

다양한 차량주행에 의한 박스형 장대교량의 동적 응답에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Dynamic Response of Box Girder Long-Span Bridges under Various Travelling Vehicles

이 래 철* 이 상 열** 임 성 순***
Lee, Rae-Chul Lee, Sang-Youl Yhim, Sung-Soon

Abstract

In this study we determine a dynamic analysis of the existing two-span prestressed concrete box girder bridge subjected to moving vehicle loads using the experimental measurements. The moving loads applied in this paper are classified as general travelling, suddenly brake, continuous travelling, reversely travelling and reversely travelling impact loads for increasing velocities. For each travelling load, we search dynamic behaviors and characteristic in various measuring point of box girder section. In addition, the three-dimensional numerical results analyzed by the developed finite element program using flat shell element with six degrees of freedom per a node are compared with the measured experimental data. Dynamic behaviors caused impact loads by suddenly braking, reversely travelling, are bigger than by general travelling in box girder. Three-dimensional numerical results are better than one-dimensional results.

요 지

본 연구는 현장 계측 실험에 의하여 주행 차량하중을 받는 2경간 P.S.C. 박스형 교량의 동적 해석을 수행하였다. 본 연구에서 적용한 이동하중은 차량 속도의 증가에 대해 주행하중, 급제동하중, 연행하중, 역주행하중, 역 주행 충격하중 등으로 분류하여 실험을 행하였다. 각 주행 하중에 대해 박스 거더 단면에서의 계측 위치를 달리하여 동적 거동의 변화 및 특성을 살펴보았으며, 절점당 6개의 자유도를 갖는 4절점 쉘요소를 이용한 유한요소 해석 프로그램을 개발하고 수치해석을 하여 실험결과와 비교·분석하였다. 박스 거더의 동적 거동은 주행하중에 의한 응답보다 급제동이나 역주행 충격하중에 의한 응답이 더 크게 나왔으며 수치해석 결과는 기존의 1차원 보요소를 사용하여 해석한 결과보다 실험값에 근접함을 보였다.

Keywords : Moving vehicles, Box girders, Experimental measurements, 3D-Finite element program, Dynamic responses

핵심 용어 : 이동 차량 하중, 박스 거더, 현장 계측 실험, 3차원 유한요소 프로그램, 동적 응답

* 정회원, (주)에스큐 엔지니어링 대표이사, 공학박사

** 정회원, (주)에스큐 엔지니어링 기술연구소, 공학박사

*** 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수, 공학박사

E-mail : SQENG@chollian.net 011-723-8932

•본 논문에 대한 토의를 2003년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2004년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

도로교는 사하중과 풍하중을 비롯하여 차량하중을 주로 받기 때문에 차량이 교량을 통과할 때 동적하중으로 인하여 다양한 형태의 동적거동을 하게 된다. 실무적으로 설계시 교량의 각 부재에 발생하는 동적응답을 정확하게 파악하기가 어렵기 때문에 도로교 시방서에서는 특별한 경우를 제외하고 설계의 편이상 교량의 부재가 1차원 또는 2차원 거동을 하는 것으로 가정하고 동적하중의 영향을 고려하기 위하여 충격계수를 고려한 정적해석으로 구한 면내 응력만을 고려하여 부재를 설계할 수 있게 규정하고 있는 것이 일반적이다. 그러나 설계시의 가정과는 달리 차량이 교량을 통과할 때 교량에는 동적 효과에 의한 추가 응력이 발생하며, 면내하중에 의한 면내응력과 3차원거동으로 인하여 면외변형으로 인한 2차 응력이 발생하게 된다. 따라서, 이동차량하중으로 인한 동적 하중을 더욱 정확히 해석할 필요성이 제기된다. 이동하중에 의한 동적응답에 관한 연구에 대한 다양한 이론적 실험적 연구가 진행되었다(Timoshenko, 1929 ; Veletsos and Huang, 1970 ; Niazi, 1997 ; Yang and Yau, 1997). 그러나 기존의 연구는 1차원 보요소 또는 2차원 판요소에 의한 간이해석으로서 박스단면 내에서의 위치변화에 따른 동적응답을 상세 분석할 수 없다(Kristek, 1979). 최근 이래철 등은 3차원 박스거더교 단면에 대한 이동하중에 의한 동적응답에 관한 수치해석연구를 수행하였다(이래철 등, 2002 ; Lee et al. 2002). 본 연구에서는 이래철 등에 의해 수행된 수치해석 연구분석을 토대로 이를 실제 교량을 대상으로 한 실험적 접근으로 확장하였으며 개발된 유한요소 해석프로그램에 의한 결과와 비교·분석하였다.

일반적으로 교량의 동적응답은 진동으로 나타나는데 대부분의 교량들은 공용중에 검토하게 되어 사용성 및 내구성 저하에 따른 실제 살내하력 평가하는데 어려움이 있다. 본 연구에서는 주행차량에 의해 교량에 발생하는 동특성을 정확히 예측하기 위하여 실제 박스거더 교량에 대하여 동적 계측 실험을 통한 동적응답분석을 수행하였다. 본 실험 대상 교량에 대한 계측 실험은 공용 전에 실시하였으며 실제 시공한 교량 제원, 공학

상수를 접근시키기 위한 설계도서검토, 비파괴검사, 외관조사 등을 선행하여 가능한 실제 구조물과 유사하도록 하였다. 본 연구는 다양한 형태의 차량주행에 따른 박스거더 단면내에서의 각 위치별 동적응답을 상세 분석하는 것에 초점을 두었다.

