저상굴절차량의 주행에 따른 파이프트러스교의 충격계수 산정

Evaluation of Impact Factor on Pipe-truss Bridges According to Driving Bimodal Tram

김 희 주* 전 명 일** 황 원 섭†
Kim, Hee-Ju Jun, Myung-Il Hwang, Won-Sup

요 지

본 논문에서는 새로운 차량의 도입으로 건설되는 신형식 교량의 동적거동을 확인하기 위해 상용 유한요소 프로그램을 이용하여 해석을 실시하여 충격계수를 산정하였으며, 국내뿐만 아니라 각국에서 적용되고 있는 충격계수에 관한 설계기준을 조사하여 비교・검토하였다. 연구에서 제시되어진 교량형식은 파이프트러스 형식으로 각각 34m, 44m, 54m로 모델링하였으며 각각의 지간길이에 따른 충격계수의 영향을 산정하였다. 차량모델은 실제 교량 위를 통과하는 2축과 3축 저상굴절차량과 박영석(1997)이 제시한 147kN 덤프트럭 모델을 적용하였으며, 각 차량별로 10km/h~100km/h까지의 속도대역에 따른 충격계수를 산정하여 이에 따른 영향을 검토하였다. 또한 차량 및 지간길이에 따라 산정되어진 지간 중앙에서의 충격계수를 바탕으로 우리나라 및 외국의 설계규정과 비교・검토하였다.

핵심용어 : 저상굴절차량, 146kN 덤프트럭, 파이프트러스교량, 충격계수

Abstract

This paper estimated the impact factor using the finite element program to confirm the dynamic behavior of new type of bridges constructed by introduction of new vehicles and compared the design criteria about the impact factor applied to domestic as well as each country. The study estimated effects of the impact factor according to pipe truss types modeled as respectively 34m, 44m, 54m and span length. The vehicle models are vehicle for bimodal tram of two axis and three axis which passes on actual bridge and dump truck model proposed by Park Young suk(1997). Each vehicle is estimated the impact factor according to velocity from 10 to 100(km/h) and examined. Also, the study investigated and compared the design regulation of domestic and a foreign country based on the impact factor on span center calculated in accordance with vehicle and span length.

Keywords *: bimodal tram, 147kN dump truck, pipe-truss bridge, impact factor*

1. 서 론

산업의 발전과 더불어 증가된 교통량을 해소하기 위한 방법으로 정부차원에서 새로운 교통 시스템에 대한 검토 및 설계가 활발하게 진행되고 있다. 대표적으로 현재 개발 중인 저상굴절차량(Vehicle for bimodal tram)은 철도와 버스의 장점을 합친 새로운 교통수단으로 전용선로를 통해 빠른 속도로 이동이 가능하고, 선로를 벗어나 일반 도로로도 운행할 수 있으며, 지하철만큼의 속도로 경량전철과 버스의 중간 규모 수송능력을 갖추고 있다. 또한 새롭게 도입된 차량으로 인해 전용선로를 갖춘 교량인 파이프 트러스(pipe truss)교의 건설이 추진되고 있으나, 이는 기존에 건설된 강합성 교량과 달리 강관 트러스 주형과 바닥판을 적용하여 이루어진 교량이다. 이러한 차량 및 교량은 지금까지 제시되지 않은 새로운 형식으로 이에 대한 동적거동 특성을 확인할 필요가 있다.

이동하중을 받는 교량은 차량과 교량의 진동특성으로 인하여 정적하중이 작용할 때 보다 더 큰 응력을 유발하게 된다.

† 책임저자, 정회원・인하대학교 사회기반시스템공학부 교수
Tel: 032-860-7570 ; Fax: 032-873-7560
E-mail: hws@inha.ac.kr
* 인하대학교 사회기반시스템공학부 박사과정
** 인하대학교 사회기반시스템공학부 박사과정, 이지엔지니어링대표이사

• 이 논문에 대한 토론을 2010년 4월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2010년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

이러한 동적영향은 교량의 내하력을 감소시키고 운전자와 보행자에게 심리적 불안감을 주게 되므로 설계 시 교량의 동적 응답을 정확히 파악하여 이를 반영해야 한다. 도로교설계기준(건설교통부, 1996)에서는 이러한 동적 영향을 충격계수(impact factor)로 정의하여 이를 정적하중에 곱하여 설계하중을 증가시켜 동적하중의 영향을 고려하도록 규정하고 있다.

