

4축 단일차량에 의한 도로교의 동적응답에 관한 연구

A Study on the Dynamic Response of Highway Bridges by 4-Axles Single Truck

정 태 주¹⁾

Chung, Tae Ju

요 약 : 본 연구에서는 4축 단일차량에 타이어의 접지폭을 고려한 새로운 3차원 차량모델을 개발하여 도로교의 동적응답을 구할 수 있는 수치해석방법을 개발하였다. 3차원 차량모델에는 타이어의 접지폭과 텐덤 스프링 차륜축의 피칭을 고려하고 4축 단일차량을 10-자유도를 갖는 차량으로 모델링하였다. 차량의 운동방정식은 Lagrange 방정식을 사용하여 유도하였으며 Newmark- β 법을 사용하여 그 해를 계산하였다. 본 연구에서 개발한 3차원 차량모델을 이용하여 구한 수치해석 결과와 실제 교량에서 실시한 실험값을 비교 검토하여 그 타당성을 입증하였다. 수치해석으로 구한 해석값은 실험값과 매우 유사한 경향을 나타내었다. 차량의 동적 해석에서는 4축 단일차량인 24톤 덤프트럭이 여러 가지 스텝 범프를 통과할 때 발생하는 타이어력의 최대 충격계수를 구하였다.

ABSTRACT : In this paper, a research for the dynamic wheel loads of a 3D vehicle model, which relates to a tire-enveloping model, is carried out. A single truck with four axles is modeled as a 10-D.O.F. vehicle by modeling both contact length of tires and pitching of tandem spring axles. The dynamic equations of the vehicle are obtained using the Lagrange's equation, the solution of the equations is calculated by Newmark- β method. The validity of the developed 3D vehicle model is demonstrated by comparing results obtained from the proposed method with those from experimental data. The maximum impact factors of tire force are evaluated according to the various step bumps on which a 24-ton dump truck is running.

핵심용어 : 도로교, 4축 단일차량 모델, 동적해석, 충격계수, 타이어력

KEYWORDS : highway bridge, Four axles single vehicle model, dynamic analysis, impact factor, tire force

1. 서론

도로를 주행하는 차량의 차륜하중은 도로 노면 및 도로교의 하중으로 작용하기 때문에 도로교 설계 시 가장 중요한 설계 인자 중 하나이다. 도로를 적법하게 운행하는 차량은 그 종류가 매우 다양하고 복잡한 구조로 구성되어 있기 때문에 차량을 수학적으로 모델링하여 차량의 차륜하중을 구하기가 쉽지 않다. 도로를 주행하는 많은 종류의 차량 중에서 도로 노면 및 도로교에 큰 영향을 미치는 차량은 주로 대형차량이다. 최근에 이르러 자동차 공학의 발전과 물류비 등의 절감을 위하여 차량이 점점 대형화 및 중량화되는 추세에 있다. 1990년대 초반까지만 해도 단일차량의 경우 3축 단일차량인 11톤 카고 트럭 및 15톤 덤프트럭이 주로 운행되었으나 2000년대

초반 이후에 4축 단일차량인 18톤 카고 트럭 및 24톤 덤프트럭이 개발되어 운행되고 있으며 그 수요가 계속 증가하는 추세에 있다. 4축 단일차량인 24톤 덤프트럭은 총 중량이 380kN 정도로 1등교 표준트럭하중인 DB-24하중의 총 중량 432kN에 거의 근접하고 전체 차축간의 거리도 5.9m로 DB-24하중 전체 차축간의 거리 8.4m보다 짧다.

2007년 12월 31일 기준으로 우리나라에 건설된 전체 교량은 24,923개이고 이 중에 1등교가 18,070개로 72.5%를 차지하고 있으며, 지방도 및 군도에 주로 건설된 2등교 이하 등급의 교량이 6,853개로 약 27.5%를 차지하고 있다(국토해양부, 2008). 과거에는 지방도 및 군도를 운행하는 대형차량의 빈도가 상대적으로 낮았으나 도시 주변을 비롯한 지방 지역에 각종 개발 사업으로 인한 건설현장 및 석산 개발 등으

1) 교신저자. 한라대학교 토목공학과 교수, 공학박사
(Tel:033-760-1263, Fax:033-760-1261, E-mail: tjchung@halla.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2011년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