2. 실험 대상 교량

본 실험대상 교량은 서울시 김포 지구와 경기 북부 지역간에 원활한 교통소통을 위하여 건설된 신설 한강 상대 교량으로 설계의 전문성과 건설업체의 우수한 기술 능력을 접목하여 교량 건설공사의 기술개발 유도 와 기술수준 향상을 도모하여 시공된 교량이다. 따라서 본 교량은 시공성을 감안한 초기의 상태를 정확히 평가할 수 있는 기회일 뿐 아니라 신규 교량의 동특성을 초기화함으로서 향후 유지관리에 필요한 기초자료를 제공한다. 본 연구에서 개발한 수치해석 프로그램과의 비교를 위하여 ILM 3 구간, F.C.M 1 구간, 총 4구간에 대하여 재하실험을 실시하였다.

동적재하실험은 PSC 박스의 동적 변위에 의한 교량의 실측 충격계수와 대수감쇠율 및 고유진동수를 측정하여 교량의 동적거동특성 분석은 물론 향후 유지관리를 위한 초기치를 얻기 위한 목적으로 실시하였다. 전문한 바와 같이 본 교량 재하실험은 교장 L=1,460m 중 강남측 ILM 구간 A1~P2 구간에 대해 다양한 케이스로 동적 재하실험을 실시하여 상세 분석하였으며, 기타 3개소에 대한 처짐, 가속도 등 동특성은 주 실험 대상의 경간에 대한 적정치와 경향을 비교 검증하는 것만으로 본 연구에서 사용하였다.

2.1 동적재하실험

교량에 동적 외력을 가하는 방법에 따라 본 연구에서는 Table 1과 같은 제원을 갖는 15Ton Dump Truck의 주행차량 1대 주행실험, 주행차량 2대를 이용한 연행실험, 급제동 실험, 역주행실험, 역주행 충격실험 등으로 나누어 실시하였다. Fig. 1은 동적 실험 대상교량의 단면 및 동적응답 측정위치를 나타낸다.

Table 1 재하차량 제원 (m)

차 종	차축 1과 2간 거리	차축 2와 3간 거리	좌,우측 거리
15 TON D/T	3.30m	1.30m	1.85m

Table 2 재하차량의 바퀴 제원 (tonf)

차 종	앞 바퀴	중간바퀴	뒷 바퀴
15 TON	2.910	4.555	4.555
	3.015	4.825	4.825



Photo 1 실험대상교량의 박스단면 전경



Photo 2 하중위치 및 충격실험 설치 전경



Photo 3 연행 실험 전경

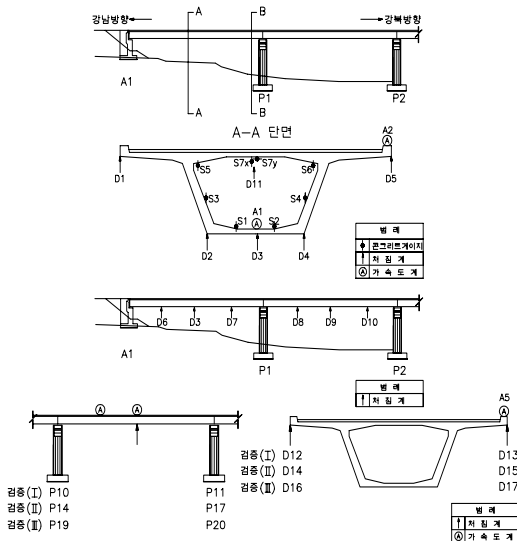


Fig. 1 교량 단면 및 동적응답의 측정 위치

또한, Photo 1~3은 실험대상 교량의 박스단면의 전경 및 동적 실험을 보여준다.

동적 재하실험은 주행실험으로 강남에서 강북으로 시속 5km~60km, Max(8단계)까지 각 단계별 속도를 증가하여 시행하였으며, 연속교입을 감안하여 단차에 의한 영향 등을 파악하고자 강북 종점부에서부터 주행하여 강남 시점부로 역주행을 함으로써 교량 거동을 파악하였다. 한편 급제동 실험은 강남측 시점에서 40km, 50km, MAX(55km)로 주행하였다. 연행실험은 실험차량을 20m 연행하여 실험하였으며, 특히 본 연구에서 역주행 충격실험은 강북에서 강남측 시점

부로 범프의 영향을 고려하기 위해 사진 2와 같이 강재 □형 PIPE(B×H=12cm×12cm)를 주행 2, 3차선에 설치하여 10km~60km까지 시속별로 동적 거동을 측정하였다. 역주행실험의 차량주행속도는 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, Max km/hr의 속도로 주행하면서 동적 처짐을 측정하였다.

2.2 측정위치 및 방법

동적 거동은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 첫 번째 경간 중앙에 D/T를 D1, D2, D3, D4, D5, D11을 설치함으로써 차선별 재하시와 교축 중심선에 편심재하에 따른 횡방향 분포를 측정 목적으로 교폭 B=14.5m 구간에 5개소를 설치하였다. 또한, PSC 교량 박스 내부의 수직 처짐은 어떠한 경향을 나타내는지를 평가하기 위하여 BOX 셀 내부에 설치하여 분석하였다. 그리고 차선별 재하 및 교축 중심선 재하, 2차선 동시 재하 등에 따른 종방향 분포의 거동을 판단하기 위하여 1, 2경간 길이 120m 구간에 지점부를 제외한 D/T D6, D3, D7, D8, D9, D10을 설치하여 분석하였다. 한편, ILM 구간인 P10, P11, F.C.M 구간인 P14, P15, 강북 ILM 구간인 P19, P20에 추가 변위에 따른 변동을 검증 차원의 가속도계와 처짐계를 설치하여 A1~P2 구간에서의 신뢰성을 검증하였다. 또한, 검증구간은 한강하부로서 처짐계를 경간 중앙에 횡단방향으로 2개소 설치하였고, 가속도계는 차량 주행에 따른 횡단, Wire 연결방법 어려움, 반송과 영향 등을 고려하여 한 방향으로 설치하였다. 한강상의 교량은 육상에서 B/L를 특수 제작하여 하단으로 내리고 피아노 강선에 의한 처짐을 측정하였으

