

LRFD 보정을 위한 동적해석에 의한 도로교의 동적하중허용계수

Dynamic Load Allowance of Highway Bridges by Numerical
Dynamic Analysis for LRFD Calibration

정태주* · 신동구** · 박영석***

Chung, Tae Ju · Shin, Dong-Ku · Park, Young-Suk

Abstract

A reliability based calibration of dynamic load allowance (DLA) of highway bridge is performed by numerical dynamic analysis of various types of bridges taking into account of the road surface roughness and bridge-vehicle interaction. A total of 10 simply supported bridges with three girder types in the form of prestressed concrete girder, steel plate girder, and steel box girder is analyzed. The cross sections recommended in "The Standardized Design of Highway Bridge Superstructure" by the Korean Ministry of Construction are used for the prestressed concrete girder bridges and steel plate girder bridges while the box girder bridges are designed by the LRFD method. Ten sets of road surface roughness for each girder are generated from power spectral density (PSD) function by assuming the roadway as "Average Road". A three dimensionally modeled 5-axle tractor-trailer with its gross weight the same as that of DB-24 design truck is used in the dynamic analysis. For the finite element modeling of superstructure, beam elements for the main girder, shell elements for concrete deck, and rigid links between main girder and concrete deck are used. The statistical mean and coefficient of variation of DLA are obtained from a total of 100 DLA results for 10 different bridges with each having 10 sets of road surface roughness. Applying the DLA statistics obtained, the DLA is finally calibrated in a reliability based LRFD format by using the formula developed in the calibration of OHBDC code.

Keywords : *dynamic load allowance, LRFD, dynamic analysis, highway bridge, reliability analysis*

요 지

본 연구에서는 교량의 노면조도 및 교량과 차량 사이의 상호작용을 고려한 수치해석방법을 사용하여 구한 도로교의 동적하중허용계수(DLA)를 LRFD 형식으로 신뢰도이론의 2차 모멘트법을 적용하여 보정하였다. 대상교량은 건설교통부에서 제정한 "도로교 상부구조 표준도"에 수록되어 있는 단순 PSC빔교와 단순 강관형교, 그리고 LRFD로 설계된 개구제형 단면을 갖는 강박스형교를 사용하고, "보통의 도로"에 대하여 생성시킨 10개의 노면조도를 사용하였다. 차량은 5축 트랙터-트레일러인 표준트럭(DB-24)을 3차원 차량모델로 모델링하고, 교량은 주형을 보요소로, 콘크리트 바닥판은 셸요소로 이상화시켰으며 주형과 콘크리트 바닥판 사이는 Rigid Link를 사용하여 3차원으로 모델링하였다. 3가지 형식에 대한 10개의 교량에 각각 10개의 노면조도를 사용하여 해석적 방법으로 구한 100개의 해석결과와 OHBDC에서 사용한 보정 식을 사용하여 PSC빔교, 강관형교, 강박스형교 및 전체 대상교량에 대한 LRFD 형식의 DLA를 통계적으로 추정하였다.

핵심용어 : 동적하중허용계수, LRFD, 동적해석, 도로교, 신뢰도분석

1. 서 론

도로교를 통과하는 이동차량에 의해 발생하는 도로교의 동적응답은 차량의 주행속도 및 중량 등과 같은 차량의 동적특성, 교량의 지간 및 형식 등과 같은 교량의 동적특성 그리고 교량 바닥판과 신축이음장치와 같은 교량의 노면조도 등과 같은 여러 가지 요소의 영향을 받는다. 이와 같이 다양한 요소에 의한 도로교의 동적응답을 도로교 설계시방서에서는 설계

실무자가 쉽게 사용할 수 있도록 간단하게 규정하는 것이 어렵기 때문에 일반적으로 충격계수(impact factor), 동적증폭계수(dynamic amplification factor; DAF) 또는 동적하중허용계수(dynamic load allowance; DLA)로 규정하고 있다. 대부분의 도로교 설계시방서에서 충격계수 또는 DAF는 교량의 지간의 함수 또는 고유진동수의 함수로 규정하고 있다. 최근에 LRFD 설계시방서에서는 기존 해석 및 실험 결과의 통계적 분석을 통하여 합리적으로 보정된 단순한 형태의 동적하중허용계수

*정회원 · 교신저자 · 한라대학교 토목공학과 교수 (E-mail : tjchung@halla.ac.kr)

**정회원 · 명지대학교 토목환경공학과 교수 (E-mail : dkshin@mju.ac.kr)

***정회원 · 명지대학교 토목환경공학과 교수 (E-mail : psy@mju.ac.kr)

용계수(DLA)를 규정하고 있다.

DLA에 관한 연구가 가장 활발한 나라는 캐나다로 1950년대부터 현재까지 많은 실험 자료를 축적하고 있으며 이들 자료가 캐나다 시방서(CSA, 2000)와 온타리오주 시방서 OHBDC(1983)의 기초가 되고 있다. 미국에서는 1960년에 5개의 실험교량을 가설하여 교량의 동적 특성을 측정 한 AASHTO Road Test(Fenves *et al.*, 1962)가 수행되었으며 최근 Nassif와 Nowak(1995), Laman 등(1999)의 실험 연구 결과가 문헌에 발표되었다. 스위스에서 Cantieni(1984)는 약 70개의 교량에 대한 동적거동을 26년간 실험하였으며 그 연구 결과는 스위스 설계기준 SIA160(1985)의 기초가 되었다. 국내에서는 고속도로 상에 있는 29개의 교량에 대하여 실험한 충격계수의 연구가 박영석 등(2000)에 의해 1996년부터 1997년까지 수행되었다.

AASHTO(1996)의 LRFD 보정에서는 Hwang(1990)이 2차원 차량모델을 사용하여 해석적인 방법으로 구한 교량의 DLA를 사용하여 보정하였다. 국내에서 신동구 등(2005)은 박영석 등(1997)이 국내에서 측정한 29개 교량에 대한 측정 결과를 이용하고 OHBDC 시방서에 적용한 보정 식을 적용하여 LRFD 시방서 형식의 DLA를 통계적으로 추정하였다.

도로교의 동적거동에 관한 해석적 연구에서는 차량과 교량을 여러 가지 형태로 모델링하여 사용하여 왔다. 차량은 주로 이동하중, 이동질량과 이동차량으로 모델링하였으며, 교량은 주형의 휨모멘트만을 고려한 연속체 및 휨과 비틀을 고려한 간단한 보요소로 이산화시킨 유한요소 모델을 사용하여 모델링하였다. 지금까지 대부분의 해석적 연구는 2차원 차량모델을 사용하였으나, Wang 등(1992), 정태주 등(1993, 1994) 및 김철우(1997)는 3차원 차량모델을 사용한 해석적 연구를 수행하였다. 최근에 정태주(2006)는 타이어의 접지폭을 고려하고 대형차량의 후륜에 많이 사용하는 탠덤 다관스프링의 현가장치에 두 개의 차축을 고려하여 지금까지 사용한 3차원 차량모델과는 달리 좀 더 개선시킨 3차원 차량모델과 3차원 교량모델을 사용하고, 노면조도 및 교량과 차량 사이의 상호작용을 고려한 수치해석방법을 개발하였다.

