

차량하중에 의한 다주형 강판형교의 충격계수 변화에 관한 연구

Impact Effects of Multi-Girder Steel Bridges Under Various Traffic Conditions

김 상 효*
Kim, Sang-Hyo

허 진 영**
Heo, Jin-Young

요 지

본 연구에서는 다양한 구조 및 하중조건에 대하여 중차량의 주행에 의한 충격효과를 분석하였다. 중차량 주행시의 다주형 강판형교의 동적해석에서는 노면조도 및 차륜-바닥판 사이의 상호작용을 고려하였다. 진입로와 교량바닥판의 노면형상은 각 노면조도에 따라 지수 스펙트럴 밀도 함수를 사용하여 생성시켰으며, 교량바닥판과 차륜사이의 상관력을 좀더 합리적으로 반영하기 위해 개선된 후처리기법을 사용하여 보정하였다. 또한 교량진입부에서 발생할 수 있는 바닥판과 진입로사이의 단차조건도 분석하였다. 현행 도로교 표준 시방서에 준하여 설계된 다양한 교량들에 대하여 동적거동에 중요한 영향을 미치는 구조인자들(경간장, 주형간격 등)의 영향을 체계적으로 검토하였다. 다양한 주행속도에 따른 단일주행에 의한 기본적인 하중상태 뿐만 아니라 동일차선 및 인접차선을 주행하는 다수 차량의 하중조건도 검토하였다.

Abstract

The study presents the linear dynamic analysis of multi-girder steel bridges under vehicular movement to examine the performance characteristics due to the various structural and loading conditions. The road surface roughness and bridge-vehicle interactions are considered. The road surface profiles for the approaching roadway and bridge decks are generated from power spectral density functions for different road roughness conditions. A new filtering method using the wheel trace is proposed to obtain the more rational bridge-vehicle interactions from the randomly generated road surface. The possible settlement condition between the bridge deck and approaching roadway is also included. The dynamic responses of various bridges designed according to current design practice are examined, in which important structural parameters(such as span length, girder spacing, etc.) are considered systematically. In addition to the basic loading conditions due to a single truck passing on the bridge, the traffic conditions of multi-truck traveling either consecutively on the same lane or side-by-side on the adjacent lanes are also evaluated.

Keywords : impact factor, power spectral density function, structural parameters, traffic condition, entrance settlement

* 정회원·연세대학교 토목공학과, 부교수
** 연세대학교 산업기술연구소, 연구원

*이 논문에 대한 토론을 1997년 12월 31일까지 본 학회에
보내주시면 1998년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

도로교는 주행차량에 의해 다양한 동적하중을 경험하게 된다. 이때 동적하중에 의한 변위 및 응력은 정적하중에 의한 것보다 다소 증가하게 되므로 설계를 위하여 이러한 동적하중에 의한 증가량을 정확하게 산정할 필요가 있다. 그러나 도로교의 동적응답은 주행차량 및 교량의 구조적 특성에 따라 크게 영향을 받게 되므로 설계단계에서 동적하중을 직접 고려하기는 매우 어렵다.

시방서에서는 동적하중에 의한 구조응답의 증가를 충격계수로서 단순하게 규정하고 있는데 대부분의 시방서에서는 충격계수를 단순히 재하된 경간장이나 제1모우드의 고유진동수의 함수로서 나타낸다. 그러나 많은 해석적, 실험적 연구에서 교량의 동적응답의 증가는 이들 외에 교량형식, 차량특성, 차량하중, 주행속도, 노면형상 등 다양한 인자들의 영향을 받음을 보여주고 있다.

합성 혹은 비합성의 다주형 강판형교는 전세계적으로 가장 널리 사용되는 도로교형식으로 경간의 연속성(단순 혹은 연속)에 따라 일반적으로 경간장 25~80m사이의 범위에서 사용된다. 판형교에서는 일반적으로 활하중의 비중이 사하중에 비하여 크므로 교량구조물의 피로손상이 중요한 문제가 된다. 중간정도의 경간장을 가진 교량에서 교량의 강도한계상태는 매우 무거운 중차량에 의해 결정되는 반면, 피로손상은 일상적으로 통행하는 중차량에 의해 증가된다.