나, 유속의 흐름이 빠르고, 수심이 깊고 연속교의 거동 등으로 Noise가 크게 발생되어 일부 값이 불안정하게 측정되는 경우도 있었다. 따라서 측정된 처짐값의 가속도의 경향을 가지고 그 결과를 A1~P2 자료 분석에 대한 검증차원에만 이용하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 실험 결과 분석

3.1.1 주행 및 급제동 실험

Table 3은 차량 속도변화에 따른 박스단면의 각 위치별 동적처짐을 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 박스단면의 각위치별로 동적처짐은 상이하게 나타나며 특히 박스단면 하단 모서리부분인 D4위치에서의 동적 처짐이 상대적으로 크게 나타났다. 한편, Table 4에서와 같이 트럭차량의 급제동 하중은 측정지점 D4를 기준으로 동적처짐값이 0.68~0.72mm로서 같은 조건의 일반주행 처짐값 0.56~0.63mm, 역주행실험 0.56~0.65mm보다 평균 15.7~17.6% 동적거동이 증가함을 알 수 있었다. 따라서 차량의 급제동하중은 다른 종류의 차량하중에 비하여 교량 박스단면의 동적 거동에 큰 영향을 준다는 사실에 주목해야 한다.

Table 3 차량속도 변화에 대한 박스거더의 각위치별 동적처짐(mm) : 일반 주행실험

구분	속도 (km/h)		A1 ~ P2										
			DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	DT6	DT7	DT8	DT9	DT10	DT11
주 행 시 험 ~ 강 남 ↓ 강 북)	5	Max	0.14	0.16	0.16	0.15	0.14	0.13	0.13	0.14	0.15	0.13	0.05
		Min	-0.41	-0.49	-0.48	-0.56	-0.37	-0.40	-0.32	-0.32	-0.41	-0.27	-0.57
	10	Max	0.16	0.18	0.15	0.17	0.15	0.13	0.14	0.14	0.17	0.19	0.05
		Min	-0.51	-0.51	-0.47	-0.54	-0.48	-0.37	-0.34	-0.32	-0.41	-0.22	-0.51
	20	Max	0.15	0.17	0.15	0.15	0.17	0.11	0.12	0.16	0.18	0.18	0.06
		Min	-0.54	-0.60	-0.53	-0.60	-0.42	-0.44	-0.38	-0.30	-0.44	-0.27	-0.49
	30	Max	0.15	0.16	0.16	0.17	0.16	0.11	0.13	0.13	0.15	0.14	0.04
		Min	-0.37	-0.46	-0.48	-0.59	-0.41	-0.39	-0.32	-0.31	-0.42	-0.30	-0.47
	40	Max	0.17	0.20	0.20	0.20	0.17	0.13	0.14	0.18	0.20	0.16	0.01
		Min	-0.44	-0.55	-0.58	-0.63	-0.45	-0.45	-0.37	-0.33	-0.46	-0.31	-0.53
	50	Max	0.15	0.12	0.15	0.15	0.16	0.13	0.14	0.14	0.17	0.16	0.04
		Min	-0.39	-0.52	-0.50	-0.56	-0.39	-0.41	-0.54	-0.30	-0.41	-0.26	-0.37
	60	Max	0.16	0.17	0.17	0.17	0.15	0.12	0.14	0.13	0.14	0.12	0.05
		Min	-0.39	-0.47	-0.48	-0.57	-0.40	-0.40	-0.30	-0.32	-0.44	-0.32	-0.49
	Max	Max	0.16	0.17	0.17	0.16	0.15	0.11	0.13	0.14	0.15	0.13	0.01
		Min	-0.38	-0.48	-0.48	-0.57	-0.39	-0.40	-0.32	-0.31	-0.44	-0.31	-0.53

Table 4 차량속도 변화에 대한 박스거더의 각위치별 동적처짐(mm) : 급제동 실험

구분	속도(km/h)		A1 ~ P2										
			DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	DT6	DT7	DT8	DT9	DT10	DT11
급제동 실험 (강남→강북)	40	Max	0.195	0.19	0.17	0.15	0.16	0.16	0.19	0.14	0.17	0.20	0.05
		Min	-0.58	-0.57	-0.57	-0.68	-0.47	-0.42	-0.39	-0.33	-0.42	-0.25	-0.59
	50	Max	0.17	0.17	0.17	0.17	0.15	0.12	0.14	0.15	0.16	0.13	0.03
		Min	-0.53	-0.62	-0.65	-0.69	-0.51	-0.45	-0.34	-0.32	-0.43	-0.33	-0.51
	Max	Max	0.17	0.18	0.18	0.17	0.16	0.12	0.13	0.13	0.15	0.12	0.03
		Min	-0.55	-0.60	-0.60	-0.72	-0.50	-0.37	-0.33	-0.3	-0.41	-0.29	-0.41

