

3次元車輛모델을 사용한 鋼道路橋의 動的應答에 關한 研究

A Study on the Dynamic Response of Steel Highway Bridges Using 3-D Vehicle Model

鄭泰周* · 朴英錫**

Chung, Tae Ju · Park, Young Suk

Abstract

This paper is presented to perform linear dynamic analysis of bridges due to vehicle moving on bridges. The road surface roughness and bridge/vehicle interaction are also considered. The bridge and vehicle are modeled as 3-D bridge and vehicle model, respectively. The road surface roughness of the roadway and bridge decks are generated from power spectral density(PSD) function for good road. The PSD function proposed by C.J. Dodds and J.D. Robson is used to describe the road surface roughness for good road condition. The vehicles are modeled as two nonlinear vehicle model with 7-D.O.F of truck and 12-D.O.F of tractor-trailer and the equations of motion of the vehicles are derived using Lagrange's equation. The main girder and concrete deck are modeled as beam and shell element, respectively and rigid link is used between main girder and concrete deck. The equations of motion of the vehicles are solved by Newmark β method and the equations of the motion of the bridges are solved by mode-superposition procedures. The validity of the proposed procedure is demonstrated by comparing the results with the experimental data reported by the AASHO Road Test. The comparison shows that the agreement between experiment and theory is quite satisfactory.

요 지

본 연구에서는 교량과 차량을 3차원으로 모델링하고, 교량의 노면조도 및 교량과 차량 사이의 상호작용력을 고려하여 이동차량이 교량을 통과할 때 교량의 선형 동적해석을 수행할 수 있는 해석방법을 제시하였다. 교량의 노면조도는 평균값이 영인 정상확률분포로 가정한 지수 스펙트럴 밀도(PSD)를 사용하여 생성시켰다. 이 때 지수 스펙트럴 밀도는 양호한 도로에 대하여 C.J. Dodds와 J.D. Robson이 제안한 PSD값을 사용하였다. 차량은 트럭과 트랙터-트레일러를 각각 7-자유도와 12-자유도를 갖는 3차원 차량으로 모델링하였고, 차량의 운동방정식은 Lagrange 방정식을 사용하여 유도하였다. 교량은 주형을 보요소로 이상화시키고 콘크리트 바닥판을 쉘요소로 이상화시켰으며 주형과 콘크리트 바닥판을 Rigid Link로 연결하여 3차원으로 모델링하였다. 차량의 운동방정식은 Newmark β 법을 사용하고 교량의 운동방정식은 모우드 중첩법을 사용하여 풀었다. 본 연구에서 제시한 해석방법의 타당성을 검토하기

* 正會員 · 明知大學校 工學技術研究所 客員研究員, 工博

** 正會員 · 明知大學校 土木工學科 教授, 工博

위하여 “AASHO Road Test”에서 실시한 단순 강합성교의 실험결과와 본 연구에서 제시한 해석적인 방법으로 구한 값을 비교하였다. 해석 결과, 본 연구에서 제시한 해석적인 방법으로 구한 값과 실험값이 매우 잘 일치하였다.

1. 概 要

도로교는 사하중과 풍하중을 비롯하여 차량하중을 주로 받기 때문에 차량이 교량을 통과할 때 여러가지 원인에 의해 발생하는 차량의 동적하중으로 인하여 동적거동을 하게 된다. 이러한 교량의 동적거동은 차량하중이 정적으로 작용할 때보다 더 큰 응력을 유발시키게 됨으로 설계시 교량의 동적응답을 정확하게 파악하는 것은 매우 중요하다.

도로교의 설계시 교량의 각 부재에 발생하는 동적응답을 정확하게 파악하기가 어렵기 때문에 도로 교시방서⁽¹⁻⁵⁾에서는 특별한 경우를 제외하고, 설계의 편의상 교량의 부재가 1차원 또는 2차원 거동을 하는 것으로 가정하고 동적하중의 영향을 고려하기 위하여 충격계수를 고려한 정적해석으로 구한 면내응력만을 고려하여 부재를 설계할 수 있게 규정하고 있는 것이 일반적이다.

설계시의 가정과는 달리 차량이 교량을 통과할 때 교량에는 동적응력이 발생하며 면내하중에 의한 면내응력과 3차원 거동으로 인하여 면외변형으로 인한 2차 응력이 발생한다. 차량이 교량을 통과할 때 교량의 각 부재에 발생하는 동적응답은 여러가지 요소의 영향을 받는다. 이러한 요소로는 1) 교량의 길이 및 형식과 기본고유주기 등과 같은 교량의 동적특성, 2) 교량의 진입부와 교량 바닥판의 노면조도, 3) 차량의 중량, 길이, 속도와 현가장치 등과 같은 차량의 동적특성 등이 있다. 이러한 영향을 고려하기 위한 지금까지의 연구에서는 대부분 차량을 이동하중, 이동질량 및 이동차량으로 모델링하여 사용하였으며, 차량과 교량을 대부분 2차원 모델로 모델링하여 교량의 동적거동에 대하여 연구하여 왔다.

본 연구에서는 교량과 차량을 3차원으로 모델링하고, 교량의 노면조도와 교량과 차량 사이의 상호작용력을 고려한 교량의 동적해석을 실시할 수 있는 수치해석적인 방법을 사용하여 강도도로교의 동적거

동에 대하여 연구하였다.

2. 路面粗度

도로를 주행하는 차량의 진동 원인이 되는 도로의 노면조도는 교량의 동적응답에 영향을 미치는 매우 중요한 인자이며, 차량의 설계시 차량에 작용하는 외력의 크기를 결정하는데도 중요한 인자가 된다. 이러한 도로의 노면조도는 차량의 승차감, 노면의 유지관리 및 보수방법 등을 연구하기 위하여 주로 측정하여 왔다.^(16,17) 도로의 노면조도에 의해 발생하는 차량의 진동으로 인한 차량의 타이어력(tire force)은 도로의 노면 및 교량에 동적하중으로 작용하기 때문에 이동차량(moving vehicle)에 의한 도로교의 동적거동을 연구하기 위해서는 교량의 노면조도를 고려하여야 한다.