본 연구의 목적은 현행 시방사항에 따라 설계된 다양한 대상 교량에 대하여 주행차량에 의한 다주형 강판형교의 동적응답특성을 알아보는 것으로서 중요한 구조적 인자들(경간장, 교폭, 거더간격 등)을 체계적으로 고려하였다. 교량진입부의 단차효과를 검토하였고, 다양한 주행속도에 따른 단일주행에 의한 기본적인 하중상태 뿐만 아니라 동일차선 및 인접차선을 주행하는 다수차량의 하중상태도 분석하였다.

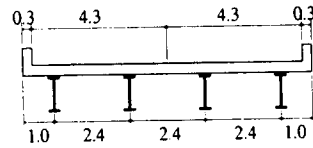
본 연구에서 충격계수(impact factor)는 차량주행에 의한 대상부위에서의 최대동적응답과 차량의 단순이동재하에 의한 최대정적응답의 차이를 최대정적응답으로 정규화시킨 값으로 평가하였으며, 증폭계수(amplification factor)는 최대

동적응답을 최대정적응답으로 정규화한 값으로 (1+충격계수)가 된다.

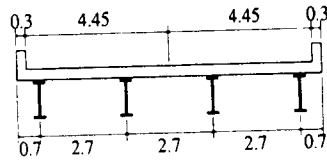
2. 해석모형

2.1 교량모형

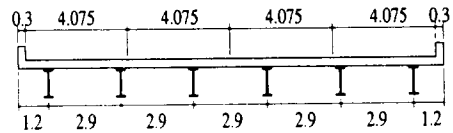
분석대상교량은 도로교표준시방서¹⁾에 따라 1등교로 설계하였다. 교량은 단순교를 대상으로 하였고 2차선 및 4차선 교량의 단면은 그림 1과 같으며 교폭은 2차선 교량의 경우에는 9.2m에서



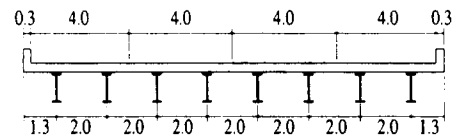
(a) Type- I



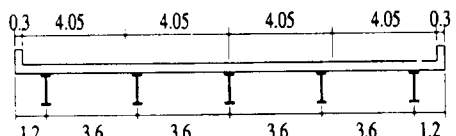
(b) Type- II



(c) Type- III



(d) Type- IV



(e) Type- V

그림 1 교량모형(단위 : meter)

9.5m, 4차선 교량의 경우에는 16.6m에서 16.9m 사이이다. 2차선 교량의 경우에 거더수는 동일하게 배치하였으며 간격은 2.4m와 2.7m이다. 4차선 교량에서는 거더를 5개에서 8개까지 사용하였고 거더간격은 2.0m에서 3.6m까지 변화시켰다.

다주형 교량의 해석모형은 그림 2처럼 격자보 구조의 3차원 뼈대요소를 사용하여 구성하였고 격자보구조의 종방향요소의 단면물성은 강관형 주형과 R.C 바닥판의 합성단면을 횡방향요소의 단면물성은 바닥판과 수직브레이싱을 대표한다.

수직브레이싱은 경간장에 따라 적절히 배치하였다. 표 1은 대표적인 교량의 부재제원이다.

2.2 차량모형

7자유도의 비선형 차량모형은 일반적인 중차량으로서 텐덤축을 가진 트럭을 사용하였다. 차량모형은 그림 3과 같으며, 총중량은 26ton으로 모형화하였고 차량의 제원은 표 2와 같으며 여기서 각 부분의 감쇠계수는 실험을 통하여 검증한 값을 사용하였다⁷⁾.

교량과 차량의 동적응답은 직접적분법인 Newmark-β법을 사용하여 구하였다. 차량주행중에 차륜과 바닥판은 한 점에서 접촉하는 것으로 가정하였으며, 차륜과 바닥판의 상호작용력은 상대변위와 상대속도의 함수로 산정하였다. 이때 상호작용력이 음수인 경우는 차륜이 바닥판을 들어 올리는 경우로서 실제로 있을 수 없는 현상이므로 작용력을 무시하였다.

개발된 해석방법을 사용하여 해석한 해석결과와 AASHO Road Test²⁾를 통하여 얻어진 실험 데이터를 비교하여 개발된 해석방법의 타당성을 검토하였다³⁾.