Table 5 차량속도 변화에 대한 박스거더의 각위치별 동적처짐(mm) : 연행 실험

구분	속도(km/h)		A1 ~ P2										
			DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	DT6	DT7	DT8	DT9	DT10	DT11
연행 실험 (강남 ↓ 강북)	10	Max	0.23	0.25	0.25	0.25	0.22	0.17	0.20	0.23	0.25	0.27	0.04
		Min	-0.70	-0.78	-0.90	-0.90	-0.74	-0.63	-0.52	-0.48	-0.74	-0.43	-0.55
	20	Max	0.29	0.31	0.31	0.31	0.20	0.22	0.31	0.25	0.28	0.22	0.27
		Min	-0.76	-0.88	-1.02	-1.02	-0.88	-0.76	-0.60	-0.52	-0.77	-0.55	-0.56
	30	Max	0.26	0.27	0.26	0.26	0.24	0.16	0.22	0.24	0.28	0.28	0.04
		Min	-0.74	-0.87	-1.04	-1.04	-0.77	-0.76	-0.62	-0.56	-0.81	-0.52	-0.55
	40	Max	0.29	0.30	0.28	0.25	0.24	0.20	0.26	0.28	0.32	0.29	0.05
		Min	-0.78	-0.95	-1.10	-1.10	-0.80	-0.77	-0.66	-0.57	-0.82	-0.53	-0.55
	50	Max	0.20	0.21	0.21	0.21	0.20	0.14	0.17	0.20	0.23	0.15	0.01
		Min	-0.61	-0.67	-0.78	-0.78	-0.69	-0.56	-0.47	-0.39	-0.58	-0.39	-0.51

또한, 두 번째 경간중양부(DT9)에서의 동적처짐은 0.43mm였고 지간 5ℓ/4, 7ℓ/4 구간인 DT8, DT10는 0.32~0.33mm의 거의 유사한 값이 나타났다. 이는 강성이 큰 교량으로 재하 거리가 멀어질수록 효과가 부재 및 위치별로 동일시되는 경향이다. 역주행과 급제동실험과의 비교시 주행속도 50km/h에서 역주행 충격실험과 급제동실험에 대한 두 번째 경간(P1~P2)의 중양부(DT9)에서 처짐은 0.43mm로 동일하게 측정되었으나 첫 번째 경간(A1~P1)에서의 처짐이 44.6% 크다는 것은 급제동실험이나 역주행 충격실험이 실험대상경간인 A1~P1의 중앙에서 큰 차이가 있으며 멀어질수록 동일한 경향으로 수렴될 것으로 추정할 수 있다.

3.1.2 연행 및 역주행 실험

본 연구에서는 연행하중에 따른 동적거동을 주행속도 10km/h~50km/h까지 약 20m의 일정한 거리를 두고 주행실험을 수행하였다. 이때 교량의 중앙점 처

짐값은 Table 5로부터 0.78mm~1.1mm로 측정되었으며 연행하중에 따른 고유진동수는 2.52~4.65Hz로 분석되었다. 연행하중시 최대처짐은 1.1mm로서 주행속도 40km/h에서 나타났다. 첫 번째 경간(A1~P1) 지점의 ℓ/4, 3ℓ/4 구간에 설치된 DT6, DT7은 0.66~0.77mm였으며 두 번째 경간 지점중양부에서는(DT9) 0.82mm이며 5ℓ/4, 7ℓ/4 구간에 설치된 DT8 DT10에서의 동적처짐은 0.53~0.57mm로 연행하중시 첫 번째 경간 중양부(DT3)에서의 처짐값과 두 번째 경간 중양부(DT9)에서의 처짐값의 비는(1.1mm/0.82mm) 25.45%로 상대적으로 감소함을 관찰할 수 있다.

역주행실험의 경우 Table 6에서 보는 바와 같이 DT2, DT4, 그리고 DT11에서 큰 동적처짐을 보였다. 이는 재하차량에 의하여 영향을 크게 받는 슬래브와 바닥판 부위로서 주행실험결과와 비교했을 때 전체적으로 큰 차이는 없으나, 동적영향이 상대적으로 큰 DT4 위치에서 일반주행의 경우보다 약 10~15%의 큰 처짐이 발생함에 주목해야한다.

Table 6 차량속도 변화에 대한 박스거더의 각위치별 동적처짐(mm) : 역주행 실험

구분	속도(km/h)		A1 ~ P2										
			DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	DT6	DT7	DT8	DT9	DT10	DT11
역주행 시험 (강북→강남)	10	Max	0.16	0.18	0.17	0.17	0.16	0.14	0.15	0.13	0.153	0.14	0.05
		Min	-0.38	-0.48	-0.56	-0.56	-0.37	-0.39	-0.31	-0.31	-0.41	-0.30	-0.58
	20	Max	0.17	0.19	0.18	0.18	0.15	0.12	0.15	0.14	0.16	0.15	0.03
		Min	-0.37	-0.48	-0.58	-0.58	-0.39	-0.47	-0.32	-0.31	-0.42	-0.29	-0.53
	30	Max	0.14	0.14	0.16	0.16	0.14	0.10	0.13	0.11	0.11	0.10	0.03
		Min	-0.39	-0.47	-0.56	-0.56	-0.39	-0.39	-0.31	-0.31	-0.44	-0.34	-0.52
	40	Max	0.15	0.13	0.13	0.13	0.10	0.10	0.12	0.13	0.16	0.15	0.01
		Min	-0.42	-0.54	-0.63	-0.63	-0.44	-0.42	-0.35	-0.32	-0.43	-0.32	-0.53
	50	Max	0.16	0.10	0.11	0.11	0.09	0.09	0.11	0.14	0.17	0.21	0.02
		Min	-0.35	-0.54	-0.62	-0.62	-0.43	-0.41	-0.35	-0.29	-0.40	-0.24	-0.51
	60	Max	0.15	0.15	0.15	0.15	0.19	0.11	0.13	0.16	0.17	0.15	0.01
		Min	-0.40	-0.51	-0.52	-0.59	-0.44	-0.40	-0.33	-0.31	-0.44	-0.32	-0.45
	70	Max	0.15	0.15	0.13	0.14	0.11	0.11	0.13	0.14	0.15	0.13	0.01
		Min	-0.40	-0.51	-0.52	-0.59	-0.44	-0.40	-0.33	-0.31	-0.44	-0.32	-0.45
	80	Max	0.21	0.19	0.18	0.17	0.13	0.15	0.18	0.15	0.18	0.18	0.01
		Min	-0.41	-0.56	-0.56	-0.65	-0.48	-0.43	-0.32	-0.34	-0.46	-0.31	-0.50
	90	Max	0.17	0.22	0.22	0.22	0.20	0.13	0.50	0.18	0.21	0.16	0.02
		Min	-0.43	-0.50	-0.49	-0.57	-0.40	-0.42	-0.36	-0.31	-0.43	-0.31	-0.46
	Max	Max	0.20	0.22	0.23	0.23	0.21	0.15	0.17	0.14	0.19	0.16	0.02
		Min	-0.39	-0.51	-0.49	-0.56	-0.36	-0.42	-0.33	-0.34	-0.48	-0.36	-0.47