로 인하여 대형 덤프트럭 및 덤프 트레일러의 운행 횟수가 많이 증가하고 있다. 이들 대형차량으로는 주로 4축 단일차량인 24톤 덤프트럭이 주로 운행되고 있으며 총 중량이 380 kN 정도로 2등교와 3등교의 설계하중의 총 중량을 초과하고 있는 실정이다. 그리고 도로교설계기준에 규정된 2등교와 3등교의 설계하중인 DB-18하중과 DB-13.5하중은 단일차량이 아닌 트랙터-트레일러를 기준으로 규정되어 있기 때문에 4축 단일차량인 24톤 덤프트럭이 2등교 이하 등급 교량에 미치는 영향을 연구하는 것이 필요한 실정이다.

도로의 노면 및 도로교에 하중으로 작용하는 차량은 도로의 노면조도, 차량의 현가장치 및 감쇠, 차량의 중량, 길이와 속도 등에 따라 다른 동적 거동 특성을 나타낸다. 이러한 영향을 고려하기 위한 연구에서는 대부분 차량의 수직운동과 피칭운동만을 고려한 2차원 차량모델을 많이 사용하여 왔으나 (Blejwas 등, 1979; Wang 등, 1992; Gupta, 1980; Huang, 1960; Hwang, 1990; Inbanathan 등, 1987), 근래에 이르러 차량의 수직, 피칭과 롤링 운동을 고려한 3차원 차량모델을 사용하여 차량의 동적 거동을 연구하는 추세에 있다(정태주, 1993; 정태주, 2002; 정태주 등, 2006; 정태주 등, 2008; Wang, 1992). 김철우(1997)는 텐덤 다판스프링에 두 개의 차축을 고려한 차량모델을 사용하여 도로교의 동적 응답을 연구하는데 사용하였고, 정태주(2006; 2008)는 3축 단일차량 및 트랙터-트레일러에 대하여 차량 타이어의 접지폭을 고려하고 대형차량의 후륜에 많이 사용하는 텐덤 다판스프링의 현가장치에 두 개의 차축을 고려하여 지금까지 사용한 3차원 차량모델과는 달리 좀 더 개선된 새로운 3차원 차량모델을 사용하여 도로교의 동적응답 및 동적하중허용계수에 대하여 연구하였다. 지금까지 도로교의 동적응답을 연구하기 위하여 사용한 차량모델 중 단일차량의 경우 2축 및 3축 단일차량에 대한 3차원 차량모델은 개발되었으나, 4축 단일차량에 대한 차량모델은 개발되지 않은 상태이다.

따라서 최근에 개발되어 석산 개발 및 각 종 건설현장 등에서 많이 운행되고 있는 4축 단일차량인 24톤 덤프트럭이 도로교에 미치는 영향을 연구하기 위하여 본 연구에서는 4축 단일차량인 24톤 덤프트럭을 10-자유도인 3차원 차량모델로 모델링하고 차량의 타이어 접지폭 및 텐덤 다판스프링의 현가장치에 두 개의 차축을 고려한 3차원 차량모델을 개발하고자 한다. 본 연구에서 개발한 3차원 차량모델을 사용하여 수치해석방법으로 구한 해석값을 실험 교량에서 구한 실험값과 비교 검토하여 본 연구의 타당성을 입증하고, 단일차량인 24톤 덤프트럭이 여러 가지 스텝 범프를 통과할 때 발생하는 타이어력의 충격계수를 구하였다. 그리고 향후 발표 예정인 논문에서는 본 연구에서 개발한 3차원 차량모델을 사용하여 여러 가지 형식의 도로교에 발생하는 동적응답을 연구할 계획이다.

2. 차량과 교량의 운동방정식

2.1 차량의 운동방정식

본 연구에서는 4축 단일차량을 그림 1에 나타난 바와 같이 현가장치에 의해 받혀지는 현가장치 상질량(Sprung Mass)과 현가장치 하질량(Unsprung Mass)으로 구분하여 3차원으로 모델링하였다. 여기서, 현가장치 상질량은 차체이고 현가장치 하질량은 차륜축이며, 차륜은 차륜축에 포함시켰다.

