

# 이동하중을 받는 판형교의 동적 거동에 대한 실험적 연구

## Experimental Study on Dynamic Responses of Plate-Girder Bridges under Moving Loads

임 성 순<sup>1)</sup>

*Yhim, Sung Soon*

**요 약 :** 본 연구는 실험적인 방법으로 이동하중을 받는 판형교의 동적 응답을 연구하였다. 판형교의 상부 슬래브는 판요소로, 거더는 보요소로 이상화였다. 이동하중과 판형교는 각각 소규모 차량모델과 교량모델로 제작하였다. 이동하중을 받는 판형교의 동적 응답은 변형계, 변위계, 가속도계 및 변형도 측정기를 이용하여 측정하였고 측정한 자료로부터 얻은 최대동적응답을 유한요소법의 결과와 비교하였다. 실험적인 모형실험으로 판형교의 동적응답을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

**ABSTRACT :** This paper presents the dynamical responses of the plate girder bridge subjected to moving load by experimental method. The upper slab of the plate girder bridges is modelled to the plate element and the girder to the beam element. The small-scaled vehicle model is manufactured as moving load and the acryl-bridge model as the plate-girder bridge. The dynamic responses of the plate-girder bridges under the moving load are obtained by the strain gauges, displacement measurements, accelerometer, and dynamic strain measurement. The maximum dynamic responses from the measured data are compared with those from the finite element method. The experimental model test can be used to obtain to the dynamic responses of the plate-girder bridges.

**핵심 용어 :** 이동하중, 동적응답, 동적확대계수, 속도계수

**KEYWORDS :** Moving Load, Dynamic Responses, Dynamic Magnification Factor, Speed Factor

1) 서울시립대학교 토목공학과 교수 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2001년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

교량구조물에 가장 지배적인 하중은 이동차량하중이며 이에 대한 동적 응답 연구는 이론 및 수치적인 방법으로 많은 연구가 진행되고 있다. 일반적인 교량설계에서 차량하중을 차륜하중 또는 차선하중으로 이상화하고 차량하중에 의한 충격계수를 고려하고 있다. 충격계수는 노면조도, 교량구조물의 강도, 질량, 감쇠비 및 이동하중속도와 급제동 및 급출발 등의 발생요인이 있으나 시방서는 전체적인 충격계수로 이를 고려하고 있다. 그러므로 본 연구는 판형교를 해석모델로하여 축소 모형실험으로 실시하고 이로부터 이동하중에 의한 동적 응답을 결정함을 연구 목적을 한다.

기존의 연구내용을 보면 이동하중을 받는 거더의 동적 응답은 다양한 방법으로 연구되었으나 이동하중을 받는 판구조의 실험적 연구는 미진한 상태이다. 판구조에 대한 연구는 1811년 Lagrange가 판의 처짐 및 진동을 나타내는 Lagrange방정식을 발표하면서 시작되었고 급수전개에 의한 방법, 에너지 해석방법 등으로 정적해석 연구방법이 제시되었다. Hamilton은 질량에 의한 동적인 효과를 고려하는 동적 평형 방정식의 해법을 제시하였으며 1970년대부터 Fryba<sup>(2)</sup>는 이동하중에 의해 발생하는 동적 응답에 대한 연구를 하였다. 1980년에 들어서면서 컴퓨터의 발전과 구조물의 동적 효과에 대해 중요성이 대두되면서 연구가 활발히 진행되었으며 1985년 Wechsler<sup>(3)</sup>는 이동하중에 의한 동적 효과를 정적인 해석에 적용시키기 위한 연구를 하였으며 1988년 O'Connor<sup>(4)</sup>는 교량 설계시 사용되어지는 충격계수 산정에 대해 연구하였다. 1990년대에 들어서면서 컴퓨터를 이용한 구조물의 동적 응답에 관한 연구가 급속히 이루어졌다. 1990년 Taheri<sup>(5)</sup>는 고전적인 평판의 자유진동과 유한요소를 이용하여 이동하중 속도, 이동질량의 크기 효과를 연구하였고 1992년 Cifuentes<sup>(6)</sup>는 이동질량에 의한 평판의

동적거동을 분석하였다.

