

차종에 따른 지방도 소규모 도로교의 동적응답

정태주^{1*}

¹교수, 한라대학교, 토목공학과

Dynamic Response of Short-Span Highway Bridges on Local Road by Vehicle Type

Chung, Tae Ju^{1*}

¹Professor, Dept. of Civil Engineering, Halla University, Wonju, 26404, Korea

Abstract - In this study, the dynamic responses of short-span bridges on local road are investigated by numerical analysis considering road surface roughness of bridge and bridge-vehicle interaction. Simply supported of RC slab bridges with span length of 8 m, 10 m and 12 m are used for bridge model, settlements of approach slab are considered in the analysis, and the road surface roughness of bridge are generated from power spectral density (PSD) function for poor road. Three different vehicles of 4-axle dump truck and 5-axle tractor-trailer (DB-24 and KL-510) are used for 3-D. vehicle model. The impact factors and dynamic load allowance (DLA) of RC slab bridges for different spans, type of vehicles, settlements of approach slab and road surface roughness for poor road are calculated by the proposed numerical analysis and compared with those specified by several bridge design codes.

Keywords - Short-span bridge, Road surface roughness, Expansion joint, Impact factor, DLA

1. 서론

차량이 교량을 통과할 때 발생하는 교량의 동적응답은 차량의 길이, 중량 및 주행속도 등과 같은 차량의 동적특성, 교량의 지간 및 형식 등과 같은 교량의 동적특성, 그리고 교량 바닥판의 노면조도, 신축이음장치와 어프로치 슬래브의 파손과 침하 등 여러 가지 요소의 영향을 받는다. 이와 같이 다양한 요소의 영향을 받는 교량의 동적응답을 도로교설계 기준에서는 충격계수(impact factor, IF) 또는 동적하중허용계수(dynamic load allowance, DLA) 등을 사용하여 반영하고 있는 것이 일반적이다. 허용응력설계에 기초한 도로교설계 기준(2005)^[1]을 비롯한 각국의 도로교설계기준에서는 일

반적으로 충격계수를 교량 지간의 함수 또는 교량의 고유진동수의 함수로 나타내고, LRFD에 기초한 도로교설계 기준(2015)^[2], American Association of State Highway and Transportation Officials(AASHTO)^[3] 등에서는 기존의 실험 및 해석결과를 통계적으로 분석하여 보정한 DLA로 규정하고 있다.

교량의 동적응답에 관한 실험적 연구 사례로 외국에서는 AASHTO Road Test^[4], Billing^[5], Cantieni^[6] 등이 있으며, 국내에서는 Lee *et al.*^[7]이 고속도로상의 29개 도로교의 충격계수와 노면조도를 측정하였다. 그리고 해석적 연구 사례로 외국에서는 Huang^[8], Hwang^[9], Wang *et al.*^[10] 등이 있으며, 국내에서는 Kim^[11]과 Chung^{[12]-[14]} 등이 교량과 차량을 3차원으로 모델링하고 노면조도를 고려한 도로교의 동적응답을 연구하였다.

과거부터 운행되고 있는 단일차량인 3축 11톤 카고 트럭과 15톤 덤프트럭의 총중량은 설계 차량활하중에 비해 작으나, 2000년대 초반부터 운행되고 있는 단일차량인 4축 24톤 덤프트럭의 총중량은 약 380 kN으로 DB-24와 KL-510의 432 kN과 510 kN보다 작으나 전체 차축간의 길이가 5.9 m

Note.-Discussion open until April 30, 2020. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 14, 2019; revised August 30, 2019; approved on August 30, 2019.

Copyright © 2019 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-33-760-1263 Fax. +82-33-760-1261

E-mail. tjchung@halla.ac.kr

로 매우 짧다. 그리고 5축 트랙터-덤프트레일러 차축의 길이는 약 8.4 m로 설계 차량활하중인 DB-24와 비슷하다. 도로교설계기준(2005, 2015)^{[1],[2]}에 규정된 DB-24와 KL-510은 주로 트랙터-트레일러를 기준으로 제정되었다.

지금까지의 연구에서는 지간이 약 20 m 이상인 중·대규모 도로교를 주로 연구하여 왔으며, 소규모 도로교에 대한 연구는 거의 실시되지 않은 상태이다. 그러나 국토교통부의 도로교량 및 터널현황 조사^[15]에 의하면 2018년 현재 우리나라에 건설된 전체 도로교는 34,298개이고, 이 중에 주로 소규모 교량으로 건설되는 RC라멘교와 RC슬래브는 각각 8,092개와 8,271개로 전체 교량의 47.7%를 차지하고 있으므로 소규모 도로교의 동적응답에 대한 연구가 필요하다.

근래에 도시주변 및 지방지역의 대형 개발 사업으로 24톤 덤프트럭과 트랙터-덤프트레일러가 지방도를 운행하는 빈도가 증가하고 있는 추세이고, 소규모 교량의 지간은 차량길이보다 짧거나 비슷한 경우가 많으며, 교량 진입부의 처짐에 의한 단차로 인한 차량의 충격하중은 중·대규모 교량의 신축이음장치에 많은 영향을 미치고 지간 중앙부에는 거의 영향을 미치지 않는 반면에 소규모 교량의 경우 신축이음장치는 물론 지간 중앙부에도 영향을 미칠 수 있으므로 소규모 교량은 설계 차량활하중을 비롯하여 24톤 덤프트럭에 의한 동적응답도 연구할 필요가 있는 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 노면조도 및 교량과 차량 사이의 상호작용을 고려한 수치해석방법을 사용하여 RC 슬래브교의 동적응답을 연구하였다. 이때 교량 진입부의 단차와 교량 바닥판의 노면조도를 고려하였고, 대상교량은 지간이 8 m, 10 m와 12 m인 단순 RC슬래브교를 선정하였으며, 차량은 4축 24톤 덤프트럭과 5축 트랙터-트레일러인 DB-24와 KL-

510을 사용하였다. 교량지간, 차량의 종류, 단차 및 노면조도에 따른 신축이음장치와 지간 중앙의 충격계수 및 DLA를 구하여 각국의 도로교설계기준과 비교하였다.

2. 차량과 교량의 운동방정식

본 연구에서는 4축 단일차량과 5축 트랙터-트레일러의 차량모델을 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 현가장치에 의해 받쳐지는 현가장치 상질량과 하질량으로 구분하여 3차원으로 모델링하였다. 여기서, 현가장치 상질량은 차체이고, 현가장치 하질량은 차륜축이며, 차륜은 차륜축에 포함시켰다.