본 연구의 목적은 동적하중에 의한 하중효과를 나타내는 동적하중허용계수(DLA)를 LRFD 형식으로 신뢰도 이론의 2차 모멘트법을 이용하여 보정하는 것이다. 이 때 교량의 동적해석은 정태주(2006)가 개발한 도로교의 동적해석 방법을 사용하고, 교량은 건설교통부(1979)에서 제정한 “도로교 상부구조 표준도”에 수록되어 있는 지간이 20 m 25 m와 30 m인 PSC빔교와 지간이 20 m, 30 m와 40 m인 단순 강판형교, 그리고 LRFD로 설계된 개구제형 단면을 갖는 지간이 30 m, 40 m, 50 m와 60 m인 강박스형교를 대상교량으로 선정하였다. 차량은 도로교설계기준(2005)에 규정되어 있는 표준트럭하중(DB-24)을 5축 트랙터-트레일러의 3차원 차량모델로 모델링하여 사용하였으며, 노면조도는 Dodds와 Robson(1973)이 제안한 “보통의 도로”에 대하여 10개의 노면조도를 생성시켜 사용하였다. 이와 같이 3가지 형식에 대한 10개의 교량에 각각 10개의 노면조도를 사용하여 해석적 방법으로 구한 100개의 동적해석 결과와 OHBDC(1983)에서 사용한 보정 식을 사용하여 보정한 PSC빔교, 강판형교, 강박스형교 및 전체 대상교량에 대한 LRFD 형식의 DLA를

통계적으로 추정하였다.

2. 차량과 교량의 운동방정식

차량모델(정태주, 2006)은 대형차량을 그림 1에 나타낸 바와 같이 단일차량인 2축과 3축 차량 및 5축 트랙터-트레일러를 각각 7-자유도, 8-자유도 및 14-자유도를 갖는 3차원 차량으로 모델링하였다. 그리고 차량의 운동방정식은 Lagrange 방정식을 사용하여 유도하였다.

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

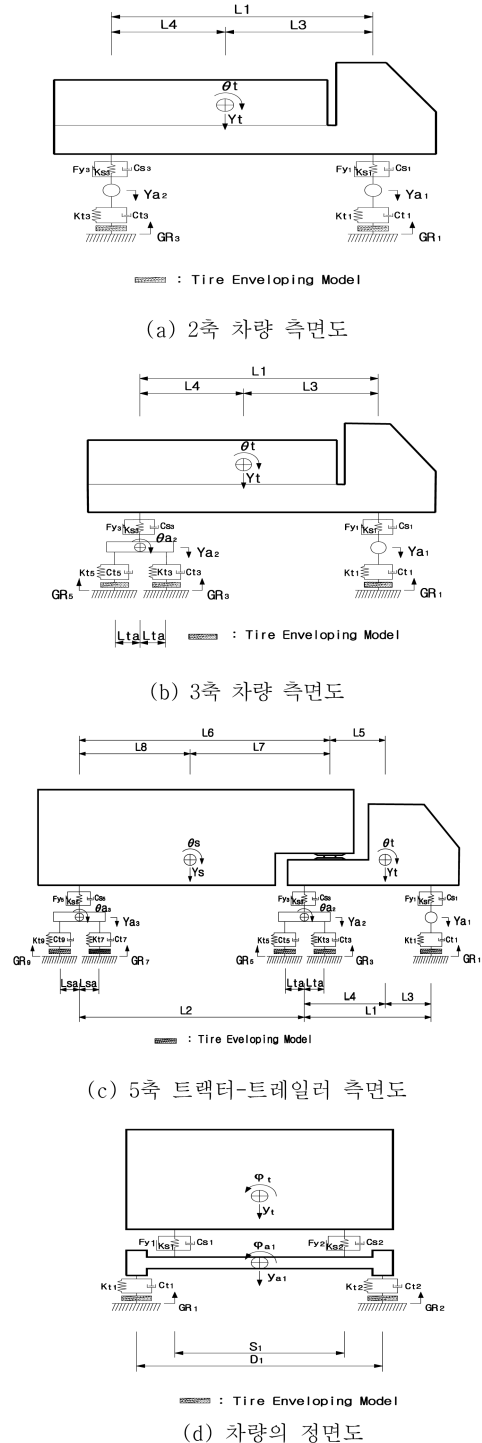


그림 1. 2축, 3축 및 5축 차량의 측면도와 정면도

여기서, T = 차량 시스템의 전체 운동에너지.
 V = 차량 시스템의 전체 위치에너지.
 D = 차량 시스템의 전체 분산에너지.
 q_i 와 \dot{q}_i = 일반화된 변위와 속도.

그림 1에 나타난 단일차량인 2축과 3축 차량 및 5축 트랙터-트레일러의 차량모델에 대한 운동방정식은 식(1)을 사용하여 유도하였다. 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 강성과 각 스프링의 상대변위를 구하여 계산하였다.

교량의 운동방정식은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서,

$[M_B]$ = 교량의 전체 질량 매트릭스.

$[C_B]$ = 교량의 전체 감쇠 매트릭스.

$[K_B]$ = 교량의 전체 강도 매트릭스.

$\{x\}, \{\dot{x}\}, \{\ddot{x}\}$ = 교량 절점의 변위, 속도, 가속도 벡터.

$\{F_B(t)\}$ = 교량과 차량 사이의 상호작용에 의해 교량에 작용하는 하중 벡터.

차량의 운동방정식은 Newmark- β 법을 사용하여 풀었고, 교량의 운동방정식은 모우드 중첩법을 사용하여 풀었다. 차량과 교량의 운동방정식, 차량의 현가장치와 타이어 접지폭 모델, 해석순서 등에 대한 자세한 내용은 참고문헌 정태주(2006)에 수록되어 있다.

3. 동적하중허용계수의 해석

3.1 개요

본 연구에서는 교량과 차량을 3차원으로 모델링하고 교량의 노면조도와 차량과 교량 사이의 상호작용력을 고려한 교량의 동적해석 방법(정태주, 2006)을 사용하였다. 교량은 건설교통부(1979)에서 제정한 “도로교 상부구조 표준도”에 수록되어 있는 지간이 20 m 25 m와 30 m인 PSC빔교와 지간이 20 m, 30 m와 40 m인 단순 강관형교, 그리고 LRFD로 설계된 개구제형 단면을 갖는 지간이 30 m, 40 m, 50 m와 60 m인 강박스형교를 대상교량으로 선정하였다. 대상교량의 모델링 시 주형과 가로보는 보요소, 콘크리트 바닥판은 셸요소, 바닥판과 주형 사이는 Rigid Link를 사용하여 대상교량을 3차원으로 모델링하였다.

차량은 도로교설계기준(2005)에 규정되어 있는 표준트럭하중(DB하중) 중에서 1등급의 하중등급에 상응하는 총 중량이 432 kN인 DB-24 하중을 기준으로 하였다. 차량은 그림 1(c)에 나타난 5축 트랙터-트레일러로 모델링 하였으며, 그 제원은 참고문헌 정태주 등(2008)에 자세히 수록되어 있다. 노면조도는 박영석 등(1997)이 국내 고속도로상의 29개 교량에 대한 노면조도 측정결과가 Dodds와 Robson(1973)이 제안한 “보통의 도로”에 상응하기 때문에 “보통의 도로”에 대한 PSD를 사용하여 10개의 노면조도를 생성시켜 사용하였다. 그림 2에는 인공적으로 생성한 노면조도의 예를 나타

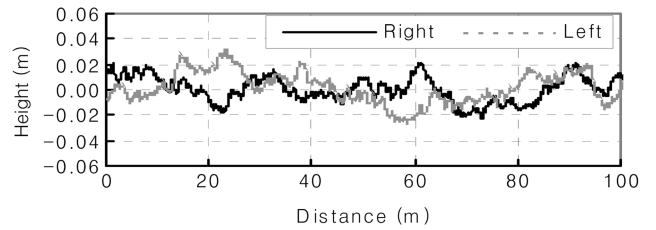


그림 2. 인공 생성한 노면조도(보통의 도로)의 예

내었으며, 그림에서 Left와 Right는 각각 차량의 좌우측 바퀴가 통과하는 라인의 노면조도를 나타낸다.