교량의 노면조도는 직접 측정하여 사용하는 것이 바람직하나, 도로 및 교량의 종류에 따라 노면조도가 다르므로 여러가지 종류의 도로 및 교량에 대하여 노면조도를 직접 측정하는 데는 많은 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 교량의 노면조도를 평균값이 영인 정상확률분포로 가정한 지수 스펙트럴 밀도(PSD)를 이용하여 생성시킨 교량의 노면조도를 사용하여 교량의 동적응답을 구하였다. 지수 스펙트럴 밀도는 C.J. Dodds와 J.D. Robson⁽¹⁶⁾이 여러가지 도로 종류에 대하여 제안한 PSD값을 사용하였다.

$$S(\gamma) = L(\gamma_0) \left(\frac{\gamma}{\gamma_0} \right)^{-W1} \quad \gamma \leq \gamma_0 \quad (1)$$

$$S(\gamma) = L(\gamma_0) \left(\frac{\gamma}{\gamma_0} \right)^{-W2} \quad \gamma < \gamma_0 \quad (2)$$

여기서, $S(\gamma)$ = PSD(m²/cycle/m)
 $L(\gamma_0)$ = 조도계수(M³/cycle)
 $W1, W2$ = 조도지수

표 1에서 W1과 W2는 1.360에서 2.28까지 변화

하나 식을 단순화시키기 위하여 모두 2.0으로 가정하였다. 교량의 노면조도를 평균값이 영인 정상확률분포라 가정하고 Y(t)로 나타내면, Y(t)는 다음 식과 같이 진폭(amplitude) α , 원주파수(circular frequency) ω 와 위상각(phase angle) θ 인 코사인 함수의 조합으로 나타낼 수 있다.

$$Y(t) = \alpha \cdot \cos(\omega t - \theta) \quad (3)$$

PSD형태로 주어진 노면조도를 DFT(Discrete Fourier Transform)기법을 사용하여 식 (3)을 다시 쓰면 다음 식과 같다.

$$Y(t) = \sum_{n=1}^N \alpha_n \cdot \cos(\omega_n t - \theta_n) \quad (4)$$

식 (4)에서 θ_n 을 확률분포(random process)라 가정하면 Y(t)의 Ensemble mean과 Ensemble mean square를 계산하여 노면의 형상은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Y(t) = \sum_{n=1}^N \sqrt{4S(\omega_n)\Delta\omega} \cdot \cos(\omega_n t - \theta_n) \quad (5)$$

식 (5)에서 원주파수 $\omega = 2\pi V\gamma$ (V =속도)의 관계가 있으므로 거리 $s = V \cdot t$ 의 함수로 나타내면 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$Y(s) = \sum_{n=1}^N \sqrt{4S(\gamma_n)\Delta\gamma} \cdot \cos(2\pi\gamma_n s - \theta_n) \quad (6)$$

식 (6)에서 θ_n 은 $[0, 2\pi]$ 영역에서 균일분포를 갖는 함수로 생각하였으며, SSP(Scientific Subroutine Package)⁽¹⁹⁾에 수록되어 있는 Subroutine RANDU를 사용하여 생성시켰다.

H. Honda⁽¹⁷⁾는 교량 노면조도의 PSD의 값을 제안하였다. H. Honda가 제안한 교량 노면조도의 PSD값을 C.J. Dodds와 J.D. Robson이 제안한 여러 가지 도로 종류에 대한 PSD값 중에서 양호한 도로(good road)의 PSD값에 상응한다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 식 (6)과 C.J. Dodds와 J.D. Robson이 제안한 표 1의 양호한 도로의 PSD값을 사용하여 교량의 노면조도를 생성시켜 사용하였다. 이 때 표본길이는 102.4 m로 하였고 이 길이에 대하여 2,048개의 점을 생성시켰다. 차량의 좌우측 차륜이 접하는 노면에 대한 대표적인 오른쪽선과 왼쪽선의 양호한 도로(good road)의 노면조도 예를 그림 1에 나타내었다.

3. 車輛 및 橋梁의 運動方程式

3.1 車輛의 運動方程式

도로교의 동적거동에 영향을 미치는 차량은 그

표 1. 도로의 분류표[16]

Road Class		L(γ_n) Range $10^{-6} \text{ m}^3/\text{cyc.}$	W1		W2	
			mean	σ	mean	σ
Mortor ways	Very Good	2~8	1.945	0.464	1.360	0.209
	Good	8~32				
Principal Roads	Very Good	2~8	2.050	0.487	1.440	0.266
	Good	8~32				
	Average	32~128				
	Poor	128~512				
Minor Road	Average	32~128	2.280	0.534	1.428	0.263
	Poor	128~512				
	Very Poor	512~2048				

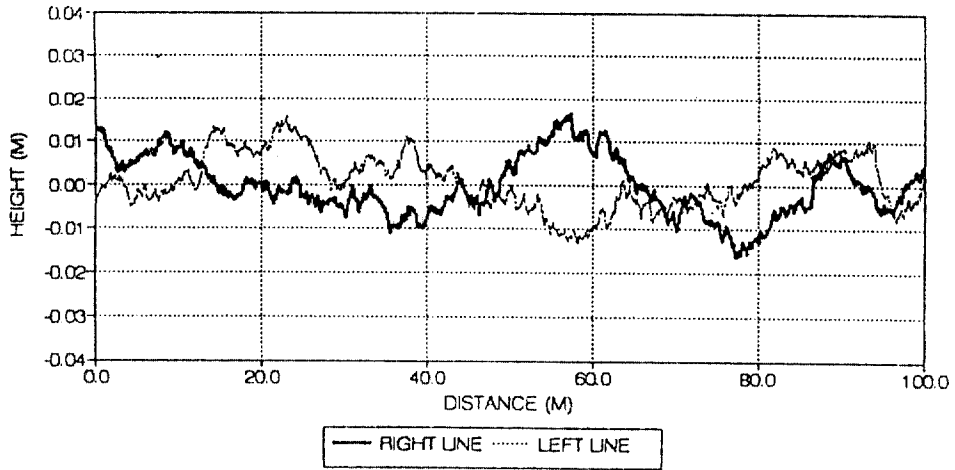


그림 1. 양호한 도로(good road)에 대한 노면조도의 예

종류가 매우 다양하다. 도로상에 운행되고 있는 차량은 차량의 현가장치 때문에 매우 복잡한 거동을 나타내는 기계적인 시스템이다. 이러한 차량을 수학적으로 모델링하기 위하여 지금까지의 연구에서는 주로 1개의 자유도를 갖는 이동질량(moving mass), 몇개의 자유도를 갖는 2차원 이동차량(moving vehicle)으로 이상화시켜 주로 사용하여 왔으나,⁽⁸⁻¹⁴⁾ 최근에 T.L. Wang⁽¹⁵⁾이 3차원 차량모델을 사용하여 교량의 동적응답을 구하였다.

본 연구에서는 교량의 동적응답에 영향을 많이 미치는 대형차량인 트럭과 트랙터-트레일러만을 고려하였다. 그림 2에 나타낸 바와 같이 대형차량인 트럭과 트랙터-트레일러를 각각 7-자유도와 12-자유도를 갖는 3차원 차량으로 모델링하여 사용하였다. 한편, 차량의 수학적 모델링을 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- ① 모든 질량체는 강체이다.
- ② 차체는 수직운동, 피칭(pitching)운동 및 롤링(rolling)운동을 하며, 차체의 중심에 대하여 일어난다.
- ③ 차륜축은 수직운동과 롤링운동을 하며 롤링운동은 차륜축의 무게중심에 대하여 일어난다.
- ④ 차량은 일정한 속도로 주행한다.
- ⑤ 차량의 모든 요소는 종방향으로 같은 속도로 이동한다.
- ⑥ 타이어는 도로와 하나의 점에서 항상 접촉한다.
- ⑦ 차량의 현가장치는 다판스프링(multi-leaf sp-

ring)이다.

