

# 차량하중에 의한 교량의 동적응답특성 분석

## Study on Bridge Dynamic Responses under Vehicle Loads

김 상 호\* 박 흥 석\*\* 윤 성 호\*\*\*  
Kim, Sang-Hyo Park, Heung-Suk Yoon, Sung-ho

### 요 지

통행차량에 의한 도로교의 동적응답은 차량이나 교량의 다양한 특성에 따라 변화하는 특성을 가지고 있다. 본 연구에서는 중차량의 통행에 의한 동적응답확대계수의 확률적인 특성을 해석적인 기법으로 분석하였다. 도로교 통행차량들 중에서 대표적인 중차량인 텐덤축트럭과 세미트레일러를 대상으로 하여 동적응답확대계수를 평가하고, 이들을 동적재하시험의 결과와 비교하여 해석기법의 타당성을 검토하였다. 차량형식, 총중량, 노면조도, 재하차량수, 재하위치 등에 따른 동적응답확대계수의 확률적 특성의 변화를 분석하고 현행 시방서 기준과 비교하였다.

### Abstract

The dynamic responses of highway bridges are varying depending on the features of either traveling vehicles or bridges. In this study, the probabilistic characteristics of dynamic amplification factors of highway bridges due to traveling heavy vehicles have been examined through analytical simulation processes. The truck with tandem axle and tractor with semitrailer are selected as the representative heavy vehicles, which are modeled with three dimensional 7-DOF and 12-DOF models, respectively. The analytical results have been compared with the experimental results of dynamic loading tests and the validity of the analytical models has been examined. Parametric studies on the means and extreme values of amplification factors have been performed with various traffic conditions such as vehicle types, vehicle weights, surface profiles, number of loading vehicles, loading positions, etc.

*Keywords* : impact factor, probabilistic characteristic, dynamisc amplification factor, traffic conditions

## 1. 서 론

도로교는 주행하는 차량에 의해 동적거동을 하

게 되며, 일반적으로 최대동적응답은 최대정적응답보다 큰 응답을 보이게 된다. 따라서 도로교 설계시에는 관련 설계시방서에서 제시하고 있는

\* 정희원·연세대학교 토목공학과, 부교수  
\*\* 연세대학교 토목공학과, 박사과정  
\*\*\* 연세대학교 토목공학과 연구원

• 이 논문에 대한 토론을 1998년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1998년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

충격계수를 이용하여 이러한 동적응답증폭효과를 고려하고 있다. 도로교의 동적응답은 차량 및 교량의 여러 가지 특성에 따라 민감하게 변화되며 설계시방서에서는 이러한 변화특성을 적절히 반영하여 설계용 충격계수를 제시하고자 하고 있다. 그러나 동적응답에 영향을 주는 차량 및 교량의 다양한 특성을 실험에 의하여 체계적으로 규명하기에는 현실적으로 여러 가지 어려움이 있다. 따라서 해석적인 기법에 의한 연구가 널리 수행되고 있다<sup>1-6)</sup>.

기존 연구결과에 의하면 도로교의 동적응답은 노면조도에 매우 민감하며, 동일한 수준의 노면조도에서도 노면형상에 따라 차량-바닥판의 상호작용특성이 변화되어 동적증폭효과가 변화되고 있다. 이러한 특성을 반영하여 일부 설계시방서<sup>7)</sup>에서는 설계상태에 따라 두 가지의 서로 다른 값을 사용하도록 하는데, 일반적인 강도한계상태에 대해서는 다소 높은 수준의 충격계수를 사용하며 일상적으로 통행하는 차량에 의해 누적되는 피로한계상태에서는 다소 낮은 수준의 충격계수를 제시하고 있다. 전자는 대상부재나 교량이 경험할 수 있는 특정수준의 극한값을 대표하며, 후자는 평균값을 대표하는 것이다. 일본 철도교시방서<sup>8)</sup>에서도 동일한 개념에서 일반강도한계상태에서는 90%극한값, 피로한계상태에서는 평균값을 설계기준으로 제시하고 있다.

본 연구에서는 도로교의 동적응답확대계수의 확률적 특성 및 차량과 교량의 특성변화에 따른 동적응답의 변동특성을 체계적으로 분석하고, 현행 시방서에 제시된 충격계수의 수준을 검토하고자 한다. 본 연구에서는 동적응답확대계수를 최대동적응답/최대정적응답으로 계산하여 정리하며, 따라서 충격계수는 (동적응답확대계수-1)이 된다.

## 2. 해석모형

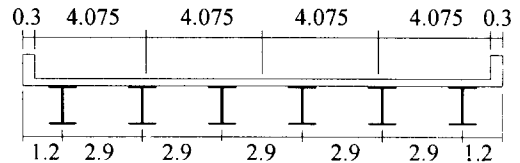
### 2.1 교량모형

동적응답확대계수의 확률적 특성을 분석하기 위해 본 연구에서 선정한 교량모형은 단경간 다주형 강합성형교이다. 현행 도로교 표준시방서에

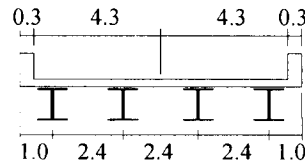
준하여 1등교로 설계되었으며 지간장은 단경간 강합성형교의 대표적인 길이인 35m를 주대상으로 하였다. 교폭은 4차선 및 2차선 교량을 대상으로 참고문헌[2]에서의 분석결과를 참고하여 교폭 및 주형배치를 대표적인 형식으로 선정하였다(그림 1). 교량의 단면제원은 표 1에 정리하였다. 대상교량의 동적거동해석모형은 참고문헌<sup>2)</sup>과 같이 3차원 뼈대요소를 이용한 격자보구조로 구성하였으며, 교량의 감쇠계수는 1차와 2차 모드에 대하여 2%로 가정하였다.