실험 연구를 보면 1993년 Tiedeman<sup>(7)</sup>은 이동하중에 의한 2경간 연속보의 동적 거동을 합성 철재 모형으로 실험하여 실험결과를 시방서 내용과 비교 연구하였다. 1995년 Green<sup>(8)</sup>은 고속도로교에서 차량의 현가장치의 영향을 고려한 동적 거동에 대해서 연구하였다. 또, 1997년 Iyengar<sup>(9)</sup>는 철도교에서 이동질량에 의해 발생하는 동적 거동을 연구하였다.

이와 같은 이동하중을 받는 교량구조물의 동적 거동에 대한 다양한 연구가 진행되었고 실제 구조계에서 얻어진 자료를 실제 설계에 적용하는 노력도 있었다. 마찬가지로 국내에서도 이동하중에 대한 연구가 진행되고 있으며 연구결과를 실무에 적용하려는 연구도 진행되고 있다.

## 2. 실험적 연구

정적하중을 받는 판 구조물의 해석방법은 다양하나 이동하중을 받는 판구조물의 동적 응답을 이론식에 의해 해를 얻기가 용이하지 않다. 따라서 이동하중을 받는 판 구조물은 이론적 해석보다 수치해석법에 의존하고 있으며 이를 실험결과와 비교하고 있다. 특히, 이동하중에 대한 실험은 기존 연구결과가 없으며 주로 보에 대한 간단한 실험적 연구가 진행되고 있다.

본 연구는 판형교를 해석모델로 하여 수치해석법에 의해 얻은 결과를 검증할 목적으로 모형 실험을 실시하였다. 염밀한 모형실험은 실제 구조물을 원형으로 선택하고 상사율을 적용하여 해석모형을 제작하여야 하나 원형으로 사용할 만한 적당한 실제 구조계의 제원을 얻을 수가 없으므로 해석결과의 검증만을 위한 모형실험을 실시하였다. 모형실험은 항공기와 선박 모형실험에 널리 사용되고 있으며 이 모형들의 공통점은 모형은 고정되어 있으며 풍동기와 조파기로부터 실험하중을 발생시킬 수 있다는 공통점이 있다. 그러나

교량구조물은 하중발생장치를 특정위치에 고정시킬 수 없는 특성을 가지고 있으므로 본 연구에서는 차량하중을 제작하여 사용하였다.

따라서 본 연구는 두 가지의 모형을 제작하였다. 첫 번째는 이동하중을 모사하기 위한 차량모형이며 두 번째는 교량구조물을 표현하기 위한 해석모형이다. 계측을 위한 장치로는 변위계, 변형계, 가속도계의 3가지 측정장치와 시그널을 변환시킬 수 있는 동적 변형률 측정정치와 분석용 소프트웨어로 구성되어 있다.

## 2.1 실험 모델

모형실험방법에는 실제 구조물과 같은 재료, 같은 크기로 제작된 구조물을 실험하는 실물구조실험방법과 차원해석을 통해 축소된 모형을 원래의 구조물과 다른 재료로 구조물을 만든 후 실험하는 축소모형실험으로 구분할 수 있다. 축소모형을 만들 때 사용 재질에 따라 여러 가지로 나눌 수 있으며 일반적으로 사용하는 재료는 금속, 플라스틱, 석고 등이 있다. 플라스틱 재료의 장점은 가공이 용이하며 탄성계수의 값이 금속에 비해  $1/10$ 내지  $1/50$ 정도이기 때문에 적은 장비만으로 실험할 수 있다는 점이다. 가공성이 탁월한 반면 열에 의해 쉽게 변형되며 온도에 의해 많은 영향을 받는 단점이 있다. 특히, 플라스틱 재료 중 아크릴 수지를 모형실험재료로 많이 이용하고 있으며 접착제로 측정 게이지의 부착이 쉽고 투명한 성질을 있으므로 게이지의 부착 상태를 확인할 수 있다. 또, 아크릴 재료는 절단 및 열에 의해 가공하기 쉬운 장점도 있다. 그러므로 본 연구에서는 아크릴 수지를 실험모형 재료로 사용하였다.