Fig. 1에 나타낸 차량모델에 대한 운동방정식은 식 (1)을 사용하여 유도하였다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = 0 \quad (1)$$

여기서, T 는 차량 시스템의 전체 운동에너지, V 는 차량 시스템의 전체 위치에너지, D 는 차량 시스템의 전체 분산에너지이고 q_i 와 \dot{q}_i 는 일반화된 변위와 속도이다.

차량의 전체 운동에너지 $T = \sum T_i$ 는 차량 시스템 요소의 질량 및 수직변위의 속도 \dot{y} 와 피칭 및 롤링에 대한 회전속도 $\dot{\theta}$ 와 $\dot{\phi}$ 를 사용하여 계산하고, 차량의 전체 위치에너지 $V = \sum V_i$ 는 현가장치 및 타이어 스프링의 상대변위로 구하였다.

교량의 운동방정식은 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$[M_B] \{\ddot{x}\} + [C_B] \{\dot{x}\} + [K_B] \{x\} = \{F_B(t)\} \quad (2)$$

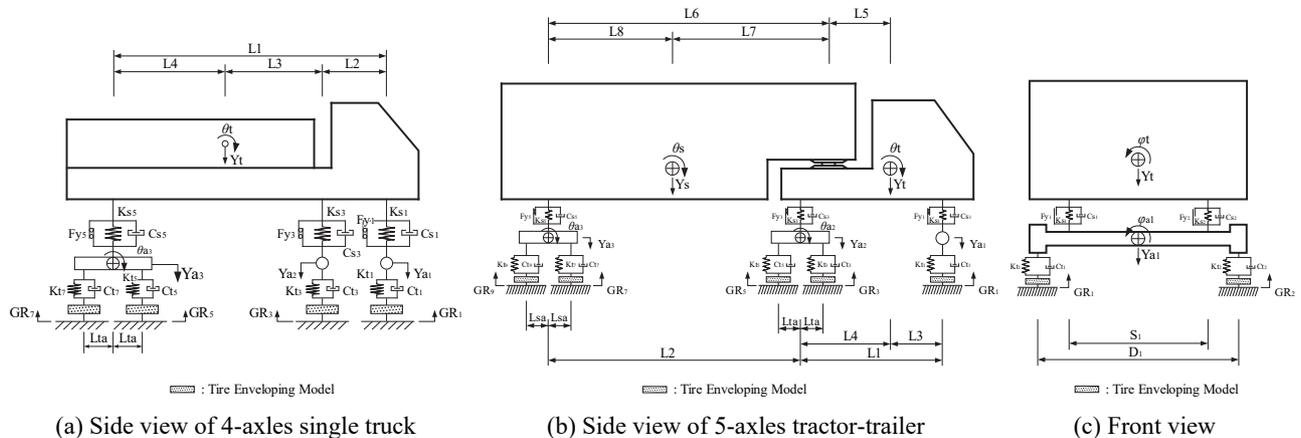


Fig. 1. Vehicle model

여기서, $[M_B]$ 는 교량의 전체 질량 매트릭스, $[C_B]$ 는 교량의 전체 감쇠 매트릭스, $[K_B]$ 는 교량의 전체 강도 매트릭스, x , \dot{x} , 및 \ddot{x} 는 교량 절점의 변위, 속도 및 가속도 벡터이고 $\{F_B(t)\}$ 는 교량과 차량 사이의 상호작용에 의해 교량에 작용하는 하중 벡터이다.

차량의 운동방정식은 Newmark- β 법을 사용하고, 교량의 운동방정식은 모우드 중첩법을 사용하여 그 해를 계산하였다. 4축과 5축 차량은 각각 10-자유도와 14-자유도를 갖는 3차원 차량으로 모델링하고 타이어의 접지 폭을 고려하였으며, 수치해석의 결과와 실험값을 비교하여 그 타당성을 입증하였다. 차량의 운동방정식, 제원과 물성, 해석순서 등 기타 자세한 사항은 참고문헌 Chung^{[12],[14]}에 자세히 수록되어 있다.

3. 대상교량의 동적응답

3.1 대상교량, 노면조도 및 하중조건

3.1.1 대상교량

동일한 지간의 교량이라도 설계자에 따라 약간씩 다르게 설계될 수 있으므로 대상교량은 Ministry of Construction^[16]에서 제정한 도로교 상부구조표준도에 수록되어 있는 1등교 단순 RC슬래브교로 지간이 8m, 10m와 12m인 3개의 교량을 선정하고, 교량의 폭은 10.5m이며 슬래브의 두께는 지간이 8m, 10m와 12m에 대하여 각각 0.5m, 0.65m와 0.75m이다. 좀 더 자세한 내용은 참고문헌에서 찾아볼 수 있다.

3.1.2 노면조도

Dodds and Robson^[17]은 도로의 노면조도를 평균값이 영인 정상확률분포로 가정하고 노면조도의 PSD를 지수함수의 형태로 나타내어 노면조도계수에 따른 도로의 분류표를 제안하였으며, “보통의 도로”와 “불량한 도로”에 대한 노면조도계수는 각각 $(32 \sim 128)$ 과 $(128 \sim 512) \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{cycle}$ 로 제안하였다. Lee *et al.*^[7]과 Chung and Cha^[18]는 각각 고속도로와 지방도 상의 도로교에 대한 평균조도계수가 $55 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{cycle}$ 와 $225 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{cycle}$ 로 “보통의 도로”와 “불량한 도로”에 상응한다고 제안하였으며, 지방도 상의 RC슬래브교에 대한 평균조도계수가 $267 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{cycle}$ 임을 제안하였다.

따라서 본 연구에서는 노면조도계수를 Dodds와 Robson

이 제안한 “불량한 도로”의 노면조도계수의 평균값인 $320 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{cycle}$ 을 사용하여 인공적으로 생성시킨 10개의 노면조도를 사용하여 교량의 동적응답을 구하였다.

3.1.3 어프로치 슬래브의 처짐에 의한 단차

교량 진입부의 처짐으로 인한 단차는 어프로치 슬래브의 파손과 교대 뒤채움 토사의 침하 등 여러 가지 원인에 의해 발생하며, 차량의 충격하중을 매우 증가시키기 때문에 신축이음장치의 파손 원인이 되기도 한다. 단차에 의해 발생하는 차량의 충격하중은 중·대규모 교량의 신축이음장치에 많은 영향을 미치나 지간 중앙부에는 거의 영향을 미치지 않지만 소규모 교량의 경우 신축이음장치는 물론 지간 중앙부에 영향을 미칠 수 있으므로 이에 대한 연구를 실시하였다.