교량의 충격계수에 관한 문제는 1956년 Thung의 연구를 시작으로 Foster와 Oehler(1956), Wen(1957), Biggs(1959), Neito(1961), 山田(1967)등 많은 연구자들에 의해 교량의 동적거동에 대한 이론적 연구와 실험적 연구가 진행되어 왔으며, 대표적인 실험적 연구로는 1962년 미국에서 실시된 "AASHO 도로실험"을 들 수 있으며, 1982년 J.R. Billing이 교량의 동적 증폭계수를 측정하여 연구결과를 발표하였다.

국내의 경우, 1968년 건설부에서 시행한 노후교량 내하력 평가조사를 시작으로 주행차량에 의한 교량의 동적거동 연구가 시작되었으며, 장동일(1986)은 실제적인 모형화 및 단순 및 3경간 연속교에 대한 충격계수의 변화를 조사하였다. 이후 박영석(1997)과 이원태(2000)는 국가별 설계기준에서 제시한 충격계수 산정식에 대해 이론 및 실험적 연구를 통해 비교·분석하였다. 이희현(2007)은 강합성 거더교에 대한 매개변수해석을 통해 동적거동 특성을 검토하고, 이로부터 강합성교의 피로설계용 충격계수를 제안하였다.

이처럼 차량-구조물의 동적 영향을 고려하기 위해 많은 국가에서는 충격계수(impact factor)를 사용하여 설계시 정적하중을 크게 해줌으로서 이를 적절히 반영하고 있는데, 미국을 비롯하여 많은 나라에서는 미국토목학회의 연구결과를 바탕으로 교량 지간의 함수로 충격계수를 정하고 있으며, 국내 도로교 시방서의 경우도 이에 따른 산정식으로 설계기준을 규정하고 있다. 이와는 달리 캐나다의 온타 리오 주의 도로교설계시방서 OHBDC(Ontario Highway Bridge Design Code, 1995) 및 스위스의 도로교설계시방서 SIA(1985)의 경우 교량의 고유진동수와 관련한 함수로 충격계수를 제안함으로써 구조물의 동적 특성을 반영하고 있다. 그 외 일본과 독일, 프랑스, 영국 등 여러 나라에서 각기 이론적, 실험적 연구를 근거로 충격계수를 정하여 사용하고 있다.

본 연구에서는 상용 유한요소 프로그램을 사용하여 동해석을 실시하였고, 교량의 지간길이(34m, 44m, 54m)에 따른 충격계수의 영향, 차량종류(2축, 3축, 147kN 덤프트럭)에 따른 충격계수의 영향을 확인하였다. 또한, 국내 도로교설계기준 및 각국의 설계기준과 해석에 의한 충격계수를 서로 비교·검토하였다.

2. 충격계수의 국내외 설계 규정

2.1 충격계수

일반적으로 차량이 교량을 통과할 때 여러 가지 원인에 의한 차량의 동적 하중으로 인하여 발생하는 동적증폭(Dynamic Amplication : DA)의 영향을 충격(Impact)라 정의하고, 이를 설계에 반영하기 위해 각국의 시방서에서는 이 영향을 정량화하여 충격계수로 정의하고 활하중에 충격계수를 곱하여 설계 활하중에 적용시키고 있다.

본 연구에서 교량의 충격계수는 동적응답 이력곡선의 정적응답과 동적응답으로부터 다음 식을 사용하여 구하였다.

$$I = \frac{R_{dyn} - R_{sta}}{R_{sta}} \tag{1}$$

여기서, I : 충격계수

R_{dyn} : 해석자료로부터 구한 최대 동적처짐(mm)

R_{sta} : 해석자료로부터 구한 최대 정적처짐(mm)

2.2 국내의 충격계수

국내의 도로교설계기준에서는 상부구조의 충격계수를 교량의 경간의 함수로 나타내었고, 식 (2)를 사용하여 산출하였으며, 0.3을 초과할 수 없다고 규정하고 있다. 그러나, 보도 등에 재하하는 등분포하중, 현수교의 주 케이블 및 보강형에 작용하는 활하중에 대하여는 충격을 고려하지 않도록 규정하고 있다.

$$i = \frac{15}{40 + L} \leq 0.3 \tag{2}$$

여기서, L은 원칙적으로 활하중이 등분포하중인 경우에 설계부재에 최대응력이 일어나도록 활하중이 재하된 경간 부분의 길이(m)이다.

2.3 외국의 충격계수

2.3.1 일본(JSHB)

일본의 도로교 표준시방서에서도 국내와 같이 상부구조의 충격계수를 교량의 경간의 함수로 나타내었으며, 교량의 경간을 사용하여 표 1에 의해 산출하도록 규정하고 있다.

