

노면조도와 단차를 고려한 2경간연속 판형교의 충격계수에 관한 실험 및 해석적 연구

An Experimental and Analytical Study on the Impact Factors of Two-Span Continuous Plate Girder Bridge Due to Road Surface Roughness and Bump

박 영 석¹⁾ · 정 태 주²⁾
Park, Young Suk Chung, Tae Ju

요 약 : 차량이 교량을 통과할 때 교량에 발생하는 충격계수는 교량의 설계시 매우 중요한 인자이다. 본 연구에서는 2연속 강판형교의 지간 중앙점에 발생하는 충격계수에 관한 실험 및 해석적 연구를 수행하였다. 교량의 수치해석시 교량과 차량은 3차원으로 모델링하였으며, 교량의 노면조도는 Intelligent Total Station으로 직접 측정하여 사용하였다. 이때 교량의 주형은 보요소, 콘크리트 바닥판은 셸요소를 사용하고 주형과 콘크리트 바닥판 사이는 Rigid Link를 사용하여 연결시켰다. 교량과 차량 사이의 상호작용을 고려하여 차량의 운동방정식을 유도하였으며, 차량의 여러 가지 주행속도에 따른 교량의 지간 중앙점에서의 충격계수를 구하여 우리나라 및 외국의 지방서 규정과 비교 검토하였다.

ABSTRACT : The prediction of the dynamic response of a bridge resulting from passing vehicles across the span is a significant problem in bridge design. In this paper, the static and dynamic experiments are performed to understand the dynamic behavior of an actual two-span steel plate girder bridge. The road surface roughness of the roadway and bridge deck is directly measured by Intelligent Total Station. Numerical scheme to obtain the dynamic responses of the bridges in consideration of measuring road surface roughness and 3-D vehicle model is also presented. The bridge and vehicle are modeled as 3-D bridge and vehicle model, respectively. The main girder and concrete deck are modeled as beam and shell elements, respectively and rigid link is used for the structure between main girder and concrete deck. Bridge-vehicle interaction equations are derived and the impact factors of the responses for different vehicle speeds are calculated and compared with those predicted by several foreign specifications.

1) 정희원, 명지대학교 토목환경공학과, 교수
2) 정희원, 한라공과대학교 건설공학부, 조교수

본 논문에 대한 토의를 1997년 12월 30일까지 학회로 보내주시면 토의회답을 게재하겠습니다.

핵심 용어 : 충격계수, 노면조도, 강판형교, 차량모델, 동적응답

KEYWORDS : Impact Factor, Road Surface Roughness, Plate Girder Bridge, Vehicle Model, Dynamic Response

1. 서론

도로교는 사하중을 비롯하여 차량하중을 주로 받는 구조물로서 그 응답을 구하기 위해서는 교량의 노면조도와 차량과 교량 사이의 상호작용을 고려한 동적응답에 관한 연구가 필요하다. 차량이 교량을 통과할 때 여러 가지 원인에 의해 발생하는 차량의 동적하중으로 인하여 교량은 동적거동을 하게 되며, 이러한 교량의 동적거동으로 인하여 교량에는 차량하중이 정적으로 작용할 때 발생하는 응력보다 더 큰 응력이 발생한다. 그러므로 교량의 각 부재에 발생하는 동적응답을 정확히 파악하여 교량의 설계 및 해석에 이용하여야 한다.

그러나, 교량의 설계시 교량의 각 부재에 발생하는 동적응답을 정확하게 파악하기 어렵기 때문에 우리나라와 각국의 도로교시방서에서는 충격계수를 이용하여 교량의 동적효과를 고려하고 있다. 우리나라의 도로교표준시방서¹⁾와 미국²⁾ 및 일본⁵⁾의 시방서에서는 충격계수를 교량의 시간만의 함수로 나타낸 간단한 식을 사용하여 구하도록 규정하고 있다. 이와는 달리 캐나다 도로교시방서인 OHBDC³⁾와 스위스 시방서인 SIA⁴⁾에서는 충격계수를 교량의 고유진동수의 함수로 규정하고 있다.

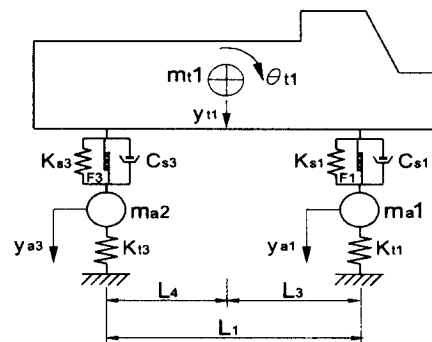
우리나라 도로교표준시방서의 충격에 대한 규정은 우리나라의 도로상태 및 교통상황 등을 고려하지 않고 외국의 규정을 바탕으로 사용하고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 교량과 차량을 3차원으로 모델링하여 교량의 충격계수를 수치해석적인 방법으로 구한 결과와 실제 교량의 노면조도와 동적응답를 직접 측정하여 구한 결과를 서로 비교 검토하고, 우리나라 도로교표준시방서 및 각국의 시방서 규정과 비교 검토하였다.

2. 해석모델 및 해석방법

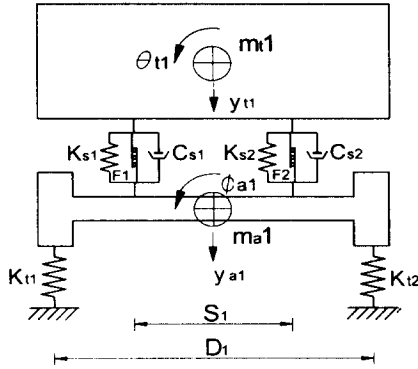
2.1 차량모델

차량을 수학적으로 모델링하기 위하여 지금까지의 연구에서는 주로 1개의 자유도를 갖는 이동 질량(moving mass), 몇 개의 자유도를 갖는 2차원 이동차량(moving vehicle)으로 이상화시켜 주로 사용하여 왔으나, 최근에 T.L. Wang⁹⁾과 T.J. Chung¹¹⁾이 3차원 차량모델을 사용하여 교량의 동적응답을 구하였다.