Ministry of Construction^[19]의 도로포장 설계·시공지침에 의하면 자동차 전용도로와 일반도로의 경우 단차의 측정 길이는 각각 15m와 10m로 하고, 단차의 유지보수 여부를 판단하기 위한 최대 단차는 자동차 전용도로의 교량과 암거에 대하여 각각 20mm와 30mm, 일반도로의 교량과 암거에 대하여 각각 30mm와 40mm로 규정하고 있다.

예로서 지방도 상의 도로교에 발생한 단차의 경향을 파악하기 위하여 Chung and Cha^[18]가 측정된 9개의 RC슬래브교 중에서 단차가 거의 발생하지 않은 교량을 제외시킨 4개 교량에 대한 단차의 형상을 Fig. 2에 나타내었으며, 최대 단차는 대략 20mm - 60mm이고 평균값이 약 35mm 정도로 유지보수 여부를 판단하기 위한 기준값을 약간 초과한다.

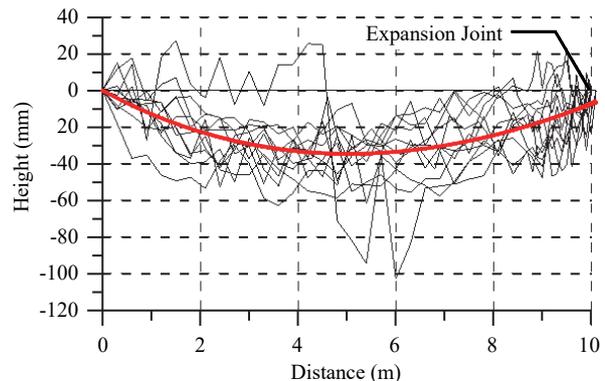


Fig. 2. Settlement of approach slab

따라서 본 연구에서는 단차를 측정된 자료가 많지 않기 때문에 단차의 모형을 Fig. 3과 같이 가정하고, 임의의 위치에서의 단차는 다음 식 (3)을 사용하여 구하였다.

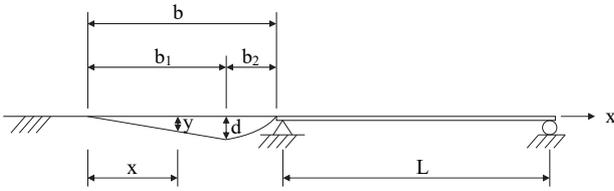


Fig. 3. Model for settlement of approach slab

$$y = (-)\frac{d}{b_1}x, \quad x \leq b_1 \quad (3a)$$

$$y = (-)d \cdot \cos\frac{\pi}{2b_2}x, \quad x \geq b_1 \quad (3b)$$

여기서, y = 임의의 위치의 단차, d = 최대 단차, $b = 10$ m, $b_1 = 9$ m, $b_2 = 1$ m이다.

3.1.4 하중조건

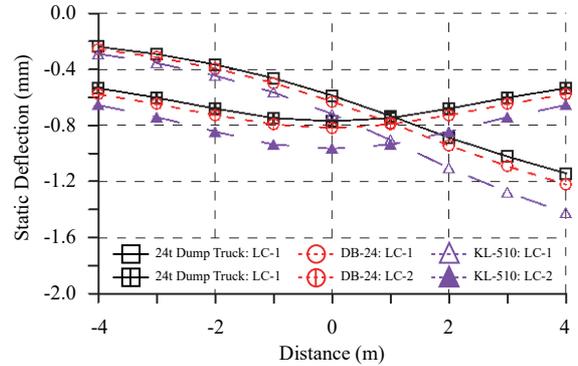
하중조건은 차량의 우측 바퀴가 연석에서부터 300 mm 떨어져 주행할 때 하중조건-1(LC-1)로 하고, 차량의 중심이 교량의 중앙을 통과할 때 하중조건-2(LC-2)로 하였다.

대상교량의 모델링 시 콘크리트 슬래브는 셸요소를 사용하여 3차원으로 모델링하였고, 교축 직각방향으로 18등분, 교축방향으로 20등분하여 360개의 셸요소를 사용하였다.

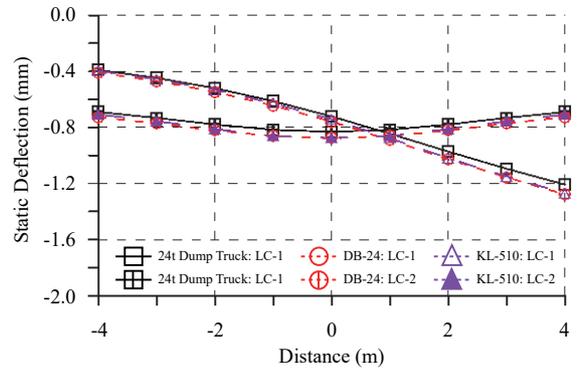
3.2 정적해석

Fig. 4(a)-(c)와 Table 1에는 24톤 덤프트럭, DB-24 및 KL-510에 의해 지간이 8 m, 10 m, 및 12 m인 교량의 지간 중앙에 발생하는 가로방향의 정적처짐과 최대 정적처짐을 각각 나타내고, Fig. 4(d)에는 차량의 앞바퀴가 교량을 진입한 후 뒷바퀴가 교량을 완전히 빠져나갈 때까지 지간 중앙에 발생하는 정적처짐의 변화를 나타내고, 가로축은 교량 시점에서부터 차량 앞바퀴의 위치를 나타낸다.

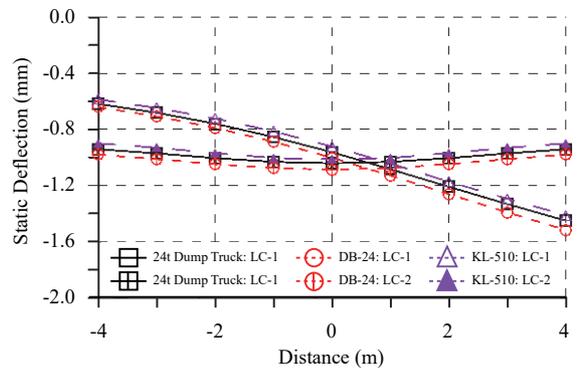
Table 1과 Fig. 4에서 보는 바와 같이 차량의 총중량이 가장 큰 KL-510을 기준으로 DB-24와 24톤 덤프트럭에 의한 LC-1과 LC-2의 최대 정적처짐에 대한 비율은 지간이 8 m, 10 m와 12 m일 때 각각 86 %와 80 %, 100 %와 95 % 및 107 %와 103 %이다. 그리고 Fig. 4(d)에서 보는 바와 같이 차량의 종류에 따른 교량 지간 중앙의 정적처짐의 변화는 차량의 길이가 교량의 지간보다 작거나 비슷한 24톤 덤프트럭과 DB-24의 경우 거의 단일 곡선을 나타내지만 차량의 길이가 교량의 지간보다 긴 KL-510의 경우 이중 곡선의 형태를 나타낸다.