### 2.2 노면모형

일반적으로 도로교의 노면은 요철을 가지게 되며 이는 지수스펙트럼밀도함수로 모형화 할 수 있다<sup>5,6)</sup>.



(a) 4차선 형식



(b) 2차선 형식

그림 1 대상교량의 단면(단위 : m)

표 1 교량의 단면제원

차선	지간장 (m)	GIRDER		
		$I \times 10^{-2}$ (m <sup>4</sup> )	$J_d \times 10^{-2}$ (m <sup>4</sup> )	질량 (t/m)
4차선	35	0.05994	0.00044	0.2516
	35	0.05390	0.00044	0.2136

Note : I=단면2차모멘트  
J<sub>d</sub>=비틀림상수

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

여기에서  $A_s$ 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  $A_s$ 의 값으로부터 본 연구에서는 매우 양호 :  $5 \times 10^{-6}$ , 양호 :  $20 \times 10^{-6}$ , 보통 :  $80 \times 10^{-6}$ , 불량 :  $256 \times 10^{-6}$ 을 대표값으로 선정하였다. 그림 2에는 본 연구에서 선정된 양호 및 보통수준의 노면조도에 대한 지수스펙트럼밀도 함수와 일본에서 측정된 자료가 비교되어 있다. 그림 2에서 일반교량과 阪神고속도로에서의 측정치가 본 연구의 양호와 보통수준의 중간수준보다 좋은 상태에 있다는 것을 알 수 있다. 노면형상은 모의 발생기법을 이용하여 생성하였으며, 사용된 식은 식 (2)와 같다 :

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

여기서  $C_i = \sqrt{4S(k) \Delta k}$ ,  $\theta_i$ 는 위상각 ( $0, 2\pi$ )으로 일양분포(uniform distribution)를 가진 확률변수이다. 생성된 노면형상은 특수한 노면여과(filtering) 기법<sup>2)</sup>을 통하여 보정한 후 이용하였다.

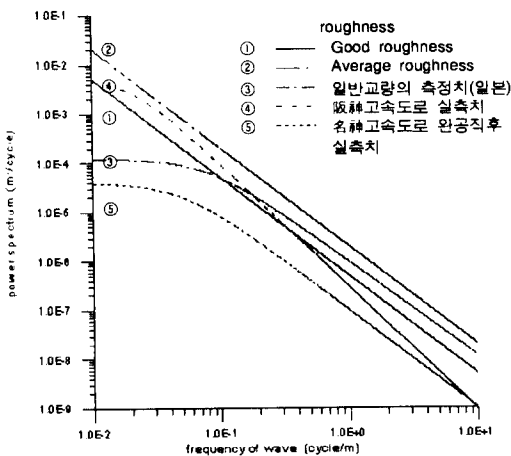


그림 2 노면의 PSD

tering) 기법<sup>2)</sup>을 통하여 보정한 후 이용하였다.

3차원으로 모형화된 차량모형에서는 좌우양측 차륜을 위한 2열의 노면모형이 필요하며, 이들은 일반적으로 상호독립적인 상태로 모형화된다<sup>2)</sup>. 그러나 실제 상태는 상호상관관계가 상당한 수준인 것으로 판단되어, 여러 수준의 상관관계에 대하여 동적응답확대계수를 분석하였다. 분석결과 는 그림 3에 정리되었으며, 상관계수(correlation coefficient)에 따른 특별한 변화경향을 발견할 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 양측 노면형상을 상호독립인 것으로 가정하여 생성하였다.

### 2.3 차량모형

도로교를 통행하는 대표적인 중차량형식들 중에서 통행량이 가장 많은 텐덤축을 가진 트럭과 세미트레일러를 차량모형으로 선정하였다. 그림 4에 정리된 것과 같이 텐덤축들은 1축으로 모형화하고 세미트레일러모형은 3축차량으로 모형화하였다. 따라서 세미트레일러모형은 현행 도로교 표준시방서의 표준트럭하중과 유사한 형태이다.

텐덤축을 2축으로 모형화한 경우와 1축으로 모형화하는 경우의 동적확대계수의 영향에 대한 연구<sup>6)</sup>에 의하면 1축모형이 2축모형보다 동적확대계수가 다소 크게 분석되나 실측결과와 비교할 때 2축모형은 작게 분석되므로 3차원 차량모형에서의 DOF를 축소하고 실제상황보다 다소 크게 안전측이 되도록 1축모형을 적용하였다.

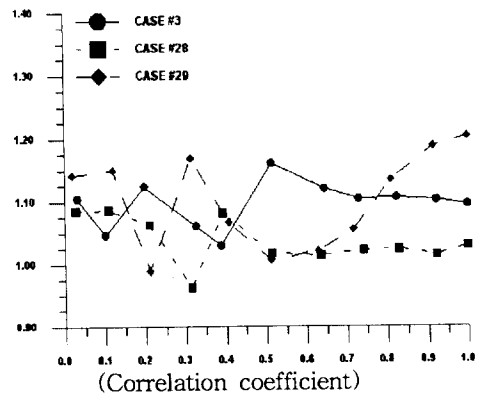
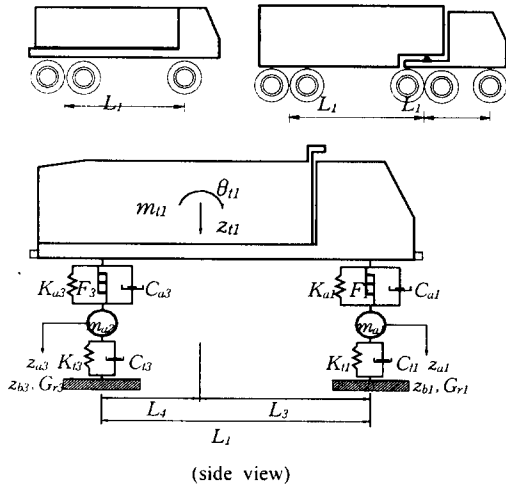
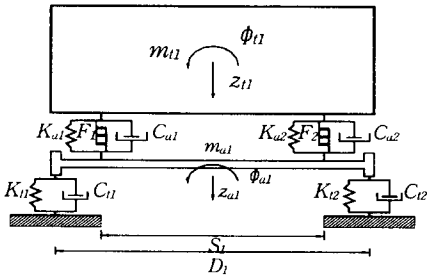