본 논문에서는 실제 재하차량인 15톤 덤프트럭을 그림 1에 나타낸 바와 같이 7-자유도를 갖는 3차원 차량으로 모델링하여 사용하였다. 차량은 복잡한 여러가지 기계장치로 구성되어 있으나 크게 트럭의 몸체, 현가장치와 타이어의 3가지 요소로 구성되어 있다고 가정할 수 있다. 트럭의 몸체는 강체로 가정하여 그림 1에 나타낸 바와 같이 모델링하여 사용하였다. 차량의 현가장치에는 여러가지 종류가 있으나 트럭의 현가장치로 많이 사용되고 있는 다판스프링으로 가정하였다. 다판스프링의 현가장치는 매우 복잡한 비선형 거동을 나타내나, 차량모델의 단순화를 위하여 현가장치의



(a) 트럭의 측면도



(b) 정면도

그림 1. 3차원 차량모델도

현가력을 선형탄성 스프링력과 일정한 크기의 마찰력으로 구성되어 있다고 가정하였다. 타이어는 선형 탄성 스프링으로 가정하고, 타이어의 감쇠는 무시하였다.

2.2 교량모델

본 논문에서 사용한 대상교량은 2연속 강판형 교로서 상부구조가 콘크리트바닥판, 주형, 가로보와 수직 및 수평브레이싱으로 구성되어 있다. 대상교량은 다음과 같이 가정하여 모델링하였다.

- (1) 교량의 모델링시 주형과 가로보는 3차원 보요소를 사용하여 모델링하였다.
- (2) 콘크리트바닥판은 모델의 단순화를 위하여 등방성이며 균질한 쉘요소로 이상화시켰다.
- (3) 바닥판과 주형은 Rigid Link를 사용하여 외력발생시 일체로 거동하게 하였다.
- (4) 교량의 동적응답을 해석할 때 수직브레이싱은 휨강성이 있는 가로보로 가정하고 수평브레이싱의 강성은 무시하였다.

2.3 노면조도

일반적으로 노면의 평탄성을 나타내는 노면조도(roughness)는 도로 포장면의 종방향 특성의

하나로서 도로의 기능적 측면과 구조적 측면에 영향을 미친다. 즉 노면조도는 시공 기면으로부터의 수직변위로서 원칙적으로 종횡방향 변위를 3차원으로 나타내는 것이 바람직하나, 이를 3차원으로 처리하기가 매우 어렵기 때문에 일반적으로 종방향과 횡방향의 변위를 분리하여 나타낸다.

노면의 종단 특성을 엄밀한 의미에서 표현하면 각기 크기가 다른 파장(wave length)을 갖는 무수히 많은 파형(wave)의 연속으로 구성되어 있다고 할 수 있다. 이러한 파장의 유형은 매우 복잡하며 그 범위가 대단히 넓다. 자동차 주행시의 평탄성과 관련하여 다루어지는 조도의 파장은 보통 0.1-100m, 진폭은 0.1-10cm의 범위로 볼 수 있으며, 특히 평탄성에 크게 영향을 미치는 것은 진폭의 크기인데 진폭이 증가하면 그만큼 평탄성이 불량하게 된다.

노면의 평탄성을 측정하는 방법에는 정적측정 방법, 동적측정 방법 및 광선을 이용한 측정 방법 등이 있으나, 본 논문에서는 정적측정 방법의 일종인 Intelligent Total Station를 사용하여 교량의 노면조도를 20cm 간격으로 직접 측정하여 사용하였다.

그리고 C.J. Dodds와 J.D. Robson¹⁰⁾은 여러 종류의 도로에 대한 대표적인 PSD인 $S(v)$ 를 식(1) 및 (2)와 같이 제안하였다.

$$S(\gamma) = L(\gamma_0) \left[\frac{\gamma}{\gamma_0} \right]^{-W_1} \quad \gamma \leq \gamma_0 \quad (1)$$

$$S(\gamma) = L(\gamma_0) \left[\frac{\gamma}{\gamma_0} \right]^{-W_2} \quad \gamma > \gamma_0 \quad (2)$$

여기서, $S(\gamma) = \text{PSD} (\text{m}^2/\text{cycle}/\text{m})$

$L(\gamma_0) = \text{조도계수} (\text{m}^2/\text{cycle})$

$\gamma_0 = 1/2\pi (\text{cycle}/\text{m})$

$W_1, W_2 = \text{조도지수}$

2.4 차량과 교량의 운동방정식

2.4.1 차량의 운동방정식

차량의 운동방정식은 Lagrange's 방정식을 사

용하여 유도하였다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = 0 \quad (3)$$

여기서, T = 차량 시스템의 전체 운동에너지.

V = 차량 시스템의 전체 위치에너지.

D = 차량 시스템의 전체 분산에너지.

q_i, \dot{q}_i = 차량의 일반화된 변위와 속도.

본 논문에서 사용한 15톤 덤프트럭의 차량모델에 대한 운동방정식은 식 (3)을 사용하여 유도할 수 있다. 차량의 전체 운동에너지 $T = \sum T_i$ 는 차량 구조물의 질량 및 수직변위의 속도와 피칭 및 롤링에 대한 회전속도를 사용하여 계산하고, 차량의 전체 위치에너지 $V = \sum V_i$ 는 현가장치 및 타이어의 스프링강성과 각 스프링의 상대변위를 구하여 계산할 수 있다.