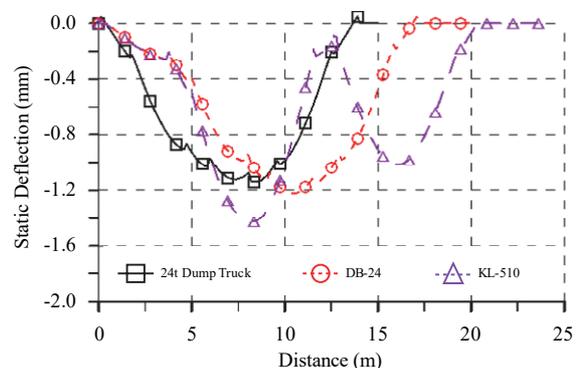
(a) Span = 8 m



(b) Span = 10 m



(c) Span = 12 m



(d) Midspan (span: 8 m, LC-1)

Fig. 4. Static deflection of bridges

Table 1. Maximum static deflection of bridges (Unit: mm)

Vehicle type		Span (max. static deflection)		
		8 m	10 m	12 m
24t dump truck	LC-1	-1.142	-1.208	-1.452
	LC-2	-0.771	-0.831	-1.042
DB-24	LC-1	-1.222	-1.278	-1.518
	LC-2	-0.818	-0.876	-1.086
KL-510	LC-1	-1.425	-1.271	-1.413
	LC-2	-0.967	-0.875	-1.013

KL-510, DB-24와 24톤 덤프트럭의 총중량은 각각 510 kN, 432 kN와 380 kN으로 차이가 많으나, 정적처짐은 교량의 지간에 따라 약간의 차이가 있기는 하지만 거의 같은 값을 나타낸다. 따라서 소규모 교량의 정적처짐은 차량의 총중량뿐만 아니라 차량의 길이에 의한 영향을 받기 때문에 소규모 도로교의 동적응답 검토 시 단일차량인 24톤 덤프트럭에 의한 영향을 검토하여야 할 것으로 판단된다.

3.3 동적응답

본 연구에서 충격계수는 다음 식 (4)을 사용하여 구하였다.

$$I(\%) = \frac{D_{dyn} - D_{sta}}{D_{sta}} \times 100 \quad (4)$$

여기서, $I(\%)$ 는 충격계수(impact factor), D_{sta} 는 최대 정적 처짐(하중)이고, D_{dyn} 은 최대 동적 처짐(하중)이다.

3.3.1 신축이음장치의 충격계수

신축이음장치의 충격계수는 단차가 20 mm, 30 mm 및 40 mm일 때 차량의 주행속도에 따른 차량 타이어의 최대 동적 하중을 사용하여 구하였다. 주행속도는 지방도의 설계속도가 대략 60 km/h 내외이나 100 km/h까지 10 km/h의 간격으로 해석하였다.

Figs. 5-7에는 신축이음장치의 주행속도별 충격계수를 나타내었으며, Table 2에는 주행속도가 60 km/h, 80 km/h 및 100 km/h이고 단차가 20 mm, 30 mm 및 40 mm일 때 차량의 각 차륜축의 충격계수에 대한 평균과 변동계수(COV)를 나타내었다.

Fig. 5에 나타난 바와 같이 24톤 덤프트럭에 의한 충격계수는 주행속도에 따라 거의 선형적으로 증가하고, 주행속도가 대략 70 km/h까지는 분산이 매우 작으나 이후의 주행속

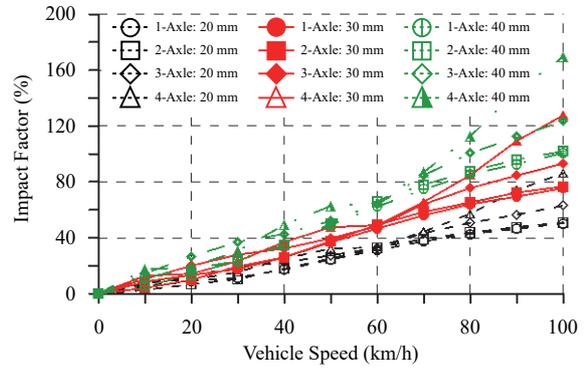


Fig. 5. Impact factor versus vehicle speed by tire force (24t dump truck)

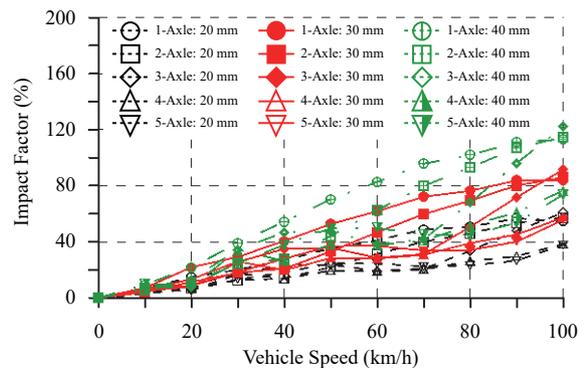


Fig. 6. Impact factor versus vehicle speed by tire force (DB-24)

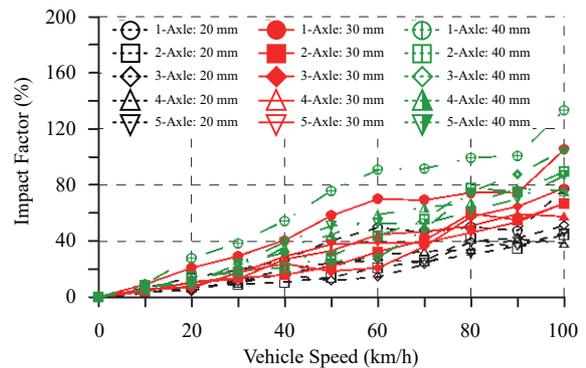


Fig. 7. Impact factor versus vehicle speed by tire force (KL-510)

도에서는 약간의 분산을 나타낸다. 그리고 Fig. 6과 Fig. 7에 나타난 바와 같이 DB-24와 KL-510에 의한 충격계수도 주행속도에 따라 거의 선형적으로 증가하나, 중간축과 후륜축의 경우 주행속도가 60 km/h - 80 km/h의 구간에서 거의 일정하다가 이후의 속도에서 다시 증가하며 24톤 덤프트럭보다 분산이 약간 크게 나타낸다.