### 2.1.1 차량 모델

차량모형은 Fig. 1과 같고 7.2볼트용 직류 충전전지를 사용하였다. 속도는 1단계부터 10단계로 증가시키면서 조정할 수 있으며 무선 리모콘으로 출발 및 정지를 제어할 수 있도록 제작하

였다. 차량모형의 폭과 길이 각각  $23.7$ ,  $39\text{ cm}$ 이며 좌우 차축간의 폭은  $20.5\text{ cm}$ , 앞 뒤 차축 거리는  $24\text{ cm}$ 이다.

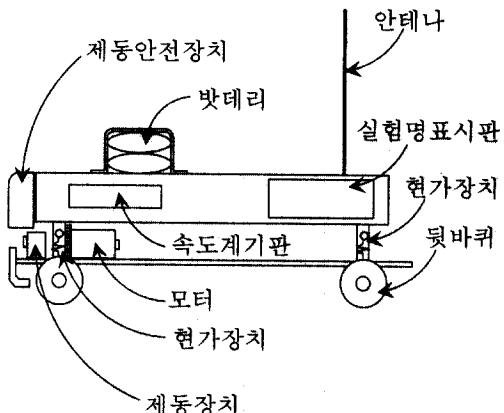


Fig. 1 Vehicle Model

### 2.1.2 판의 축소모형

판구조의 모형은 이동하중이 가속되는 진입구간, 실험구간, 그리고 통과구간으로 구분하여 아크릴로 제작하였다. 진입구간은 충분한 가속도를 발휘하기 위하여 길이  $400\text{cm}$ 로 제작하였고 통과구간은 차량모델의 센서가 부착되어 차량의 안전을 위한 장치가 장착되어 있으므로  $100\text{cm}$ 로 제작하였다. 판구조물의 실험모형은 Fig. 2와 같다.

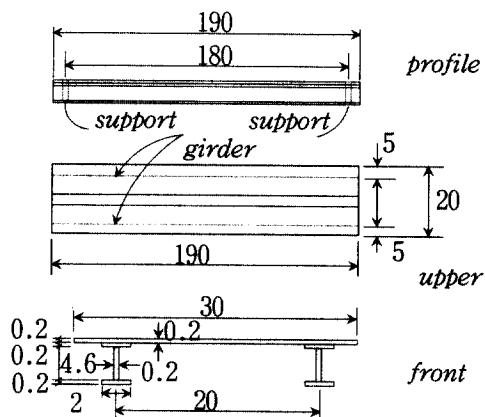


Fig. 2 Plate Girder Bridge Model  
(Unit : cm)

## 2.2 계측장비 및 계측절차

계측장비는 Photo 1과 같이 변위계, 스트레인 케이지, 가속도계를 사용하였으며 차량 모형의 속도측정을 위한 센서를 실험구간 진입부분과 통과 부분에 장착하여 통과시간을 측정하였다. 또, 실

험모형에서 발생하는 시그널은 동적 변형률 측정기로 얻도록 하였다. 동적 변형률 측정기로부터 얻은 시그널은 FFT분석과 스펙트럼분석을 통해 파일로 저장되는 분석 프로그램을 사용하였다. 계측 절차는 Fig. 3과 같다.

## 2.3 실험내용 및 실험방법

본 연구에서 실시한 실험은 사용재료의 특성을 얻기 위한 재료실험과 이동하중을 받는 판형교의 동적 응답을 얻기 위한 축소모형에 의한 구조실험이다.

### 2.3.1 인장 재료실험

재료실험은 공업규격에 의해 제작된 Fig. 4와 같이 6개의 표준시편을 제작하고 시편에 케이지를 부착한 후 UTM으로 인장력을 가함으로서 변형률을 측정하고 이에 대응하는 탄성계수를 구하였다. 그림속의 P는 평행부의 길이로 22 cm, L은 표점거리로서 20 cm, R은 어깨 반지름으로 2.5 cm이며 W는 시편의 폭으로 4 cm, t는 2.5 cm이다. 인장시험방법은 KS B 0802에 따라 실시하였다.