2.4.2 교량의 운동방정식

교량은 3차원으로 모델링하고 선형 동적해석을 실시하였다. 교량의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M_B]\{\ddot{x}\} + [C_B]\{\dot{x}\} + [K_B]\{x\} = \{F_B(t)\} \quad (4)$$

여기서, $[M_B]$ = 교량의 전체 질량매트릭스

$[C_B]$ = 교량의 전체 감쇠매트릭스

$[K_B]$ = 교량의 전체 강도매트릭스

$\{x\}, \{\dot{x}\}, \{\ddot{x}\}$ = 교량의 절점의 변위, 속도, 가속도 벡터

$\{F_B(t)\}$ = 교량과 차량 사이의 상호작용에 의해 교량에 작용하는 하중벡터

2.4.3 교량과 차량 사이의 상호작용

식 (4)에서 우변의 하중항은 교량의 노면조도 및 교량과 차량 사이의 상호작용으로 발생하는 타이어력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{B_i}(t) = K_{t_i} \cdot R_{t_i} \quad (5)$$

여기서,

K_{t_i} = i 번째 차륜의 타이어 스프링 강성.

R_{t_i} = i 번째 차축과 교량 사이의 상대변위.

식 (5)에서 상대변위 R_{t_i} 는 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$R_{t_i} = y_{t_i} - (G_{r_i}) - (y_{b_i}) \quad (6)$$

여기서, y_{t_i} = i 번째 차륜의 수직변위

G_{r_i} = i 번째 차륜에서의 노면조도.

y_{b_i} = i 번째 차륜에서 교량의 수직변위.

3. 실제 교량에의 적용

3.1 개요

본 논문에서는 국도상에 위치한 2연속 강판형 교량 대상교량으로 하였다. 교량의 폭은 10.5m 이고 설계하중은 DB-24로 설계된 교량이다. 실험시 사용한 실험차량은 15ton 덤프트럭으로 총 중량이 25.1ton이다. 정적실험은 교량의 최대변형과 처짐이 발생하도록 4개의 하중조건별로 2회씩 실험을 실시하였고, 동적실험은 5km/hr~60km/hr의 주행속도별 주행실험과, 높이 3.4cm의 단차를 고려한 단차실험, 그리고 51.4km/hr 속도로 주행 중 급제동시 동적거동을 파악하는 제동실험을 실시하였다.

차량이 교량위를 통과할 때 지간 중앙점에서의 정적 및 동적처짐을 그림 2에 나타내었다. 교량의 최대 정적처짐은 정적하중이 교량의 지간 중앙점 부근에서 발생하지만 최대 동적처짐은 교량의 노면조도와 고유주기 및 차량 특성 등에 의해 이동 차량이 지간 중앙점 부근에 위치할 때 반드시 발생하지는 않는다. 따라서 본 논문에서는 식 (7)를 사용하여 충격계수를 정의하였다. 교량의 감쇠는 임계감쇠비 1.14%를 사용하였다. 그리고 교량의 동적해석시 사용한 모우드 수는 반복계산을 통하여 그 수를 변화시켜도 계산값이 크게 변하지 않고 안정된 값을 유지할 때의 모우드 수인 100개를 취하였다.

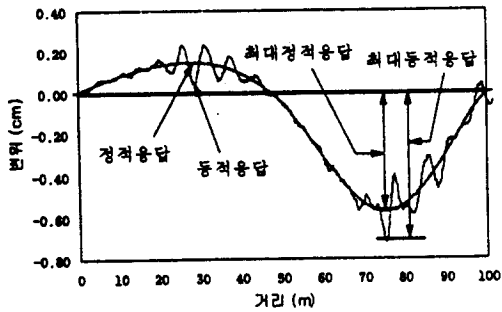


그림 2. 대표적인 시간 중앙점에서의 변위이력

$$I = \frac{D_{dya} - D_{sta}}{D_{sta}} \quad (7)$$

여기서, I = 충격계수 (Impact Fator)

D_{dya} = 최대 동적응답

D_{sta} = 최대 정적응답

3.2 교량과 차량의 제원 및 노면조도

3.2.1 교량제원

대상교량인 2연속 강판형교는 지간이 50m이고 교폭은 10.5m이다. 철근콘크리트 바닥판의 두께는 20cm이고 5개의 주형으로 구성되어 있다. 그리고 5m 간격으로 수직브레이싱과 15m 간격으로 가로보가 배치되어 있다. 그림 3에 대상교량의 평단면도를 나타내었다.

3.2.2 차량제원

실험시 사용한 15ton 덤프트럭의 제원은 표 1과 그림 4에 각각 나타내었다.

표 1. 실험용 재하차량의 하중

적재시 전륜 하중	7,540 kg
적재시 중축 하중	8,350 kg
적재시 후륜 하중	9,210 kg
적재시 차량 총하중	25,100 kg

3.2.3 노면조도

본 논문에서는 최근에 개발된 Intelligent Total Station을 사용하여 교량의 노면조도를 20cm 간격으로 직접 측정하였다. 본 논문에서는 차량의 각 자유도에 대한 초기변위와 속도를 차량의 동적거동이 안정된 후에 교량에 진입할 수 있도록 교량 시점 50m 전에서부터 교량 종점 후 6m까지 총 156m를 20cm 간격으로 좌우측 2 line을 측정 한 노면조도를 사용하였으며, 교량의 수치해석시 계측점 사이는 직선보간하여 사용하였다.

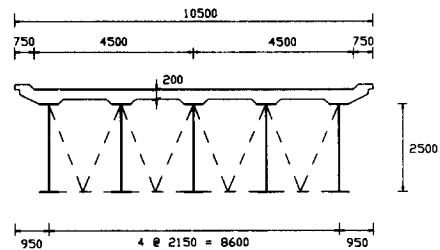


그림 3. 대상교량의 횡단면도

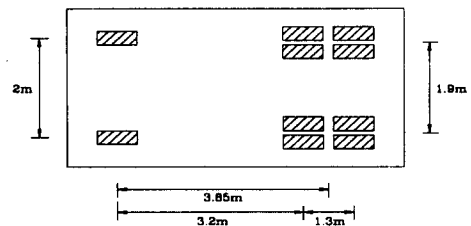


그림 4. 재하차량용 15ton 덤프트럭

그림 5는 측정한 노면조도의 DATA를 그래픽 전문 프로그램인 GRAPHER를 사용하여 Curve Fitting한 상태를 나타낸 그림이며, Curve Fitting Line을 기준으로 노면조도를 다시 나타낸 그림을 그림 6에 나타내었다. 그림 7은 측정한 노면조도를 F.F.T.를 사용하여 교량의 PSD를 계산한 값을 나타낸다. 그림 7로부터 본 대상교량의 노면의 조도계수값은 오른쪽이 $15.8E-6 \text{ m}^2/\text{cycle}$ 이고 왼쪽이 $12.5E-6 \text{ m}^2/\text{cycle}$ 이다. 이 값은 C.J. Dodds와 J.D. Robson¹⁰⁾이 제안한

도로의 분류표와 비교하면 양호한 도로(Good Road)에 상응한다.