⑧ 현가장치의 스프링 상수는 선형이며 일정한 크기의 마찰력으로 구성되어 있다고 가정한다. 그리고 현가장치에 의해 발생하는 마찰력의 크기는 일정한 것으로 가정한다.

⑨ 현가장치의 감쇠는 선형으로 가정하고 점성 감쇠로 가정한다. 감쇠력은 속도에 비례하며 임계값의 10%를 사용하였다.

⑩ 타이어는 선형 탄성 스프링으로 가정한다. 그리고 타이어의 감쇠는 무시한다.

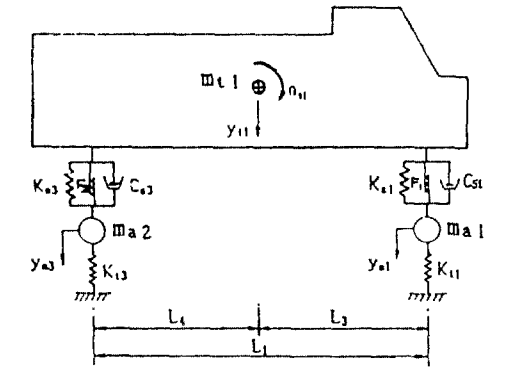
차량의 현가장치에는 여러가지 종류가 있으나 트럭의 현가장치로 많이 사용되고 있는 다판스프링으로 가정하였다. 다판스프링의 현가장치는 매우 복잡한 비선형 거동을 나타내나, 차량모델의 단순화를 위하여 현가장치의 현가력을 선형탄성 스프링력과 일정한 크기의 마찰력으로 구성되어 있다고 가정하였다. 현가장치의 힘-변위 곡선을 그림 3에 나타내었다. 그리고 타이어 스프링은 선형으로 가정하였다.

차량의 운동방정식은 Lagrange's 방정식을 사용하여 유도하였다.

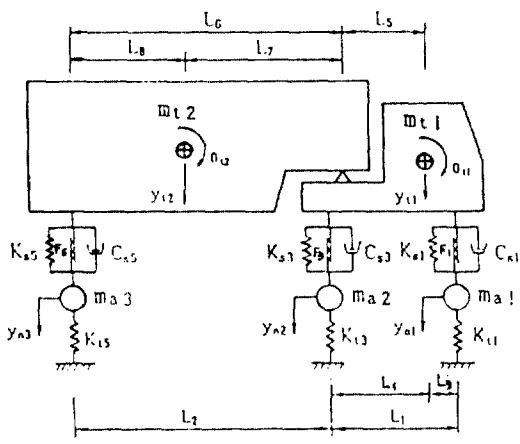
$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} - \frac{\partial V}{\partial q_i} - \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = 0 \quad (7)$$

여기서,

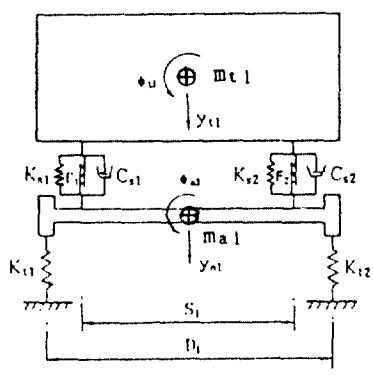
- T = 차량 시스템의 전체 운동에너지
- V = 차량 시스템의 전체 위치에너지
- D = 차량 시스템의 전체 분산에너지



(a) 트럭의 측면도



(b) 트랙터-트레일러의 측면도



(c) 정면도

그림 2. 3차원 차량모델

q_i, \dot{q}_i = 차량의 일반화된 변위와 속도
 차량의 전체 운동에너지 $T = \Sigma T_i$ 는 차량 시스템 요소의 질량 및 수직변위의 속도와 피칭 및 롤링에 대한 회전속도를 사용하여 계산하고, 차량의 전체

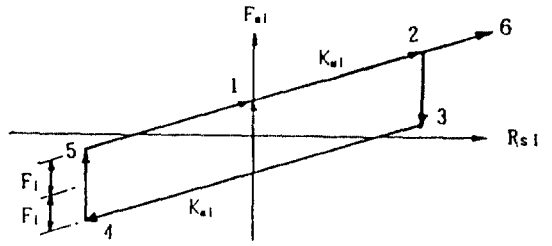


그림 3. 현가스프링의 힘-변위 관계도

위치에너지 $V = \Sigma V_i$ 는 현가장치 및 타이어의 스프링 강성과 각 스프링의 상대변위(relative displacement)를 구하여 계산할 수 있다. 이들 값을 식 (7)에 대입하여 차량의 운동방정식을 구하였다.

3.2 橋梁의 運動方程式

교량의 해석모델은 유한요소를 사용하여 3차원으로 모델링하였다. 이 때 주형 및 가로보는 3차원 요소로 이상화시키고, 철근콘크리트 바닥판은 쉘 요소(shell element)를 사용하여 이상화시켰으며, 주형과 바닥판은 Rigid Link를 사용하여 연결시켰다. 한편, 교량의 운동방정식은 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$[M_B]\{\ddot{x}\} + [C_B]\{\dot{x}\} + [K_B]\{x\} = \{F_B(t)\} \quad (8)$$

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

식 (8)에서 교량과 차량 사이의 상호작용에 의한 i 번째 차륜과 노면 사이의 상호작용력 $\{F_B(t)\}$ 는 다음 식과 같다.

$$F_B(t) = K_{ti} \cdot R_{ti} \quad (9)$$

여기서, K_{ti} 는 i번째 차륜의 타이어 스프링 강성을 나타내고, R_{ti} 는 i번째 차축과 교량 사이의 상대변위로 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$R_{ti} = y_{ti} - (G_{ti}) - (y_{bi}) \quad (10)$$

여기서,

$y_{ii} = i$ 번째 차륜의 수직변위

$G_{ri} = i$ 번째 차륜에서의 노면조도로 상향이 양의 값이다.

$y_{bi} = i$ 번째 차륜에서 교량의 수직변위로 상향이 양의 값이다.

식 (10)에서 요소내의 수직변위 y_{bi} 는 식 (8)의 절점변위 $\{x\}$ 를 사용하여 구하였으며 선형형상함수를 사용하였다.