표 1 Impact factor of Japan Highway-Specification Code

Type of bridge	Impact factor	Remarkes
Steel bridge	$i=\frac{20}{50+L}$	T-load & L-load
Reinforced concrete bridge	$i=\frac{20}{50+L}$	T-load
	$i=\frac{7}{20+L}$	L-load
Prestressed concrete bridge	$i=\frac{20}{50+L}$	T-load
	$i=\frac{10}{25+L}$	L-load

2.3.2 미국(AASHTO)

미국의 도로교설계기준에도 국내의 도로교설계기준과 같이 충격계수를 교량 경간의 함수로 나타내었으며 상부구조, 교각 및 지표면 위에 있는 콘크리트와 강 말뚝의 설계시 식 (3)을 사용하여 충격계수의 값을 산출하며 그 상한값을 0.3으로 규정하고 있다.

$$i=\frac{50}{L+125}\leq 0.3 \tag{3}$$

여기서, i : 충격계수(최대 30%)

L : 설계부재에 최대응력이 일어나도록 활하중이 재하된 경간부분의 길이(feet)

2.3.3 캐나다(OHBDC)

국내의 도로교 표준시방서와는 달리 캐나다의 도로교설계기준에서는 충격계수를 교량의 고유진동수의 함수로 나타내었다.

2.3.4 스위스

스위스 도로교설계기준(SIA)에서는 충격계수를 캐나다 설계기준과 같이 교량의 고유진동수의 함수로 규정하고 있다. 그림 3에서 Truck load는 1대의 트럭이 교량을 통과하는

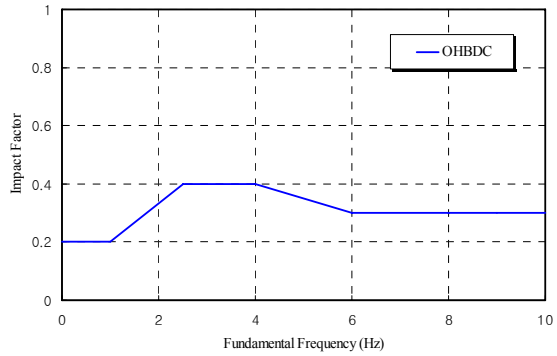


그림 1 OHBDC의 충격계수 규정

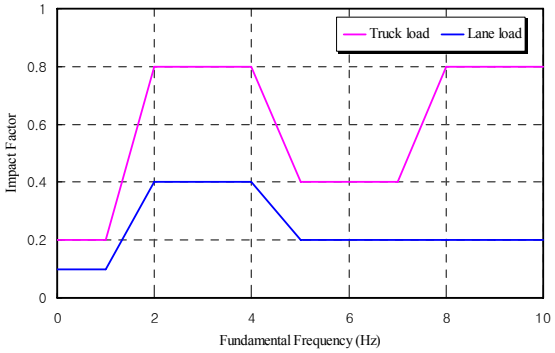


그림 2 SIA의 충격계수 규정

경우를 나타내고, Lane load는 트럭이 천천히 이동하는 차선하중을 나타낸다.

2.4 각 국의 충격계수 비교

각 국의 충격계수 산정식과 충격계수 값을 비교하기 위해 교량 지간의 함수로 표현된 충격계수 산정식을 교량의 고유진동수의 함수로 바꾸어 그림 4에 나타내었다.

Tilly가 제시한 식 (4)를 사용하여 교량 지간의 함수로 규정된 국내와 미국, 일본의 도로교 시방서를 교량의 고유진동수의 함수로 환산하여 나타내었다.

$$f=82\times L_{\max}^{-0.9} \tag{4}$$

여기서, f : 교량의 고유진동수(Hz)

$L_{\max}$: 교량의 최대지간(m)

각 국에서 사용하고 있는 설계하중의 크기는 서로 다르나 미국을 비롯한 일본, 국내 도로교 시방서에서 사용하고 있는 충격계수 산정식은 모두 교량의 고유진동수가 증가할수록 충격계수도 증가하나 캐나다 및 스위스의 규정과는 상당히 다른 것을 알 수 있다.