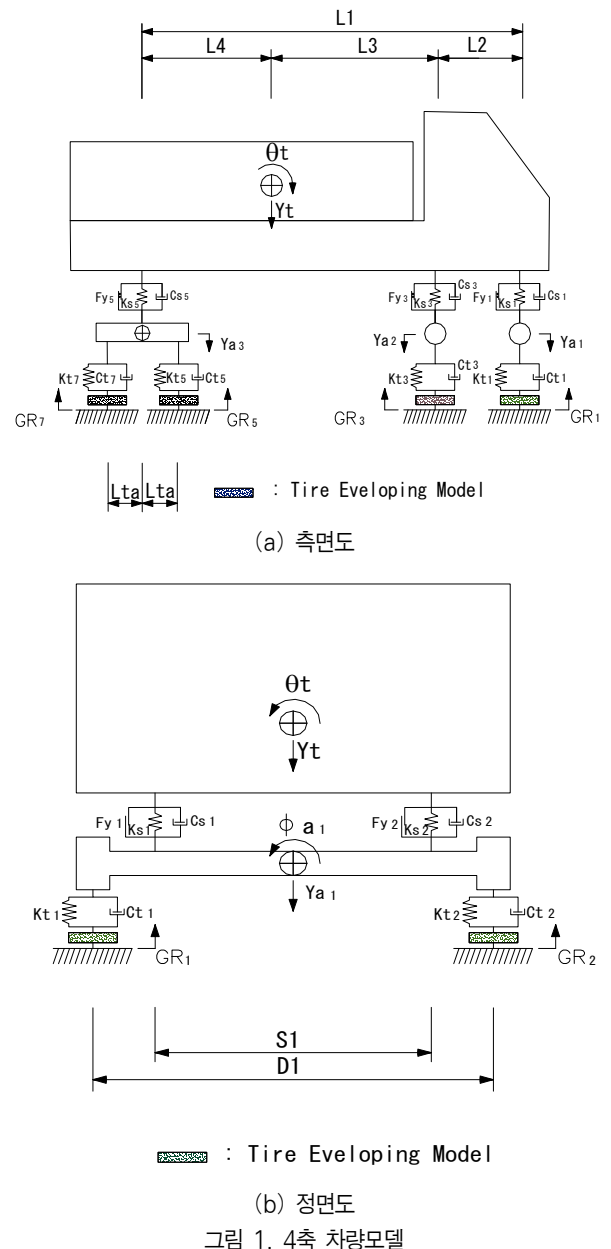


그림 1. 4축 차량모델

그림 1에 나타난 차량모델에 대한 운동방정식은 식 (1)을 사용하여 유도할 수 있다. 차량의 전체 운동에너지 $T = \sum T_i$

는 차량 시스템 요소의 질량 및 수직변위의 속도 \dot{Y} 와 피칭 및 롤링에 대한 회전속도 $\dot{\theta}$ 와 $\dot{\phi}$ 를 사용하여 계산하고, 차량의 운동방정식은 Lagrange 방정식을 사용하여 유도하였다.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = 0 \quad (1)$$

여기서, T = 차량 시스템의 전체 운동에너지.

V = 차량 시스템의 전체 위치에너지.

D = 차량 시스템의 전체 분산에너지.

q_i 와 \dot{q}_i = 일반화된 변위와 속도.

차량의 전체 위치에너지 $V = \sum V_i$ 는 현가장치 및 타이어의 스프링 강성과 각 스프링의 상대변위를 구하여 계산하였다.

그림 1(a)에 나타낸 각각의 길이, 강체의 자유도와 질량에 대한 기호는 다음과 같다.

$L1$ = 트럭의 전전 차축과 뒤 차축 사이의 거리.

$L2$ = 트럭의 전전 차축과 전후 차축 사이의 거리.

$L3$ = 트럭의 전후 차축과 트럭 중심 사이의 거리.

$L4$ = 트럭의 뒤 차축과 트럭 중심 사이의 거리.

L_{ta} = 후륜 현가장치 중심과 후륜 타이어 사이의 거리.

$S1, S2$ = 전륜과 후륜 현가장치 사이의 거리.

$D1, D2$ = 전륜과 후륜 타이어 사이의 거리.