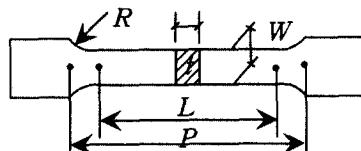


Photo 1. Measurement Equipments

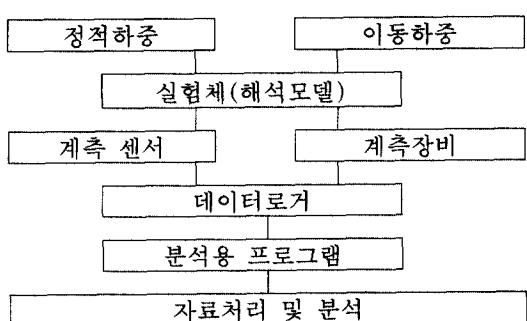


Fig. 3 Procedure of Measurements

### 2.3.2 판형교의 축소모형실험

판형교를 양단 단순지지된 모형으로 이상화하고 차량하중의 속도변화에 따라 실험모형 위를 직선 주행시켰다. 직선주행을 위해 실험모형 위에는 주행 유도레일을 설치하고 차량의 이탈을 막기 위해 피아노선을 이용하여 직선주행을 유도하였다. 본 실험을 위해 제작한 차량하중은 1단계로부터 10단계까지 주행할 수 있는 모형이지만 주행중 발생하는 마찰력으로 말미암아 속도의 감소가 발

생하므로 충분한 가속도를 발생시키기 위한 가속도 구간을 400cm로 제작하였고 실속도를 측정하기 위해 센서를 실험모형의 진입부와 통과부에 설치함으로서 실제 주행시간을 측정하였다. 실험체 길이를 측정한 시간으로 나누어 실제 통과속도를 측정하였다.

## 2.4 측정 결과 및 분석

### 2.4.1 인장재료시험결과 및 분석

본 연구에서 실시한 인장재료시험과정은 Photo 2와 같으며 인장재료시험에서 측정한 공학상수의 값은 참고문헌에 제시된 값과 오차범위 내에 있는 것으로 판단되며 측정한 탄성계수 값은 Table 1과 같다. 본 실행에서 얻어진 각 시편별 응력-변형율 곡선은 생략하고 실험에서 얻어진 자료로부터 탄성계수는  $35900\sim38100 \text{ kg/cm}^2$  까지 분포되어 있다. 그러므로 본 연구에서 사용하는 아크릴 수지의 탄성계수는 약  $37500 \text{ kg/cm}^2$ 임을 알 수 있다.

### 2.4.2 모형실험결과

본 연구는 정적실험 및 이동하중에 따른 동적실험을 실시하였다. 정적 하중 및 이동하중에 대한 실험 장면은 Photo 1과 같고 측정위치 및 측정장비는 Photo 3과 같다. 정적실험은 최대 정적처짐이 발생하도록 차량하중을 재하하였으며 동적실험은 이동차량하중을 단계1~10까지 속도 변화시키면서 처짐, 변형율, 가속도의 동적 응답에 대한 시간이력곡선을 측정하였다.

정적 실험은 최대변위가 발생하도록 차량하중을 재하시켜 변위 및 변형율을 측정하였고 이동하중에 의한 동적 응답은 단계1~10까지 속도를 증가시키면서 측정하였다. 측정시 각 단계별로 10회 이상을 반복 실험하였으며 각 시험시 최대 측정치들을 평균하여 구한 최대 변형율과 변위를 정리하면 Table 2와 같다.

Photo 2. Fractured Specimen

Table 1. Measured Modulus of Elasticity

Specimen	Modulus of Elasticity
No. 2	$35878.56 \text{ kg/cm}^2$
No. 3	$37681.75 \text{ kg/cm}^2$
No. 4	$38040.84 \text{ kg/cm}^2$
No. 5	$38142.38 \text{ kg/cm}^2$
No. 6	$37854.94 \text{ kg/cm}^2$
Average	$37519.69 \text{ kg/cm}^2$