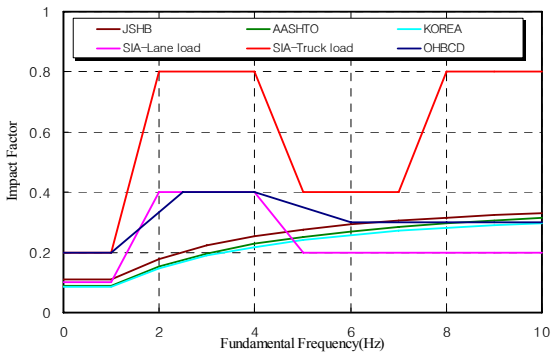
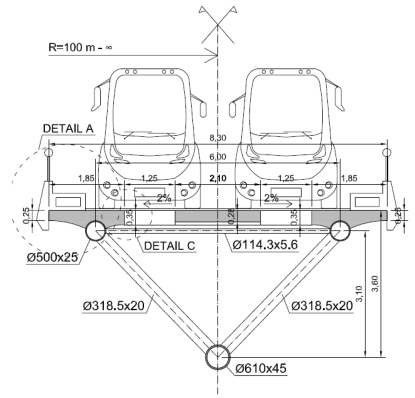


그림 3 각 국가별 충격계수 비교

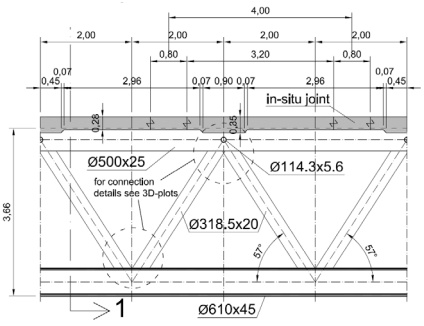
3. 교량및 차량의 제원

3.1 교량제원

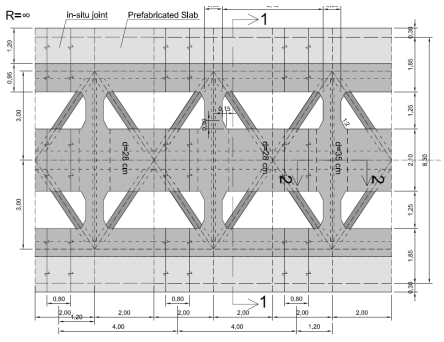
본 연구에서 채택하고자 하는 교량 형식은 파이프트러스 교량으로 상부에는 저상굴절차량이 운행할 수 있도록 전용궤도가 건설되고 하부는 트러스구조로 형성되어 있다. 상부 슬래브에는 마그네틱 바를 설치하여 차량의 운행을 유도할 수 있도록 하였으며, 방음판을 설치하여 소음을 방지하였다. 이는 강과 콘크리트 두 재료의 단점을 보완하고 장점을 극대화 시켜 경제적인 면뿐만 아니라 유지관리 등 효율성이 우수한 교량이라 할 수 있다. 저상굴절차량의 통행위치와 교량의 단면은 그림 4와 같으며 34m, 44m, 54m의 지간으로 교량을 선정하였다.



(a) Front view



(b) Side view



(c) Top view

그림 4 교량의 단면도

3.2 저상굴절차량 제원

본 연구에서 제시된 차량은 2축과 3축의 저상굴절차량과 147kN 덤프트럭으로 저상굴절차량은 기존의 도로교에서 운행되는 차량과 달리 전용교량에서만 운행되는 신형식 차량이다. 2축 저상굴절 차량은 하나의 차체를 구성하고 있으며, 3축 저상굴절 차량은 전방차량과 후방차량이 연결되어 있는 관절형 방식으로 차량과 차량 간 운동을 분리시킬 수 있다. 이는 철도의 정시성과 버스의 유연성을 조합한 신 교통시스템으로 지하철만큼의 속도를 내면서 경량전철과 버스의 중간 규모 수송능력을 갖추고 있으며, 전용선로에서는 다른 차량의 방해를 받지 않아 정시성 및 안정성이 보장된다. 147kN 덤프트럭은 박영석(1997)이 제시한 차량으로 본 연구에서 제시된 신형식 교량 위를 운행하지는 않지만 운행 중 저상굴절차량에서 발생할 수 있는 문제를 해결하기 위해 사용되는 견인차 및 중장비를 대표하여 차량해석에 사용하였으며 각 차량의 제원은 표 2와 그림 5와 같다.

표 2 해석에 사용된 차량의 하중(단위:kN)

구분 \ 차량		저상굴절차량		덤프트럭 (147kN)
		2축	3축	
축하중	전륜하중	58.80	34.30	73.50
	중축하중	-	55.86	82.32
	후륜하중	98.00	75.46	90.16