그림 3 상호상관관계에 따른 동적응답확대계수의 변화

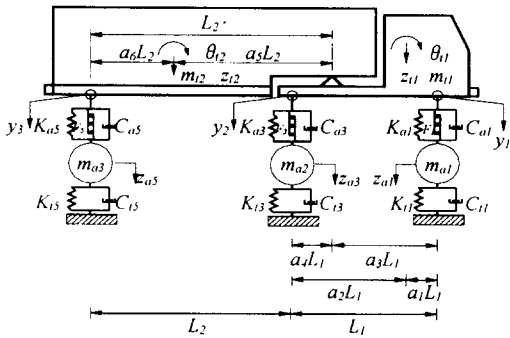


(side view)



(front view)

(a) 탠덤축의 트럭모형



(b) 세미트레일러 모형

그림 4 차량모형

=3.7m,  $L_2=8.0\text{m}$ 로 모형화되었으며 이는 표준트럭하중의 축간거리  $L_1=4.2\text{m}$ ,  $L_2=4.2\text{m}$ 와는 다소 차이가 있다. 탠덤축트럭모형에서는  $L_1=4.0\text{m}$ 로 축간거리를 모형화하였다. 중량은 국내에서 생산되는 적재중량 15ton덤프트럭의 일반적인 만재시 총중량을 반영하여 총중량 25ton을 표준으로 하였다.

이는 현행 표준트럭하중 DB-24의 후축이 없는 경우의 총중량 24ton을 반영하도록 한 것이며, 세미트레일러모형과의 비교를 위해 총중량 32.4ton모형도 분석하였다. 축중분배는 전축대후축을 1 : 4로 모형화하였다. 세미트레일러모형은 DB-24와 같이 총중량 43.2ton을 기본으로 하여, DB-18 표준트럭하중을 반영한 32.4ton 모형도 분석하였다. 세미트레일러모형의 축중분배는 DB하중과 같이 1 : 4 : 4로 모형화하였다. 해석모형은 그림 4에 도시된 것과 같이 탠덤축트럭모형은 3차원 7-DOF으로 모형화하였으며, 세미트레일러모형은 12-DOF으로 모형화하였다<sup>2,4)</sup>.

차량-교량의 동적상호거동은 차륜이 도로면에 한 점에서 접촉하는 것으로 모형화하여 분석하였다. 따라서 실제 차륜과 요철을 가진 도로면의 접촉상태를 반영하기 위하여 앞에서 설명하였듯이 모의발생된 도로면에 대해 노면여과기법을 적용하였다. 차량하중의 작용력은 상향력은 무시하고 하향력만을 고려하였고, 동적응답은 Newmark- $\beta$ 법을 이용하여 직접적분법으로 해석하였다. 동적해석모형 및 기법의 타당성은 실험결과들과의 비교,분석<sup>10,11)</sup>을 통하여 검토하였다.

### 3. 동적응답확대계수의 확률적 특성

도로교의 동적응답확대계수는 교량 및 차량의 특성에 따라 변화하는 특성을 가진다. 기존연구결과<sup>4,11,12)</sup>들에 의하면 도로교의 동적응답에 민감한 영향을 주는 특성은 노면형상이다. 즉 동일한 수준의 노면조도를 가지는 차량-교량상호거동의 특성에 따라 서로 다른 동적응답을 나타내게 되며, 이러한 결과는 동일한 교량에 대한 반복적인 동적재하시험결과들에서도 나타난다. 따라서 노

면조도모형으로부터 모의발생된 노면형상을 이용하여 도로교의 동적응답확대계수를 분석하기 위해서는 모의발생된 노면형상에 따른 동적응답확대계수의 변동특성을 분석하여야 한다. 그리고 분석된 변동특성에 따라 적절한 모의분석규모를 결정하여야 한다.

본 연구에서는 동적응답확대계수의 확률적 변동특성을 분석하기 위해 35m 4차선교량에 대하여 40쌍의 노면형상을 생성하여 동적응답확대계수를 분석하였다. 표 2는 25ton 텐덤축트럭을 시속60km/h로 주행시킨 결과이며, 표 3은 43.2ton 세미트레일러의 결과로 양호한 노면과 보통수준의 노면상태 각각에 대하여 분석하였다. 양호한 노면위를 주행하는 25ton 텐덤축트럭에 의한 동적확대계수는 최소 0.953에서 최대 1.293의 분포를 보이며 평균은 1.110, 표준편차는 0.082의 특성값을 보인다. 보통수준의 노면에서는 최소 1.026에서 최대 1.541까지 분포되며, 평균 1.266, 표준편차 0.134로 나타났다. 즉 노면상태가 악화될수록 평균동적확대계수도 증가하며 표준편차도 증가하고 있다. 43.2ton 세미트레일러모형에 의한 동적확대계수는 25ton 텐덤축트럭에 비하여 상당히 낮은 수준으로 분석되었다. 양호한 노면에서는 0.977~1.119의 범위에서 평균 1.034, 표준편차 0.042이며, 보통수준의 노면에서는 1.053~1.277의 범위에 평균 1.147, 표준편차 0.054이다. 25ton 텐덤축트럭과 비교하여 최대값도 매우 감소되었으며, 특히 변동특성이 현저히 저감되었다. 그림 5와 그림 6은 동적확대계수의 확률분포특성을 분석하기 위해 표 2와 표 3의 결과를 정규분포확률용지에서 정규분포모형의 적합성을 검토한 결과이다. 전반적으로 정규분포모형과 잘 적합되는 것으로 판단되어 본연구에서의 동적확대계수의 특성분석을 위해 정규분포모형을 이용하였다.