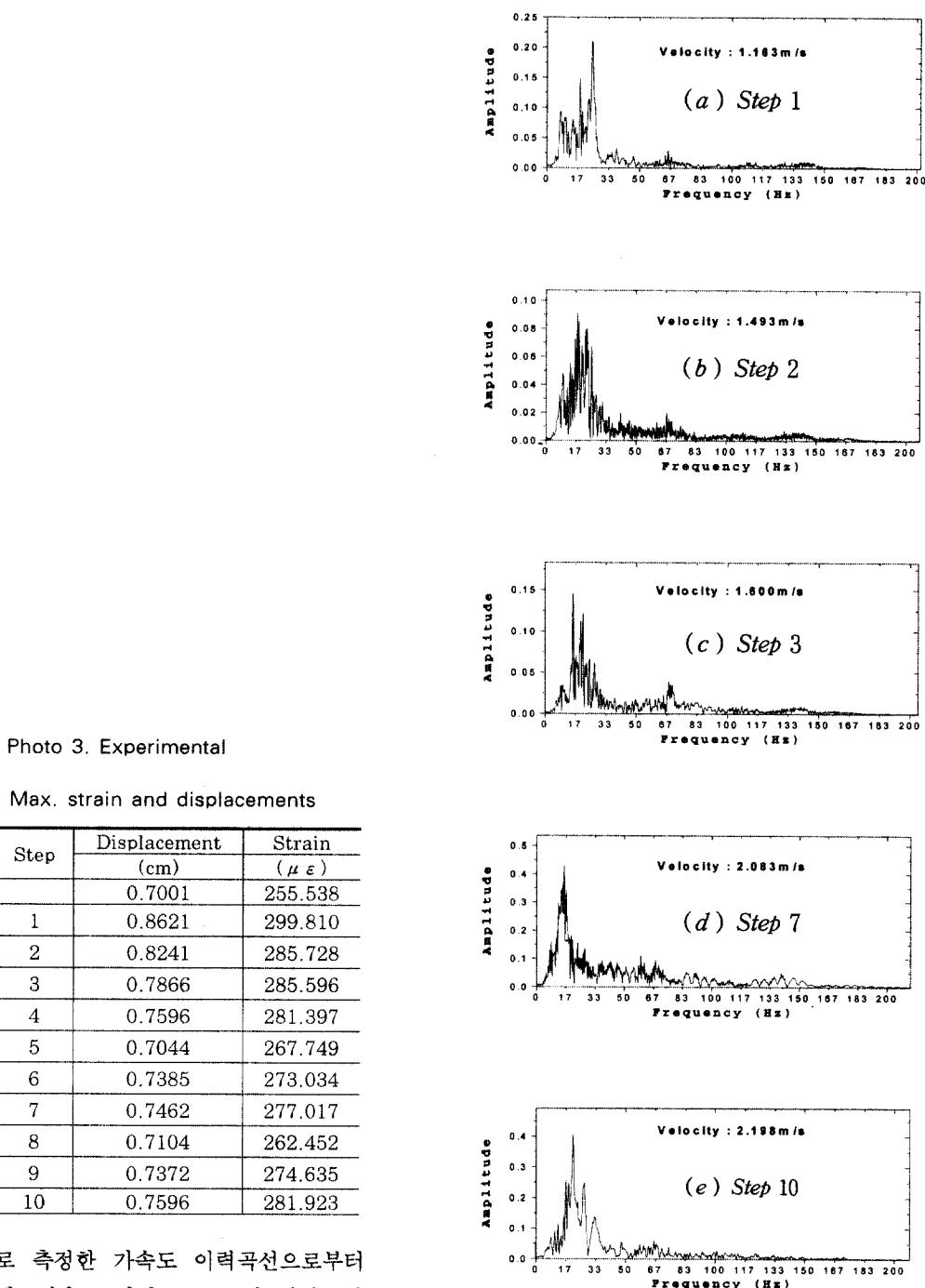


Photo 3. Experimental

Table 2. Max. strain and displacements

Loading Type	Step	Displacement (cm)	Strain ( $\mu\epsilon$ )
Static		0.7001	255.538
Dynamic	1	0.8621	299.810
	2	0.8241	285.728
	3	0.7866	285.596
	4	0.7596	281.397
	5	0.7044	267.749
	6	0.7385	273.034
	7	0.7462	277.017
	8	0.7104	262.452
	9	0.7372	274.635
	10	0.7596	281.923

각 단계별로 측정한 가속도 이력곡선으로부터 대표적인 스펙트럼을 구하면 Fig. 5와 같다. 단계별로 유사한 스펙트럼 형상을 보이며 속도 차이에 의한 특정 주파수에서 적은 차이를 나타낸다.