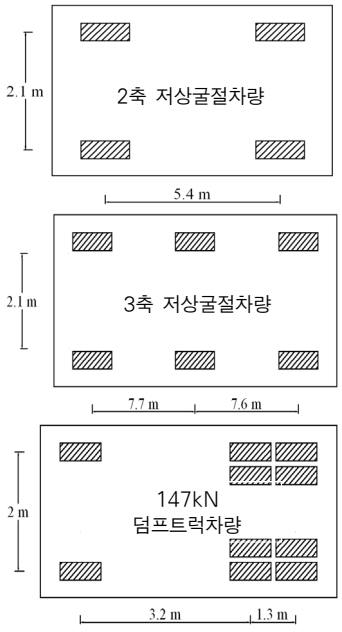


그림 5 해석에 사용된 차량제원

4. 해석결과 및 분석

4.1 해석이론

본 연구에서는 MIDAS Civil 2006을 사용하여 이동하중 해석을 실시하였다. 이동하중 모델은 교량상을 주행하는 차량의 관성효과를 배제한 것으로 가장 단순화된 수치모델이다. 이 방법은 이동차량에 의한 교량의 본질적인 동적응답 특성을 파악할 수 있는 방법으로 사용성 및 수치적 정식화의 과정이 단순하며 현재까지도 상당히 많이 이용되고 있는 방법이다. 이동하중에 의한 교량의 동적응답 특성을 수치적으로 구현하기 위한 교량의 강제진동 운동방정식은 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$[M_b]\ddot{q}+[C_b]\dot{q}+[K_b]q=\{f\} \quad (5)$$

여기서, $[M_b]$, $[C_b]$, $[K_b]$는 각각 교량의 질량, 감쇠, 강성행렬을 나타내며, $\{f\}$는 차량의 정적하중을 나타낸다.

이와 같이 이동하중 해석기법은 교량에 대한 질량, 감쇠, 강성 행렬만 구성하고 교량상을 통과하는 차량은 단순히 정적하중으로만 표현되기 때문에 수치적 정식화 과정이 상당히 단순하며 운동방정식의 해를 결정하는 과정 또한 복잡한 수치적 과정이 요구되지 않는다.

4.2 해석모델

본 연구에서는 표 4에서와 같은 해석변수를 대상으로 이동하중 해석을 하였다. 이 때 사용된 교량의 감쇠비는 최은석(2001)등이 제안한 '고속전철 교량 감쇠 연구'에서 사용한 2%로 해석을 수행하였다.

그림 6은 상용 유한요소 프로그램인 MIDAS Civil 2006을 적용하여 모델링한 교량으로 하부구조는 프레임 요소, 상부구조는 쉘 요소로 모델링하였다. 하부구조와 상부구조는 rigid rink를 사용하여 일체화시켰으며 논문에서 제시하고

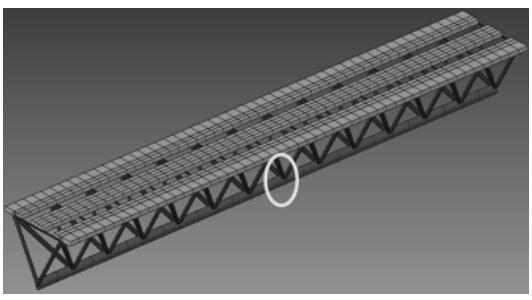


그림 6 수치해석모델

표 3 재료의 물리상수

	탄성계수 (MPa)	단위중량 (kg/m^3)	프아송 비
거더(SM490)	2.1×10^5	7850	0.3
콘크리트 바닥판 (f_{ck}=30MPa)	29,970	2500	0.18

표 4 해석변수

검토항목	해석변수	주행속도
지간길이의 영향	34m~54m ($\triangle L$=10m)	10~100km/h ($\triangle V$=10)
차량종류의 영향	2축 저상굴절차량	
	3축 저상굴절차량	
	147kN 덤프트럭	

있는 차량이 통과하는 이동하중 해석을 수행할 수 있도록 하였다. 해석에 사용된 교량의 물리상수는 표 3과 같다.

4.2 해석교량의 고유진동수

교량의 고유진동수는 수치해석에 의해 구할 수 있으며 이는 1.7~3.8의 범위에 위치하며 그림 7과 같이 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 해석대상 교량의 고유진동수는 지간이 짧아짐에 따라 증가하는 경향을 보인다. 이는 식 (4)에서 Tilly가 제시한 관계식과도 비슷한 경향을 나타냄을 확인할 수 있다.