Table 7 차량속도 변화에 대한 박스거더의 각위치별 동적처짐(mm) : 역주행 충격 실험

구분	속도(km/h)		A1 ~ P2										
			DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	DT6	DT7	DT8	DT9	DT10	DT11
역주행 충격 (강북→강남)	10	Max	0.14	0.15	0.15	0.16	0.14	0.11	0.14	0.18	0.24	0.12	0.02
		Min	-0.54	-0.58	-0.85	-0.70	-0.48	-0.46	-0.37	-0.36	-0.43	-0.32	-0.56
	20	Max	0.15	0.15	0.15	0.15	0.14	0.11	0.12	0.20	0.34	0.21	0.02
		Min	-0.56	-0.65	-0.78	-0.76	-0.49	-0.54	-0.47	-0.30	-0.40	-0.28	-0.61
	30	Max	0.13	0.14	0.14	0.14	0.12	0.09	0.11	0.28	0.36	0.24	0.02
		Min	-0.66	-0.76	-0.80	-0.90	-0.69	-0.66	-0.49	-0.29	-0.38	-0.28	-0.25
	40	Max	0.08	0.09	0.08	0.09	0.06	0.05	0.08	0.28	0.39	0.19	0.02
		Min	-0.71	-0.82	-0.86	-1.00	-0.70	-0.69	-0.54	-0.28	-0.40	-0.30	-0.47
	50	Max	0.14	0.15	0.16	0.15	0.13	0.10	0.12	0.35	0.45	0.28	0.01
		Min	-0.79	-0.87	-0.94	-1.09	-0.83	-0.77	-0.59	-0.31	-0.43	-0.32	-0.43
	60	Max	0.12	0.08	0.09	0.16	0.09	0.21	0.11	0.20	0.27	0.23	0.09
		Min	-0.56	-0.70	-0.70	-0.65	-0.56	-0.45	-0.51	-0.29	-0.38	-0.24	-0.53

3.1.3 역주행 충격 실험

Table 7에서 보는 바와 같이 50km/h에서 가장 큰 값 0.94mm를 나타냈는데 이는 첫 번째 경간(A1~P1)지간의 $l/4$, $3l/4$ 구간인 DT6, DT7에서 0.77mm, 0.59mm로 측정되었고, 교량 시점부 A1에

근접한 DT6가 DT7보다 60km/h를 제외한 주행속도 별 24.3~14.8% 큰 것으로 평가되었다. 또한 두 번째 경간의 중앙부(DT9)에서는 0.43mm였고 지간 $5l/4$, $7l/4$ 구간인 DT8, DT10에서 처짐값은 0.20~0.23mm으로 거의 유사한 값을 나타냈다.

스텝범프에 따른 충격하중에 의한 동적처짐값은 DT3에서 0.78~0.94mm로 분석되었다. 일반 주행시험시(강남→강북) 충격에 의해 측정된 값이 0.47~0.58mm, 역 주행(강북→강남)의 경우의 측정값 0.52~0.63mm보다 평균 49.5~63.8 % 동적처짐이 크게 증가하였다. 한편 측정된 고유 진동수는 2.845~4.393Hz 범위도 측정되었다. 상기 분석된 값은 급제동시험값 0.57~0.65mm보다 41% 증가된 값으로 돌출된 스텝범프의 영향이 제동하중에 대한 영향보다 더 큰 것으로 평가되었다. 따라서 반복하중의 작용으로 인하여 노면에 발생하는 범프에 의한 차량 충격하중은 교량 전반에 심각한 동적 영향을 가져올 수 있으므로 범프 발생시 신속한 보수 및 보강조치가 요구된다.

3.1.4 실측 충격계수 및 대수감쇠율

Fig. 2는 주행시험에 의해 산출한 동적 확대계수를 나타낸 것으로 시방서에서 제시하고 있는 충격계수 30%를 넘지 않는 값을 나타냈다. 주행차량의 통과 후 교량은 자유진동을 하게되고 재료 내부에서 에너지 분산등으로 시간이 지남에 따라 감쇠진동을 하게 되는데 일반적으로 대수감쇠율을 사용한다. Fig. 3은 주행시험에서 차량의 주행속도에 따른 대수감쇠분포를 나타낸 것이며, 이에 따른 감쇠비의 분포는 1.36~5.17%로 나타났다.

연속교에서 첫 구간 중앙점(DT3)에서의 최대처짐은 주행, 역주행, 급제동, 역주행 충격, 연행 순으로 나타났으나, 두 번째 구간의 중앙점(DT9)에서는 상대적으로 거의 같은 값이 측정되었고 연행시험은 2배정도로 측정되었다. 이는 급제동이나 역주행 충격시험이 시험구간에서는 상대적으로 큰 값을 보이나 인접구간에서는 급격히 수렴함을 나타내는 것이다.