#### 4. 차량 및 도로교의 특성에 따른 동적확대계수분석

##### 4.1 현행시방서에 제시된 충격계수

주행차량에 의한 도로교의 동적응답증폭을 반

표 2 동적증폭계수 (25ton 트럭, 시속 60km/h)

(a) 양호한 노면

동적증폭계수	평균	표준편차
1.096 1.180 1.199 1.001 1.293	1.110	0.082
1.077 1.083 1.226 0.953 1.131		
1.079 1.065 1.086 1.088 1.056		
1.160 0.986 1.142 1.148 1.144		
1.122 1.042 1.070 0.996 1.096		
1.108 1.266 0.963 1.084 1.090		
1.083 1.076 1.049 1.254 1.207		
1.019 1.111 1.183 1.235 1.141		

(b) 보통의 노면

동적증폭계수	평균	표준편차
1.076 1.110 1.256 1.303 1.356	1.266	0.134
1.133 1.479 1.093 1.331 1.290		
1.236 1.359 1.227 1.521 1.026		
1.453 1.290 1.275 1.541 1.207		
1.471 1.360 1.130 1.442 1.092		
1.220 1.329 1.255 1.185 1.417		
1.216 1.383 1.359 1.196 1.189		
1.276 1.101 1.207 1.184 1.066		

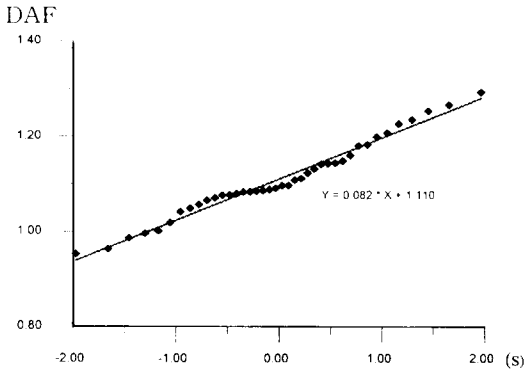
표 3 동적증폭계수 (43.2ton 세미트레일러, 시속 60km/h)

(a) 양호한 노면

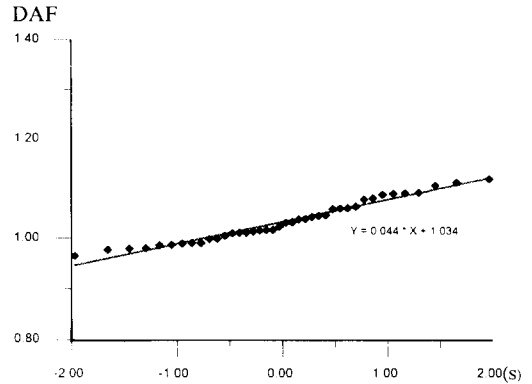
동적증폭계수	평균	표준편차
1.039 1.017 1.014 0.999 1.059	1.034	0.042
1.088 0.987 1.033 1.091 0.999		
1.017 1.080 0.977 1.064 1.012		
1.090 0.991 1.018 1.078 1.047		
1.039 1.112 1.061 1.032 0.981		
0.980 1.119 1.012 0.988 1.024		
1.044 0.991 1.011 1.092 1.005		
0.990 0.985 1.106 1.046 1.060		

(b) 보통의 노면

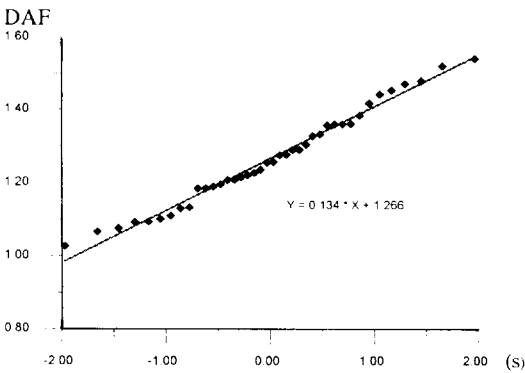
동적증폭계수	평균	표준편차
1.053 1.167 1.123 1.134 1.088	1.147	0.054
1.129 1.133 1.116 1.167 1.108		
1.123 1.133 1.183 1.139 1.106		
1.212 1.273 1.277 1.166 1.160		
1.121 1.272 1.143 1.143 1.126		
1.073 1.090 1.190 1.142 1.127		
1.117 1.260 1.118 1.106 1.084		
1.127 1.222 1.156 1.152 1.109		



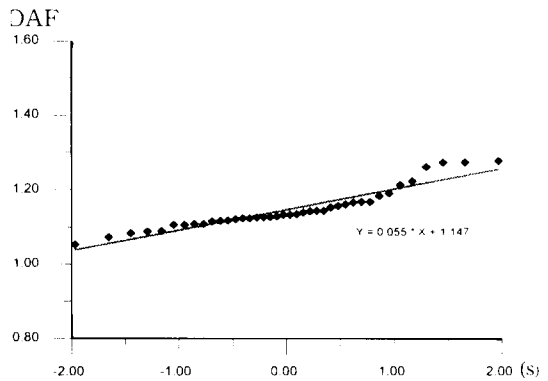
(a) 양호한 노면의 경우



(a) 양호한 노면의 경우



(b) 보통의 노면의 경우



(b) 보통의 노면의 경우

그림 5 25ton 탠덤축트럭에 의한 동적확대계수의 확률분포특성

그림 6 43.2ton 세미트레일러에 의한 동적확대계수의 확률분포특성

영하기 위해 관련 설계기준들에서는 도로교의 특성에 따른 설계충격계수를 제시하고 있다. 대부분의 설계기준들이 시간장에 대한 함수로 제시하며 일부기준은 교량의 고유진동수에 대한 함수, 또는 교량의 특성에 관계없는 정수로 제시한 경우도 있다. 또한 일반 강도설계와 피로설계에 대해 다른 충격계수를 제시한 경우도 있다.