동적해석 시 차량의 주행속도는 20 km/hr에서부터 10 km/hr씩 증가시키면서 120 km/hr까지 해석하였고, 차량이 교량 시점 40 m 전에서 출발하여 교량을 완전히 통과할 때까지 해석하였다. 그리고 모우드 중첩법을 사용하여 동적해석을 실시할 때 150개의 모우드를 사용하였으며, PSC빔교, 강관형교 및 강박스형교의 감쇠비는 각각 임계 감쇠비의 2.0%, 1.0%와 1.0%를 사용하였고, 시간간격 $\Delta t = 0.002$ 초를 사용하였다.

본 연구에서는 다음 식을 사용하여 지간 중앙 점에서의 처짐에 대한 교량의 충격계수를 구하였다.

$$I(\%) = \frac{D_{dyn} - D_{sta}}{D_{sta}} \times 100 \quad (3)$$

여기서, $I(\%)$ = 교량의 충격계수

D_{dyn} = 최대 동적처짐

D_{sta} = 최대 정적처짐

3가지 형식에 대한 10개의 교량에 각각 10개의 노면조도를 사용하여 해석적 방법으로 구한 100개의 해석 결과와 OHBDC(1983)에서 사용한 보정 식을 사용하여 보정한 PSC빔교, 강관형교, 강박스형교 및 전체 대상교량에 대한 교량의 DLA를 통계적으로 추정하였다.

3.2 PSC빔교의 DLA

지간이 20 m, 25 m와 30 m인 단순 PSC빔교는 교량의 폭이 10.5 m, 주형은 5개이고 주형의 간격은 2.1 m이고 콘크

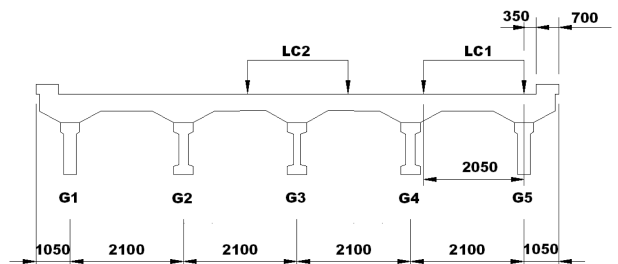


그림 3. PSC빔교의 표준단면도

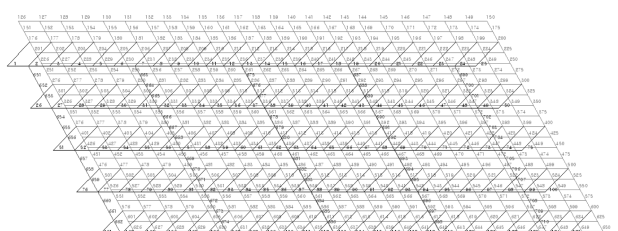


그림 4. PSC빔교의 모델링 예(지간=20 m)

리트 바닥판의 두께는 25.0 cm이다. PSC빔교의 표준단면도를 그림 3에 나타내었다. 교량의 모델링 시 20 m, 25 m와 30 m 지간의 주형을 각각 24등분, 22등과 26등분하였으며, 콘크리트 바닥판은 20 m, 25 m와 30 m 지간에 대하여 각각 480개, 440개와 520개의 셀요소로 모델링하였다. 이렇게 대 상교량을 모델링 한 예를 그림 4에 나타내었다.

하중조건은 그림 3에 나타난 바와 같이 차량의 우측 바퀴가 연석에서 35 cm 떨어져서 주행할 때를 하중조건-1(LC-1)으로 하고, 차량의 중심이 교량의 중앙을 통과 할 때를 하중조건-2(LC-2)로 하였다. 각 주형의 최대 충격계수가 하중 조건-1의 경우 20 m 지간에서는 G5, 25 m와 30 m 지간에서는 G4, 하중조건-2의 경우 모두 G3 주형에서 발생하여 이들 주형에 발생한 충격계수를 나타내었다.

표 1~표 3에는 20 m, 25 m와 30 m 지간의 단순 PSC빔 교에 대하여 각 교량별로 “보통의 도로”에 대한 10개의 노면조도를 사용하여 구한 DLA 해석결과를 요약하여 나타내었으며, 표에서 값이 표기되지 않은 란은 동적해석 값이 정

적해석 값보다 작게 발생한 경우로 이들 값은 무시하였다. 그림 5와 그림 6에는 차량의 주행속도에 따른 시간별 충격 계수를 하중조건-1과 하중조건-2에 대하여 각각 나타내었다. 표 1~표 3에서 보는 바와 같이 교량과 차량의 주행속도가 동일하고 PSD의 값이 같은 노면조건인 경우에도 노면조건에 따라 충격계수의 값이 매우 다르며 그 분산도 매우 심하게 나타냄을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 10개의 노면조도를 사용하여 구한 교량 시간중앙 점에서의 충격계수를 평균하여 사용하였다.

그림 5에 나타난 바와 같이 하중조건-1의 경우 주행속도별 충격계수가 20 m 지간에서는 6%~11.5%의 분포로 30 km/h에서 11.5%로 최대 값을 나타내고, 25 m 지간에서는 8%~9.6%로 거의 일정한 값을 나타내며 80 km/h에서 9.6%로 최대 값을 나타내며, 30 m 지간에서는 주행속도 100 km/h까지 10% 내외로 거의 일정하다가 120 km/h에서 15.8%로 최대 값을 나타낸다.

그림 6에 나타난 바와 같이 하중조건-2의 경우 주행속도별

표 1. 시간 20 m인 PSC빔교의 DLA 통계(DB-24, LC-1=G5, LC-2=G3)

노면 조건	DLA		DLA																	
			20 km/h		30 km/h		40 km/h		50 km/h		60 km/h		70 km/h		80 km/h		100 km/h		120 km/h	
	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2
1	5.17	7.14	10.47	8.26	6.23	8.33	6.72	7.94	5.87	2.89	6.41	7.58	4.30	12.67	6.12	6.64	7.06	9.04		
2	9.24	8.49	11.46	9.20	6.43	8.94	7.62	7.22	3.33	4.77	5.57	1.79	10.43	12.19	19.91	23.31	20.48	18.03		
3	2.16	1.74	9.94	4.64	6.60	9.44	9.35	6.81	4.06	4.67	-	0.63	1.94	4.05	4.60	13.52	7.70	14.98		
4	8.96	7.17	8.05	4.15	11.77	0.04	0.24	1.21	1.89	2.83	3.04	5.16	4.61	6.73	11.19	7.07	9.58	13.73		
5	3.87	5.87	13.83	16.20	8.32	9.59	7.86	6.50	2.96	3.61	1.42	1.35	4.64	5.77	8.03	12.04	1.46	7.05		
6	7.36	2.94	6.23	7.42	2.96	8.81	5.27	7.54	5.02	5.22	6.36	7.48	9.13	15.45	8.19	5.04	-	-		
7	4.25	5.09	15.52	9.18	5.87	7.33	3.39	5.97	3.96	4.83	3.43	8.06	5.50	11.68	8.91	13.06	8.84	5.57		
8	5.57	7.80	10.90	18.51	3.06	7.79	8.68	8.44	6.95	6.90	4.35	2.42	4.86	5.78	2.86	12.62	4.12	-		
9	2.48	5.13	14.18	13.25	3.05	8.55	4.74	3.45	5.01	6.06	2.26	4.35	6.85	16.21	13.52	13.57	8.91	1.62		
10	4.67	5.32	14.22	12.80	6.78	8.10	5.14	4.03	4.80	4.90	2.47	4.87	0.15	4.09	-	6.32	-	-		
Mean	5.37	5.67	11.48	10.36	6.11	7.69	5.90	5.91	4.38	4.67	3.92	4.37	5.24	9.46	9.26	11.32	8.52	10.00		
COV(%)	45.82	37.46	25.92	45.71	44.47	36.12	46.50	38.96	33.49	27.63	46.98	62.93	58.05	49.43	55.42	47.79	65.27	58.10		