4. 解析方法

교량의 운동방정식은 선형 운동방정식이지만 차량의 운동방정식은 현가장치의 비선형성 때문에 비선형 운동방정식이 된다. 본 연구에서 교량의 운동방정식은 모우드 중첩법을 사용하여 풀었고, 차량의 운동방정식은 Newmark의 β 법을 사용하여 풀었다. 식 (8)의 교량의 운동방정식에서 우변의 하중항은 교량의 변위에 따라 달라지게 된다. 그러므로 각각의 시간 단계에서 교량의 변위 오차가 원하는 오차 범위 이내에 들 때까지 반복계산을 실시하여야 한다. 교량의 변위 오차율은 다음 식으로 구하였다.

$$Tol = \frac{|\delta_i - \delta_{i-1}|}{|\delta_i|} \quad (11)$$

여기서,

Tol = 변위오차율

$\delta_i = i$ 번째 단계에서 새로 구한 변위

$\delta_{i-1} = i-1$ 번째 단계에서의 변위

차량의 동적 축하중을 계산하기 위해서는 교량의 변위와 노면조도가 필요하다. 교량의 노면조도는 교량의 좌측 교대에서부터 차량길이의 약 3~5배 정도 떨어진 곳에서부터 고려하고 이 곳에서부터 차량을 출발시켜 차량의 동적거동이 안정을 찾았을 때 교량에 진입하도록 하였다. 차량이 교량에 진입한 후부터는 노면조도와 교량의 변위를 고려하여 차량의 동적축하중을 구하였다. 그리고 차륜이 절점상에 위치하지 않는 경우에는 요소의 각 절점변위를 사용하여 차륜이 위치하는 점에서의 교량 변위를 구하였다. 전체적인 컴퓨터 프로그램의 계산 순서를 흐름도로 그림 4에 나타내었다.

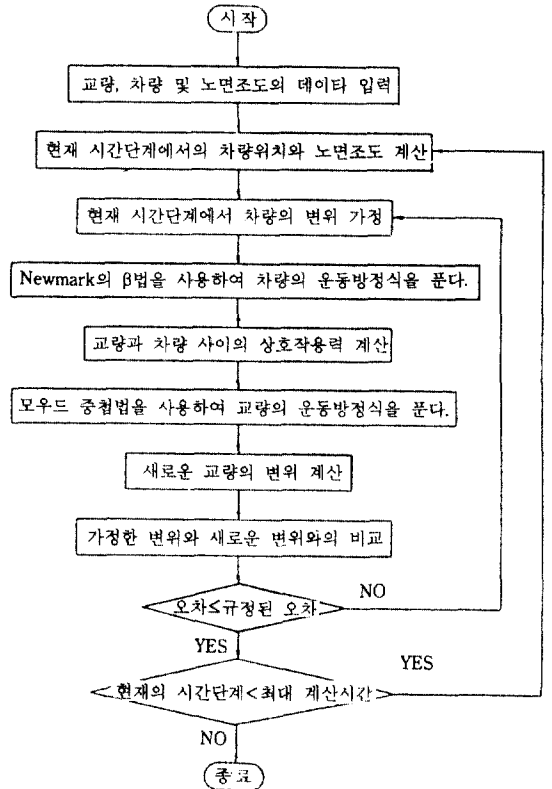


그림 4. 컴퓨터프로그램의 계산 순서도

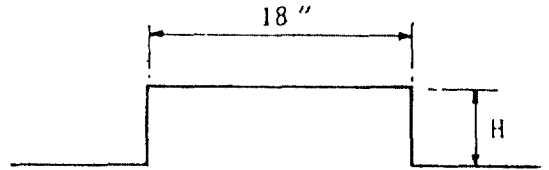


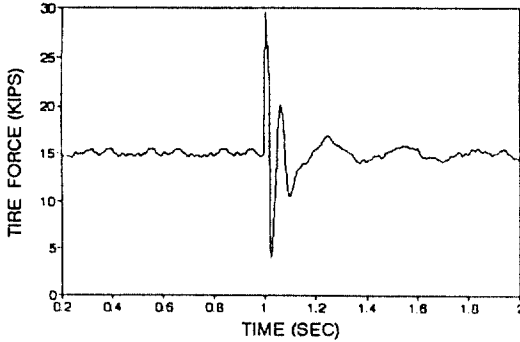
그림 5. Step Bump의 측면도

5. 數値解析의 例

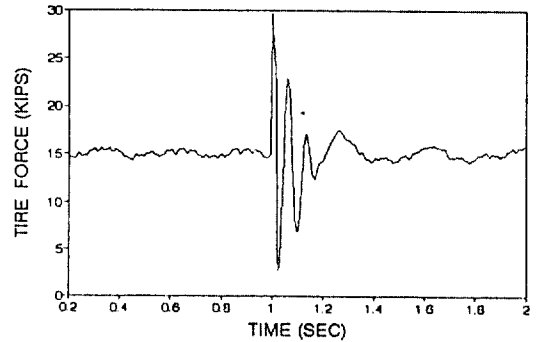
5.1 車輛의 動的舉動 特性

수학적인 차량모델이 실제 차량의 동적거동과 유사하게 거동하는지를 검토하기 위하여 A.P. Whittemore와 J.R. Wiley⁽¹⁸⁾ 등이 도로포장의 동적축하중을 연구하기 위하여 실시한 실험결과를 사용하였다. 그림 5에 나타난 바와 같은 3/4 in.(높이)×18 in.(길이)와 1/2 in.(높이)×18 in.(길이)의 스텝범프(step bump)를 차량이 통과할 때 차량의 타이어에 발생되는 동적축하중을 측정하였다.

본 연구에서는 차량에 대한 자료를 T. Huang⁽¹²⁾이

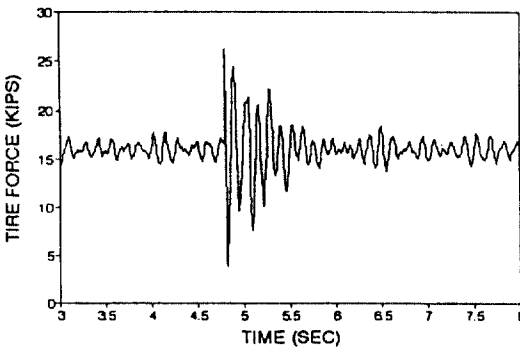


(a) 감쇠

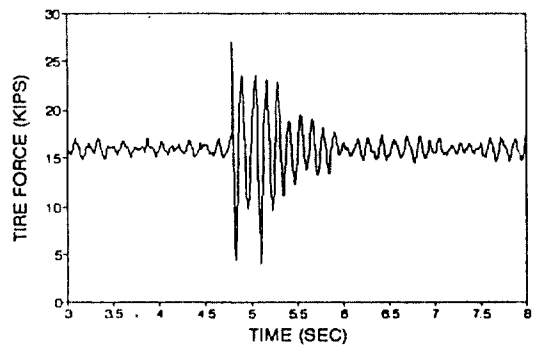


(b) 비감쇠

그림 6. 3/4" 범프 통과시 트럭 뒷축의 타이어력(55 Mph)