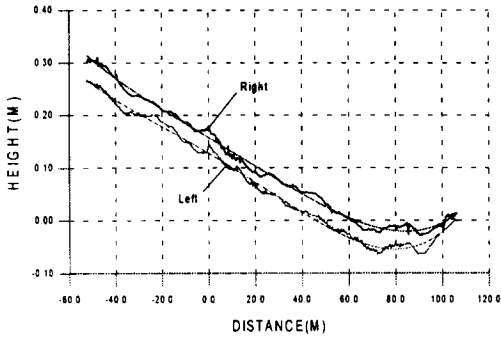


그림 5. 측정된 대상교량의 노면조도

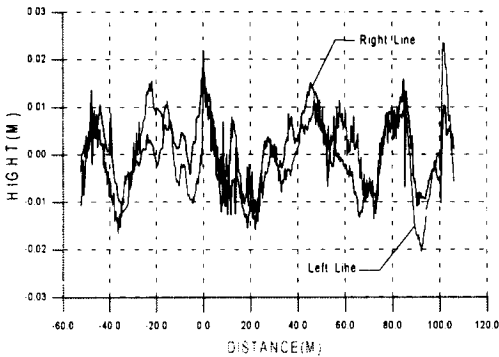


그림 6. Curve Fitting한 교량의 노면조도

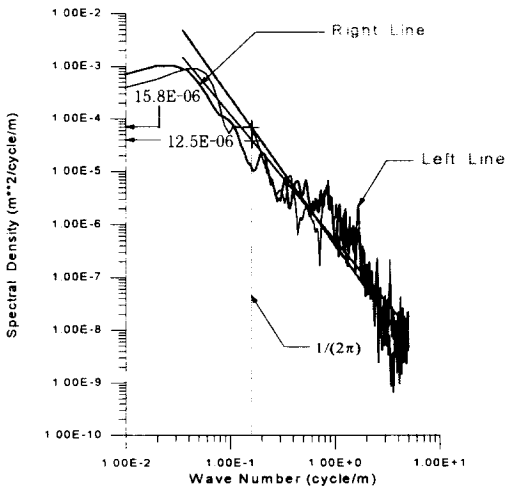


그림 7. 교량 노면조도의 PSD 계산

3.3 교량의 모델링

본 연구에서 사용한 대상교량인 2연속 강판형 교의 모델링시 주형은 종방향으로 40개 요소로 분할하였고 콘크리트 바닥판은 종방향으로 40구간, 횡방향으로 10구간으로 분할하여 총 400개의 셀요소로 분할하였다. 이렇게 대상교량을 3차원으로 모델링하였을 때 총 자유도수는 3,414개이다.

3.4 측정위치 및 하중조건

3.4.1 정적실험

1) 측정위치

주형의 정적변형도를 측정하기 위하여 steel 전기저항게이지를 사용하였다. 게이지는 S1 지간 중앙부 G1, G2, G3의 하부플랜지와 북부판에 부착하여 휨변형을 조사하였다. 처짐의 측정은 휨변형을 측정하기 위한 장소와 동일한 단면의 주형 하면에 0.01mm단위까지 측정이 가능한 다이알게이지를 설치하여 각각의 하중조건에 대하여 육안으로 관찰하여 기록하였다.

2) 하중조건

교량의 최대변형과 처짐이 발생하도록 실험차량을 재하시켰으며, 4개의 하중조건별로 정적실험을 2회 실시하였다.

- 하중조건 1 : S1의 지간 중앙부 G1에 좌측 뒷바퀴.
- 하중조건 2 : S2의 지간 중앙부 G1에 좌측 뒷바퀴.
- 하중조건 3 : S2의 지간 중앙부 G5에 좌측 뒷바퀴.
- 하중조건 4 : S1의 지간 중앙부 G5에 좌측 뒷바퀴.

3.4.2 동적실험

1) 측정위치

동적실험에서는 실험차량을 일정한 주행속도로

교량 위를 주행시키고 이때 발생하는 응답을 Dynamic Amplifier로 확대시켜 Tape Recorder에 수록한 후, 실험실에서 FFT분석기

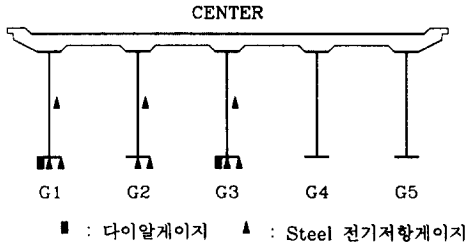


그림 8. 정적실험의 측정위치

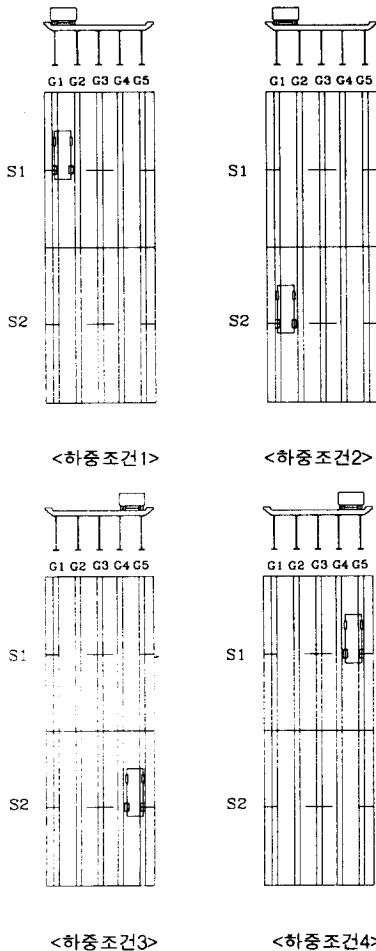


그림 9. 정적실험의 하중조건

를 이용하여 분석하여 교량의 동적특성을 파악하였다. 동적응답치로는 주형의 변형도, 교량중앙부의 변위와 가속도의 성분을 측정하였다.