Fig. 5 Spectrum from acceleration history

단계별로 측정한 변위의 시간이력곡선중 대표적인 시간이력곡선을 도시하면 Fig. 6과 같다.

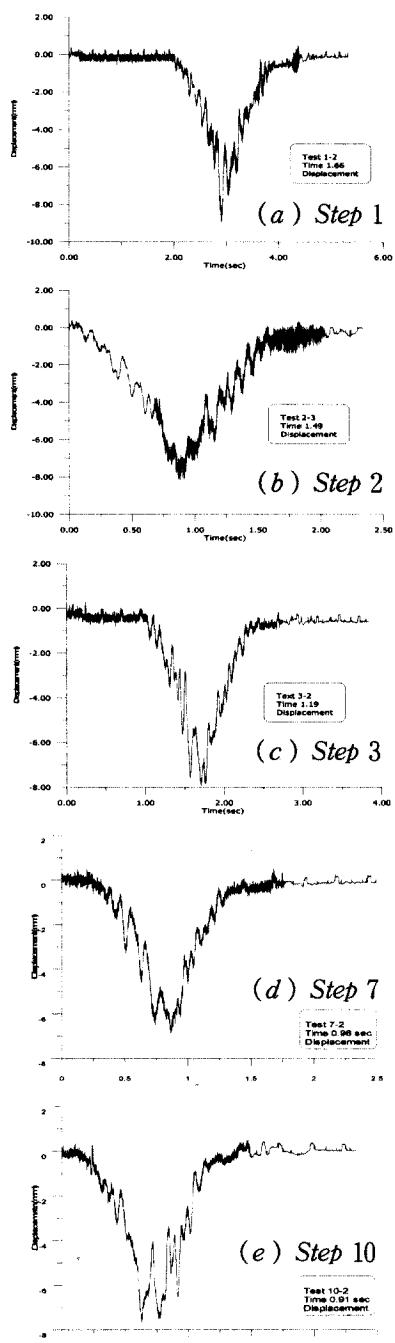


Fig. 6 Displacement history at midspan

### 3. 이론적 해석과 비교분석

#### 3.1 프로그램의 검증

본 연구에서 작성한 유한요소 프로그램은 판요소를 Hermite 3차 방정식을 변위형상함수로 가정하였다. 판요소의 검증만을 정리하기로 하며 해석모델은 단위 중량  $2.5 \text{ t/m}^3$ , 탄성계수  $2 \times 10^6 \text{ t/m}^2$ , 판의 크기는 가로, 세로 길이가 각각  $10 \text{ m}$ , 두께  $0.5 \text{ m}$ , 포아송비는 0.3인 판구조물을 선택하였다. 해석모델의 종방향 경계조건은 단순지지이며 횡방향은 자유단인 단순교이다. Table 3은 판의 중앙점에 단위하중이 작용할 때 요소 분할수에 따른 중앙점의 처짐을 나타낸 것이며 Fig. 7은 중앙점 처짐에 대한 수렴도를 나타낸 그림이

Table 3. Deflection at mid-point ( $\times 10^{-5}$ )

Mesh	Theory	This Study	Ratio(%)
$2 \times 2$	5.568	6.428571	86.61
$4 \times 4$		5.829312	95.51
$6 \times 6$		5.700875	97.67
$8 \times 8$		5.649869	98.55
$10 \times 10$		5.624041	99.00
$12 \times 12$		5.609039	99.27
$14 \times 14$		5.599503	99.44
$16 \times 16$		5.593041	99.55
$18 \times 18$		5.588447	99.63
$20 \times 20$		5.585057	99.70
$30 \times 30$		5.576521	99.85

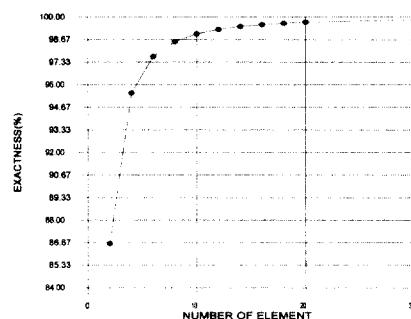


Fig. 7 Convergence according to Mesh Refinement

다. 처짐에 대한 수렴도로부터 요소 분할수가 10 × 10이상이면 99%이상 정확도를 나타내며 이로 부터 강도매트릭스가 적절함을 알 수 있다.