표 2. 시간 25 m인 PSC빔교의 DLA 통계(DB-24, LC-1=G4, LC-2=G3)

노면 조건	DLA		DLA																	
			20 km/h		30 km/h		40 km/h		50 km/h		60 km/h		70 km/h		80 km/h		100 km/h		120 km/h	
	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2
1	3.22	4.97	5.90	5.80	6.23	8.58	5.00	9.79	3.46	9.09	9.54	8.92	15.58	15.04	2.49	1.59	10.93	5.68		
2	7.87	8.31	6.81	2.91	6.43	8.26	6.51	6.52	6.12	5.89	6.97	12.39	6.19	7.63	15.62	11.20	22.36	21.10		
3	5.84	5.54	3.46	2.70	6.60	7.88	7.62	9.01	5.98	5.87	10.63	15.35	14.32	16.29	1.94	7.50	4.99	10.13		
4	6.98	9.34	8.31	9.99	11.77	10.02	9.77	9.79	5.83	17.40	12.72	19.67	12.92	15.48	3.45	5.49	4.82	6.47		
5	10.92	14.71	10.31	8.57	8.32	10.69	4.13	5.01	9.74	9.97	12.71	15.00	2.33	4.10	3.68	4.75	8.77	11.70		
6	8.46	15.64	5.27	9.08	2.96	5.74	8.78	8.87	7.78	14.21	4.60	6.81	16.58	18.14	8.22	9.21	8.07	11.92		
7	5.22	5.05	9.46	6.32	5.87	7.48	3.71	2.63	4.48	5.34	4.17	3.37	10.38	8.48	4.38	4.34	11.02	10.05		
8	13.63	18.75	5.65	7.82	3.06	4.38	3.25	5.43	12.89	5.28	5.49	10.41	5.43	8.33	0.70	0.64	1.56	2.68		
9	12.52	15.17	7.83	5.58	3.05	1.10	1.13	1.60	11.82	6.02	3.65	6.61	7.42	7.05	5.56	4.71	2.70	3.11		
10	8.71	8.69	5.61	8.65	6.78	5.07	3.58	5.11	8.34	7.75	5.86	6.32	4.46	5.49	5.16	3.69	5.59	4.34		
Mean	8.34	10.62	6.86	6.74	6.11	6.92	5.35	6.38	7.65	8.68	7.63	10.49	9.56	10.61	5.12	5.31	8.08	8.72		
COV(%)	39.28	47.43	30.63	37.52	44.47	41.65	51.19	46.08	40.38	47.77	45.69	48.32	53.04	47.90	82.87	61.04	73.67	63.70		

표 3. 시간 30 m인 PSC빔교의 DLA 통계(DB-24 , LC-1=G4, LC-2=G3)

노면 조건	DLA		DLA															
	20 km/h		30 km/h		40 km/h		50 km/h		60 km/h		70 km/h		80 km/h		100 km/h		120 km/h	
	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2
1	8.08	9.65	15.82	10.50	8.48	7.30	12.15	11.85	8.73	10.45	6.44	10.44	4.13	6.33	2.59	-	8.48	7.69
2	9.31	6.57	9.61	7.74	12.74	15.04	12.49	13.03	5.86	10.82	3.29	4.08	6.38	3.85	11.13	8.67	29.78	28.95
3	4.19	4.08	7.06	6.36	13.33	13.94	3.54	8.28	11.40	14.55	13.44	15.31	10.71	10.57	6.08	6.80	10.18	14.41
4	8.98	10.02	8.81	9.59	10.68	16.20	15.04	11.51	12.13	16.43	12.91	19.74	11.09	15.28	14.04	13.36	13.31	17.83
5	12.61	16.42	15.19	6.86	11.57	13.69	13.99	11.79	13.98	16.21	13.26	15.53	12.58	14.09	12.20	16.03	13.66	20.88
6	11.85	10.92	8.72	5.85	8.19	9.49	16.07	5.99	5.36	6.61	8.05	9.86	11.79	13.40	8.60	12.24	27.47	31.21
7	13.84	12.82	8.34	9.31	7.32	8.78	12.51	10.24	10.42	10.10	5.64	8.96	5.43	4.32	2.61	0.35	12.46	12.28
8	11.15	12.11	7.55	3.52	8.42	7.96	6.77	5.55	14.31	18.43	11.82	13.92	7.01	8.29	16.57	17.12	17.21	18.20
9	9.33	9.47	4.01	4.95	7.12	3.42	6.65	6.59	8.47	10.33	8.33	5.36	3.45	1.74	1.68	4.71	1.37	-
10	10.61	9.72	15.82	4.83	8.24	12.16	9.95	6.57	2.44	5.69	5.52	4.11	10.31	7.93	11.40	11.61	24.01	24.82
Mean	10.00	10.18	10.09	6.95	9.61	10.80	10.92	9.14	9.31	11.96	8.87	10.73	8.29	8.58	8.69	10.10	15.79	19.59
COV(%)	27.11	32.99	40.59	33.08	23.69	37.53	37.43	31.16	41.77	35.71	41.99	49.72	40.74	54.30	60.22	54.12	56.49	39.49

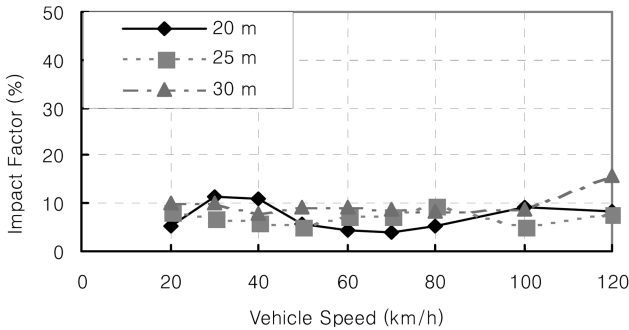


그림 5. PSC빔교의 시간별 충격계수(LC-1)

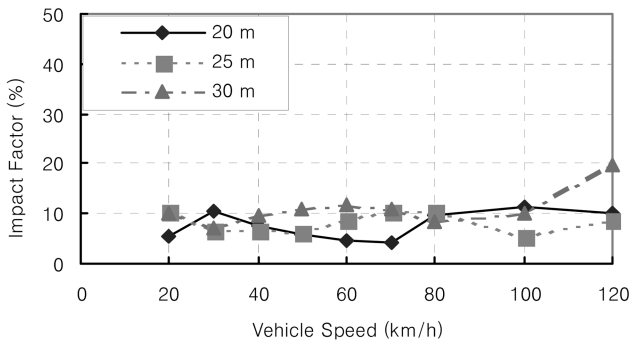


그림 6. PSC빔교의 시간별 충격계수(LC-2)

충격계수가 20 m 지간에서는 30 km/h에서 10.4%이고 70 km/h에서 4.4%로 감소하다가 다시 증가하여 100 km/h에서 11.3%로 최대 값을 나타내고, 25 m 지간에서는 5.3%~10.6%의 분포로 80 km/h에서 10.6%로 최대 값을 나타내며, 30 m 지간에서는 주행속도 100 km/h까지 10%로 내외로 거의 일정하다가 120 km/h에서 19.6%로 최대 값을 나타낸다.