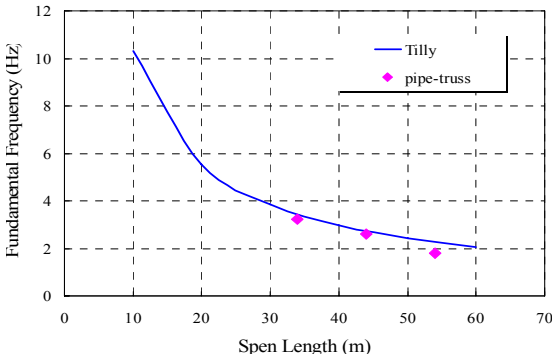


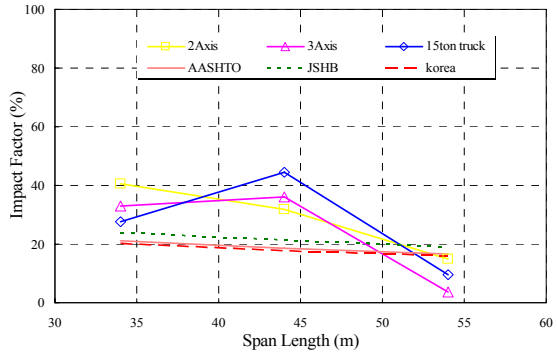
그림 7 해석교량의 지간에 따른 고유진동수

4.3 지간길이에 의한 충격계수

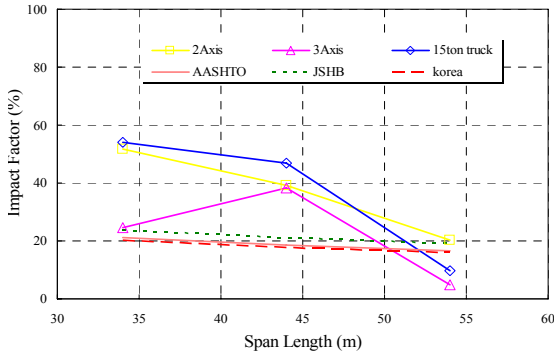
국내를 비롯한 미국, 일본 등 많은 나라에서 충격계수를 지간의 함수로 표현하여 사용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 각국에서 현재 사용하고 있는 충격계수 설계기준과 해석에 의한 충격계수를 비교하였다.

그림 8은 지간과 충격계수의 관계를 나타낸 것으로 해석에 의한 교량의 충격계수는 지간의 길이에 따라 충격계수의 변화량이 최대 61.2%에서 최소 17.7%까지 큰 폭으로 변화

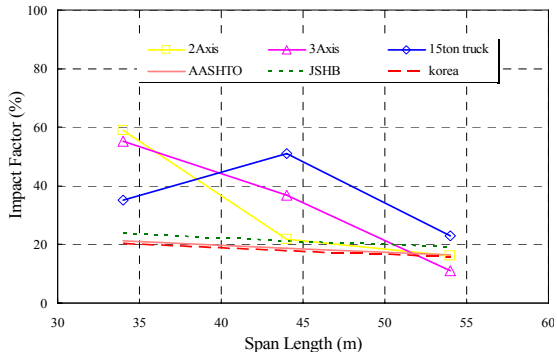
함을 알 수 있다. 이는 각국의 충격계수 설계기준에 따른 충격계수의 변화량이 최대 23.8%에서 최소 16.0%인 것과 비교하여 큰 폭으로 변화함을 확인할 수 있다. 또한, 지간이 54m인 교량을 제외한 나머지 34m, 44m에서의 충격계수는 각국의 설계기준을 초과함을 확인할 수 있다.