주형의 변형도 측정 위치는 정적측정 위치와 같으며 동적변위계는 G1, G3의 하부플랜지에 부착시켰으며, 가속도계는 보도 난간에 부착하여 각 점의 처짐과 진동의 가속도 성분을 측정하였다.

2) 동적실험

동적실험은 주행속도에 따른 주행실험과 제동실험, 그리고 단차실험을 실시하였다. 주행실험은 주행속도 5km/h, 10km/h, 20km/h, 40km/h, 60 km/h의 다섯가지 속도로 실시하여 측정위치의 주행속도별 처짐과 변형율을 측정하였다. 제동실험은 51.4km/h 속도로 진행하다가 측정위치 위에서 갑자기 급제동하여 제동하중에 의한 동적거동을 조사하였다. 그리고 팽창줄눈 부분의 단차 및 파손과 국부적인 포장의 파손 등으로 인해 교량에 미치는 영향을 알아보기 위한 단차실험을 실시하였다. 단차실험은 여러 가지 경우 중에서 그 영향이 가장 크다고 판단되는 교량의 지간 중앙부에 폭 30cm×길이 300cm×높이 3.4cm의 송판을 부착시켜 주행속도 5km/h, 10km/h, 20km/h, 40km/h, 60km/h의 속도로 주행시켜 주행속도별로 동적처짐과 변형율을 측정하였다.

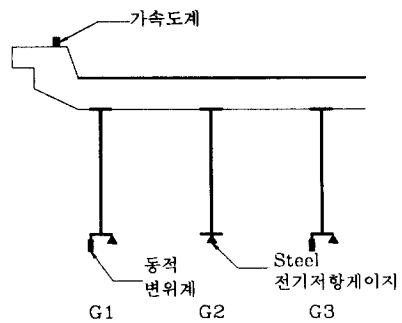


그림 10. 동적실험의 측정위치

3.5 실험결과

3.5.1 정적응답

G1, G3에 부착한 다이알게이지에 의한 하중조건별 처짐값은 표 2에 나타내었고, G1, G2, G3의 Steel 전기저항게이지에 의한 응력값은 표 3에 나타내었다. 각각의 값은 2회 실시한 값의 평균값이다.

3.5.2 동적응답

동적실험은 주행속도별 주행실험과 급제동에 의한 제동실험, 그리고 높이 3.4cm의 단차에 의한 단차실험을 실시하였다.

표 2. 시간 중앙점의 최대 정적처짐(mm)

L.C.	주형	G1	G3
하중조건 1		-5.58	-3.75
하중조건 2		1.71	1.25
하중조건 3		1.02	1.33
하중조건 4		-1.33	-3.50

표 3. 시간 중앙점의 최대 정적응력(kg/cm²)

L.C.	주형	G1	G2	G3
하중조건 1		134.40	109.20	72.45
하중조건 2		22.05	-17.85	-10.50
하중조건 3		15.75	22.05	-22.05
하중조건 4		9.45	50.40	78.75

주행실험은 교량의 외측 연석에서부터 125cm 떨어져서 주행속도 7km/h에서부터 53.3km/h까지 5가지 주행속도로 실시하였다. 표 4~표 6에는 G1, G3의 동적변위계에 의한 S1 시간 중앙점의 동적 처짐을 나타내었다. 표 4는 속도별 주행실험에 의한 시간 중앙점에서의 동적처짐값을 나타내

표 4. 시간 중앙점에서의 동적처짐(mm) : 주행

L.C.	주형	G1	G3
7.0 km/hr		5.25	-4.00
10.6 km/hr		5.74	-4.00
18.0 km/hr		6.00	-4.35
40.0 km/hr		-5.75	-4.11
53.3 km/hr		-6.02	-4.30

었으며 대표적으로 주행속도 40km/hr로 교량을 통과할 때 교량의 시간 중앙점에 발생하는 처짐이력곡선의 예를 그림 11에 나타내었다.

제동실험은 실험차량을 주행속도 51.4km/hr로 주행하다가 교량의 시간 중앙점에서 급제동시켰으며 이 때 시간 중앙점에서의 최대 동적처짐값은 -5.26mm이다. 그림 12에는 제동실험에 의한 시간 중앙점에서 발생하는 처짐이력곡선의 예를 나타내었다.

표 5에는 단차실험에 의한 시간 중앙점에서의 동적처짐값을 나타내었으며, 그림 13에는 대표적으로 실험차량이 주행속도 17km/h로 교량을 통과할 때 시간 중앙점에 발생하는 처짐이력곡선의 예를 나타내었다.

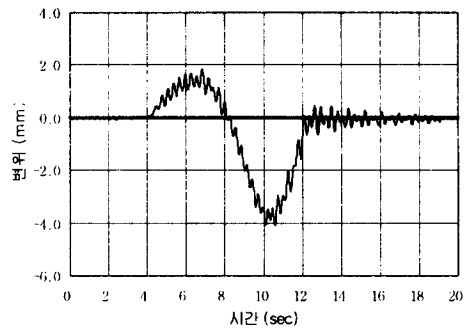


그림 11. 시간 중앙점에서의 동적처짐 이력곡선 (주행실험, G3, 40km/h)

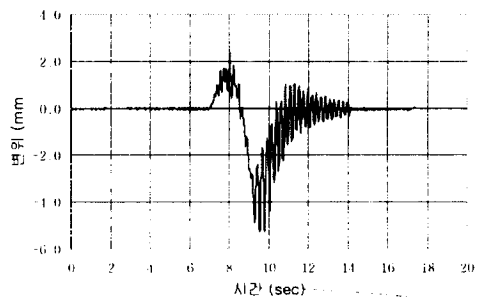


그림 12. 시간 중앙점에서의 동적처짐 이력곡선 (제동실험, G3, 51.4km/h)