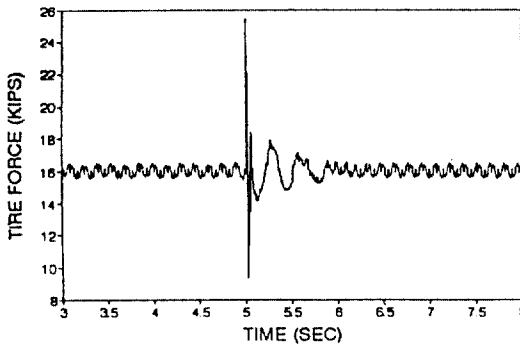


(a) 감쇠

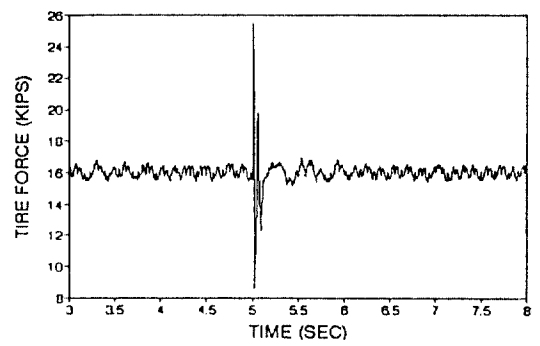


(b) 비감쇠

그림 7. 1/2" 범프 통과시 트럭 뒷축의 타이어력(45 Mph)



(a) 감쇠



(b) 비감쇠

그림 8. 1/2" 범프 통과시 트럭 뒷축의 타이어력(45 Mph)

제안한 여러가지 계수들을 사용하였다. A.P. Whittemore 등이 측정된 실험값과 본 연구에서 수치적인 방법으로 구한 값을 서로 비교하였다. 그리고 단위는 실험값과 비교하기 위하여 ksi 단위를 사용하였다.

3/4 in.(높이)×18 in.(길이)와 1/2 in.(높이)×18 in.(길이)의 스텝범프를 각각 트럭과 트랙터-트레일러가 통과할 때 트럭의 뒷축과 트랙터의 뒷축 및 트레일러 뒷축에 발생하는 타이어력을 프로그램을 사용하여

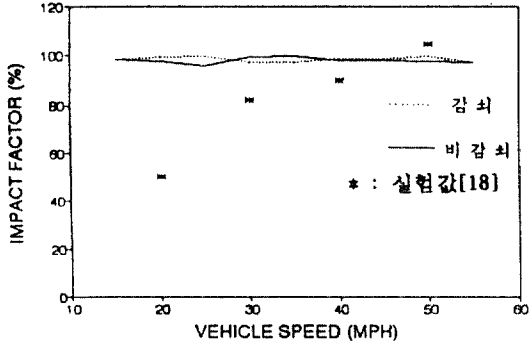


그림 9. 3/4" 범프 통과시 속도에 따른 트럭 뒷축 타이어력의 충격계수

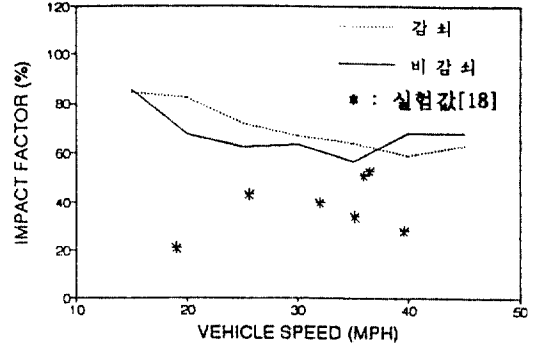


그림 11. 1/2' 범프 통과시 속도에 따른 트랙터 뒷축 타이어력의 충격계수

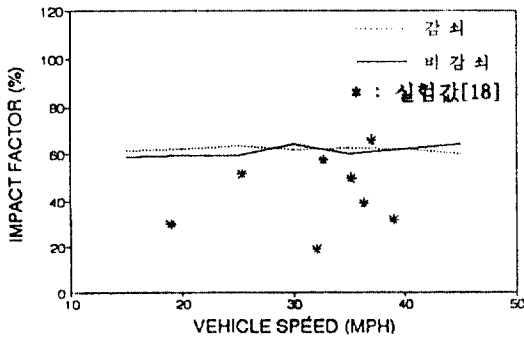


그림 10. 1/2" 범프 통과시 속도에 따른 트럭 뒷축 타이어력의 충격계수

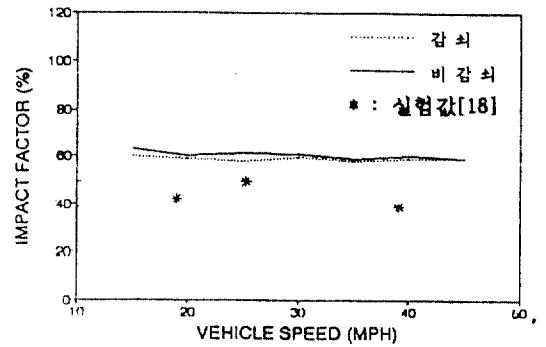


그림 12. 1/2" 범프 통과시 속도에 따른 트레일러 뒷축 타이어력의 충격계수

구한 결과를 그림 6에서부터 그림 8에 각각 나타내었다. 또한, 차량의 속도를 트럭에 대하여는 15 Mph에서부터 55 Mph까지 5 Mph씩 증가시키고, 트랙터-트레일러에 대하여는 15 Mph에서부터 45 Mph까지 5 Mph씩 증가시키면서 스태뎀프를 통과할 때 발생하는 트럭의 타이어력을 각각 그림 9에서부터 그림 12에 나타내었다. 타이어력의 수치해석에서는 현가장치의 감쇠를 고려하지 않은 경우와 고려한 경우에 대하여 각각 검토하였다. 이 때 감쇠비는 임계 감쇠비의 10%를 사용하였다.

수치해석 결과에 의하면 그림 9에서부터 그림 12에서와 같이 트럭과 트랙터-트레일러가 스태뎀프를 통과할 때 차량의 최대 타이어력의 충격계수는 현가장치의 감쇠를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 값이 서로 크게 다르지 않음을 알 수 있다. 그러나 그림 6에서부터 그림 8에서 보는 바와 같이 현가장치에 감쇠를 고려한 경우가 고려하지 않은

경우 보다 빠른 시간내에 정적 축하중에 접근함을 알 수 있다. 실제로 차량이 낮은 속도로 스태뎀프를 통과하면 타이어가 충격을 어느 정도 흡수하기 때문에 차량의 주행속도가 빠를 때보다 타이어력의 충격계수가 작아진다. 그러나 본 연구에서 타이어는 도로와 하나의 점에서 항상 접촉하는 선형스프링으로 가정하였기 때문에 차량이 스태뎀프를 통과하는 경우에는 주행속도에 관계 없이 거의 일정하게 나타나는 것으로 생각된다. 그러나 대부분 도로의 노면조도는 스태뎀프와 같이 급격히 변하지 않으므로 일반적인 도로에서는 충격계수가 속도에 따라 변하는 값이 된다.