현행 도로교표준시방서<sup>13)</sup>는 미국 AASHTO표준시방서<sup>14)</sup>와 같은 형식으로 시간장(L)에 대한 함수로 제하고 있다 :

$$I = \frac{15}{40+L} \leq 0.3 \quad (3)$$

여기에서 참고해야할 점은 현행 도로교표준시

방서의 설계차량하중은 3등급으로 제시되어 1등급 설계차량하중은 AASHTO설계차량하중과 형식은 동일하나 총중량을 33%증가시킨 것으로 차량의 중량에 따라 충격계수가 변화되는 특성이 있다는 점이다.

일본 도로교시방서<sup>9)</sup>도 시간장에 대한 함수로 제시하고 있으나, 상부구조형식 및 설계차량하중의 종류에 따라 다른 값을 사용하게 된다. 강교에 대해서는 설계차량하중의 종류에 관계없이 다음 식을 사용한다 :

$$I = \frac{20}{(L+50)} \quad (4)$$

일본 도로교시방서의 충격계수는 1989년까지

국내 도로교시방서에도 채택되었다.

미국 AASHTO LRFD시방서<sup>7)</sup>에서는 교량의 형식이나 특성에 관계없이 일정한 충격계수를 사용하도록 하고 있다. 단, 일반강도설계와 피로설계에 대해 다른 값을 제시하고 있다. 즉, 일반강도설계에서는 0.33을, 피로설계에서는 0.15를 사용하도록 하고 있다. 여기에서 참고할 점은 AASHTO LRFD시방서의 설계차량하중은 기존 AASHTO 표준시방서와 달리 항상 표준트럭하중과 차선하중을 조합하는 형식으로 되어있으며 하중효과를 기준으로 지간장에 따라 기존 표준시방서보다 최대 75%까지 증가되었다. 그러나 충격계수는 표준트럭하중에만 적용하도록 되어 있다.

캐나다의 OHBDC [15] 기준(그림 7)이나 스위스 기준 등에서는 교량의 기본 고유진동수에 따라 충격계수를 결정하게 되어 있다. 독일 DIN 기준에서는 지간장의 함수로 되어 있으며, 프랑스 기준과 같이 지간장 및 사하중과 활하중의 비율의 함수로 된 경우도 있다.

본 연구에서 선정한 대상교량의 충격계수를 검토하면 현행 도로교표준시방서의 기준으로는 0.200, 일본시방서 0.235, AASHTO LRFD기준 0.330(피로설계용 0.150)이 되며, OHBDC기준으로는 4차선교량과 2차선교량의 고유진동수가 각각 3.18Hz와 3.17Hz로 충격계수는 0.400이 된다. 즉 동일한 교량에 대해서도 시방서에 따라 다양한 수준의 충격계수가 제시되고 있다. 물론 앞에서도 설명하였듯이 설계차량하중의 형식

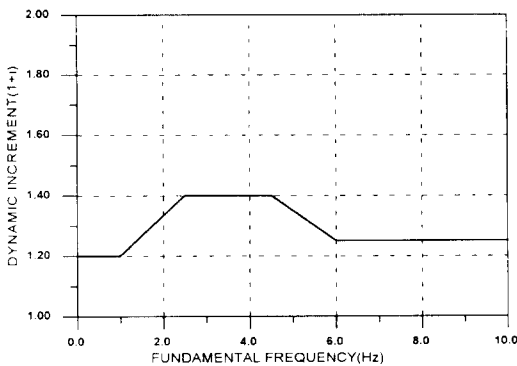


그림 7 OHBDC의 충격계수

및 총중량에 따라 충격계수가 변화된다는 점을 고려하여도 아직까지 충격계수에 대한 합리적인 기준이 제시되지 못하고 있다는 것을 알 수 있다.

#### 4.2 차량형식 및 총중량

대표적인 중차량형식인 탠덤축트럭과 세미트레일러에 의한 35m-4차선 교량의 동적확대계수의 변화특성 및 총중량의 영향을 분석한 결과가 표 4에 정리되어 있다. 본 분석에서 차량주행속도는 60km/h이며 주행위치는 외측차선의 정상주행위치이고, 노면상태는 양호 및 보통수준으로 가정하였다. 주행위치에 따른 동적확대계수의 영향을 분석한 결과에 의하면 대상거더에 가장 불리한 재하위치가 가장 작은 동적확대계수를 가지므로 정상주행위치에서는 다소 큰 동적확대계수가 예상된다. 본 논문의 후반에 불리한 재하경우가 검토되어 있다. 표 4의 평균과 표준편차는 각 경우 40개의 분석결과에 대한 특성값이며, 90%극한값이란 각 경우의 평균과 표준편차를 정규분포모형에 적용하여 산정한 초과확률 10%의 특성값으로 본 연구에서 결과분석의 편의상 임의로 선정한 특성값이다. 분석결과를 살펴보면 탠덤축트럭보다 세미트레일러에 의한 동적확대계수가 작으며, 같은 형식에서는 총중량이 증가할수록 동적확대계수가

표 4 차량형식 및 총중량에 따른 확률특성값

(a) 양호한 노면

	탠덤트럭		세미트레일러	
	25ton	32.4ton	32.4ton	43.2ton
평균	1.110	1.078	1.027	1.034
표준편차	0.082	0.067	0.044	0.042
극한값	1.214	1.163	1.083	1.088

(b) 보통수준의 노면조건

	탠덤트럭		세미트레일러	
	25ton	32.4ton	32.4ton	43.2ton
평균	1.266	1.185	1.188	1.177
표준편차	0.1340	0.1274	0.0824	0.0539
극한값	1.437	1.348	1.294	1.246

감소하는 경향을 보이고 있다. 동적확대계수의 분산특성도 유사한 경향을 보이고 있다.