표 5. 지간 중앙점에서의 동적처짐(mm) ; 단차

L.C.	주형	G1	G3
	7.0 km/h		-7.35
9.0 km/h		-7.82	-6.70
17.0 km/h		-9.40	-5.75
25.7 km/h		-7.40	-4.64
36.0 km/h		-6.77	-4.26
55.4 km/h		-6.96	-4.57

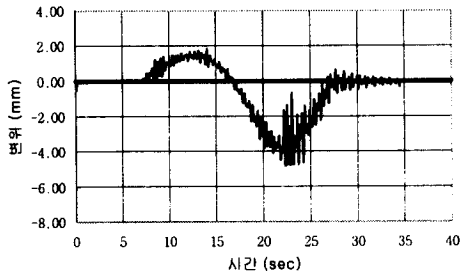


그림 13. 지간 중앙점에서의 동적처짐 이력곡선
(단차실험, G3, 17km/hr)

4. 실험값과 해석값의 비교

4.1 정적응답

하중조건에 따른 지간 중앙점에서의 최대 정적 처짐에 대한 실험값과 수치해석값을 표 6에 나타내었다. 표 6에 나타낸 바와 같이 실험값과 수치해석값을 비교하면 하중조건 1에 대한 G1의 경우 오차가 약 14% 정도, G3의 경우 3.6%이고 나머지 주형은 거의 일치하고 있다.

표 6. 정적처짐의 비교(mm)

L.C.	주형	실험 값		수 치 해 석 값		
		G1	G3	G1	G2	G3
하중조건1		-5.58	-3.75	-6.51	-5.21	-3.85
하중조건2		1.71	1.25	1.58	1.43	1.28
하중조건3		1.02	1.33	1.01	1.18	1.35
하중조건4		-1.33	-3.50	-1.27	-2.55	-3.87

하중조건에 따른 지간 중앙점에서의 최대 정적 응력에 대한 실험값과 수치해석값을 표 7에 나타내었다. 표 7에 나타낸 바와 같이 실험값과 수치해석값을 비교하면 하중조건 1에 대한 G1의 경우 오차가 약 0.8%, G2의 경우 4.7%이고 G3의 경우 5.0%로 매우 잘 일치하고 있다.

표 7. 최대 정적응력의 비교(kg/cm²)

L.C.	주형	실험 값			수 치 해 석 값		
		G1	G2	G3	G1	G2	G3
L.C-1		134.4	109.2	72.4	135.5	104.3	69.0
L.C-2		-22.0	-17.8	-10.5	-15.6	-16.1	-15.0
L.C-3		-15.7	-22.0	-22.0	-14.0	-15.6	-15.8
L.C-4		9.4	50.4	78.7	11.3	39.9	68.6

4.2 충격계수

대상교량과 차량을 3차원으로 모델링하고 실측한 노면조도를 사용하여 15톤 덤프트럭인 실험차량이 대상교량을 여러 가지 주행속도로 주행할 때 교량의 지간 중앙점에 발생하는 충격계수를 수치해석적인 방법으로 구한 결과와 실험을 통하여 구한 실험값을 서로 비교 검토하였다.

대상교량의 첫번째 고유진동수의 실험값과 수치해석 값은 각각 2.25Hz와 2.327Hz로 오차가 약 3.4%로 매우 잘 일치한다. 수치해석방법에 의한 교량의 동적해석시 사용한 모우드수는 100개를 사용하였으나, 고유진동수를 10개만 표 8에 나타내었다.

표 8. 대상교량의 고유진동수

모우드 형상	고유진동수 (Hz)	모우드 형상	고유진동수 (Hz)
1st	2.327	6th	8.547
2nd	3.378	7th	8.807
3rd	3.474	8th	9.924
4th	3.966	9th	10.500
5th	8.092	10th	10.780

4.2.1 주행실험에 의한 충격계수

표 9에는 주행속도별 처짐에 대한 충격계수의 실험값과 수치해석값을 나타내었으며, 그림 14에는 주행속도에 따른 충격계수의 변화를 그림으로 나타내었다. 그림 14에서 속이 빈 도형은 수치 해석 결과이고 속이 찬 도형은 실험값을 나타낸다.

표 9. 주행속도별 충격계수(주행실험)

주행속도 (km/hr)	G1		G2	G3	
	실험값	해석값	해석값	실험값	해석값
5.0	-	0.11	0.12	-	0.14
6.9	0.03	0.13	0.12	0.07	0.12
10.6	0.09	0.19	0.18	0.10	0.25
18.0	0.12	0.18	0.12	0.14	0.08
30.0	-	0.12	0.14	-	0.17
40.0	0.17	0.19	0.16	0.17	0.16
53.3	0.19	0.25	0.24	0.26	0.25
60.0	-	0.18	0.19	-	0.22
70.0	-	0.18	0.15	-	0.13
80.0	-	0.31	0.25	-	0.18
90.0	-	0.17	0.19	-	0.23
100.0	-	0.35	0.45	-	0.62

그림 14에서 보는 바와 같이 처짐에 대한 충격계수는 실험값과 수치해석값의 경향이 잘 일치하고 있다. 주행속도가 5km/h ~ 90km/hr까지는 충격계수의 값이 약 20% 내외로 거의 일정하다가 주행속도가 100km/hr일 때 G1의 경우 약 35%의 최대값을 나타낸다.

현장 여건상 실험차량의 최대 주행속도를 53.3 km/hr 이상 주행할 수가 없었다. 주행속도 53.3 km/hr일 때 충격계수에 대한 실험값이 약 19%, 해석값이 25%의 값을 나타낸다. 이들 값은 도로 교표준시방서에 규정되어 있는 16.7%의 값보다 크다.