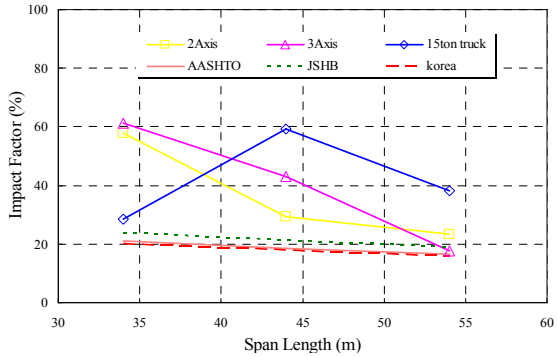
(a) 주행속도 - 40km/h



(b) 주행속도 - 60km/h



(c) 주행속도 - 80km/h



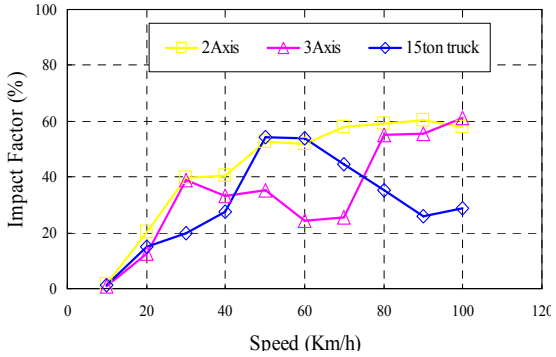
(d) 주행속도 - 100km/h

그림 8 지간길이에 의한 충격계수

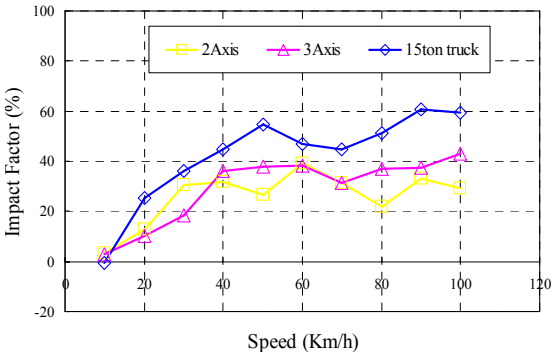
4.4 차량종류에 의한 충격계수

파이프 트러스 교량을 주행하는 차량종류가 충격계수에 미치는 영향을 검토하기 위해 그림 9와 같이 각각 2축, 3축 및 147kN 덤프트럭의 3가지 종류의 차량에 따른 수치해석 결과를 비교하였다.

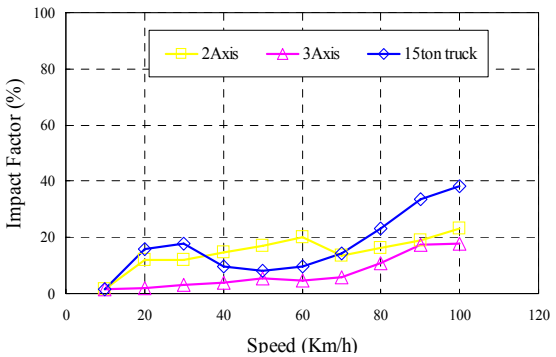
그림 9(a)와 같이 지간길이가 34m인 경우 2축 저상굴절차량의 경우 주행속도에 따라 증가하는 경향을 보이며 고속



(a) 지간길이 34m의 경우



(b) 지간길이 44m의 경우



(c) 지간길이 54m의 경우

그림 9 차량종류에 의한 충격계수

인 100km/h일 때 최대인 58.0%의 충격계수를 보인다. 3축 저상굴절차량도 전체적으로 증가함을 확인할 수 있으나 30km/h~70km/h일 때 감소함을 알 수 있다. 반면 147kN 덤프트럭의 경우 일정 속도대역까지 증가하는 경향을 보이지만 고속의 경우 충격계수가 감소하는 경향을 보이며 최대 충격계수는 50km/h일 때 54.1%를 나타내었다.

그림 9(b)는 지간길이가 44m인 경우로 모든 차량에 따라 충격계수가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 3축 저상굴절차량과 147kN 덤프트럭의 증가경향이 서로 비슷함을 확인할 수 있고 최대값은 고속인 100km/h에서 각각 43.0%, 59.4%로 나타났다. 2축 저상굴절차량도 증가하는 경향을 보이나 30km/h~100km/h의 속도대역에서는 서로 유사한 응답수준을 보이고 있다.

그림 9(c)의 경우 지간길이가 54m인 경우 차량종류에 의한 충격계수를 비교한 것으로 (a)와 (b)에 비해 충격계수 값이 크게 감소함을 확인할 수 있다. 2축과 3축 저상굴절차량의 경우 전속도 대역별 최대값은 100km/h일 때 각각 23.4%, 17.7%로 국내 도로교설계기준에서 제시한 충격계수 기준에 만족하는 것을 확인할 수 있다. 147kN 덤프트럭의 경우 고속인 90km/h~100km/h일때를 제외한 나머지 속도대역에서는 30.0%이하로 국내도로교시방서를 만족하였다.

4.5 각 국 설계기준과의 비교

표 5는 주행하중 70km/h의 경우에 2축, 3축 및 147kN 덤프트럭의 지간길이별 해석결과에 의한 충격계수와 각국의 설계기준에 따른 충격계수를 비교하여 나타낸 것이다.

국내 도로교설계기준, AASHTO 및 일본 도로교설계기준은 지간길이에 따라 16%~24%를 나타낸다. 반면 고유진동수의 함수로 충격계수를 나타내는 캐나다 및 스위스는 각 지간길이의 고유진동수에 따라 26%~40%의 값을 나타낸다.