### 4.3 주행속도

도로교의 동적응답확대계수는 교량-차량의 상호작용효과에 의해 결정되는 것이므로 동일한 노면상태에서도 차량의 주행속도에 따라 동적응답이 변화하게 된다. 표 5에는 43.2ton 세미트레일러와 25ton 텐덤축트럭이 양호한 노면조도 및 보통수준의 노면조도를 주행하는 경우에 대한 결과가 정리되어 있다.

표 5에 의하면 속도에 따른 변화는 차량중량이나 형식에 따른 변화에 비하여 크지는 않으나 중량이 무거운 43.2ton 세미트레일러에서는 시속 40km/h수준에서 최대동적확대계수가 보여지나, 중량이 가벼운 25ton 텐덤축트럭에서는 60~80km/h의 속도에서 최대값이 나타나고 있다. 43.2ton 세미트레일러의 경우 보통수준의 노면에서 90%극한값이 1.277로 이는 현행 도로교시방서에 제시된 동적확대계수 1.200(충격계수 0.200)보다 높은 값이며, 일본기준의 1.235보다도 크다. 이러한 결과는 텐덤축의 1축모형화, 축간 거리의 차이, 차량의 주행위치등에 따른 영향도 있으나 주요원인은 ISO에서 보통수준이라고 분류되는 노면조도는 포장두께가 8cm이하인 일반적인 교량에서는 매우 불량한 노면상태이기 때문에 발생한 결과로 판단된다. 즉 보통수준의 노면조도모형 ( $A_r=80 \times 10^{-6}$ )으로 모의 발생시킨 노면형상은 지간장 35m교량에서 평균노면으로부터 대략  $\pm 3 \sim 4$ cm의 최대 변화진폭을 가지게 되어 총두께 8cm이하의 교량포장에서는 불량한 노면상태이며 정상적인 교량유지관리상황에서는 경험하기 드문 경우로 판단된다. 이는 그림 2에서 일반교량의 계측 노면조도가 본 연구의 보통수준모형보다 훨씬 양호한 수준인 것으로부터도 알 수 있다.

43.2ton 세미트레일러에 의한 보통노면상태에서의 동적확대계수의 평균값은 1.178이다. 이는 AASHTO LRFD기준에 제시된 피로설계용 충격계수인 0.15(동적확대계수 1.150)보다 다소 높은 수준이다. 그러나 양호한 노면에서의 평균동적확

표 5 주행속도에 따른 확률특성값

(a) 43.2ton 세미트레일러

i) 양호한 노면

시속 (km/h)	20	40	60	80
평균	1.036	1.058	1.034	1.038
표준편차	0.026	0.037	0.042	0.050
극한값	1.070	1.105	1.088	1.101

ii) 보통의 노면

시속 (km/h)	20	40	60	80
평균	1.119	1.178	1.147	1.149
표준편차	0.050	0.077	0.054	0.073
극한값	1.183	1.277	1.216	1.243

(b) 25ton 텐덤축트럭

i) 양호한 노면

시속 (km/h)	20	40	60	80
평균	1.090	1.096	1.110	1.093
표준편차	0.036	0.060	0.082	0.095
극한값	1.136	1.173	1.214	1.214

ii) 보통의 노면

시속 (km/h)	20	40	60	80
평균	1.229	1.253	1.266	1.311
표준편차	0.0921	0.1129	0.1336	0.1451
극한값	1.347	1.398	1.437	1.497

대계수가 1.058의 매우 낮은 수준이며, 일반적인 교량의 노면상태를 다양하게 경험한다는 점을 고려하면 사용기간중의 평균동적확대계수는 AASHTO 설계기준인 1.15보다 낮을 것으로 판단된다.

### 4.4 노면조도

앞에서 언급한 바와 같이 도로교의 동적응답확대계수에 가장 민감한 영향요소는 노면조도이다. 이를 검토하기 위해 양호 ( $A_r=20 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{cycle}$ ), 보통 ( $A_r=80 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{cycle}$ ) 및 불량 ( $A_r=256 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{cycle}$ ) 수준의 노면상태를 대상으로



탠덤축트럭(25ton)과 세미트레일러(43.2ton)에 의한 동적확대계수를 분석하였다. 35m-4차선 교량에서 주행속도는 60km/h, 주행위치는 외측차선 정상위치이다. 그림 8에 정리된 결과로부터 동적확대계수는 노면상태에 매우 민감하게 변화한다는 것을 알 수 있다. 특히 보통수준(A<sub>r</sub>=80×10<sup>-6</sup>m<sup>3</sup>/cycle) 이하의 노면상태에서는 동적확대계수가 급격히 증가하고 있다. 43.2ton 세미트레일러의 경우, 보통노면상태에서는 평균 1.147, 90% 극한값 1.216이나 불량한 노면상태에서는 평균 1.313, 90% 극한값 1.458의 높은 수준이다. 동적재하시험에서 널리 이용되는 25ton 탠덤축트럭의 경우에는 양호한 노면에서는 평균 1.110, 90% 극한값 1.214이나 보통노면상태에서도 평균 1.266, 90% 극한값 1.437의 비교적 높은 수준을 보여주고 있다.