4.2.2 단차실험에 의한 충격계수

교량의 지간 중앙점 노면 위에 폭 30cm×길이 300cm×두께 3.4cm의 송판을 설치하고 15톤 덤프트럭인 실험차량이 대상교량을 여러 가지 주행속도로 주행할 때 교량의 지간 중앙점에 발생하는 충격계수를 수치해석방법으로 구한 결과와 측정을 통하여 구한 실험값을 서로 비교 검토하였다.

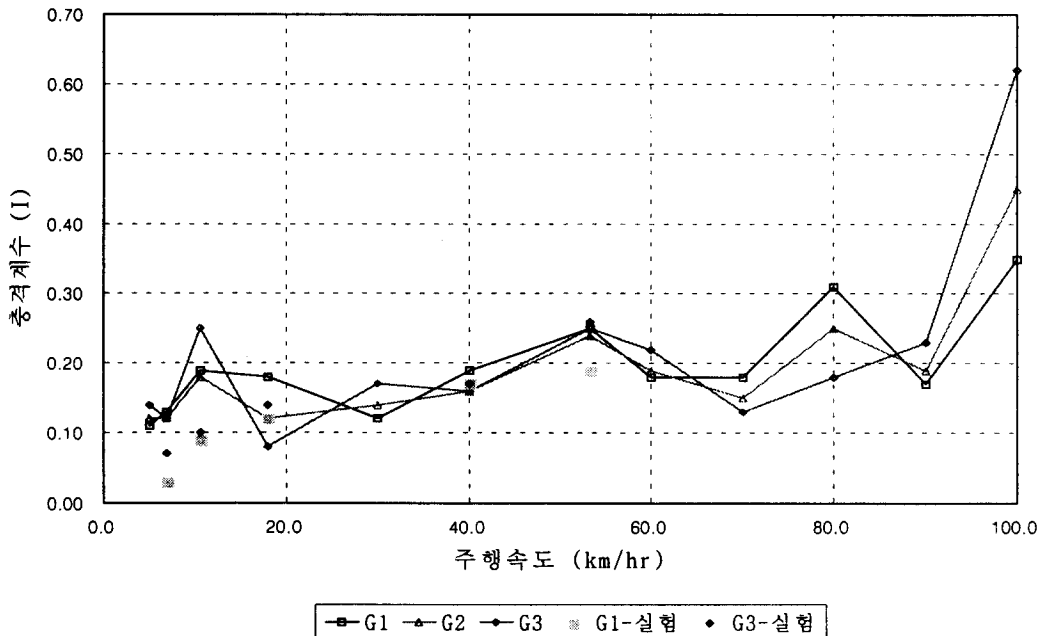


그림 14. 주행속도별 충격계수(일반주행)

표 10에는 노면 위의 단차를 고려하였을 때 주행속도별 충격계수의 실험값과 수치해석값을 나타내었으며, 그림 15에는 주행속도에 따른 충격계수의 변화를 나타내었다. 그림 15에서 속이 빈 도형은 수치해석 결과이고 속이 찬 도형은 실험값을 나타낸다.

그림 15에서 보는 바와 같이 충격계수의 실험값과 수치해석값의 경향이 매우 잘 일치하고 있다. G1에서 주행속도가 9km/hr일 때 충격계수에 대한 실험값이 95%이고 수치해석값이 79%이다. 이와 같이 차량의 주행속도가 낮을 때 충격계수의 값이 매우 크게 나타나는 것은 차량이 송판 위에서 자유낙하하는 형태가 되기 때문에 정적값의 약 2배 정도가 되는 것으로 판단된다. 주행속도가 증가할수록 충격계수의 값이 점점 감소하여 주행속도가 약 36km/hr 정도일 때 충격계수에 대한 실험값이 33%, 해석값이 31%의 값을 나타낸다.

그리고 주행속도가 100km/hr까지 증가하도록 충격계수의 값은 약 30% 정도 내외의 일정한 값을 나타낸다.

표 10. 주행속도별 충격계수(단차실험)

주행속도 (km/hr)	G1		G2		G3	
	실험값	해석값	해석값	실험값	해석값	
5.0	-	0.86	1.01	-	1.27	
7.0	0.94	0.90	1.06	0.95	1.38	
9.0	0.95	0.79	0.94	0.98	1.21	
17.0	0.80	0.63	0.61	0.83	0.82	
25.7	0.40	0.59	0.55	0.33	0.56	
36.0	0.33	0.31	0.27	0.23	0.35	
55.4	0.34	0.40	0.38	0.40	0.37	
60.0	-	0.32	0.30	-	0.32	
70.0	-	0.28	0.24	-	0.20	
80.0	-	0.42	0.35	-	0.26	
90.0	-	0.22	0.20	-	0.24	
100.0	-	0.35	0.45	-	0.62	