차량에 따른 신축이음장치의 충격계수를 살펴보면, Figs.

5-7과 Table 2에서 보는 바와 같이 단차와 설계속도 기준인 30 mm와 60 km/h일 때 최대 충격계수는 24톤 덤프트럭이 48.3%로 제일 크고, DB-24와 KL-510가 각각 40.5%와 41.4%로 도로교설계기준의 70%을 만족시킨다. 그러나 단차가 기준을 10 mm 이상 초과하고 주행속도가 60 km/h보다 증가하면 기준을 초과한다.

Table 2. Impact Factor by tire force according to vehicle type and height of bump

Height (mm)	Speed (km/h)	Vehicle type			
		24t dump truck	DB-24	KL-510	
20	60	Mean	32.52	27.03	28.29
		COV (%)	2.83	34.59	46.94
	80	Mean	48.61	36.00	39.18
		COV (%)	13.88	33.61	19.48
	100	Mean	62.66	49.81	51.50
		COV (%)	26.79	21.85	29.14
30	60	Mean	48.34	40.49	41.39
		COV (%)	2.54	34.97	44.25
	80	Mean	72.44	53.93	57.70
		COV (%)	13.44	34.30	18.85
	100	Mean	93.28	74.92	74.89
		COV (%)	26.07	22.64	24.71
40	60	Mean	64.38	54.16	54.88
		COV (%)	2.70	35.09	42.13
	80	Mean	96.58	71.91	76.25
		COV (%)	13.07	34.90	18.91
	100	Mean	123.95	100.13	98.13
		COV (%)	25.96	22.99	22.74

따라서 신축이음장치의 최대 충격계수는 유지관리와 설계속도 기준을 만족시키는 경우 70%의 기준을 만족하지만, 단차가 유지관리 기준을 10 mm 이상 초과하고 설계속도 기준을 초과하는 경우에는 70%의 기준을 만족시키지 못하므로 최대 단차가 유지관리 기준을 10 mm 이상 초과하지 않도록 지속적인 유지관리가 필요하다.

3.3.2 단차에 의한 대상교량의 동적응답

본 연구에서 모우드 중첩법을 사용하여 교량의 동적해석을 실시할 때 150개의 모우드를 사용하였으며, 대상교량의 고유진동수를 Table 3에 나타내었다. 지간이 8 m, 10 m와 12 m인 RC슬래브교의 고유진동수는 각각 12.87 Hz, 10.37 Hz와

8.14 Hz이다.

Table 3. Modal frequencies of RC slab bridges (Unit: Hz)

No.	Span (modal frequencies)		
	8 m	10 m	12 m
1st	12.87	10.37	8.14
2nd	17.94	16.42	14.61
3rd	31.02	32.49	31.84
4th	49.72	40.38	32.62
5th	52.67	46.58	39.09

단차가 교량의 지간 중앙의 충격계수에 미치는 영향을 검토하기 위하여 노면조도는 고려하지 않고 오직 단차만을 고려하여 대상차량에 의한 대상교량의 동적응답을 구하였고, 차량의 주행속도는 10 km/h의 간격으로 80 km/h까지 해석하였다. Figs. 8-10에는 대상차량이 20 mm, 30 mm 및 40 mm의 단차를 각각 통과할 때 지간 8 m, 10 m와 12 m 교량의 지간 중앙에 발생하는 최대 충격계수를 주행속도별로 나타내었다.

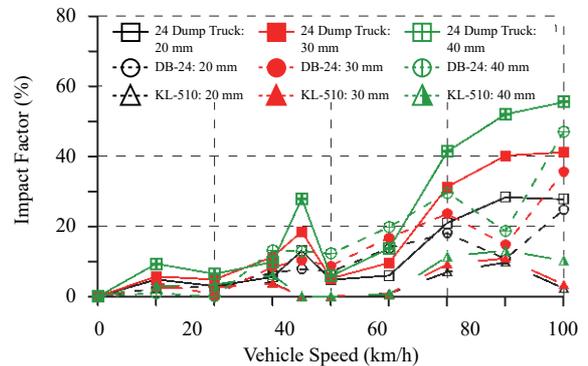


Fig. 8. Impact factor versus vehicle speed for 8 m RC slab bridge (Bump)

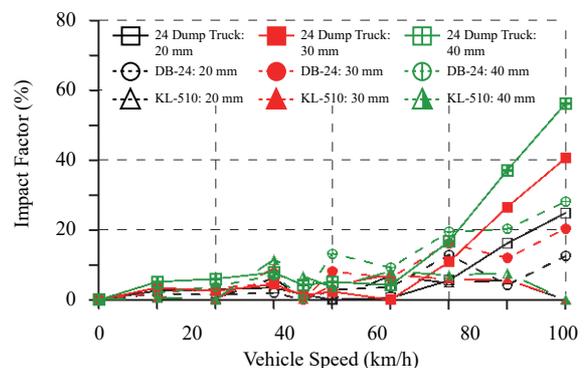


Fig. 9. Impact factor versus vehicle speed for 10 m RC slab bridge (Bump)

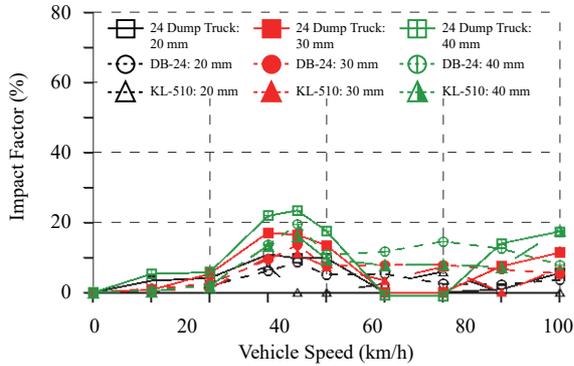


Fig. 10. Impact factor versus vehicle speed for 12 m RC slab bridge (Bump)