이러한 해석결과를 점검하기 위해 국내에서 수행된 동적재하시험결과를 취합, 정리하였다. 그림 9는 지간장에 따른 충격계수의 분포를 보여주며, 가는 실선은 취합된 전체교량(57개)에 대한 회귀분석결과이고 굵은 실선은 이들 중에서 특히 크거나 작은 충격계수를 나타내는 8개 교량의 자료(◇표기)를 제외한 회귀분석결과이다.

그림 9에서 지간장 20m미만은 주로 철근콘크리트 T형교 또는 슬래브교이며, 20m이상은 한 개를 제외하고는 전부 다주형교량(강교 및 PC교 등)이다. 회귀분석결과(n=49)를 살펴보면 35m에서 평균충격계수 0.223(동적확대계수 1.223)이며, 지간장 20m~40m교량의 결과에 대해 분석

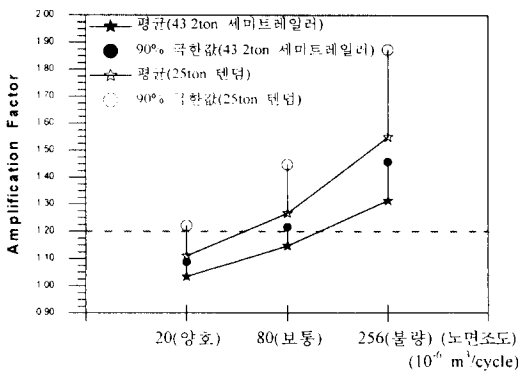


그림 8 노면조도에 따른 동적확대계수

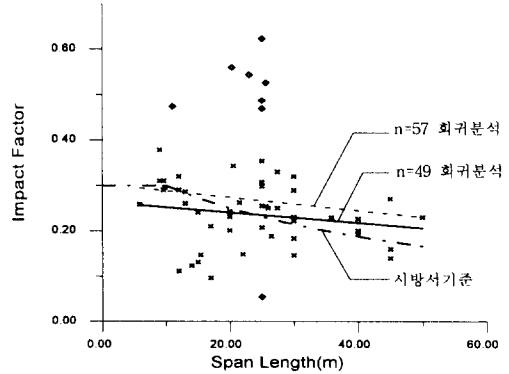


그림 9 동적재하시험의 결과 분석

한 표준편차와 정규분포함수로 산정한 90% 극한값은 동적확대계수 1.290이다. 이는 25ton 탠덤축트럭의 해석결과에서 양호한 수준의 노면상태에 대한 해석결과(평균 1.110, 90%극한값 1.214)와 보통수준의 노면상태의 해석결과(평균 1.266, 90%극한값 1.437)의 중간정도의 수준을 보여주고 있으며, 동적재하시험대상교량들의 노면상태가 양호내지 보통수준이상의 상태라고 한다면 해석결과가 매우 타당한 것으로 판단된다. 수집된 자료 전체(n=57)에 대한 회귀분석결과로 분석하면 35m에서 평균동적확대계수 1.252, 90% 극한값 1.394로 이는 보통노면상태의 해석결과인 평균 1.266, 90% 극한값 1.437과 매우 유사한 수준이다.

#### 4.5 동시재하차량

현행 도로교표준시방서에서는 설계트럭하중을 교폭 및 차선에 따라 대상거더의 영향폭의 범위에 걸쳐 불리하게 재하시키도록 요구하고 있다. 따라서 본 연구에서는 4차선 교량과 2차선 교량에 대하여 최외측거더의 영향폭에 따라 3대 또는 2대까지의 43.2ton 세미트레일러를 나란히 주행시켜 동적확대계수의 확률적 특성을 분석하였다. 재하위치는 도로교표준시방서에서 제시하는 방법에 따라 최외측거더에 불리하도록 편심재하되도록 선정하였으며, 주행속도는 앞에서 분석한 결과를 참고하여 40~80km/h범위로 선정하였

다. 노면형상은 각 차량마다 상호독립적인 상태로 모의발생하였다.

표 7은 4차선 교량의 결과이며 표 8은 2차선 교량의 결과이다. 우선 4차선교량 단독주행의 결과를 살펴보면 양호한 노면에서 최대동적확대계수는 40km/h속도에서 평균 1.049, 90%극한값 1.093이며, 보통 노면에서는 평균 1.155(40km/h), 90% 극한값 1.249이다. 이는 표 5의 최외측차선 정상주행 위치에서의 동적확대계수인 양호한 노면의 평균 1.058, 90%극한값 1.105 및 보통수준노면의 평균 1.178, 90%극한값 1.277보다 다소 낮은 값을 보여 주고 있다. 이 차이가 앞에서도 언급한 재하위치에 따른 동적응답확대계수의 변화특성이다.

4차선 교량에서 보통수준의 노면 상태에서는 주행차량의 수가 증가할수록 동적확대계수가 감소하는 것으로 분석되었다. 평균값은 물론 표준편차도 감소되어 90% 극한값을 보면 1대 주행시

표 7 동시재하효과에 의한 확률특성값(4차선)

(a) 양호한 노면

		40km/h	60km/h	80km/h
단독진입	평균	1.049	1.025	1.035
	표준편차	0.035	0.041	0.044
	극한값	1.093	1.077	1.091
2대 동시진입	평균	1.033	1.027	1.040
	표준편차	0.029	0.024	0.030
	극한값	1.071	1.058	1.078
3대 동시진입	평균	1.039	1.034	1.046
	표준편차	0.029	0.029	0.037
	극한값	1.076	1.071	1.090

(b) 보통의 노면

		40km/h	60km/h	80km/h
단독진입	평균	1.155	1.131	1.142
	표준편차	0.073	0.049	0.070
	극한값	1.249	1.194	1.232
2대 동시진입	평균	1.114	1.113	1.118
	표준편차	0.057	0.043	0.060
	극한값	1.188	1.168	1.195
3대 동시진입	평균	1.121	1.128	1.122
	표준편차	0.059	0.053	0.071
	극한값	1.196	1.196	1.213