3.3 강판형교의 DLA

강판형교에 대한 결과는 참고문헌 정태주 등(2008)이 동적 해석 방법을 사용하여 실시한 강판형교의 동적응답에 대한 연구결과를 이용하였다. 본 연구에서는 기본적인 사항과 결과만을 소개하고자 하며, 자세한 내용은 참고문헌 정태주 등

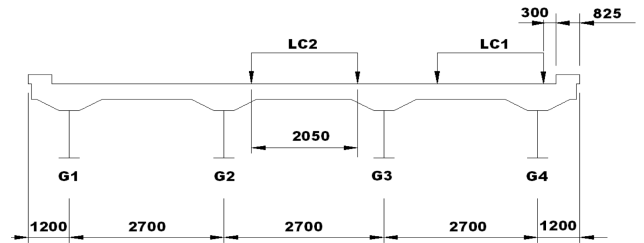


그림 7. 강판형교의 표준단면도

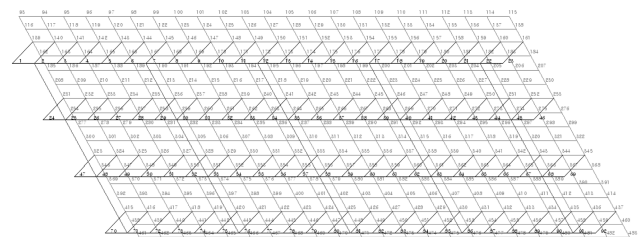


그림 8. 강판형교의 모델링 예(지간=20 m)

(2008)에 수록되어 있다.

강판형교는 지간이 20 m, 30 m와 40 m이고, 교량의 폭이 10.5 m, 주형은 4개이고 주형의 간격은 2.7 m이고 콘크리트 바닥판의 두께는 25.0 cm이다. 강판형교의 표준단면도를 그림 7에 나타내었다. 교량의 모델링 시 20 m 지간은 주형을 22 등분, 30 m 및 40 m의 지간은 주형을 26등분하였으며, 콘크리트 바닥판은 지간이 20 m인 경우 352개, 지간이 30 m와 40 m인 경우 416개의 셀요소로 모델링하였다. 이렇게 대상 교량을 모델링 한 예를 그림 8에 나타내었다.

하중조건은 그림 7에 나타난 바와 같이 차량의 우측 바퀴가 연석에서 30 cm 떨어져서 주행할 때를 하중조건-1(LC-1)으로 하고, 차량의 중심이 교량의 중앙을 통과 할 때를 하중조건-2(LC-2)로 하였다. 차량은 DB-24 하중을 사용하고 각각의 교량에 대하여 “보통의 도로”에 대한 10개의 노면조건을 사용하였다.

그림 9와 그림 10에 나타난 바와 같이 주행속도별 충격계수는 지간이 20 m인 경우 하중조건-1과 하중조건-2 모두 약

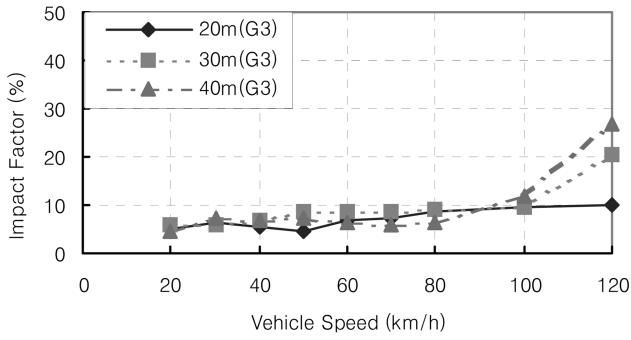


그림 9. 강판형교의 지간별 충격계수(LC-1)

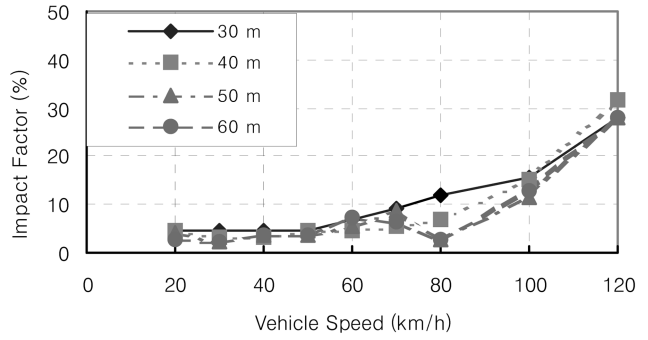


그림 13. 강박스형교의 지간별 충격계수(LC-1)

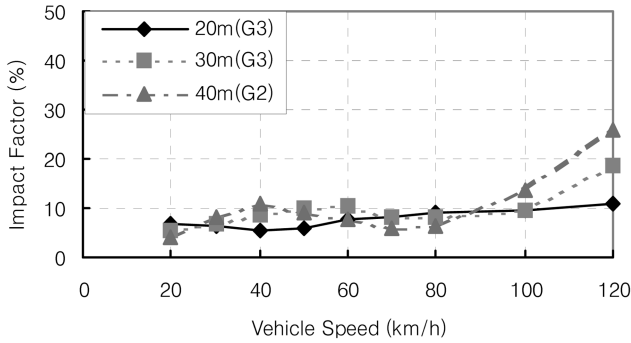


그림 10. 강판형교의 지간별 충격계수(LC-2)

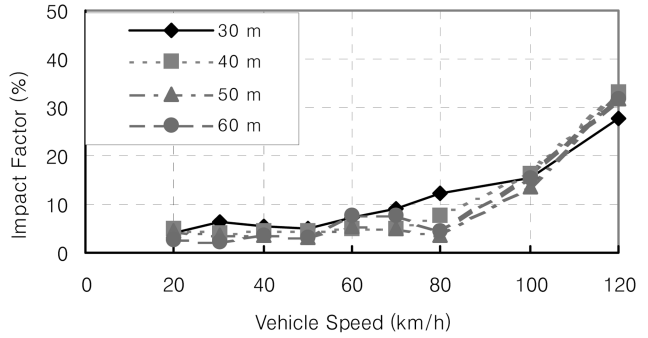


그림 14. 강박스형교의 지간별 충격계수(LC-2)

5%~11% 정도로 주행속도의 영향을 많이 받지 않으며, 지간이 30m와 40m인 경우도 하중조건-1과 하중조건-2 모두 100 km/h까지는 약 4%~14% 정도의 분포를 나타내다 120 km/h일 때 대략 20%와 27%로 가장 큰 값을 나타낸다.

3.4 강박스형교의 DLA

LRFD로 설계된 지간이 30 m, 40 m, 50 m와 60 m인 개구제형 단면의 강박스형교는 교량의 폭이 10.5 m, 주형은 2 개이고 주형의 간격은 2.5 m이고 콘크리트 바닥판의 두께는 25.0 cm이다. 강박스형교의 표준단면도를 그림 11에 나타내었다. 교량의 모델링 시 30 m와 40 m 지간은 주형을 52등분, 50 m와 60 m의 지간은 주형을 76등분하였으며, 콘크리트 바닥판은 지간이 20 m와 40 m인 경우 416개, 지간이

50 m와 60 m인 경우 608개의 쉘요소로 모델링하였다. 이렇게 대상교량을 모델링 한 예를 그림 12에 나타내었다.