Y_t, ϕ_t, θ_t = 트럭의 수직, 롤링 및 피칭 변위.

Y_{a1}, ϕ_{a1} = 전전 차축의 수직 및 롤링 변위.

Y_{a2}, ϕ_{a2} = 전후 차축의 수직 및 롤링 변위.

$Y_{a3}, \phi_{a3}, \theta_{a3}$ = 뒤 차축의 수직, 롤링 및 피칭 변위.

m_t, I_{tx}, I_{tz} = 차체의 질량 및 롤링과 피칭에 관한 회전 관성 2차모멘트

m_{a1}, m_{a2}, m_{a3} = 전전 차축, 전후 차축과 뒤 차축의 질량

$I_{ax1}, I_{ax2}, I_{ax3}, I_{az3}$ = 전전 차축과 전후 차축의 롤링과 뒤 차축의 롤링 및 피칭에 관한 회전 관성 2차모멘트.

GR_i = 교량의 노면조도.

현가 스프링의 상대변위는 다음 식과 같다.

$$U_{s1} = (Y_t - Y_{a1}) + (L2 + L3) \cdot \theta_t + (S1/2)(\phi_t - \phi_{a1}) \quad (2)$$

$$U_{s2} = (Y_t - Y_{a1}) + (L2 + L3) \cdot \theta_t - (S1/2)(\phi_t - \phi_{a1}) \quad (3)$$

$$U_{s3} = (Y_t - Y_{a2}) + L3 \cdot \theta_t + (S2/2)(\phi_t - \phi_{a2}) \quad (4)$$

$$U_{s4} = (Y_t - Y_{a2}) + L3 \cdot \theta_t - (S2/2)(\phi_t - \phi_{a2}) \quad (5)$$

$$U_{s5} = (Y_t - Y_{a3}) - L4 \cdot \theta_t + (S3/2)(\phi_t - \phi_{a3}) \quad (6)$$

$$U_{s6} = (Y_t - Y_{a3}) - L4 \cdot \theta_t - (S3/2)(\phi_t - \phi_{a3}) \quad (7)$$

타이어 스프링의 상대변위는 다음 식과 같다.

$$U_{t1} = Y_{a1} + (D1/2) \cdot \phi_{a1} - (-GR_1) \quad (8)$$

$$U_{t2} = Y_{a1} - (D1/2) \cdot \phi_{a1} - (-GR_2) \quad (9)$$

$$U_{t3} = Y_{a2} + (D2/2) \cdot \phi_{a2} - (-GR_3) \quad (10)$$

$$U_{t4} = Y_{a2} - (D2/2) \cdot \phi_{a2} - (-GR_4) \quad (11)$$

$$U_{t5} = Y_{a3} + L_{ta} \cdot \theta_{a3} + (D3/2) \cdot \phi_{a3} - (-GR_5) \quad (12)$$

$$U_{t6} = Y_{a3} + L_{ta} \cdot \theta_{a3} - (D3/2) \cdot \phi_{a3} - (-GR_6) \quad (13)$$

$$U_{t7} = Y_{a3} - L_{ta} \cdot \theta_{a3} + (D4/2) \cdot \phi_{a3} - (-GR_7) \quad (14)$$

$$U_{t8} = Y_{a3} - L_{ta} \cdot \theta_{a3} - (D4/2) \cdot \phi_{a3} - (-GR_8) \quad (15)$$

식(8)~식(15)에서 GR_i 는 상향이 양(+)이다.

그림 1(a)에 나타낸 10개의 자유도에 대한 4축 단일차량의 운동방정식은 다음 식과 같다.