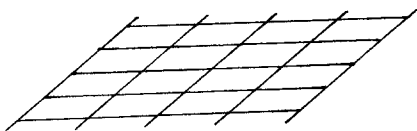


그림 2 교량의 해석모형

표 1 교량의 단면제원 예

(a) Type- I

Span length (m)	GIRDER		
	$I \times 10^{-2}$ (m ⁴)	$J_d \times 10^{-2}$ (m ⁴)	Mass (t/m)
30	0.02378	0.0007056	0.1478
60	0.1225	0.0007101	0.1722
Span length (m)	Cross frame		
	$I \times 10^{-2}$ (m ⁴)	$J_d \times 10^{-2}$ (m ⁴)	
30	0.002438	0.0005	
60	0.003160	0.0005	

Note : I =inertia momemt
J_d= torsional inertia moment

(d) Type- IV

Span length (m)	GIRDER		
	$I \times 10^{-2}$ (m ⁴)	$J_d \times 10^{-2}$ (m ⁴)	Mass (t/m)
30	0.04101	0.001944	0.2158
60	0.04414	0.2301	0.2440
Span length (m)	Cross frame		
	$I \times 10^{-2}$ (m ⁴)	$J_d \times 10^{-2}$ (m ⁴)	
30	0.002990	0.0005	
60	0.003480	0.0005	

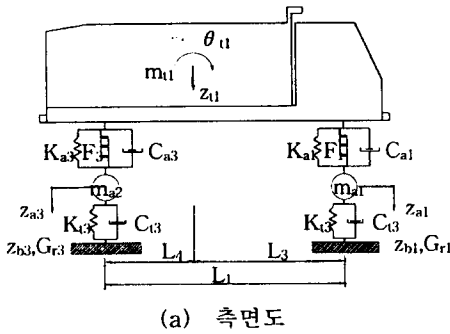
3. 노면모형

3.1 노면형상모형

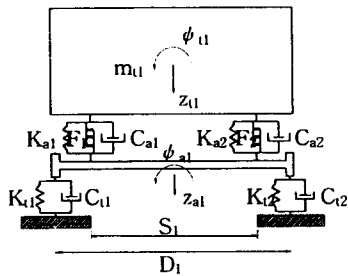
기본적인 노면형상은 Dodds와 Robson⁴⁾에 의해 개발되고 Wang과 Huang⁵⁾에 의해 수정된 지수스펙트럴밀도함수를 사용하여 생성시킨다.

여기에서 노면상태는 4단계(매우양호, 양호, 보통, 불량)로 분류된다. 생성된 노면형상으로부터 고주파항을 소거하고 바닥판-차륜사이의 상호작용을 보다 합리적으로 개선하기 위하여 새로운 보정기법을 사용하였다³⁾.

사용된 보정기법은 생성된 기본노면형상을 따라 차륜을 움직이면서 노면형상을 보정하는 것으로 기본노면형상과 보정된 노면형상은 그림 3에 나타났다. 점차중으로 작용하는 차륜모형은 깊은 골에 작용할 수도 있는데 이는 실제로는 발생할 수 없는 경우이므로 그림 4에서와 같이 소거되어야 한다.



(a) 측면도



(b) 정면도

그림 3 차량모형

표 2 차량의 제원

차 량		15ton 덤프트럭
구 분		
총 길이(m)		4.0
정적축하중(ton)	앞 축	5.7
	뒷 축	19.5
현가스프링상수 (t/m)	앞 축	35.0
	뒷 축	241.0
타이어스프링상수 (t/m)	전 륜	110.0
	후 륜	440.0
현가장치감쇠계수 (kg·s/mm)	앞 축	0.54680
	뒷 축	1.69337
타이어감쇠계수 (kg·s/mm)	앞 축	0.05484
	뒷 축	0.23587

3.2 단차모형

노면형상은 교량진입부 슬래브의 침하나 신축이음의 틈새 등으로 인해 교량의 동적응답을 증가시키는 단차를 포함할 수도 있다. 차량주행시에 이러한 단차주변의 노면은 심한 손상을 받게 되므로 단차모형은 그림 5와 같이 단차, 나쁜 노

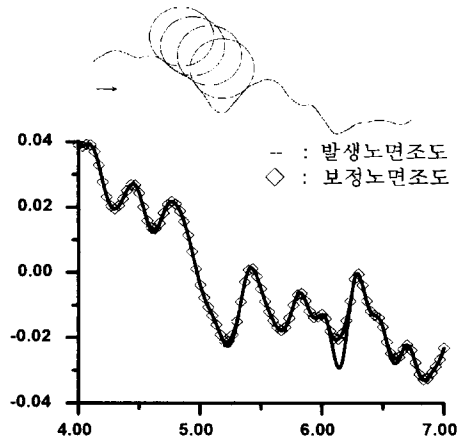


그림 4 생성된 노면형상의 보정기법

면구간, 회복구간, 보통 노면구간의 4개 영역으로 구성된다. 본 연구에서는 종방향으로 나쁜 노면구간 1m, 회복구간은 2m로 가정하였으며 회복구간의 노면형상은 조도차를 갖는 나쁜 노면과 보통 노면의 선형조합으로 생성하였다.