하중조건은 그림 11에 나타난 바와 같이 차량의 우측 바퀴가 연석에서 30 cm 떨어져서 주행할 때를 하중조건-1(LC-1)으로 하고, 차량의 중심이 교량의 중앙을 통과 할 때를 하중조건-2(LC-2)로 하였다. 각 주형의 최대 충격계수가 하중조건-1과 하중조건-2 모두 G2 주형에서 발생하여 G2 주형에 발생한 충격계수를 나타내었다.

지간이 30 m, 40 m, 50 m와 60 m인 개구제형 단순 강박스형교에 대하여 차량은 DB-24를 사용하고, 각각의 교량에 대하여 “보통의 도로”에 대한 10개의 노면조도를 사용하여 구한 충격계수를 표 4~표 7에 나타내었다. 그리고 그림 13과 그림 14에는 차량의 주행속도에 따른 지간별 충격계수를 하중조건-1과 하중조건-2에 대하여 각각 나타내었다.

표 4~표 7에서 보는 바와 같이 강박스형교의 경우도 같은 PSD를 갖는 10개의 노면조도를 사용하여 구한 교량의 주행 속도별 충격계수는 그 값이 매우 다르며 그 분산도 매우 심하게 나타남을 알 수 있다.

그림 13에 나타난 바와 같이 하중조건-1의 경우 주행속도 별 충격계수가 30 m와 40 m 지간에서는 60 km/h까지 모두 5% 내외로 일정하다가 이후의 주행속도에서부터 증가하여 120 km/h일 때 각각 27.8%와 31.5%로 최고 값을 나타내고, 50 m와 60 m 지간에서는 50 km/h까지 4% 내외로 일정하다가 70 km/h일 때 각각 8.8%와 7.5%의 침투값을 나타내고 80 km/h에서 약 3%로 감소하였다가 다시 증가하여 120 km/h일 때 각각 28.1%와 27.9%로 최고 값을 나타낸다.

그림 14에 나타난 바와 같이 하중조건-2의 경우 주행속도 별 충격계수가 30 m 지간에서는 50 km/h까지 6% 내외로 일정하다가 계속 증가하여 120 km/h일 때 27.8%로 최고 값을 나타내고, 40 m 지간에서는 70 km/h까지 5% 내외로 일

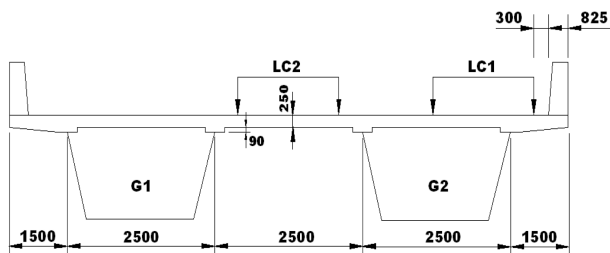


그림 11. 강박스형교의 표준단면도

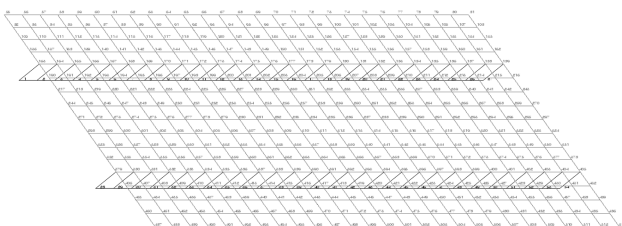


그림 12. 강박스교의 모델링 예(지간=30m)

표 4. 시간 30 m인 강박스형교의 DLA 통계(DB-24, LC-1=G2, LC-2=G2)

노면 조도	DLA		DLA															
	20 km/h		30 km/h		40 km/h		50 km/h		60 km/h		70 km/h		80 km/h		100 km/h		120 km/h	
	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2
1	5.27	4.73	4.35	6.89	2.34	3.84	-	3.66	4.84	7.01	7.04	9.13	11.74	11.74	10.93	8.17	21.36	20.00
2	4.64	3.75	4.23	7.46	2.22	5.06	4.51	3.69	8.38	6.55	11.75	5.42	9.93	9.93	26.94	27.31	42.44	48.18
3	4.30	4.65	8.74	11.27	3.89	6.00	4.93	7.75	8.85	9.25	10.47	11.94	11.17	11.17	14.83	13.19	26.27	27.16
4	6.19	4.44	7.36	10.37	7.95	9.43	4.35	8.26	6.23	8.61	7.51	10.10	12.39	12.39	11.87	14.30	25.27	21.40
5	6.53	4.22	5.48	6.04	5.25	7.65	7.69	5.26	9.44	9.90	8.99	11.05	11.19	11.19	11.46	9.72	27.62	21.18
6	4.76	6.04	2.43	3.46	3.55	6.13	2.65	2.99	7.00	8.27	6.32	9.69	17.14	17.14	16.52	18.95	24.85	31.05
7	4.10	5.87	4.45	4.90	4.61	4.53	4.94	4.91	4.54	2.76	9.63	8.24	12.42	12.42	14.81	14.06	34.85	33.30
8	2.07	1.36	3.27	3.13	6.53	6.68	4.22	7.84	7.39	9.16	9.79	9.90	12.20	12.20	17.58	17.64	27.92	24.34
9	3.96	3.77	2.90	2.83	4.33	3.30	4.50	3.65	2.78	2.77	8.57	4.64	7.52	7.52	10.41	8.30	21.59	19.57
10	2.01	2.22	2.42	5.73	5.00	4.16	2.50	0.92	8.55	6.70	7.53	10.98	15.76	15.76	19.70	22.23	25.57	31.88
Mean	4.38	4.10	4.56	6.21	4.56	5.68	4.48	4.89	6.80	7.10	8.76	9.11	12.15	12.15	15.50	15.39	27.77	27.81
COV(%)	34.11	36.39	46.12	46.62	38.60	33.37	33.58	49.24	31.98	35.89	19.31	26.28	22.38	22.38	32.68	40.47	22.98	31.68

표 5. 시간 40 m인 강박스형교의 DLA 통계(DB-24, LC-1=G2, LC-2=G2)

노면 조도	DLA		DLA															
	20 km/h		30 km/h		40 km/h		50 km/h		60 km/h		70 km/h		80 km/h		100 km/h		120 km/h	
	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2
1	2.87	2.32	2.27	2.00	5.06	5.40	6.39	7.15	5.44	6.26	4.70	5.31	6.01	5.15	11.92	12.64	26.50	25.44
2	5.67	5.96	4.52	5.28	2.05	7.04	4.52	3.58	1.88	3.51	00.76	0.58	0.45	-	17.09	19.34	31.72	39.46
3	5.20	7.43	1.31	2.74	5.69	4.83	6.09	6.02	2.45	3.50	5.48	2.98	3.95	4.25	12.83	12.47	29.73	32.24
4	9.02	10.17	4.06	6.17	3.96	4.84	6.58	5.67	8.33	6.87	8.22	8.39	11.00	11.92	17.36	20.56	34.82	34.64
5	3.42	3.83	4.45	3.64	5.04	7.40	3.77	4.75	5.36	5.37	7.52	7.71	6.45	8.28	12.69	13.94	30.55	28.91
6	3.50	3.67	3.28	3.67	2.28	1.99	1.26	1.86	3.98	2.95	4.90	4.07	7.57	7.56	15.05	17.00	30.99	35.33
7	4.92	4.74	1.82	2.33	1.58	2.11	5.03	5.51	3.75	5.32	3.44	3.29	7.40	6.22	13.98	12.06	33.15	34.34
8	1.94	2.43	4.02	5.12	2.22	2.65	4.53	4.08	7.45	8.54	8.67	10.87	11.38	13.64	22.39	25.82	39.04	39.57
9	3.89	2.91	4.72	4.45	0.74	1.32	4.24	2.99	4.63	3.99	3.53	3.49	2.59	2.59	10.55	9.03	24.48	22.39
10	6.48	5.86	3.77	5.30	4.14	5.65	5.07	4.24	2.72	3.49	5.94	4.47	10.49	10.63	19.68	21.76	33.80	39.53
Mean	4.69	4.93	3.42	4.07	3.28	4.32	4.75	4.58	4.60	4.98	5.32	5.12	6.73	7.81	15.35	16.46	31.48	33.18
COV(%)	43.67	50.40	35.40	34.81	52.14	50.24	32.57	34.14	45.83	36.55	45.64	59.44	54.28	47.22	24.33	32.18	13.16	18.08