$$m_t \ddot{Y}_t + (F_{s1} + F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} + F_{s5} + F_{s6}) + (F_{cs1} + F_{cs2} + F_{cs3} + F_{cs4} + F_{cs5} + F_{cs6}) = m_t \cdot g \quad (16)$$

$$I_{tx} \ddot{\phi}_t + (F_{s1} - F_{s2})(S1/2) + (F_{s3} - F_{s4})(S2/2) + (F_{s5} - F_{s6})(S3/2) + (F_{cs1} - F_{cs2})(S1/2) + (F_{cs3} - F_{cs4})(S2/2) + (F_{cs5} - F_{cs6})(S3/2) = 0 \quad (17)$$

$$I_{tz} \ddot{\theta}_t + (F_{s1} + F_{s2}) \cdot (L2 + L3) + (F_{s3} + F_{s4}) \cdot L3 - (F_{s5} + F_{s6}) \cdot L4 + (F_{cs1} + F_{cs2}) \cdot (L2 + L3) + (F_{cs3} + F_{cs4}) \cdot L3 - (F_{cs5} + F_{cs6}) \cdot L4 = 0 \quad (18)$$

$$m_{a1} \ddot{Y}_{a1} - (F_{s1} + F_{s2}) + (F_{t1} + F_{t2}) - (F_{cs1} + F_{cs2}) + (F_{ct1} + F_{ct2}) = m_{a1} \cdot g \quad (19)$$

$$I_{ax1} \ddot{\phi}_{a1} - (F_{s1} - F_{s2})(S1/2) + (F_{t1} - F_{t2})(D1/2) - (F_{cs1} - F_{cs2})(S1/2) + (F_{ct1} - F_{ct2})(D1/2) = 0 \quad (20)$$

$$m_{a2} \ddot{Y}_{a2} - (F_{s3} + F_{s4}) + (F_{t3} + F_{t4}) - (F_{cs3} + F_{cs4}) + (F_{ct3} + F_{ct4}) = m_{a2} \cdot g \quad (21)$$

$$I_{ax2} \ddot{\phi}_{a2} - (F_{s3} - F_{s4})(S2/2) + (F_{t3} - F_{t4})(D2/2) - (F_{cs3} - F_{cs4})(S2/2) + (F_{ct3} - F_{ct4})(D2/2) = 0 \quad (22)$$

$$m_{a3} \ddot{Y}_{a3} - (F_{s5} + F_{s6}) + (F_{t5} + F_{t6} + F_{t7} + F_{t8}) - (F_{cs5} + F_{cs6}) + (F_{ct5} + F_{ct6} + F_{ct7} + F_{ct8}) = m_{a3} \cdot g \quad (23)$$

$$I_{ax3} \ddot{\phi}_{a3} - (F_{s5} - F_{s6})(S3/2) + (F_{t5} - F_{t6})(D3/2) + (F_{t7} - F_{t8})(D4/2) - (F_{cs5} - F_{cs6})(S3/2) + (F_{ct5} - F_{ct6})(D3/2) + (F_{ct7} - F_{ct8})(D4/2) = 0 \quad (24)$$

$$I_{a23}\ddot{\theta}_{a3} + (F_{t5} + F_{t6}) \cdot L_{ta} - (F_{t7} + F_{t8}) \cdot L_{ta} + (F_{ct3} + F_{ct4}) \cdot L_{ta} - (F_{ct5} + F_{ct6}) \cdot L_{ta} = 0 \quad (25)$$

위의 식에서 g =중력가속도이고, F_{si} , F_{csi} , F_{ti} 와 F_{cti} 는 다음과 같다.

$$F_{si} = K_{si} \cdot U_{si} + F_{yi} \quad (26)$$

$$F_{csi} = C_{si} \cdot \dot{U}_{si} \quad (27)$$

$$F_{ti} = K_{ti} \cdot U_{ti} \quad (28)$$

$$F_{cti} = C_{ti} \cdot \dot{U}_{ti} \quad (29)$$

식(26)~식(29)에서 K_{si} 와 C_{si} 는 각각 i 번째 현가 스프링의 스프링계수와 감쇠계수, K_{ti} 와 C_{ti} 는 i 번째 타이어 스프링의 스프링계수와 감쇠계수이고 F_{yi} 는 i 번째 현가 스프링의 마찰력을 나타낸다.

차량의 운동방정식에서 피칭 및 롤링에 대한 회전관성2차모멘트는 Haung(1960)이 제안한 다음 식을 사용하여 구하였다.

$$I = a_1 \cdot a_2 \cdot L^2 \cdot i \cdot m_t \quad (30)$$

여기서, I = 트럭의 질량에 대한 회전 관성2차모멘트이고, a_1 과 a_2 는 차체의 무게 중심에서부터 차축까지의 거리에 대한 차축 사이의 거리에 대한 비율이며, i = 동적지수(0.9~1.7)이다.