교량 지간 중앙의 충격계수를 살펴보면, Fig. 8에 나타난 지간이 8 m인 RC슬래브교의 경우 24톤 덤프트럭과 DB-24는 단차와 주행속도가 증가하면 증가하는 경향을 나타내지만 KL-510은 단차와 주행속도가 증가하여도 10% 이하로 거의 일정하다. Fig. 9에 나타난 지간이 10 m인 RC슬래브의 경우 차량의 종류에 관계없이 50 km/h까지는 단차의 크기와 주행속도가 증가하여도 대략 10% 이하의 값을 나타내지만, 24톤 덤프트럭과 DB-24는 60 km/h부터 단차와 주행속도가 증가하면 빠르게 증가하고, KL-510은 단차와 주행속도가 증가하여도 거의 증가하지 않는다. 그리고 Fig. 10에 나타난 지간이 12 m인 RC슬래브교의 경우 모든 차량이 주행속도가 비교적 느린 35 km/h에서 15% 내외로 가장 크고 이후의 주행속도에서도 15% 이하로 거의 일정하다.

Table 4에는 단차가 20 mm, 30 mm 및 40 mm일 때 지간이 8 m, 10 m와 12 m 교량의 지간 중앙의 최대 충격계수를 나타내었다. 차량에 따른 교량 지간 중앙의 충격계수를 살펴보

면, 지간이 8 m인 RC슬래브교의 경우 KL-510은 기준을 초과하는 40 mm와 70 km/h일 때 13.1%로 작지만, DB-24는 30 mm와 60 km/h일 때 23.6%이지만 80 km/h일 때 35.6%이고, 40 mm와 60 km/h일 때 29.6%, 80 km/h일 때 37.1%로 기준을 초과한다. 그리고 24톤 덤프트럭은 30 mm와 60 km/h일 때 31.3%로 기준보다 크며, 70 km/h일 때 40.2%이며, 40 mm이고 60 km/h일 때 41.3%, 70 km/h일 때 52.0%로 단차와 주행속도가 기준을 약간만 초과하여도 기준을 많이 초과한다.

지간이 10 m인 RC슬래브교의 경우 KL-510은 40 mm와 70 km/h일 때 11.6%로 작지만, DB-24는 30 mm와 60 km/h일 때 16.2%이고, 40 mm와 60 km/h일 때 16.7%, 70 km/h일 때 20.2%이다. 24톤 덤프트럭은 30 mm와 60 km/h일 때 10.8%이지만 80 km/h일 때 40.6%이다. 그리고 지간이 12 m인 RC슬래브교의 경우 DB-24와 KL-510은 단차가 40 mm이고 80 km/h일 때 최대 19.4%이고, 24톤 덤프트럭은 30 km/h이고 30 mm일 때 17.1%, 40 mm일 때 23.4%로 다른 차량보다는 크게 발생한다.

따라서 단차에 의한 교량 지간 중앙의 충격계수에는 단일 차량인 24톤 덤프트럭이 가장 많은 영향을 미치고, DB-24와 KL-510의 순서로 영향을 미치며, 대략 지간이 10 m 이하의 교량이 단차의 영향을 받는 것으로 판단된다. 지간이 8 m인 RC슬래브교는 단차가 30 mm이고 60 km/h일 때 24톤 덤프트럭에 의한 값이 31.3%로 25%의 기준보다 크다.

3.3.3 노면조도에 의한 대상교량의 동적응답

노면조도가 교량 지간 중앙의 충격계수에 미치는 영향을

Table 4. Impact factor of RC slab bridges according to vehicle type and height of bump

Height (mm)	Speed (km/h)	Span = 8 m			Span = 10 m			Span = 12 m		
		24t D.T	DB-24	KL-510	24t D.T	DB-24	KL-510	24t D.T	DB-24	KL-510
20	30(35)	(13.0)	7.7	3.8	3.5	2.0	6.2	10.9	(8.6)	7.5
	60	21.0	18.0	7.0	5.5	12.8	4.7	0.0	2.5	5.9
	70(80)	28.3	(24.8)	9.7	16.2(24.0)	(12.5)	5.6	(5.6)	2.3	0.0
30	30(35)	(18.5)	10.3	3.7	4.4	4.8	9.0	17.1	(13.5)	(11.0)
	60	31.3	23.6	9.2	10.8	16.2	5.8	0.0	7.8	7.3
	70(80)	40.2	(35.6)	10.9	26.6(40.6)	(20.4)	5.8	(11.4)	6.6	(7.0)
40	30(35)	(27.9)	12.9	6.1	7.8	7.0	11.6	(23.4)	(19.4)	(16.2)
	60	41.3	29.6	11.4	16.7	19.5	7.1	0.0	14.6	8.0
	70(80)	52.0	(37.1)	13.1	37.1(56.2)	20.2(28.1)	7.6	(17.4)	12.5	(17.9)

검토하기 위하여 노면조도계수는 $320 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{cycle}$ 을 사용하여 인공적으로 생성시킨 10개의 노면조도를 사용하여 대상교량의 동적응답을 구하였다.

Figs. 11-13에는 노면조도에 의한 8 m, 10 m와 12 m 지간 교량의 지간 중앙에 발생하는 최대 충격계수를 주행속도별 나타내었으며 여기서, 최대 충격계수는 10개의 노면조도를 사용하여 구한 값의 평균을 나타낸다.

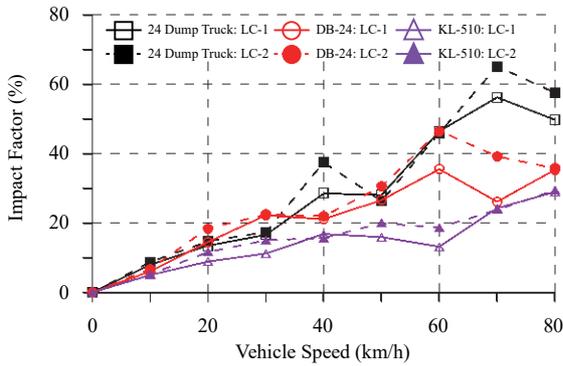


Fig. 11. Impact factor versus vehicle speed for 8 m RC slab bridge (Poor)