4. 영향인자 연구

4.1 진입부 단차의 영향

단차의 영향을 알아보기 위하여 교량진입부에 3cm깊이의 단차를 가정하였다. 주형의 휨모멘트에 의한 충격계수(5회 모의분석의 평균:이하동일)의 변화는 그림 6에 나타내었다. 대상교량은 3개의 각기 다른 지간장(30, 45, 60m)을 갖고 Type-V 교량과 동일한 주형배치를 사용하여 설계하였다. 60m 지간장의 단순강판형교는 일반적으로 사용되지 않는 형식이나 단차의 지간장에 따른 영향을 분석하기 위해 이용하였다. 이때 보통 구간의 노면형상은 매우 양호한 노면조도로 가정하였다.

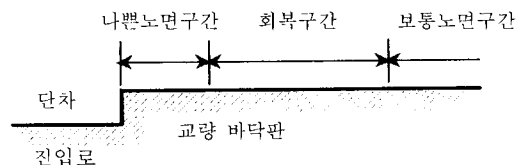
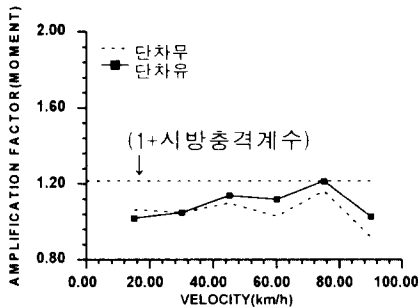
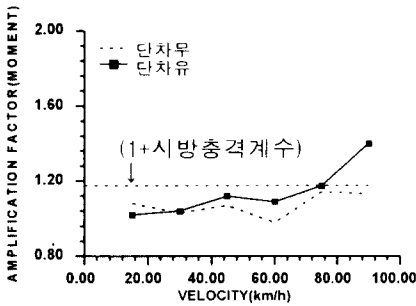


그림 5 단차모형

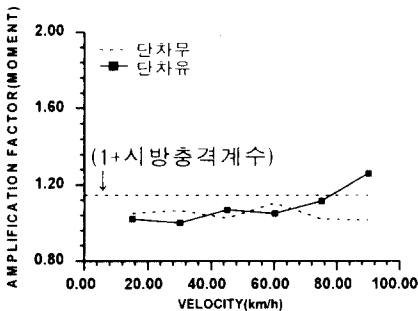
그림 6에 나타낸 충격계수는 노면형상을 제외한 모든 조건이 동일한 모형에 대해 5회의 모의분석을 수행한 평균치이다. 위의 결과에서 단차는 충격계수를 증가시키나 대부분의 경우 설계치보다 작은 범위에 있음을 알 수 있다. 충격계수는 단차가 존재하는 진입부에서 거리가 있는 경간 중앙부에서의 최대 동적응답치와 정적응답치에 의해 산정되므로 일반적으로 차량속도가 증가할수록 충격계수는 증가하고 단차의 영향은 경간장이 길어질수록 감소한다.



(a) 지간장 30m



(b) 지간장 45m



(c) 지간장 60m

그림 6 단차에 의한 변화

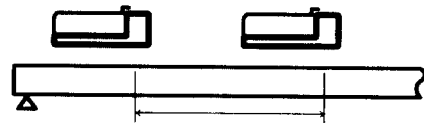
4. 2 차량주행특성의 영향

4. 2. 1 차량연행의 영향

몇 대의 차량이 동시에 교량상을 주행하는 경우에는 교량의 동적거동도 달라지게 된다. 이전의 연구^{5,6)}에서는 선행차량과 후행차량의 간격이 없는 평행주행상태를 주로 고려하였으나 본 연구에서는 동일차선 혹은 인접차선에 대하여 선행-후행차량사이에 임의의 간격을 두고 연속적으로 주행하는 경우를 가정하였는데 이때 차두간격은 시간에 따라 일정한 것으로 가정하였다(그림 7). 1개의 차선에 대하여 2개의 확률적으로 독립적인 노면형상(1조)을 생성시켰으며 인접한 차선의 노면형상도 상호독립적인 것으로 가정하였다. 노면조도는 매우 양호한 상태를 고려하였고 단차는 없는 경우이다.