5.2 實驗 橋梁과의 比較

본 연구에서 개발한 3차원 차량모델과 교량의 동적해석 방법의 타당성을 검토하기 위하여 실제 교량에서 실험한 실험값과 본 연구에서 수치적인

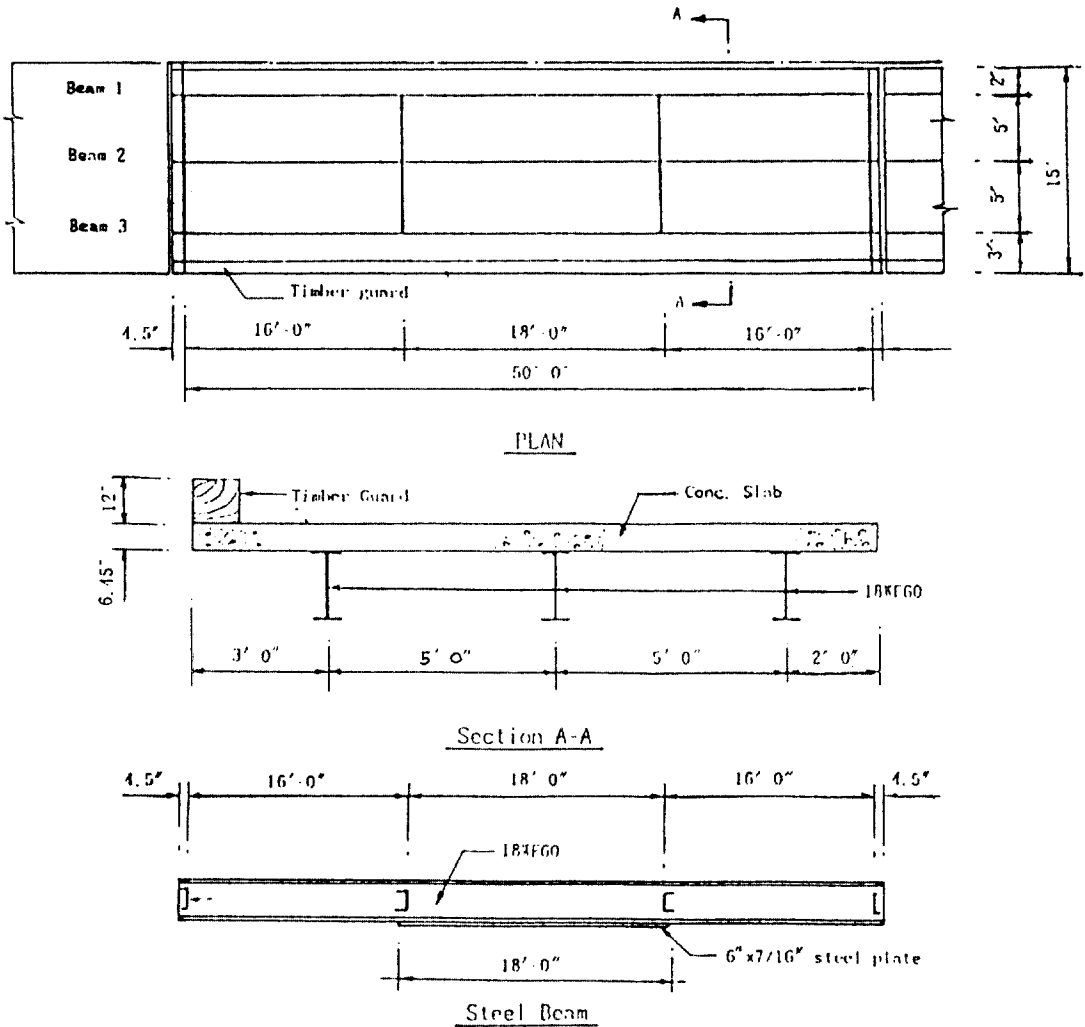


그림 13. "3B 교량"의 평면도 및 단면도

해석방법으로 계산한 결과를 비교 검토하였다. 실험교량으로는 S.J. Fenves 등^(6,7)이 "AASHTO 도로시험"에서 실험을 목적으로 특별히 제작한 단순 강합성교인 "3B 교량"을 대상으로 하였고, 차량은 "Vehicle 91"로 명명한 실험차량을 재하시켜 얻은 결과를 본 연구에서 계산한 결과와 비교 검토하였다.

5.2.1 橋梁 및 車輛의 諸元

"3B 교량"은 그림 13에 나타난 바와 같이 지간이 50ft이고 폭이 15ft인 단순 강합성교로서 3개의 강주형과 철근콘크리트 바닥판으로 구성되어 있다. 강주형의 탄성계수는 3.0×10^4 ksi이고, 바닥판 철근콘크리트의 탄성계수는 5.0×10^3 ksi이다. 강주형은

18WF60의 와이드 플랜지를 사용하였으며 주형의 중앙부에 $6" \times 7/16"$ 의 덮개판이 부착되어 있고, 콘크리트 바닥판의 두께는 6.45"이다. Beam 1, Beam 2와 Beam 3에 대한 단면2차 모멘트는 각각 4.36×10^3 in⁴, 4.29×10^3 in⁴과 4.16×10^3 in⁴이고 전체 교량의 휩강성 EI는 384.3×10^6 kip-in²이며, 전체 교량의 자중은 76.2 kips이다.

실험차량인 "Vehicle 91"은 총중량이 21.3 kips인 2축트럭이며 이 차량에 대한 제원은 참고문헌[7]의 값을 사용하였다. 본 연구에서 실험차량인 "Vehicle 91"은 그림 2에 나타난 2축 트럭으로 모델링하였다.