차량의 운동방정식은 차량의 현가장치가 비선형 거동을 하기 때문에 비선형 방정식이 된다. 본 연구에서는 이러한 운동방정식의 해를 Newmark- β 법을 사용하여 풀었다.

2.2. 교량의 운동방정식

교량의 운동방정식은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M_B]\{\ddot{x}\} + [C_B]\{\dot{x}\} + [K_B]\{x\} = \{F_B(t)\} \quad (31)$$

여기서, $[M_B]$ = 교량의 전체 질량 매트릭스.

$[C_B]$ = 교량의 전체 감쇠 매트릭스.

$[K_B]$ = 교량의 전체 강도 매트릭스.

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

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

교량의 운동방정식은 모우드 중첩법을 사용하여 풀었다. 교

량의 운동방정식에 대한 좀 더 자세한 내용은 참고문헌 정태주(1993)에 자세하게 수록되어 있다.

2.3 타이어 접지폭 모델(Tire Enveloping Model)

도로를 주행하는 차량의 타이어는 특별한 경우를 제외하고 도로의 노면과 항상 일정한 크기의 접지폭을 갖은 상태로 주행하게 되므로 본 연구에서는 차량의 타이어가 도로의 노면과 항상 일정한 폭으로 접지된 상태를 타이어 접지폭 모델(Tire Enveloping Model)을 사용하여 차량의 타이어력을 구하였다. 단위길이 폭의 돌기(Cleat) 위를 차량이 주행할 때 발생하는 타이어의 수직력의 압력분포는 가우스 지수함수를 일부 수정한 다음 식으로 가정하였다.

$$F(x) = \alpha \cdot \exp\left(\beta \cdot \frac{(x - \mu)}{2.0 \cdot \delta^2}\right) \quad (32)$$

여기서, μ 는 타이어의 접지폭, β 와 δ 는 계수로 $\beta=0.30$, $\delta=0.5$ 를 사용하였으며 α 는 진폭이다. 식 (32)에서 β 와 δ 의 값을 조절하여 타이어의 압력분포와 유사한 형태가 되도록 한 후, 이 도형의 전체 면적이 타이어의 스프링 강성과 같게 되는 α 를 구할 수 있다. 이 때 α 는 단위 높이의 노면조도에 상응하는 α 값이며, 노면조도의 값이 변하면 그에 상응하는 만큼 α 값도 변하게 된다. 타이어 접지폭 모델에 대한 좀 더 자세한 내용은 정태주(2002)에 자세하게 수록되어 있다. 그리고 타이어의 접지폭은 일반적으로 대형차량의 타이어 접지폭이 약 25.0cm 정도인 점을 감안하여 본 연구에서는 타이어의 접지폭이 25.0cm 일정하다고 가정하였다(건설교통부 2005).

3. 차량의 동적해석

3.1 차량모델의 타당성 검토

본 연구에서 개발한 차량모델이 실제 덤프트럭의 동적 거동과 유사하게 거동하는지를 검토하기 위하여 본 연구에서 개발한 수치해석방법으로 구한 해석값과 실험값을 서로 비교 검토하였다. 대상교량은 국도 34호선 상에 위치한 1등교인 임동교로 모두 16지간(2@50+3@50+3@50+3@50+3@50+2@50=800m)으로 구성된 교량이며, 시점부에 위치한 2연속 강판형교를 비교 대상교량으로 선정하였다.

대상교량은 2연속 강판형교(2@50=100m)로서 그림 2에 나타난 바와 같이 교량 폭은 10.5m, 철근콘크리트 바닥판

두께는 20cm이고 5개의 주형으로 구성되어 있으며, 5m 간격으로 수직 브레이싱과 15m 간격으로 가로보가 설치되어 있다. 대상교량에 대한 좀 더 자세한 내용은 박영석(1995)과 정수형(2005)에 자세히 수록되어 있다. 한편, 실험차량은 총 중량이 431.6kN인 4축 덤프트럭을 사용하고 그림 1에 나타난 차량으로 모델링하였으며 그 제원을 표 1에 나타내었다. 표 1의 구분 란에서 우측이라 표기한 값은 좌측과 동일한 값을 갖는다. 그리고 표 1의 값은 각 종 차량제조회사의 차량 카탈로그를 참조하였으며, 그 값이 차량제조회사마다 약간씩 다르나 가장 일반적인 경우의 값을 사용하였다.