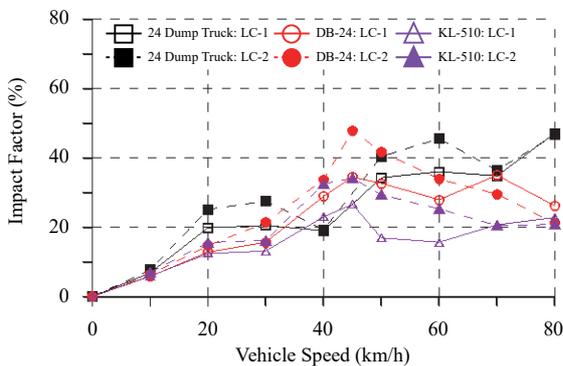


Fig. 12. Impact factor versus vehicle speed for 10 m RC slab bridge (Poor)

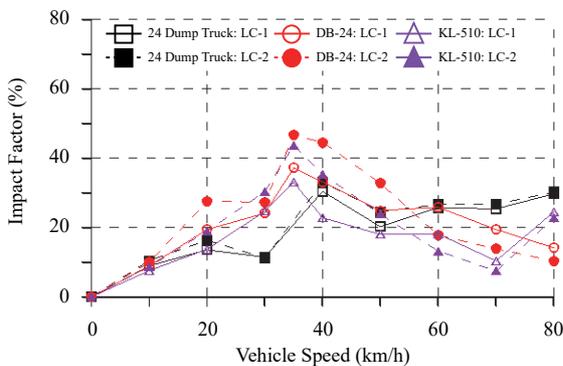


Fig. 13. Impact factor versus vehicle speed for 12 m RC slab bridge (Poor)

노면조도에 의한 교량별 지간 중앙의 충격계수를 살펴보면, Fig. 11에 나타낸 8 m RC슬래브교는 LC-1과 LC-2 모두 주행속도가 증가할수록 증가하며, 60 km/h일 때 LC-1과 LC-2의 값은 24톤 덤프트럭이 모든 하중조건에서 46 %, DB-24가 36%와 47 %, KL-510이 16%와 20%이다. Fig. 12에 나타낸 10 m RC슬래브교는 LC-1과 LC-2 모두 60 km/h까지 증가하고 이후의 주행속도에서 거의 일정하거나 약간 감소하며, 60 km/h에서 LC-1과 LC-2의 값은 24톤 덤프트럭이 36 %와 45.5 %이고, 45 km/h에서 DB-24와 KL-510은 각각 34 %와 48 % 및 27%와 34 %로 최대를 나타낸다.

Fig. 13에 나타낸 12 m RC슬래브교는 LC-1과 LC-2 모두 대략 35 km/h에서 최대를 나타내고 60 km/h까지 감소한 후 이후의 주행속도에서 거의 일정한 경향을 나타내며, LC-1과 LC-2의 값은 24톤 덤프트럭이 40 km/h일 때 30%와 33 %, DB-24와 KL-510은 35 km/h일 때 각각 37%와 47 % 및 33 %와 44 %로 최대를 나타낸다.

Bahkt and Pinjakar^[20]에 따르면 교량의 DLA는 많은 랜덤 변수(random variable)의 함수로 결정론적 값을 갖지 않고 통계분석에 근거한 값으로 규정되어야 적절한 것으로 제안하고 있다. 즉, 충분한 표본수를 갖고 평균과 변동변수를 이용한 값으로 규정되어야 하며, 다음과 같은 보정 식을 사용하여 구한 DLA를 규정하였다.

$$DLA_S = DLA_M (1 + s \cdot \delta \cdot \beta_T) / \alpha_{LL} \quad (5)$$

여기서, DLA_S 는 DLA의 보정치, DLA_M 는 DLA의 측정치의 평균값, s 는 동적하중에 대한 분리계수(0.57), δ 는 변동계수, β_T 는 목표신뢰도 지수(3.5), α_{LL} 은 활하중 계수(1.8)이다.

Table 5에는 대상차량과 대상교량에 대한 최대 충격계수 평균과 변동계수(COV)를 요약하였으며, 최대 충격계수는 주행속도가 60km/h 이하이고 LC-1과 LC-2 중에서 큰 값을 사용하였다.

차량과 교량에 따른 지간 중앙의 충격계수를 살펴보면, Table 5에 나타낸 24톤 덤프트럭, DB-24 및 KL-510에 대한 평균과 변동계수 및 식 (5)를 사용하여 구한 전체 대상교량에 대한 24톤 덤프트럭, DB-24 및 KL-510의 DLA_S 는 각각 46.8 %, 48.6 % 및 40.9 %이고, 전체 차량에 대한 8 m, 10 m 및 12 m RC슬래브교의 DLA_S 는 각각 46.2 %, 47.5 % 및 45.3 %이며, 전체 교량과 차량에 대한 DLA_S 는 46.2 %로 계산되었다.

Table 5. Summary of DLA statistics by RC slab bridges (poor road)

Span (m)		24t Dump truck	DB-24	KL-510	Total
8	Mean	46.47	46.56	19.93	37.65
	COV (%)	55.65	37.25	67.15	60.50
10	Mean	45.49	47.85	34.14	42.50
	COV (%)	43.92	50.97	57.18	50.68
12	Mean	33.02	46.59	43.68	41.10
	COV (%)	51.23	44.77	50.38	49.23
Total	Mean	41.66	47.00	32.58	40.42
	COV (%)	51.43	43.26	63.10	52.94

노면조도에 의한 교량 지간 중앙의 DLA_s 는 24톤 덤프트럭과 DB-24가 가장 많은 영향을 미치며 KL-510의 순서이다. 그리고 지간이 8 m, 10 m 및 12 m인 RC슬래브교의 DLA_s 는 각각 46.2%, 47.5% 및 45.3%로 비슷하고 전체 대상교량에 대한 DLA_s 는 46.2%로 도로교설계기준과 AASHTO에 규정된 25%와 33%보다 크다.

지방도의 소규모 도로교는 노면조도가 “불량한 도로”에 상응하여 전체 대상교량의 DLA_s 는 46.2%로 계산되었다. 따라서 도로교설계기준에서는 바닥판 신축이음장치를 제외한 모든 부재의 충격계수를 25%로 규정하고 있으나, 지간이 대략 10 m 전후 이하인 소규모 도로교는 충격계수를 25%보다 크게 적용하여야 할 것으로 판단된다.