3.2 3차원 해석과의 비교

3.2.1 해석 프로그램 모델

본 연구에서는 3차원형태의 박스 거더를 유한요소 모델링하기 위하여 상판과 웨브, 웨브와 하부 플랜지를 절판(Folded Plates)으로 결합하였다.

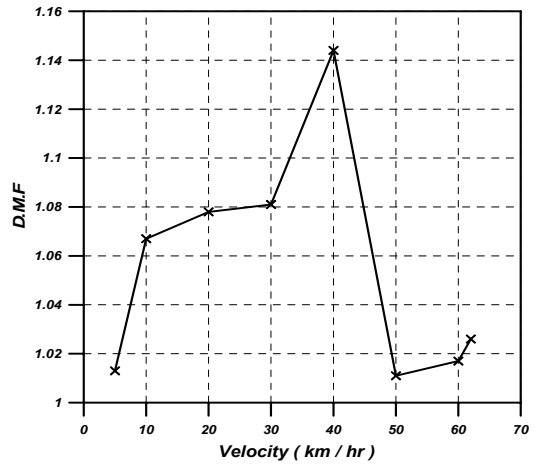


Fig. 2 실측에 의한 동적 확대 계수

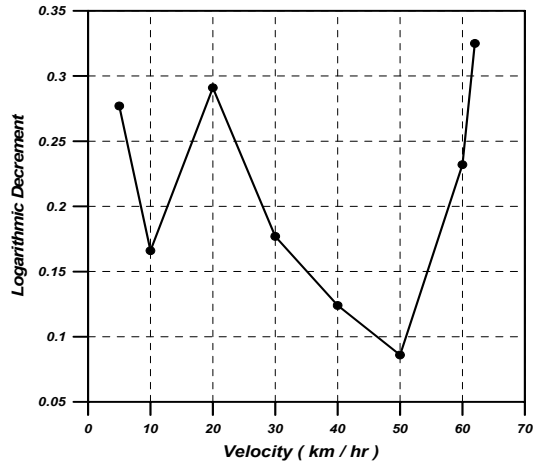


Fig. 3 실측에 의한 대수감쇠율

이 때 사용한 요소는 Fig. 4에서와 같이 plate와 plane의 거동이 독립적이라 가정하고 Hermite 변위 형상함수와 Lagrange 변위 형상함수를 사용하여 면내 변위와 면외 변위를 나타냈으며, 면내회전 변위(Drilling D.O.F.)를 추가로 고려한 4절점 셸 요소(4-node Flat Shell)를 사용하였다 (Bathe, 1996 ; Zienkiewicz, 1991). 본 논문의 대상교량은 자유도가 크기 때문에 동적 평형방정식의 해는 시간각분에 대한 수치적 방법을 사용하였으며, 분할시간대에 관계없이 안정적인 특징을 갖는 Newmark 방법을 선택하였다.

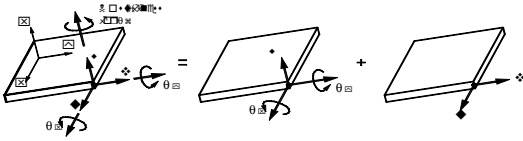


Fig. 4 6개의 자유도를 갖는 Flat Shell 요소

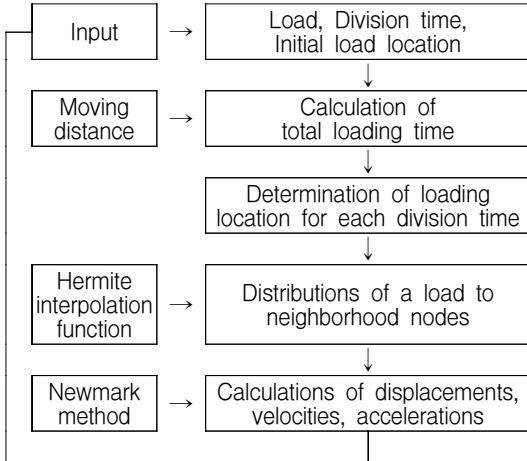


Fig. 5 이동하중에 대한 수치해석 흐름도

Fig. 5은 본 논문의 수치해석 프로그램 중에서 이동하중을 제어하는 부분의 흐름도를 요약하여 도시한 것이다. 본 논문에서는 A1~P2 구간의 계측 실험 결과와 개발된 박스거더교의 이동하중 프로그램을 비교, 분석하였다. Fig. 6은 본 개발된 유한요소 동적 해석 프로그램을 이용한 이동하중에 의한 박스거더의 동적 해석 시뮬레이션을 나타낸 것이다. 개발 프로그램은 이동하중의 속도변화에 따른 박스거더의 각 분할시간에서의 동적 처짐 형상을 3차원으로 표현할 수 있다. 본 연구의 프로그램은 절점당 6개의 자유도가 사용된 Flat Shell 요소를 이용한 3차원 해석단면을 사용함으로써 교량구조물의 종방향 거동뿐만 아니라 단면 내의 구조 거동도 보다 명확히 나타낼 수 있도록 하였다(Fryba, 1999). 따라서 본 연구의 개발프로그램은 실험교량의 실제 박스 단면과 유사한 조건에서 비교가 가능하다.