5.2.2 動的解析

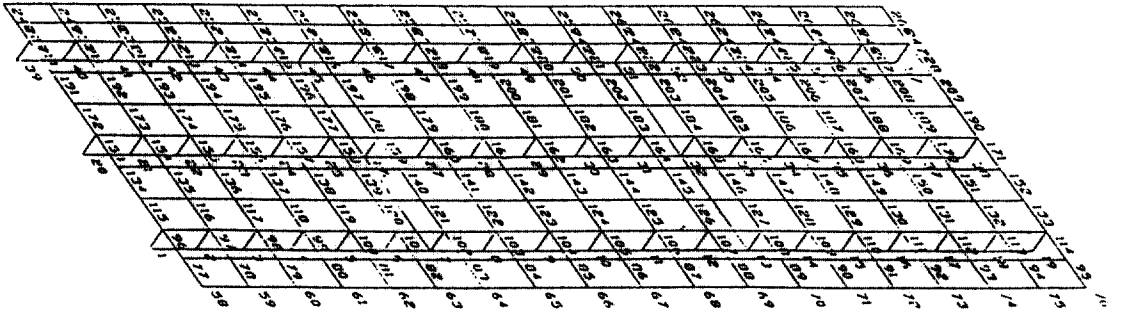


그림 14. "3B 교량"의 모델링도

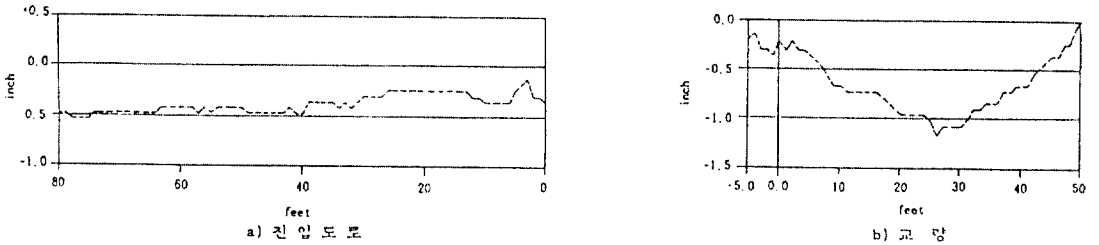


그림 15. "3B 교량"의 노면조도[7]

실제의 교량을 그림 14에 나타난 바와 같이 주형은 보요소를 사용하고 콘크리트 바닥판은 셀요소를 사용하여 3차원으로 모델링하였다. 주형은 한 지간을 18개 요소로 분할하였다. 콘크리트 바닥판은 종방향으로 18구간, 횡방향으로 10구간으로 분할하였다. 또한 주형과 바닥판은 Rigid Link를 사용하여 연결하였다. 이렇게 교량을 3차원으로 모델링 하였을 때 총 자유도수는 1,360개가 된다.

실험교량에 대한 동적해석시 교량의 노면조도는 S.J. Fenves 등이 실제의 교량에서 측정한 노면조도를 사용하였다. 해석시 사용한 교량의 노면조도는 그림 15에 나타내었다. 차량(vehicle 91)은 교량의 좌측 교대에서 차량길이의 약 5배인 660 inch 떨어진 곳에서부터 출발하여 차량의 뒷축이 교량을 완전히 지나갈 때까지 해석하였다. 이 때 차량의 양쪽 차륜이 접하는 노면조도는 서로 같은 것으로 가정하였다. 교량의 감쇠비는 실제의 교량 실험에서 측정된 값인 임계 감쇠비의 0.8%를 사용하였다. 모드 중첩법을 사용하여 교량의 동적해석을 실시할 때 첫 번째와 두 번째 모드에만 각각 임계 감쇠비의 0.8%를 사용하였다. 그리고 시간 간격은 $\Delta t=0.0004$ 초로 하였다.

표 2. "3B 교량"의 고유진동수

모우드 형상 번호	고유주기 (Hz)	모우드 형상 번호	고유주기 (Hz)
1 st	4.318	6 th	35.100
2 nd	7.444	7 th	37.170
3 rd	16.290	8 th	39.890
4 th	19.920	9 th	44.480
5 th	33.130	10 th	52.490

모우드 중첩법을 사용하여 교량의 동적해석을 실시할 때 모우드는 30개의 모우드를 사용하여 응답을 구하였고 부공간 반복법을 사용하여 모우드를 구하였다.

교량의 첫번째 고유진동수는 본 연구에서 해석적인 방법으로 구한 값이 4.318 HZ이고 실험에서 구한 실험값이 4.39 HZ로 약 1.7%의 오차가 있다. 본 연구에서 구한 교량의 고유진동수를 표 2에 나타내었다.

차량과 교량이 정상적으로 동적거동을 하는지를 검토하기 위하여 먼저 차량의 속도가 거의 정적 하중에 가까운 3 Mph로 주행할 때를 검토하여 보

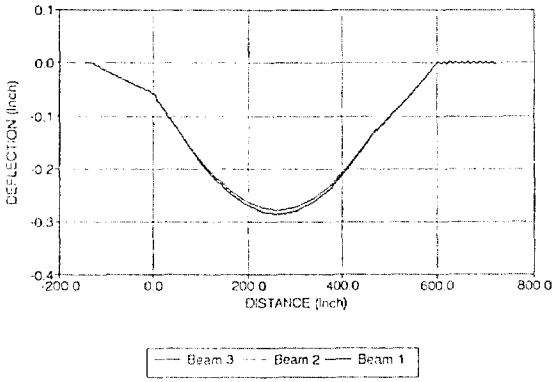


그림 16. 시간 중앙점에서의 각 주형의 처짐 이력곡선 (3 Mph)

았다. 계산 결과를 그림 16에 나타낸 바와 같이 정적해석으로 구한 값과 차량이 3 Mph로 주행할 때 동적해석으로 구한 값이 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 실험에서는 정적시험 대신에 차량이 3 Mph로 주행할 때 중앙주형(Beam 2)의 시간 중앙에서의 변위를 측정하였다. 이 때 17번 실험하여 구한 Beam 1, Beam 2와 Beam 3의 평균 처짐값은 각각 0.276", 0.270", 0.268"이고 본 논문에서 구한 정적 처짐의 값은 각각 0.285", 0.284"와 0.277"로서 오차가 각각 3.3%, 5.2%와 3.4%로 매우 잘 일치하였으며, 차량의 주행속도가 3 Mph일 때 동적해석으로 구한 계산값은 각각 0.286", 0.285"와 0.278"이다.

다음으로 차량의 속도에 따른 교량의 동적 특성을 파악하기 위하여 다음 식과 같은 속도매개변수(speed parameter)를 사용하였다.

$$\alpha = \frac{v \cdot T_b}{2L} \quad (12)$$

여기서,

- α = 속도매개변수
- v = 차량의 속도
- T_b = 교량의 고유주기
- L = 교량의 지간

그리고 최대 동적응답에 대한 최대 정적응답의 비인 증폭계수(amplification factor) A.F.는 다음 식과 같이 정의하였다.