실험교량의 노면조도는 Intelligent Total Station을 사용하여 교량 시점 50m 전에서부터 교량 종점 후 6m까지 156m를 20cm 간격으로 좌우측 2라인을 측정하였다. 측정 한 노면조도를 F.F.T. 해석을 통하여 교량의 P.S.D를 계산한 결과, 실험교량의 노면조도계수는 우측 라인이 $68.0 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{cycle}$ 이고 좌측 라인이 $35.0 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{cycle}$ 로 Dodds와 Robson(1973)이 제안한 도로 분류표와 비교하면 “보통의 도로”에 상응한다. 그림 3에는 측정된 실험교량의 노면조도를 나타내었다(박영석, 1995).

대상교량의 모델링 시 주형과 가로보는 보요소를 사용하고 바닥판은 셸요소를 사용하였으며 바닥판과 주형 사이는 Rigid Link를 사용하여 연결시켰다. 이 때 주형은 40개 구간으로 분할하고 바닥판은 종방향으로 40개 구간, 횡방향으로 10개 구간으로 분할하였다. 이렇게 대상교량을 3차원으로

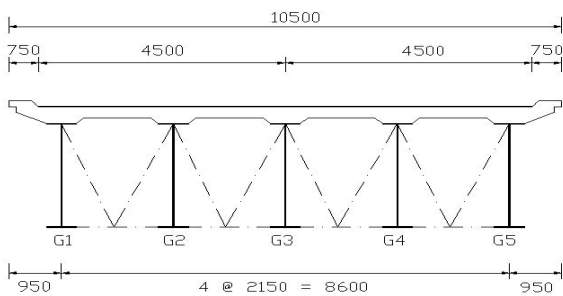


그림 2. 대상교량의 횡단면도

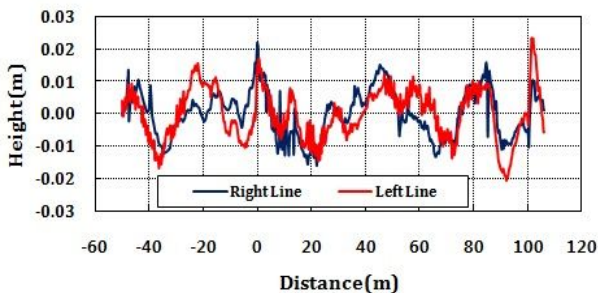


그림 3. 측정된 실험교량의 노면조도

표 1. 실험 차량 및 24톤 덤프트럭의 제원과 물성

구분		차량	실험차량	24톤 덤프트럭
정적축하중 (kN) (우측)		전전축	52.0	45.0
		전후축	52.0	45.0
		후전축	55.9	49.5
		후후축	55.9	49.5
길이(m)		L1	5.2750	5.2250
		L2	1.7000	1.6300
		L3	1.4007	1.4503
		L4	2.1743	2.1447
		Lta	0.6750	0.6750
		D1, D2	2.1000	2.1000
		D3, D5	1.9000	1.8500
		S1, S2	0.8900	0.8900
		S3	1.0000	0.9800
질량 (kg)		mt	39,160.0	32,900.0
		ma1	1,000.0	1,000.0
		ma2	1,000.0	1,000.0
		ma3	2,900.0	2,900.0
관성모멘트 (kg·m ²)		Itx	33,450.0	32,900.0
		Itz	249,128.0	207,793.0
		Iax1	542.0	542.0
		Iax2	542.0	542.0
		Iax3	1,570.0	1570.0
	Iaz3	735.2	735.2	
스프링계수 (kN/m)	현가	Ks1, Ks2	125.0	125.0
		Ks3, Ks4	175.0	175.0
		Ks5, Ks6	2,600.0	2,600.0
	타이어	Kt1, Kt2	1,700.0	1,700.0
		Kt3, Kt4	1,700.0	1,700.0
		Kt5-Kt8	2,200.0	2,200.0
감쇠계수 (kN·s/m)	현가	Cs1, Cs2	6.0	6.0
		Cs3, Cs4	6.0	6.0
		Cs5, Cs6	17.0	17.0
	타이어	Ct1, Ct2	6.0	6.0
		Ct3, Ct4	6.0	6.0
		Ct5-Ct8	10.0	10.0
현가장치 마찰력 (kN)	Fy1, Fy2	2.00	2.00	
	Fy3, Fy4	2.00	2.00	
	Fy5, Fy6	15.00	15.00	