표 6. 시간 50 m인 강박스형교의 DLA 통계(DB-24, LC-1=G2, LC-2=G2)

노면 조도	DLA		DLA															
	20 km/h		30 km/h		40 km/h		50 km/h		60 km/h		70 km/h		80 km/h		100 km/h		120 km/h	
	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2
1	2.03	0.95	0.63	1.31	-	-	4.96	2.76	6.47	5.93	7.04	4.18	0.12	0.34	10.97	12.40	26.24	27.70
2	4.07	4.12	0.48	1.44	2.05	0.92	3.24	2.93	5.62	5.59	11.75	6.57	5.24	6.55	6.32	10.90	20.30	29.20
3	4.98	6.19	5.59	7.68	4.02	4.22	5.52	5.03	6.86	6.11	10.47	9.15	4.45	7.97	9.35	10.11	25.11	29.83
4	3.68	5.18	0.89	2.05	2.92	2.39	3.81	1.17	3.77	4.27	7.51	2.51	3.57	4.31	16.33	19.10	34.53	37.11
5	6.32	7.63	4.26	6.88	3.97	4.15	4.31	3.83	5.44	4.90	8.99	3.36	2.76	1.36	10.34	13.22	29.22	30.45
6	3.59	3.48	2.25	2.87	2.93	2.01	1.87	2.94	2.61	3.82	6.32	3.02	-	-	10.19	12.82	27.38	32.39
7	2.60	3.75	3.27	3.56	7.31	6.80	5.49	6.00	6.11	9.03	9.63	8.46	1.04	3.55	8.14	8.53	23.78	28.26
8	4.39	5.44	2.19	2.47	3.76	3.09	2.53	2.37	5.08	5.31	9.79	4.46	4.87	6.84	20.22	23.92	38.71	42.20
9	3.96	3.92	1.49	1.95	2.80	4.20	3.15	1.43	4.78	4.82	8.57	5.16	1.35	1.55	9.16	8.61	22.49	23.33
10	4.85	4.78	2.26	4.27	1.84	3.80	3.67	4.16	6.20	5.42	7.53	5.31	1.61	1.47	14.82	17.74	32.81	38.78
Mean	4.05	4.55	2.33	3.45	3.51	3.51	3.85	3.26	5.29	5.52	8.76	5.22	2.78	3.77	11.58	13.73	28.06	31.93
COV(%)	30.05	39.33	70.58	64.47	46.24	47.99	31.75	46.54	24.62	25.78	19.31	42.89	66.54	74.37	36.61	36.48	20.62	18.05

표 7. 시간 60 m인 강박스형교의 DLA 통계(DB-24, LC-1=G2, LC-2=G2)

노면 조도	DLA		DLA															
	20 km/h		30 km/h		40 km/h		50 km/h		60 km/h		70 km/h		80 km/h		100 km/h		120 km/h	
	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2	LC-1	LC-2
1	2.08	1.95	2.39	1.87	4.30	4.51	1.56	1.17	4.60	5.30	5.74	8.10	1.22	5.13	13.99	16.58	27.14	30.80
2	2.57	2.59	1.76	2.46	3.29	3.30	4.96	5.24	10.32	11.08	11.67	13.66	8.16	11.18	6.39	6.82	20.13	21.35
3	2.33	2.75	2.94	2.80	7.52	5.66	7.72	5.78	10.64	12.17	8.84	11.44	2.56	5.60	10.41	12.01	28.27	30.38
4	2.40	2.96	2.73	2.34	3.26	2.71	0.80	0.43	5.36	4.61	3.09	5.12	-	1.92	18.38	21.71	32.97	38.03
5	3.86	4.84	2.53	2.14	4.06	1.95	4.95	2.96	5.32	5.50	2.21	3.32	-	-	13.96	17.07	28.84	33.04
6	2.31	2.75	1.73	2.32	3.53	4.81	3.52	2.95	8.16	8.21	8.63	9.85	2.58	4.68	10.01	14.20	24.30	31.32
7	3.19	3.14	0.98	1.67	2.34	1.75	4.57	4.88	10.22	8.42	7.90	8.46	0.42	0.89	6.74	9.43	22.20	24.10
8	2.25	2.53	3.66	3.56	3.68	3.19	1.34	1.53	3.86	3.82	2.62	2.91	1.68	4.09	20.81	25.18	37.94	43.78
9	3.34	3.38	1.26	1.42	4.00	3.20	3.50	3.10	8.14	8.69	7.24	9.37	2.17	4.20	11.22	13.22	25.97	28.04
10	0.99	1.17	2.64	2.13	2.61	4.11	4.89	2.83	8.05	8.27	6.01	7.13	-	-	15.38	18.98	30.90	38.14
Mean	2.53	2.81	2.26	2.27	3.86	3.52	3.78	3.09	7.47	7.61	6.39	7.94	2.68	4.71	12.73	15.52	27.86	31.90
COV(%)	31.21	33.89	36.24	26.53	37.00	35.55	55.79	57.51	33.80	36.29	48.07	43.29	94.43	65.10	36.89	35.89	18.79	21.16

정하다가 계속 증가하여 120 km/h일 때 33.2%로 최고 값을 나타내고, 50 m와 60 m 시간에서는 80 km/h까지 5% 내외로 일정하다가 계속 증가하여 120 km/h일 때 각각 33.2%와 32.0%로 최고 값을 나타낸다.

3.5 DLA 요약 및 보정

Bahkt와 Pinjekar(1989)의 연구에 의하면 DLA는 교량의 기하학적 변수, 노면상태 변수, 통행차량 변수 등 많은 무작위 변수(random variable)의 함수로, 결정론적인 값(deterministic value)을 갖지 않고 통계분석에 근거한 값으로 규정되어야 적절한 것으로 보고하고 있다. 즉, 충분한 표본수를 갖고 평균과 변동계수를 이용한 값으로 설계기준에 규정되어야 한다. 실제로 OHBDC(1983)에서는 동적하중효과에 대한 다음과 같은 보정식을 적용하여 DLA를 시방서에 규정하였다.

$$DLA_s = DLA_M(1 + s\delta\beta_T)/\alpha_{LL} \quad (4)$$

식(4)에서 α_{LL} 은 활하중계수(live load factor)이며, s 는 동적하중에 대한 분리계수(separation factor), δ 는 변동계수, β_T 는 목표신뢰도지수(target reliability index)를 나타내며 DLA의 아래첨자 S와 M은 각각 DLA 보정치와 DLA 측정 평균값을 의미한다. Bahkt와 Pinjekar(1989)에 의하면 s 는 0.57을 사용하는 것이 적절하고, LRFD 시방규정에서 β_T 는 일반적으로 3.5 내외의 값을 사용한다. 보정 식 (4)에서 실제 시방서에 규정할 DLA는 DLA의 평균값과 변동계수 및 목표신뢰도지수에 비례하고 활하중계수에 반비례하는 것을 보여 준다.