한편, 본 연구에서는 소규모 도로교의 대상교량으로 RC 슬래브교를 연구하였으나, 현재, 소규모 도로교로 많이 사용되고 있는 다른 형식의 교량에 대한 추가적인 실험 및 해석적 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 교량 바닥판의 노면조도 및 교량과 차량 사이의 상호작용을 고려한 수치해석방법을 사용하고, 대상교량으로 3개의 RC슬래브교, 대상차량으로 24톤 덤프트럭, DB-24와 KL-510, 각각의 대상교량마다 “불량한 도로”에 대한 10개의 노면조도를 생성시켜 사용하였다. 이와 같은 해석적 방법으로 신축이음장치의 충격계수와 단차 및 노면조도에 따른 교량의 충격계수를 구하고 통계적으로 분석하여 DLA 를 구하였으며, 본 연구를 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 소규모 도로교의 최대 정적처짐은 차량의 총중량뿐만 아니라 차량의 길이에 의한 영향을 받으므로 소규모 도로교의 동적응답 검토 시 24톤 덤프트럭에 의한 영향을 검토하여야 할 것으로 판단된다.
- (2) 신축이음장치의 최대 충격계수는 단차와 주행속도 기준을 만족시키는 경우 70%의 기준을 만족시키지만, 단차의 유지관리 기준을 10 mm 이상 초과하고 설계속도 기준을 초과하는 경우에는 기준을 만족시키지 못하므로 단차가 유지관리 기준을 10 mm 이상 초과하지 않도록 지속적인 유지관리가 필요하다.
- (3) 단차에 의한 교량 지간 중앙의 충격계수에는 24톤 덤프트럭이 가장 큰 영향을 미치고, DB-24와 KL-510의 순서이며, 지간이 10 m 이하의 교량이 단차의 영향을 많이 받는 것으로 판단되며, 8 m RC슬래브교는 단차와 설계속도 기준에서 24톤 덤프트럭에 의한 값이 31.3%로 25%의 기준보다 크다.
- (4) 소규모 도로교는 노면조도가 “불량한 도로”에 상응하여 전체 대상차량의 DLA 는 46.2%이다. 따라서 지간이 대략 10 m 전후 이하인 소규모 도로교는 충격계수를 25%보다 크게 적용하여야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2019년도 한라대학교 교내연구비 지원에 의한 것임.

참고문헌(References)

- [1] Ministry of Construction & Transportation (2005) *Highway Bridge Design Standard*, Korea (in Korean).
- [2] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2015) *Highway Bridge Design Standard*, Korea (in Korean).
- [3] American Association of State Highway and Transportation Officials (2017) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (8th Ed.), USA.
- [4] NRC Highway Research Board (1962) *Dynamic Studies of Bridges on the AASHTO Road Test*, Highway Research Board Special Report No. 71, National Academy of Sciences - National Research Council, USA.

- [5] Billing, J. R. (1982) *Dynamic Test of Bridges in Ontario, 1980: Data Capture, Test Procedure and Data Processing*, MTC Research and Development Report No. SRR-82-02, Ministry of Transportation and Communication of Ontario, Canada.
- [6] Cantieni, R. (1983) *Dynamic Load Tests on Highway Bridges in Switzerland*, EMPA Report No. 211, Swiss Federal Laboratories for Material Science and Technology, Switzerland.
- [7] Lee, W., Park, Y.S., and Chung, T.J. (2000) A Study on the Impact Factors of Highway Bridges, *Journal of Korean Society of Civil Engineers A*, KSCE, Vol.20, No.3A, pp.395-406 (in Korean).
- [8] Huang, T. (1960) *Dynamic Response of Three Span Continuous Highway Bridge*, Ph.D. Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.
- [9] Hwang, E.-S. (1990) *Dynamic Loads for Girder Bridges*, Ph.D. Dissertation, University of Michigan, USA.
- [10] Wang, T.-L., Huang, D., and Shahawy, M. (1992) Dynamic Response of Multigirder Bridges, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.118, No.8, pp.2222-2238.
- [11] Kim, C.W. (1997) *An Experimental and Analytical Study for Traffic-Induced Vibration on Roadway Bridges*, Ph.D. Dissertation, Chung-Ang University, Korea.
- [12] Chung, T.J. (2006) Dynamic Analysis of Highway Bridges by 3-D. Vehicle Model Considering Tire Enveloping, *Journal of Korean Society of Civil Engineers A*, KSCE, Vol.26, No.6A, pp.989-999 (in Korean).
- [13] Chung, T.J. (2011) A Study on the Dynamic Response of Highway Bridges by 4-Axles Single Truck, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.23, No.3, pp.395-406 (in Korean).
- [14] Chung, T.-J. (2013) Dynamic Response of Steel Plate Girder Bridges by the KL-510, *Journal of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol.17, No.6, pp.50-60 (in Korean).
- [15] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2019) *2018 Road Bridge and Tunnel Status Report*, MOLIT, Korea (in Korean).
- [16] Ministry of Construction (1979) *Standard for Highway Bridge Superstructure*, Korea (in Korean).
- [17] Dodds, C.J., and Robson, J.D. (1973) The Description of Road Surface Roughness, *Journal of Sound and Vibration*, Elsevier, Vol.31, No.12, pp.175-183.
- [18] Chung, T.J., and Cha, B.K. (2016) Spectra of Road Surface Roughness on Bridges of Minor Road, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol.36, No.5, pp.757-767 (in Korean).
- [19] Ministry of Construction (1991) *Guideline for Pavement Design and Construction*, MOC, Korea (in Korean).
- [20] Bahkt, B., and Pinjakar, S.G. (1989) *Review of Dynamic Testing of Highway Bridges*, MTC Research and Development Report No. SRR-89-01, Ministry of Transportation and Communication of Ontario, Canada.

요약: 본 연구에서는 노면조도 및 교량과 차량의 사이의 상호작용작용을 고려한 수치해석방법에 의한 지방도 소규모 도로교의 동적응답을 연구하였다. 대상교량은 8 m, 10 m와 12 m 지간의 단순 RC슬래브교를 사용하고, 교량 진입부의 단차를 고려하였으며, “불량한 도로”에 대하여 생성시킨 10개의 노면조도를 사용하였다. 대상차량은 4축 24톤 덤프트럭, 5축 트랙터-트레일러인 DB-24와 KL-510을 3차원 차량모델로 모델링하였다. 이와 같은 차량, 교량 진입부의 단차와 노면조도를 사용하여 단순 RC슬래브교의 시간별, 차종별, 단차 및 노면조도에 따른 충격계수와 DLA를 구하고 각국의 설계기준과 비교하였다.

핵심용어: 소규모 도로교, 노면조도, 신축이음장치, 충격계수, 동적하중하용계수