### 3.2 정적 해석의 검증

본 연구의 실험모형을 슬래브는 판요소로, 거처는 보요소로 이상화하여 계측결과를 비교하였다. 유한요소해석결과와 계측치는 Table 4와 같으며 해석결과는 실험결과의 94%를 보인다.

### 3.3 고유진동수 분석

본 연구에서 작성한 프로그램의 질량매트릭스의 적절성을 보이기 위해 고유진동수 해석을 실시하였다. 특히, 판 요소에 대한 정확도를 얻기 위하여 수렴도 검토를 위한 해석모델에 대한 고유진동수를 계산하면 Table 5와 같으며 계산결과는 참고문헌에 제시된 고유진동수와 거의 일치함을 알 수 있다.

본 연구의 실험모델에 대한 기본 고유진동수를 계측치와 계산치를 정리하면 Table 6과 같다. 측정치중 낮은 진동수에서 명확히 구분할 수 없으므로 단계7에 대하여 20Hertz까지만 확대하여 도시하면 Fig. 8과 같다. 계산치는 본 연구에서 작성한 유한요소 프로그램의 해석결과이며 Fig.8의 계측결과에 대한 스펙트럼으로부터 얻은 진동수를 정리한 것이다.

### 3.4 이동하중에 의한 동적응답

본 연구에서 작성한 프로그램을 이용하여 이동하중에 의한 동적 응답해석할 때 시간 적분법을 사용하였으며 시간증분량에 따라 수치적으로 안정한 값을 나타내는 Newmark 방법을 사용하였다. 이동속도는 모형실험에 사용한 속도를 이용하였으며 해당 시간에서 절점하중벡터는 변위형상함수의 전치매트릭스와 차량하중과의 곱에 의해

Table 4. Static Deflection at mid-span of Experimental Model

Model	Value	Ratio
Test	0.7001 cm	1
FEM	0.6594 cm	0.942

Table 5. Natural Frequencies(Hertz)

Mode	Ref.(10)	Present
1	6.559869	6.569679
2	10.99328	10.99009
3	25.10754	24.89156
4	26.52963	26.61361
5	31.83556	31.86117
6	48.18244	47.73150

Table 6. Natural Frequencies(Hertz)

Mode	Test	FEM
1	1.05	1.040
2	2.30	2.224
3	2.90	2.866
4	4.40	4.302
5	5.70	5.619
6	7.35	7.274
7	8.65	8.631
8	-	8.894
9	9.40	9.289
10	13.05	13.012
11	-	13.879
12	17.60	17.474

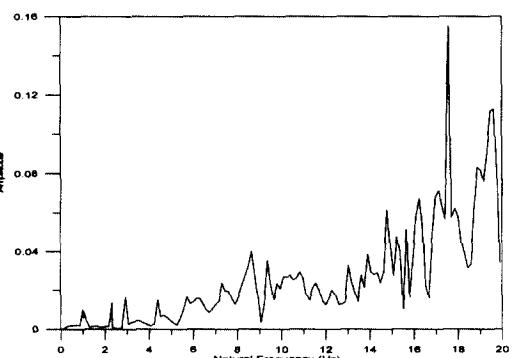


Fig. 8 Distribution of Frequencies

해당 시간에서 절점하증벡터로 환산하는 방법을 사용하였다. 이동하중에 의해 발생하는 동적 응답은 동적 확대계수(DMF)로 나타내며 이는 최대 정적응답에 대한 동적 응답의 비로 정의한다. 동적응답의 양상을 보기 위해 수평축은 실험의 단계별 동적확대계수의 분포를 도시하였으며 그 결과는 Fig. 9와 같다.

