 매우 양호인 경우에는 5회, 양호인 경우는 10회, 보통인 경우는 20회의 모의분석을 실시하여 증폭계수의 평균값을 계산하였다.

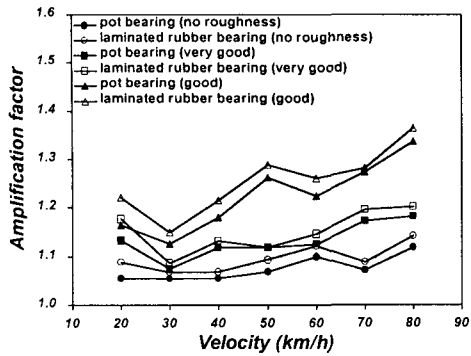
그림에서 알 수 있듯이 탄성받침을 사용한 경우가 일반받침을 사용한 경우보다 동적증폭계수가 크게 나타나는데 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 탄성받침을 사용할 때 비틀림강성의 저하로 인하여 교량의 동적변위가 커지는 현상으로 판단된다. 이러한 현상으로 인해 합성형 강상자형교에서 동적증폭계수의 증가가 합성형 판형교에 비해 조금씩 큼을 알 수 있다. 탄성받침을 사용한 경우의 충격계수를 포트받침을 사용한 경우와 비교하면 평탄한 노면인 경우 트럭주행시 약 65%정도, 세미-트레일러 주행시에는 100%이상 충격계수가 증가하는 경향을 나타내고 있으며 노면조도가 있는 경우는 평균적으로 약 25%정도 증가하고 있다. 여기서 세미-트레일러의 경우나 노면이 평탄한 경우 증가수준이 더 커지는 이유는 충격계수의 값 자체가 작기 때문에 나타나는 현상이므로 증가하는 값 자체에 대한 차이는 크게 나타나지 않지만 탄성받침을 사용할 경우 교량의 동적응답이 전반적으로 확대되는 경향이 있다. 또한 노면조건이 악화될수록 강상자형교의 충격계수가 판형교에 비해 더 큰데 이는, 앞 절의 고유진동수 결과를 통해 알 수 있듯이 강상자형교의 강성이 판형교보다 작아서 발생한 현상인 것으로 판단된다.

따라서 교량의 설계시 탄성받침을 사용하는 경우 충격계수에 대하여 좀 더 신중한 고려가 필요하다고 판단된다.

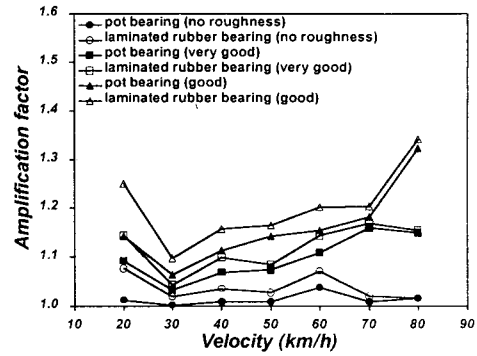
4. 결론

본 연구에서는 탄성받침을 가진 교량의 차량하중에 의한 동적응답특성을 분석하기 위하여 탄성받침과 탄성받침의 강성과 감쇠를 모형화하여 교량의 동적해석 모형에 반영하여 차량의 주행에 의한 교량의 동적거동을 탄성받침을 사용한 교량과 일반받침을 사용한 교량의 동적거동을 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 탄성받침을 사용한 경우 교량의 강성의 저하로 인하여 고유진동수가 줄어들며 동적응답이 일반받침을 사용한 경우에 비해 다소 커지고, 진동특성도 더 복잡한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 특히 비틀림 강성의 저하로 인하여 비틀림 모드에서 고유진동수의 감소가 크게 나타나고 이로 인하여 동적응답의 증가되는 것으로 분석되었다.
2. 차량의 주행에 의한 교량의 동적증폭계수에 대한 변화를 분석한 결과 탄성받침을 사용한 경우가 일반받침을 사용한 경우에 비하여 동적증폭계수가 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 교량의 설계시 탄성받침을 사용하는 경우 충격계수에 대한 신중한 고려가 필요하다고 판단된다.

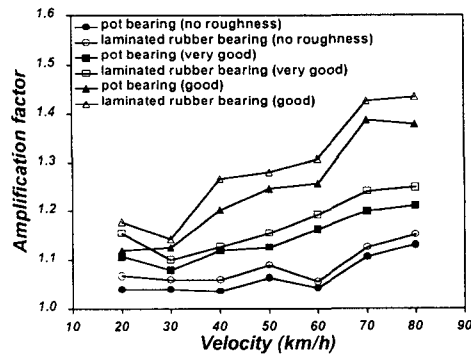


(a) 3축 트럭

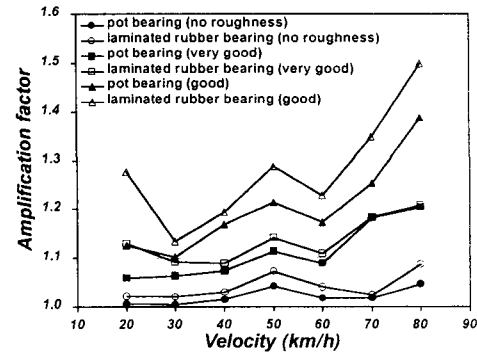


(b) 5축 세미-트레일러

그림 6 합성형 관형교의 동적증폭계수 변화



(a) 3축 트럭



(b) 5축 세미-트레일러

그림 7 합성형 강상자형교의 동적증폭계수 변화

참 고 문 헌

1. Hambly, E.C., *Bridge Deck Behaviour*, Chapman & Hall, 1991.
2. 김상효, 전강훈, 허진영, 김종학, "중차량 텐덤 모형화에 의한 강관형교의 동적응답에 관한 연구", 한국강구조공학회 학술발표회 논문집, 1999.
3. 김상효, 허진영, "차량하중에 의한 다주형 강관형교의 충격계수 변화에 관한 연구", 한국전산구조공학회논문집, 1997.9.
4. 전규식, *교량의 내진 및 면진설계법과 응용*, 제19회 전산구조공학회 기술강습회, 1998.
5. AASHTO, *LRFD Bridge Design Specification*, 2nd Edition, 1998.