3.2.2 수치해석결과와의 비교

Fig. 7과 8은 본 논문 프로그램 해석 결과와 계측

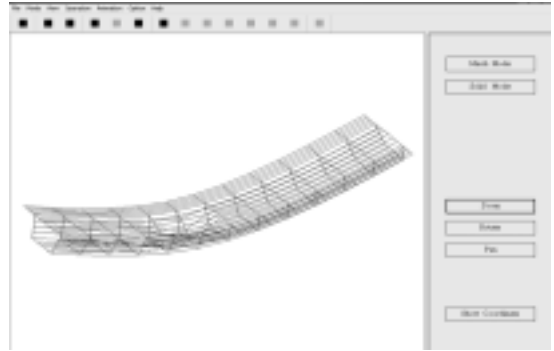
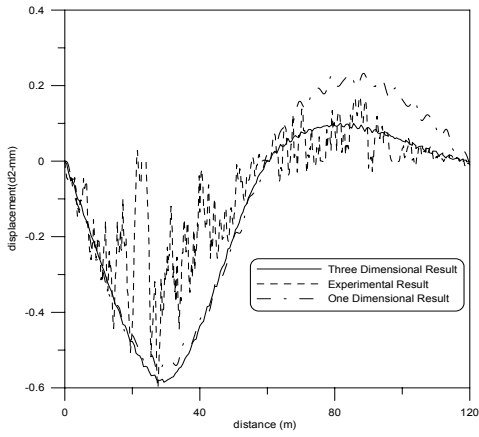


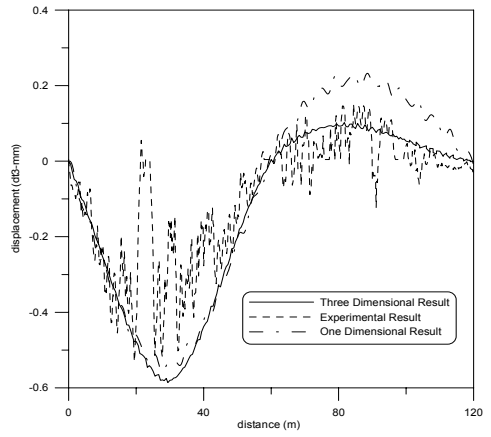
Fig. 6 개발 프로그램에 의한 박스거더교의 이동하중 동적 해석 시뮬레이션

데이터를 비교한 것이다. 여기서 동적처짐은 시간 중앙 위치에서 비교하였으며 차량하중은 교량 중앙위치에서 주행하도록 하였다. 본 논문에서는 쉘 요소를 사용한 3차원 박스거더교의 해석결과 및 보요소를 사용한 일차원 해석결과를 실험결과와 비교하였다. 그림의 결과에서 실측 데이터의 진폭이 큰 것은 노면조도 및 단차 등이 차량하중의 주행에 영향을 주어 동적데이터상의 오차나 발생한 것으로 판단된다. 수치해석결과와 실험결과는 비슷한 양상의 동적처짐곡선을 보였으며, 일차원 보요소의 처짐은 2경간에서 3차원 해석보다 다소 크게 발생하였다. DT3 위치에서의 처짐을 보요소의 처짐위치로 가정한다면, 속도별로 약 10~15%의 최대처짐 오차를 보였다.

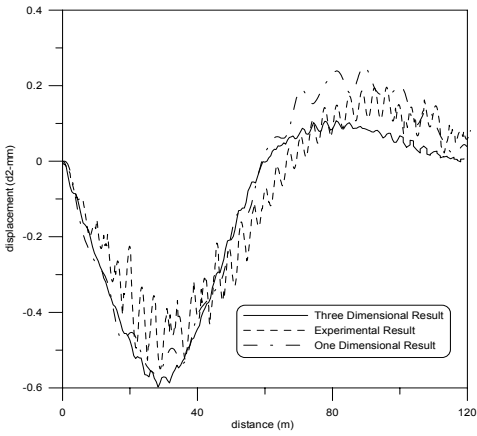
보 요소를 사용한 1차원 해석의 경우, 하중이 작용한 후에 단면은 하중 작용 전과 같은 변위형상을 갖게 되므로 박스 단면의 측정 위치에 따라 다소 오차가 발생하게 된다. 반면, 본 논문의 3차원 모델링에 의한 해석은 각 박스 단면 위치별마다 동적 처짐을 구할 수 있으므로 실험 측정치와 더욱 작은 오차범위 안에서 비교 가능한 동적 데이터를 얻을 수 있었다. 최대 처짐을 비교할 경우 재하속도마다 차이가 있으나 약 5~10%이내의 오차를 보이는 것으로 나타났다. 결론적으로 박스거더교의 경우 단면 위치에 따라 다른 거동을 보임을 알 수 있으며 이러한 거동은 실제 계측 실험데이터 분석에서도 나타났다. 이러한 결과로부터 이동하중을 받는 박스단면의 경우, 실제거동에 가까운 3차원 모델링에 의한 동적 해석이 필요함이 제기된다.