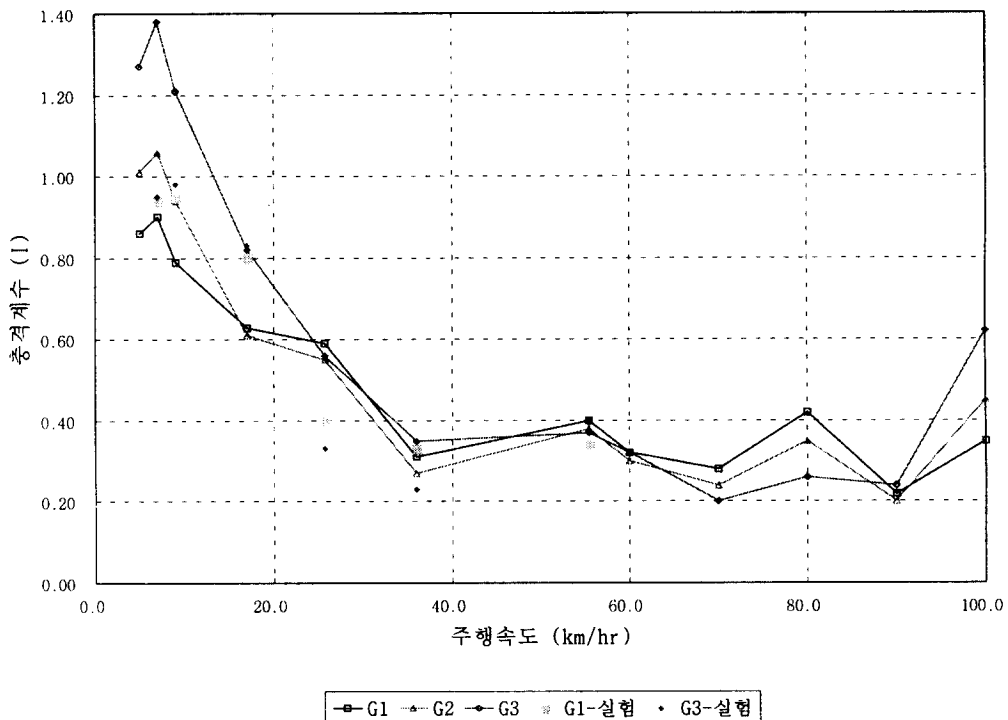


그림 15. 주행속도별 충격계수(단차)

4.2.3 각 국 시방서와의 비교

15톤 덤프트럭인 실험차량이 대상교량을 주행하였을 때의 동적실험에 의한 충격계수와 수치해석에서 구한 충격계수를 각 국의 시방서 규정과 비교하여 표 11에 나타내었다.

우리나라 도로교표준시방서, AASHTO 및 일본 도로교시방서는 지간의 함수로서 충격계수를 규정하고 있으며, 지간이 50m인 본 대상교량의 충격계수 값은 각각 약 17%와 20%를 나타낸다. 반면에 캐나다의 OHBDC와 스위스의 SIA는 충격계수를 고유진동수의 함수로서 나타내며, 본 대상교량의 경우 2.25Hz를 기준으로 할 때 충격계수는 각각 35%와 80%를 나타낸다.

본 연구의 결과를 분석해 보면 주행실험의 경우 본 연구에 구한 충격계수의 값은 도로교 표준시방서보다 큰 값을 나타내나, OHBDC 및 SIA에 규정된 값보다는 작다. 제동실험의 경우 충격계수의 값이 약 40%로 큰 값을 나타내며, 특히 단차실험의 경우에는 주행속도가 늦을 때 충격계수의 값이 모든 나라의 시방서 규정을 초과한다.

표 11. 각 국의 시방서 규정과의 비교

구 분			시간 : 50m (2.25Hz)	
도로교 표준 시방서			0.17	
AASHTO			0.17	
일본 도로교 시방서			0.20	
OHBDC			0.35	
SIA			0.80	
본 연구	주행 실험	치 짐	실험값	0.19
			해석값	0.35
	제 동 실험		0.40	
	단차 실험	치 짐	실험값	0.95
			해석값	0.90

5. 결 론

본 연구에서는 실제 교량을 대상교량으로 정적 및 동적실험을 실시하였고 노면조도를 직접 측정

하였다. 그리고 대상교량과 실험차량을 3차원으로 모델링하였고, 측정된 노면조도를 고려한 수치해석으로 충격계수를 구하여 실험에 의한 충격계수 및 각 국의 시방서와 비교하였다.

본 연구의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 측정된 대상교량의 노면조도는 양호한 도로에 속하며 주행실험 결과 주행속도별 충격계수는 도로교표준시방서의 규정된 값보다 크게 발생한다.
- ② 차량의 제동에 의해 교량에 발생하는 충격계수는 차량이 정상적으로 주행할 때보다 크게 발생한다(본 대상교량의 경우 제동하중에 의한 충격계수는 40% 임).
- ③ 교량의 노면에 단차가 있는 경우 교량에 발생하는 충격계수는 차량의 주행속도가 빠른 경우보다 늦을 때(10km/h 정도) 매우 크게 발생한다.
- ④ 앞으로 교량의 지간 뿐만 아니라 교량의 고유진동수 및 노면조도 등의 영향에 따른 이론 및 실험적 연구를 통해 교량의 설계시 충분한 동적효과를 고려할 수 있는 교량의 충격계수를 구하여야 할 것으로 판단된다.

감사의 말

본 논문은 포항제철주식회사의 1995년도 철강분야 연구비(No.95030) 지원에 의하여 수행되었으며, 연구비를 지원해 주신 포항제철주식회사에 진심으로 감사드립니다. 연구비중 일부는 명지대학교산업기술연구소 지원 교내 연구비가 포함되었음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- (1) 건설부 : 1992, 도로교표준시방서.
- (2) AASHTO : 1989, Standard Specification for Highway Bridges.

- (3) OHBDC : 1983, Ontario Highway Bridge Design Code, Ministry of Transportation and Communications, Downsview, Ontario.
- (4) SIA : November, 1985, Schweizer Norm, SIA, Switzerland.
- (5) 日本道路橋協會 : 1990, 道路橋示方書, 同解説.
- (6) J.R. Billing : 1982, Dynamic Test of Bridges in Ontario, 1980 : Data Capture, Test Procedure, and Data Processing, Ministry of Transportation and Communication, Research and Development Report, Vol. 26.
- (7) R. Cantieni : 1983, Dynamic Load Tests on Highway Bridges in Switzerland, Swiss Fedral Laboratories of Material Testing and Research, Report No. 211, Dubendorf, Switzerland.
- (8) E.S. Hwang : 1990, Dynamic Loads for Girder Bridges", PhD Thesis, University of Michigan.
- (9) T.L. Wang, D. Huang and M.Sahawy : 1992. 8, Dynamic Response of Multigirder ridges, ASCE, Vol. 118, No. ST8.
- (10) C.J. Dodds and J.D. Robson : 1973, The Description of Road Surface Roughness, Journal of Sound and Vibration.
- (11) 정 태주, 박 영석 : 1994. 9, 3차원 차량모델을 사용한 강도로교의 동적응답에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 제14권 제5호.
- (12) 박 영석, 정 태주 : 1996. 1, 노면조도를 고려한 강판형교의 충격계수에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 제 16권 제I-1호.

(접수일자 : 1997. 2. 1)