그림 8은 동일한 차선에 대한 일정한 차두간격을 가정하였을 경우의 충격계수 변화를 나타내고, 그림 9는 그림 7의 2가지 다른 주행상태에 의한 충격계수의 변화를 나타낸 것이다. 그림 8, 9에는 2번째 트럭에 대해 산정된 충격계수를 정리하였다.

차두간격이 짧은 경우에 2번째 트럭에 의한 충격계수가 1대만 주행한 경우의 충격계수보다 작는데 이는 2대 트럭의 상호작용에 의한 영향으로 분석된다. 그러나 어떤 차두간격의 경우에는 2번



차두간격

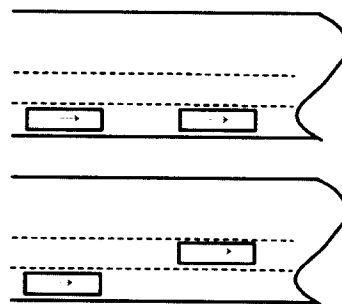
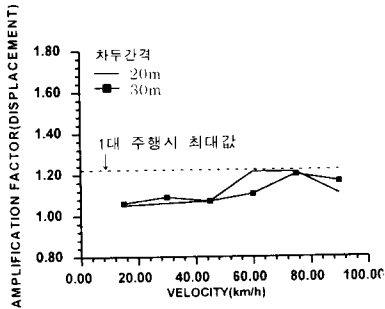
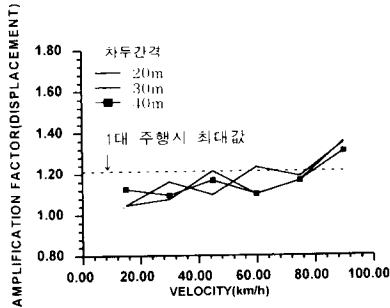


그림 7 차량의 연행모형

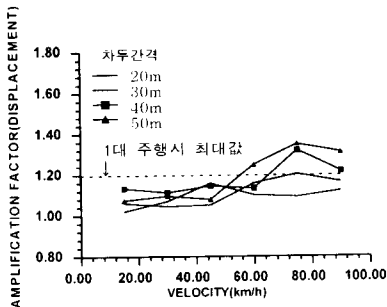
째 트럭에 의한 충격계수가 증가하는데 이는 주로 2대 주행시에 동적해석의 초기조건이 다르기 때문인 것으로 판단된다. 즉 2번째 차량이 진입할 때 교량이 이미 진동하고 있는 상태이기 때문이다. 또한 다수 차량의 효과는 긴 경간장을 가진 교량의 경우에 더 크게 나타난다. 차두간격이 동일할 경우 동일차선을 연이어 주행하는 경우가 인접차선을 연이어 주행하는 경우보다 큰 충격계수를 나타낸다.



(a) 지간장 30m



(b) 지간장 45m



(c) 지간장 60m

그림 8 차량의 연행에 의한 변화

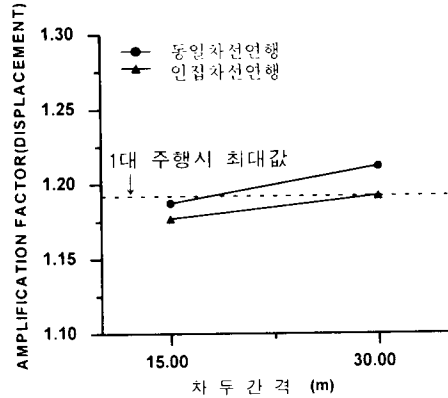
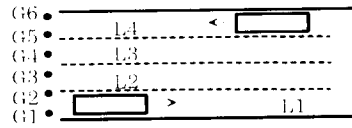
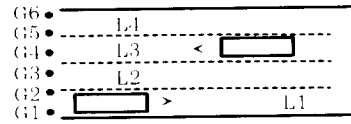