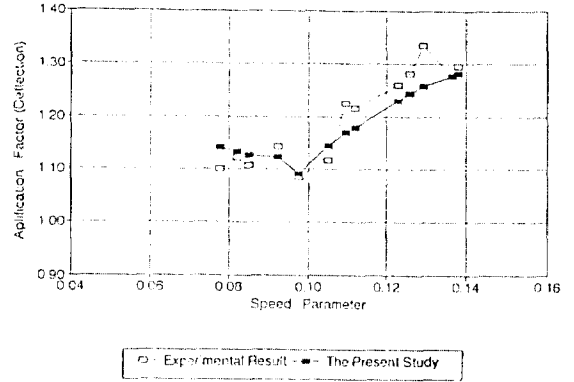


그림 17. 속도매개변수에 따른 처짐의 동적 증폭계수에 대한 실험값과 계산값의 비교

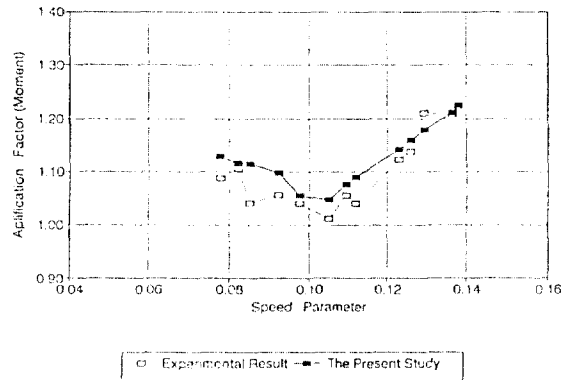


그림 18. 속도매개변수에 따른 모멘트의 동적 증폭계수에 대한 실험값과 계산값의 비교

$$A \cdot F = \frac{AF_D}{AF_S} \quad (13)$$

여기서,

AF_D = 동적해석으로 구한 절대 최대응답

AF_S = 정적해석으로 구한 절대 최대응답

위에서와 같이 정의한 속도매개변수에 따른 교량의 동적 증폭계수를 그림 17과 그림 18에 나타내었다. 그림 17은 중앙 보의 시간 중앙점에서의 처짐에 대한 값을 나타내고 그림 18은 중앙보의 시간 중앙점에서의 모멘트에 대한 값을 나타낸다. 그림 17과 그림 18에서 보는 바와 같이 본 연구에서 개발한 3차원 차량모델과 교량모델을 사용하여 계산한 값과 측정된 실험값이 매우 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 실측을 통하여 얻은 처짐에 대한

동적 증폭계수는 주행속도에 따라 약 1.10에서 1.30 까지 증가하고 모멘트에 대한 동적 증폭계수는 약 1.05에서 1.22까지 증가한다. 동적 증폭계수는 처짐에 대한 값이 모멘트에 대한 값보다 약간 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 또한, 실측으로 구한 처짐에 대한 동적 증폭계수는 속도매개변수가 0.09에서 0.10 사이에서는 서서히 감소하는 경향을 보이고 속도매개변수가 0.10보다 큰 경우에는 이보다 급하게 증가함을 알 수 있다. 모멘트에 대한 동적 증폭계수는 속도매개변수가 약 0.10보다 작을 때는 약간 감소하여 속도매개변수가 0.10일 때는 거의 1.0에 접근하며 속도 매개변수가 0.10보다 큰 경우에는 점점 증가함을 알 수 있다.

6. 結 論

본 연구에서는 3차원 차량모델을 개발하여 차량과 교량을 3차원으로 모델링하고 교량의 노면조도와 교량과 차량 사이의 상호작용력을 고려한 교량의 선형 동적해석을 수행할 수 있는 해석적인 방법을 제시하였다.

본 연구에서 개발한 3차원 차량모델과 교량을 사용하여 S.J. Fenves 등이 "AASHO 도로시험"에서 단순 강합성교에 대하여 실시한 실험 결과와 본 연구에서 해석적인 방법으로 구한 값을 비교하였다. 해석 결과 본 연구에서 해석적인 방법으로 구한 값과 실험값의 비교에서 교량의 고유진동수는 2.0% 이내의 오차가 있으며, 지간 중앙점에서의 정적처짐은 오차가 5% 이내로 매우 잘 일치하였다. 또한, 교량의 동적해석에서 속도매개변수에 따른 지간 중앙점에서의 처짐과 휨모멘트의 동적 증폭계수는 본 연구에서 해석적인 방법으로 구한 값과 실험값이 매우 유사한 경향을 보였으며, 그 결과는 매우 만족할만한 결과를 얻었다.

본 연구에서는 적용 예에서 실험 교량인 단순 강관형교만을 다루었으나, 본 연구에서 개발한 도로의 노면형상과 3차원 차량모델 및 교량의 동적 해석 방법은 연속교 및 기타 형식의 도로교에도 적용시킬 수 있으므로 도로교에 관한 동적응답의 연구에 적용시킬 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 "93년 핵심전문연구" KOSEF 931-1200-020-1에 의하여 연구된 논문으로 한국과학재단에 깊은 감사를 드립니다.

參考文獻

1. 建設部, "道路橋標準示方書", 1992.
2. AASHTO, "Standard Specification for Highway Bridges", 14th Edition, 1989.
3. OHBDC, "Ontario Highway Bridge Design Code", Ministry of Transportation and Communications, Downsview, Ontario, 1983.
4. SIA, "Schweizer Norm", SIA, Switzerland, November, 1985.
5. 日本道路橋協會, "道路橋示方書.同解説", 1990년.
6. "The AASHO Road Test", Highway Research Board, Report 4, Bridge Rearch, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1962.
7. 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.
8. O'Connor, C. and Prichard, R.W., "Impact Studies on Small Composite Girder Bridge", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 3, March, 1985.
9. Fryba, L., "Vibration of Solid and Structures under Moving Loads", Noordhoff International Publishing, 1970.
10. Biggs, J.M., *Introduction to Structural Dynamics*, McGraw-Hill, 1982.
11. Inbanathan, M.J. and Wieland, M., "Bridge Vibrations Due to Vehicle Moving over Rough Surface", ASCE, Vol. 113, No. ST9, September, 1987.
12. Huang, T., "Dynamic Response of three-Span continuous Highway Bridge", Ph.D. Dissertation, University of Illinois, IL., 1960.
13. Gupta, R.K., "Dynamic Loading of Highway Bridges", ASCE, Vol. 106, No. EM2, April, 1980.
14. Hwang, E.S., "Dynamic Loads for Girder Bridges", PhD Thesis, University of Michigan, 1990.
15. Wang, T.L., Huang, D. and Shahawy, M., "Dynamic Response of Multigirder Bridges", ASCE, Vol. 118, No. ST8, August, 1992.
16. 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.
17. Honda, H., Kajikawa, Y. and Kobori, T., "Spectra

- of Road Roughness on Bridges”, ASCE, Vol. 108, No. ST9, September, 1982.
18. Whittemore, A.P., Wiley, J.R., Schulte, P.C. and Pollock, D.E., “Dynamic Pavement Load of Highway Vehicles”, National Cooperative Highway Research Program Report, Washington, D.C., 1970.
 19. I.B.M., “Application Program: System/360 Scientific Subroutine Package Version III”, 5th Edition, 1970.
 20. 정태주, 박영석, “3차원 차량모델과 노면 조도에 따른 차량의 동적하중에 관한 연구”, 한국강구조학회, 학술발표대회 논문집, 1993. 6.
(接受 : 1994. 3. 29)