표 8에는 PSC빔교, 강관형교와 강박스형교에 대한 시간별 최대 충격계수와 변동계수를 요약하였다. 각 교량형식별 DLA에 대한 보정 값인 DLA_s 의 값은 식 (4)에서 $\beta_T=3.5$, $\alpha_{LL}=1.75$, $s=0.57$ 를 사용하였다. 식 (4)를 사용하고 PSC빔교에 대한 평균 13.64%, 변동계수 52.60%의 값을 사용하여 구한 PSC빔교의 DLA_s 값은 16.0%, 강관형교에 대한 평균 20.31%, 변동계수 48.10%의 값을 사용하여 구한 강관형교의 DLA_s 값은 22.7%이고 강박스형교에 대한 평균

표 8. 교량별 DLA 통계 요약

교량 형식	시간(m)	평균(%)	변동계수(%)
PSC빔교	20	11.32	47.79
	25	10.61	47.90
	30	19.59	39.49
	소계	13.64	52.60
강관형교	20	10.77	57.57
	30	20.63	39.07
	40	26.67	31.15
	소계	20.31	48.10
강박스형교	30	27.81	31.68
	40	33.18	18.08
	50	31.93	18.05
	60	31.90	21.16
	소계	31.20	22.90
전체평균(%)		22.83	47.64

31.20%, 변동계수 22.90%의 값을 사용하여 구한 강박스형교의 DLA_s 값은 26.0%이다. 그리고 전체 대상교량인 PSC빔교, 강관형교와 강박스형교에 대한 평균 22.83%, 변동계수 47.64%의 값을 사용하여 구한 전체 대상교량에 대한 DLA 보정 값인 DLA_s 의 값은 25.4%로 계산되었다.

전체 대상교량에 대한 DLA 보정 값인 DLA_s 의 값인 25.4%는 국내 고속도로상의 29개 교량 실측값에서 구한 DLA 평균이 17%, 변동계수가 44.4%, $\alpha_{LL}=1.75$ 및 $\beta_T=3.5$ 일 때 DLA_s 의 값인 18.32%(신동구 등, 2005)보다는 약간 크게 발생하였으나 ASSHTO-LRFD에서 규정한 33%보다 작음을 알 수 있다.

한편, 본 연구에서는 대상교량을 PSC빔교, 강관형교와 강박스형교에 대하여만 연구하였으나, 현재 많이 사용되고 있는 PSC 상자형교에 대한 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 교량의 노면조도 및 교량과 차량 사이의 상호작용을 고려한 수치해석방법을 사용하고, 교량은 3개의 PSC빔교와 강관형교 및 4개의 강박스형교로 모두 10개 교량을 대상교량으로 선정하였다. 그리고 차량은 도로교설계기준(2005)에 규정된 표준트럭하중(DB-24)을 사용하였으며, 노면조도는 각각의 교량마다 “보통의 도로”에 대하여 10개의 노면조도를 생성시켜 사용하였다. 이와 같이 3가지 형식에 대한 10개의 교량에 각각 10개의 노면조도를 사용하여 해석적 방법으로 구한 100개의 해석 결과를 통계적으로 분석하여 DLA를 LRFD형식으로 신뢰도이론의 2차 모멘트법을 적용하여 보정하였으며 본 연구를 통하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서 개발한 수치해석방법을 사용하여 구한 PSC빔교, 강관형교와 강박스형교에 대한 평균 충격계수는 각각 13.64%, 20.31%와 31.20%이고 변동계수는 각각 52.60%, 48.10%와 22.90%로 계산되었다. 그리고 전체 대상교량에 대한 평균 충격계수는 22.83%, 변동계수는 47.64%로 계산되었다.
2. 전체 대상교량에 대한 DLA 해석 결과를 이용하고 $\beta_T=3.5$, $\alpha_{LL}=1.75$, $s=0.57$ 를 사용하여 보정한 DLA_S의 값은 다음과 같다.
 PSC빔교; DLA_S = 16.0%, 변동계수 = 52.60%
 강관형교; DLA_S = 22.7%, 변동계수 = 48.10%
 강박스형교; DLA_S = 26.0%, 변동계수 = 22.90%
 전체 대상교량; DLA_S = 25.4%, 변동계수 = 47.64%
3. 전체 대상교량에 대한 보정값 DLA 25.4%는 국내 고속도로상의 29개 교량 실측값에서 구한 보정값 DLA 18.32%보다는 약간 크게 발생하였으나 ASSHTO-LRFD에서 규정한 33%보다 작음을 알 수 있다.
4. DLA 통계표본의 대표성을 높이기 위하여 향후 다양한 형식의 교량에 대한 DLA 실험 및 해석 연구 결과를 추가하여 지속적으로 DLA 값을 재보정하여야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

참고문헌

건설교통부(2005) 도로교설계기준.

건설교통부(1979) 도로교 상부구조 표준도.
 김철우(1997) 도로교상의 교통유발진동에 관한 실험 및 이론적 연구, 박사학위논문, 중앙대학교.
 박영석, 이원태, 정태주(2000) 고속도로 교량의 충격계수에 관한 실험적 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제20권 제3-A호, pp. 395-406.
 신동구, 박영석, 정태주(2005) 신뢰도 기반 동적하중허용계수의 보정, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제25권 제3A호, pp. 545-553.
 정태주(1993) 3차원 차량모델에 의한 강도로교의 노면조도를 고려한 동적해석, 박사학위논문, 명지대학교.
 정태주, 박영석(1994) 3차원 차량모델을 사용한 강도로교의 동적응답에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제14권 제5호, pp. 1055-1067.
 정태주(2006) 타이어 접지폭을 고려한 3차원 차량모델에 의한 도로교의 동적해석, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제26권 제6A호, pp. 989-999.
 정태주, 신동구, 박영석(2008) 동적해석에 의한 강관형교의 동적응답, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제28권 제1A호, pp. 39-49.
 AASHTO (1962) *The AASHTO Road Test*, Highway Research Board, Special Report 71, National Academy of Sciences-National Research Council, Washington, D.C.
 AASHTO (1996) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, First Edition.
 Bahkt, B. and Pinjakar, S.G. (1989) *Review of Dynamic Testing of Highway Bridges*, SRR-89-01, MTO, Downsview, Ontario, Canada.
 CAN/CSA-S6-00 (2000) *Canadian Highway Bridge Code*, CSA International, Toronto, Ontario, Canada.
 Cantieni, R. (1983) *Dynamic Load Tests on Highway Bridges in Switzerland*, Swiss Federal Laboratories of Material Testing and Research, Report No. 211, Dubendorf, Switzerland.
 Dodds, C.J. and Robson, J.D. (1973) The Description of Road Surface Roughness, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 31, No. 12, pp. 175-183.
 Hwang, E.S. (1991) *Dynamic Loads for Girder Bridges*, PhD. Thesis, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.
 Laman, J.A., Pechar, J.S., and Boothby, T.E. (1999) Dynamic Load Allowance for Through-Truss Bridges, *ASCE, J. Bridge Engineering*.
 Nassif, H.H. and Nowak, A.S. (1995) *Dynamic Load Spectra for Girder Bridges*, Transportation Research Record (1476) Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., U.S.A.
 OHBDC (1983) *Ontario Highway Bridge Design Code*, Highway Engineering Division, Ontario Ministry of Transportation and Communications, Downsview, Ontario, Canada.
 SIA (1985) *Schweizer Norm*, SIA, Switzerland.
 Wang, T.L., Huang, D., and Shahawy, M. (1992) Dynamic Response of Multigirder Bridges, *ASCE*, Vol. 118, No. ST8, pp. 2222-2238.

(접수일: 2007.5.30/심사일: 2007.7.30/심사완료일: 2008.2.25)