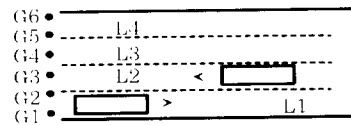
그림 9 주행 조건의 영향



(a) Case II



(b) Case III



(c) Case IV

그림 10 상하행선 주행모형

4. 2. 2 차량교행의 영향

어떤 차량이 교량상을 주행할 때 교량의 동적거동은 그림 10에 보인바와 같이 반대 방향으로 주행하는 다른 차량에 의해 영향을 받을 수 있다. 이러한 주행형태는 2방향 교통체계가 실시되는 교량상에서의 일반적으로 나타나는 주행형태이다. 이때 주행차량은 상하행 동시에 교량에 진입하는 것으로 가정하였으며, 상하행선에 대하여 2조의 확률적으로 독립적인 노면형상을 생성시켜 사용하였다.

그림 11에서 Case I 은 한 대의 트럭이 차선 1로 주행한 결과를 나타내고 Case II, Case III, Case IV는 각각 그림 9-(a),(b),(c)에 나타난 바와 같이 주행 차선이 점차 근접함에 따른 주형1과 주형2의 충격계수에 미치는 영향을 알아보았다. 결과에 따르면 주형의 동적응답은 인접차선에 주행하는 다른 차량의 주행에 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

주행차선에 인접한 주형에서 발생하는 충격계수는 차량이 주행하지 않는 주형에서 발생하는 충격계수보다 작으며, 상하행선 왕복주행의 경우에도 주행주형에서 발생하는 최대충격계수는 외측차선 1대 주행(그림 10(a)의 주형 1, 2) 혹은 내측차선 1대주행(그림 10(b)의 주형 2, 3)의 경우와 유사한 것으로 분석되었다.

4. 2. 3 차선내 차량주행위치에 의한 영향

한 주행차선안에서 차량의 횡방향 주행위치의 변화에 따른 충격계수의 변화를 알아보기 위하여 한 주행차선안에서 외측으로부터 내측으로 차량의 주행위치를 변화시켜가며 해석하여 보았다(그림 12). 대상교량은 2차선 교량인 Type-II교량을 사용하였다. 그림 13에 나타난 결과와 같이 각 주행위치에서 응답이 최대가 되는 주형은 가장 적은 충격계수를 나타낸다. 또한 이때 나타나는 주행위치별 주형의 최소충격계수는 거의 일정한 수준을 유지한다.

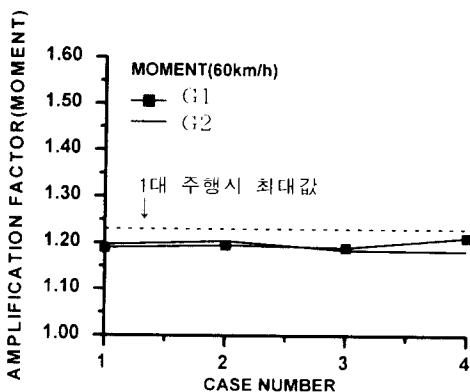


그림 11 상하행차선 교행의 영향 (지간장 30m, 60km/h, 휨모멘트)

4. 3 주형간격의 영향

그림 1에서 보는 바와 같이 다양한 주형배치에 대하여 검토하였다. 이때 차량의 주행위치는 검토대상 주형에 가능한 불리한 재하상태가 되도록 선정하였다. 그림 14에 정리된 결과와 같이 주형간격에 따른 변화가 크지는 않지만 주형간격이 증가함에 따라 충격계수가 다소 감소되는 것을 보여주고 있다. 그리고 주형수가 적은 교량의 충격계수가 낮은 것으로 분석되었다. 즉 4차선 교량(주형수 6~8개)인 Type III와 IV의 충격계수가 2차선교량(주형수 4개)인 Type I과 II의 충격계수보다 크게 분석되었다.