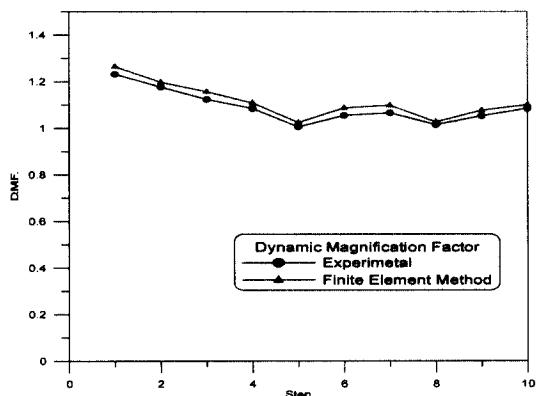


Fig. 9 Dynamic Magnification Factors vs velocity step of vehicle

#### 4. 결 론

본 연구는 모형실험과 유한요소방법으로 이동차량 하중을 받는 판형교의 동적 응답을 분석하였다. 실용적인 검증을 위해서는 실험모델에 상사율을 적용하여 축소모형을 제작하여야 하나 판형교의 원형의 선택이 적당치 않아 해석결과의 검증을 위한 실험적 연구에 주안점을 두었다. 실험체는 제작이 용이한 아크릴을 이용하였고 실험은 재료의 공학적 상수를 얻기 위한 재료실험, 정적 실험 및 이동하중을 받는 판형교의 동적 실험을 실시하였다. 계측자료와 분석내용을 정리하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

본 연구는 축소모형실험으로 판형교의 정적 및 동적 응답을 분석할 수 있음을 보였고 모형실험의 정도를 확인하기 위해 유한요소 프로그램을

작성하여 이로부터 얻은 구조해석결과를 실험결과와 비교하였다.

변위에 대한 정적 실험과 해석결과를 비교하면 5%정도의 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이동하중에 대한 동적 확대계수의 분포를 보면 실험결과는 차량모델의 모터에 의한 노이즈로 고주파의 진동이 합쳐 나타나고 있으나 기본적인 동적 응답의 형상이 유사함을 알 수 있다.

보다 현실적인 모형실험을 위해서는 상사율을 고려한 교량 및 차량모형 제작이 필요하며 실측한 동적 응답과 모형실험에 의한 동적응답의 변화는 차기 연구에서 수행할 예정이다.

#### 감사의 글

이 논문은 1998년도 서울시립대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었으므로 이에 감사 드립니다. 또, 실험체 및 실험차량 제작에 도움을 준 (주)영엔지니어링에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) 임성순, “나선형 곡선부재의 동적해석,” 서울대학교 공학박사 학위논문, 1987
- (2) L. Fryba, “Vibration of Solids and Structures under Moving Loads,” Noordhoff, 1972
- (3) M. B. Wechsler, “Moment Determination for Moving Load System,” Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No. 6, June, 1985, pp. 1401~1405
- (4) C. O’Conner and T. H. T. Chan, “Dynamic Wheel Loads from Bridge Strains,” Journal of Structural Engineering, Vol. 114, NO. 8, August, 1988, pp. 1703~1723
- (5) M. R. Taheri and E. C. Ting, “Dynamic Response of Moving Loads: Finite Element Method,” Computer & Structures, Vol. 34, 1990, pp. 509~521

- (6) A. Cifuentes and S. Lalapet, "A General Method to Determine the Dynamic Response of a Plate to Moving Mass," *Computer & Structures*, Vol. 42, No. 1, 1992, pp. 31~36
- (7) J. L. Tiedeman, P. Albercht and L. R. Cayes, "Behavior of Two-span Continuous Bridge under Truck Axle Loading," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 119, No. 4, April, 1993
- (8) M. F. Green, D. Cebon and D. J. Cole, "Effects of Vehicle Suspension Design on Dynamics of Highway Bridges," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, No. 2, February, 1995
- (9) O. R. Jaiswal and R. N. Iyenger, "Dynamic Responses of Railway Tracks to Oscillatory Moving Masses," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, No. 7, July, 1997
- (10) R. D. Brevins, "Formulas for Natural Frequency and Mode Shape," *Van Boststrand Reinhold*, 1979

(접수일자 : 2000년 5월 8일)