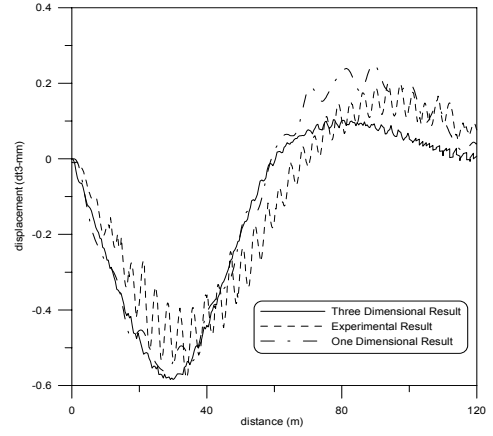
(a) 시속 20km, DT2



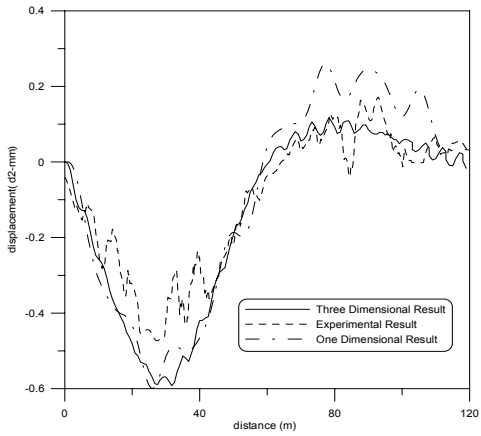
(a) 시속 20km, DT3



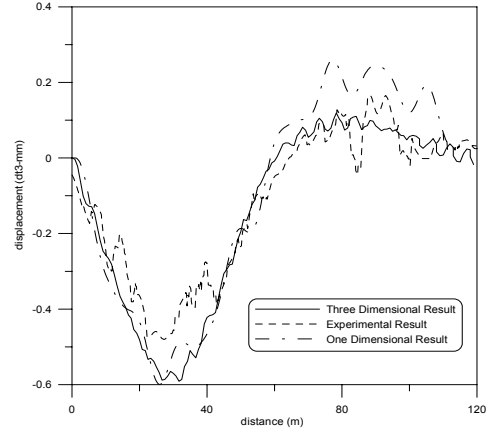
(b) 시속 40km, DT2



(b) 시속 40km, DT3



(c) 시속 60km, DT2



(c) 시속 60km, DT3

Fig. 7 수치해석 및 실험결과의 비교 (DT2)

Fig. 8 수치해석 및 실험결과의 비교 (DT3)

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 박스거더형 장대교량에 대하여 다양한 차량 주행하중에 의한 동적 영향을 실제현장실험을 통하여 분석하였다. 실험결과는 개발된 이동하중을 받는 3차원 박스거더교 프로그램을 이용한 수치해석 결과와 비교·분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 차량이동하중에 의하여 발생하는 동적인 효과는 교량의 박스 단면내 위치에 따라 그 영향이 다르게 나타난다. 따라서 교량의 전체적인 거동뿐만 아니라 박스 단면의 자세한 응답을 살펴보기 위해서는 단면내 다양한 위치에 대한 동적응답 분석이 필요로 된다.
2. 본 실험에서 주행 실험시 차량의 바퀴 위치와 비교적 가까운 하부플랜지의 모서리 부분인 DT4에서 전반적으로 큰 동적처짐이 발생하였다.
3. 다양한 주행 실험에서 급제동 및 역주행 충격하중의 동적처짐이 일반 주행실험의 동적처짐보다 그 값이 크게 증가함을 알 수 있었다. 특히, 역주행 충격하중이 교량의 동적거동에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 따라서 차량의 진행에 따른 교량의 동적효과를 감소시키기 위해서는 노면의 단차를 최대한 방지할 수 있는 교량의 유지관리가 요구된다.
4. 연속교에서 첫 경간 중앙점(DT3)에서의 최대처짐은 주행, 역주행, 급제동, 역주행 충격, 연행 순으로 나타났으나, 두 번째 경간의 중앙점(DT9)에서는 상대적으로 거의 같은 값이 측정되었다. 이는 급제동이나 역주행 충격시험이 시험구간에서는 상대적으로 큰 값을 보이나 인접경간에서는 급격히 수렴함을 나타내는 것이다.
5. 본 연구에서 개발한 절판요소로 구성된 3차원 박스 단면 프로그램은 기존의 1차원 보요소를 사용하여 해석한 결과보다 실측 결과와 더욱 비슷한 결과를 얻을 수 있었으며, 실험에서 얻지 못한 다양한 매개변수에 대한 추가적인 수치해석이 가능할 것으로 판단된다.

현 도로교 시방서에서 규정된 교량의 충격계수 산정식은 교량의 시간만의 함수로서 교량의 다양한 형식 및 차량하중의 종류 등과 무관하게 되어 있으므로 교

량의 정확한 거동을 파악하기 위해서는 교량의 동적 거동에 영향을 주는 여러 인자를 고려한 상세 규정이 필요하다고 사료되며, 본 연구의 다양한 실험 및 수치해석 결과들은 교량의 상세 동적 거동을 규명하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 이래철, 이상열, 임성순, "이동하중을 받는 3차원 PSC 박스형 교량의 동적 수치해석", 대한토목학회 논문집 제22권 5-A, 2002, pp. 1059-1068.
2. AASHTO, "Standard Specifications for Highway Bridges" 17th Edition. Washington DC. 1996.
3. A. S. Veletsos and T. Huang, "Analysis of dynamic response of highway bridges", Journal of Engineering Mechanics Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 96, 1970, pp. 593-620.
4. Khalid Niazi, "Numerical Simulation of the Dynamic Responses of Bridges to Impact and Moving Mass Loads", PH.D. Dissertation, Kansas State University, 1997.
5. K. J. Bathe, "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Prentice-Hall, 1996.
6. L. Fryba, "Vibration of solids and structures under moving loads", Thomas Telford, 1999.
7. R. C. Lee, S. Y. Lee, and S. S. Yhim, "A study on the dynamic responses of PSC box girder bridge under the moving load", Proceeding of the First International Conference on Bridge Maintenance Safety and Management, Barcelona, Spain, 2002.
8. S. P. Timoshenko, "On the Forced Vibration of Bridges", Philosophical Magazine, Series 6, Vol. 43, 1929, p. 1018-1019.
9. O.C. Zienkiewicz, "The Finite Element Method", McGraw-Hill, 1991, pp103-134.
10. Vladimir Kristek, "Theory of Box Girders", John Wiley & Sons, 1979.
11. Y. B. Yang and J. D. Yau, "Vehicle-bridge interaction element for dynamic analysis", Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 123, 1997, pp. 1512-1518.

(접수일자 : 2003년 7월 11일)