표 8 동시재하효과에 의한 확률특성값(2차선)

(a) 양호한 노면

		40km/h	60km/h	80km/h
단독진입	평균	1.050	1.036	1.029
	표준편차	0.031	0.037	0.042
	극한값	1.090	1.084	1.083
2대 동시진입	평균	1.034	1.032	1.037
	표준편차	0.031	0.032	0.030
	극한값	1.073	1.073	1.075

(a) 양호한 노면

		40km/h	60km/h	80km/h
단독진입	평균	1.159	1.166	1.144
	표준편차	0.069	0.063	0.070
	극한값	1.247	1.247	1.234
2대 동시진입	평균	1.115	1.130	1.123
	표준편차	0.055	0.057	0.054
	극한값	1.186	1.203	1.192

1.249(40km/h)에서 3대 주행시 1.213(80km/h)으로 감소되었다. 이는 현행시방서의 1.200보다는 약간 높으며 일본시방서의 1.235보다는 낮은 수준이다. 양호한 노면에서는 주행차량수에 따른 동적응답확대계수의 변화가 크지 않은 것으로 분석되었다. 3대 동시진입시의 최대 극한값은 1.090으로 이는 현행시방서의 1.200보다 매우 낮은 수준이다. 현행시방서의 설계값 1.200의 확률적 수준은 양호한 노면에서는 초과확률  $0.16 \times 10^{-4}$ 이며, 보통 수준의 노면에서는 초과확률 0.136이다.

2차선 교량에서도 주행차량의 수에 따른 동적응답확대계수의 감소경향이 확실하다. 보통노면에서 90%극한값이 1대 주행시 1.247에서 2대주행시 1.203으로 감소되고 있다. 이는 4차선에서 3대 주행시의 결과(1.213)와 매우 유사한 수준이며, 교폭의 증가에 따른 동적응답확대계수의 감소경향은 무시할 수 있는 수준이다.

## 5. 결 론

도로교의 동적응답확대계수에 대해 판형교를 중심으로 다양한 조건변화에 따른 영향 및 확률

적 특성을 해석적으로 체계적인 분석을 수행한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 차량하중에 의한 도로교의 동적응답확대계수의 확률분포특성은 정규분포함수에 의해 적절히 모형화되는 것으로 분석되었다.

2) 보통수준의 노면상태를 주행하는 25ton 탠덤축트럭에 대한 해석적인 분석결과는 국내 도로교의 동적재하시험결과와 비교하여 매우 유사한 결과를 보여주며, 본 연구의 해석기법의 타당성을 보완해 주었다.

3) 도로교의 동적응답확대계수는 차량형식 및 중량에 따라 민감하게 변화한다. 탠덤축트럭보다는 세미트레일러가 낮은 값을 가지며, 중량이 증가할수록 감소하는 경향을 보인다.

4) 도로교의 동적응답확대계수는 다수의 차량이 주행하는 경우가 단독주행보다 다소 낮은 수준으로 분석되었으며, 대상거더에 불리하게 편심재하된 경우가 아닌 경우보다 낮은 동적확대효과를 보이고 있다.

5) 도로교의 동적응답확대계수는 노면상태에 매우 민감하다. 본 연구의 분석결과에 의하면 ISO기준에 따른 보통수준( $Ar=80 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{cycle}$ ) 이하의 노면상태가 되는 경우에는 도로교가 현행시방서에서 제시한 충격계수 이상을 경험할 가능성이 커지므로 바람직하지 못한 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 정태주, "3차원 차륜모델에 의한 강도도로교의 노면조도를 고려한 동적해석", 명지대학교 대학원, 박사학위논문, 1993.
2. 김상효, 허진영, "차량하중에 의한 다주형 강관형교의 충격계수 변화에 관한 연구", 한국전산구조공학회 논문집, 제 10권 제 3호, 1997년 9월
3. Huang, S. E., and Nowak, A. S., "Simulation of dynamic load for bridges", Jour-

- nal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 117, No. ST5, 1991, pp.1413-1434
4. Wang, T. L., Huang, D., and Shahawy, M., "Dynamic Response of Multigirder Bridges", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.118, No. ST8, 1992, pp. 2222-2238
5. Huang, T., "Impact Analysis of Continuous Multigirder Bridges due to Moving Vehicles", Journal of Structural Engineering, ASCE, 118(12), 1992, pp.3427-3443.
6. 橋梁振動研究會編, "橋梁振動の計測と解析", 1993
7. AASHTO, LRF Bridge Design Specifications, 1994
8. 日本鐵道橋協會, "鐵道橋示方書 同解説", 1990
9. Dodds, C. J. and Robson, J. D., "The Description of Road Surface Roughness", Journal of Sound and Vibration, Vol.31, No.12, 1973, pp.175-183.
10. 허진영, "차량하중특성에 따른 강교량의 충격계수에 관한 연구", 연세대학교 대학원, 석사학위논문, 1996.
11. 정재익, "강박스거더교의 형식에 따른 충격계수 특성에 관한 연구", 연세대학교 대학원, 석사학위논문, 1997.
12. 윤성호, "노면조도에 따른 도로교충격계수의 확률적 특성에 관한 연구", 연세대학교 대학원, 석사학위논문, 1997.
13. 도로교표준시방서, 건설교통부, 1996.
14. AASHTO, Standard Specifications for Highway Bridges, 1992
15. OHBDC, "Ontario Highway Bridge Design Code", Ministry of Transportation and Communication. Downsview, Ontario, 1983
16. SIA, "Schweizer Norm", SIA, Switzerland, November, 1985

(접수일자 : 1997. 10. 8)