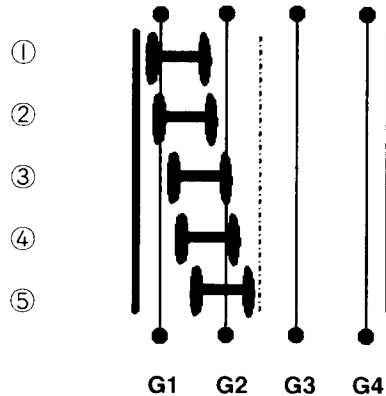


그림 12 차선내 차량의 주행위치

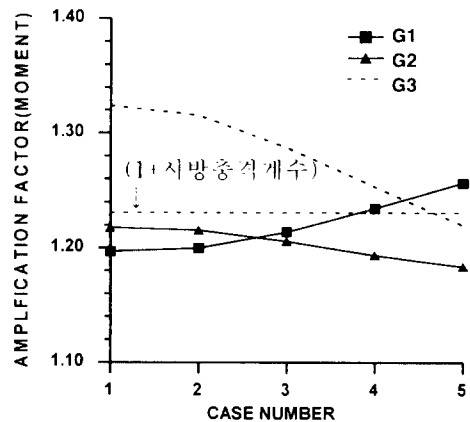


그림 13 차선내 주행위치의 영향 (지간장 30m, 4차선, 시속 60km/h, 휨모멘트)

5. 결 론

다주형 강관형교의 동적거동에 대한 체계적인 연구의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 진입부의 단차는 충격계수를 증가시킨다. 특히 지간장이 짧을수록, 주행속도가 빠를수록 그 영향은 커지게 된다.

2) 다수차량이 연행하는 경우에 지간장과 차 두 간격의 상관관계에 따라 충격계수는 증가될 수 있다. 이러한 효과는 장지간의 교량에 더욱 확실하게 나타난다.

3) 다수 차량이 상하행 교행할 경우, 주행위치와 근접한 주형의 최대충격계수는 1대주행에 따른 최대충격계수 이하인 것으로 분석되었다. 동일한 주행차선내에서 주행위치가 변화할 경우 최외측 주형의 최대충격계수가 실제 충격계수를 초

과할 수도 있는 것으로 나타났다.

4) 주형간격이 증가할수록 충격계수는 감소하며, 2차선교량이 4차선교량보다 다소 낮은 충격계수를 가지는 것으로 나타났다.

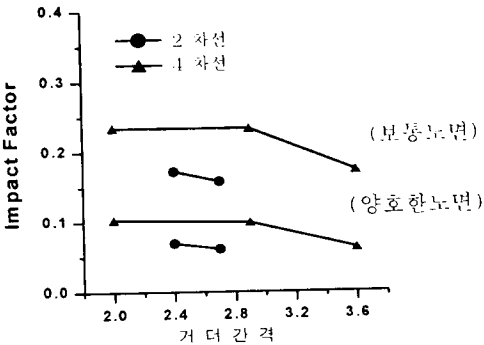
감사의 글

본 연구는 POSCO의 연구비지원(1996년도)에 의해 수행된 연구임을 밝히며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

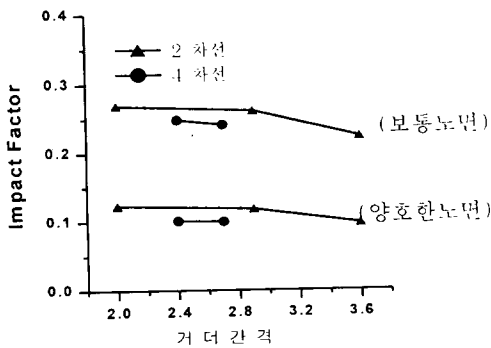
참 고 문 헌

1. 도로교표준시방서, 건설교통부, 1996.
2. Fenves, S.J., Veletsos, A.S., and Siess, C.P., 'Dynamic Studies of Bridges on the AASHO Road Test, Highway Research Board, Report 71, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1962.
3. 허진영, "차량하중특성에 따른 강교량의 충격계수에 관한 연구," 연세대학교 대학원 공학석사 학위논문, 1996. 8.
4. Dodds, C. J. and Robson, J. D., "The Description of Road Surface Roughness," J. of Sound and Vibration, 31(2), 1973., pp. 175-183
5. Huang, D., Wang, T-L., and Shahawy, M., "Impact Studies of Multigirder Concrete Bridges," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 119, No. 8, August, 1993., pp. 2387-2402
6. Wang, T-L., Huang, D., Shahawy, M., and Huang, K., "Dynamic Response of Highway Girder Bridge," Computer & Structure, Vol. 60, No 6, 1996., pp. 1021-1027
7. 정재익, "강박스거더교의 형식에 따른 충격계수 특성에 관한 연구," 연세대학교 대학원 공학석사 학위논문, 1997. 2.

(접수일자 : 1997. 6. 17)



(a) 시속 40km/h



(b) 시속 60km/h

그림 14 주형간격의 영향(지간장 35m)