표 5 각 국 설계기준과의 비교(70km/h)

구분		지간길이(m)		
		34 (1.80Hz)	44 (2.61Hz)	54 (3.23Hz)
도로교설계기준		0.20	0.18	0.16
AASHTO		0.21	0.19	0.17
일본도로교설계기준		0.24	0.21	0.19
OHBDC		0.26	0.40	0.40
SIA		0.34 (Truck:0.68)	0.40 (Truck:0.80)	0.40 (Truck:0.80)
본 연구	2축	0.58	0.31	0.14
	3축	0.25	0.32	0.10
	147kN덤프트럭	0.45	0.45	0.14

본 연구에서 해석에 의한 충격계수의 값은 지간의 함수로 하는 설계기준보다 큰 값을 나타내나, 고유진동수를 함수로 규정하는 설계기준과 비슷한 값을 나타냄을 확인할 수 있으며 특히 지간길이 54m의 경우 모든 나라의 설계 규정을 만족함을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 저상굴절차량이 주행하는 파이프트러스교량의 동적거동특성을 충격계수를 통하여 분석하였으며, 이를 통해 각국의 설계기준과 비교·분석하였다. 또한, 파이프트러스교의 지간길이에 따른 영향을 비교하였고, 차량종류에 따른 충격계수의 영향을 확인하였다. 이 연구로 얻은 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 지간길이에 따른 교량의 충격계수는 대체적으로 지간이 길어짐에 따라 충격계수도 감소하는 경향을 보이나 지간을 함수로 하는 국내, 미국 및 일본의 설계기준에 비해 충격계수가 큰 값을 나타낸다.

(2) 차량종류에 따른 교량의 충격계수는 속도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 특히 지간길이 54m일 때 147kN 덤프트럭의 고속인 90km/h~100km/h를 제외한 나머지 속도대역에서는 국내 도로교설계기준을 만족함을 확인할 수 있다.

(3) 실제 운행속도인 70km/h에서는 지간을 함수로 하는 설계기준에는 초과하는 충격계수 값을 가지나 고유진동수를 함수로 하는 설계기준에는 지간길이 34m, 2축 저상굴절차량을 제외한 나머지 차량의 충격계수 값은 만족함을 알 수 있다.

향후 본 연구를 통해 산정된 고유진동수 및 충격계수를 바탕으로 파이프트러스교의 저상굴절차량 주행실험에 따른 동적효과를 확인할 수 있을 것이다. 또한, 교량의 설계 시 충분한 동적효과를 고려할 수 있는 차량모델 및 해석방법의 개발에 대한 연구가 이뤄져야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 인하대학교의 연구비 지원사업의 일환으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

건설교통부 (2005) 도로교설계기준, 사단법인 한국도로교통협회.
박영석, 정태주 (1996) 노면조도를 고려한 강판형교의 충격계

수에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 16(3-A), pp.43~54.

이원태, 박영석, 정태주 (2000) 고속도로 교량의 충격계수에 관한 실험적 연구, 대한토목학회논문집, 20(I-1), pp.395~406.

이희현, 전준창, 경갑수 (2007) 강합성 거더교의 피로설계용 충격계수의 제안, 대한토목학회논문집, 28(6A), pp.777~788.

장동일 (1988) 단순 및 연속 강도로교의 충격계수 변화에 관한 연구, 한국전산구조공학회논문집, 1, pp.123~133.

조명선, 정태주, 박영석 (1997) 실험차량과 실동하중에 의한 교량의 충격계수에 관한 연구, 명지대학교 대학원 논문집, 1, pp.379~385.

최동호 (2008) 도로교 설계기준 및 AASHTO LRFD 설계기준에 근거한 U-채널 교량측보의 차량충돌의 영향, 2008한국전산구조공학회 학술대회논문집.

최은석, 전원종, 곽종원. 박성용, 강재윤, 김영진, 김병석 (2001) 고속전철 교량 감쇠 연구, 한국철도학회논문집, 4(1), pp.23~30.

최준혁, 조선규, 장동일 (1997) 국내 강철도 교량의 충격계수 및 응력빈도분포의 평가, 한국강구조학회논문집, 9(4), pp.489~500.

한국건설교통기술평가원 (2007) 신에너지 바이모달 저상굴절차량개발 4차년도 연구보고서.

한국도로공사 도로연구소 (1997) 교량의 충격계수에 관한 연구(Ⅲ),한국도로공사, pp.1~5, 67~73.

AASHO (1962) The AASHO Road Test, Highway Research Board, Special Report 71, National Academy of Sciences-National Research Council, Washington, D.C.

AASHTO (1998) LRFD Bridge Design Specifications, 2nd Edition.

Billing, J.R. (1982), Dynamic Test of Bridges in Ontario, 1980:Data Compute, Test Procedure, and Data Processing, *Research and Development Report*, 26.

OHBDC (1995) Ontario Highway Bridges Design Code, Ministry of Transportation and Communications, Downsview, Ontario.

SIA (1985) Schweizer Norm, Swizerland.

日本道路橋協會 (1990) 道路橋示方書, 同解設.

● 논문접수일 2009년 8월25일
● 논문심사일
1차 2009년 9월21일
2차 2009년12월 1일
● 게재확정일 2009년12월11일