모델링하였을 때 총자유도 수는 3,414개이다. 하중조건은 교량의 우측 연석에서 100cm 떨어진 곳에 우측바퀴가 통과하도록 하였다. 변위의 측정위치는 교대에서 22.4m 떨어진 곳에 변위계를 설치하여 정적 및 동적 변위를 측정하였다.

동적해석 시 교량의 노면조도는 그림 3에 나타난 바와 같은 측정된 노면조도를 사용하였으며, 차량은 교량의 시점부50m 전에서부터 교량을 완전히 빠져나갈 때까지 해석하였다. 모우드 중첩법을 사용하여 동적해석을 실시할 때 150개의 모우드를 사용하였으며 감쇠비는 실험으로부터 구한 임계 감쇠비의 1.14%를 사용하였다. 그리고 시간간격 $\Delta t=0.002$ 초를 사용하였다.

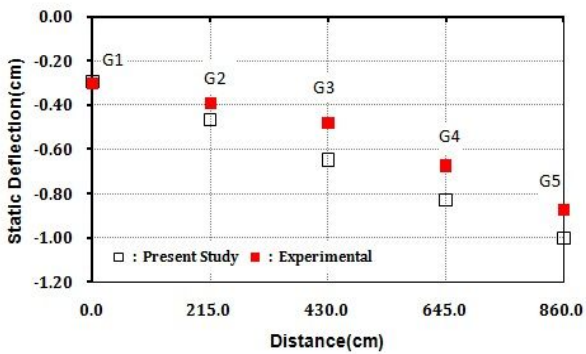


그림 4. 정적 처짐의 실험값과 해석값의 비교

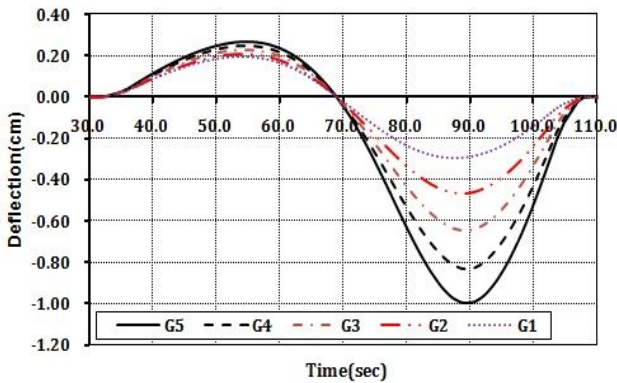


그림 5. 각 주형별 정적 처짐의 해석값

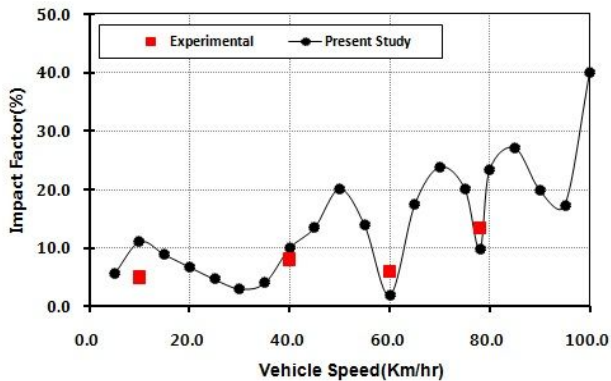


그림 6. 주행속도별 충격계수의 실험값과 해석값 비교

본 논문에서는 식 (33)을 사용하여 충격계수를 구하였다.

$$I(\%) = \frac{D_{dya} - D_{sta}}{D_{sta}} \times 100 \quad (33)$$

여기서, $I(\%)$ = 충격계수(Impact Factor)

D_{dya} = 최대 동적 처짐

D_{sta} = 최대 정적 처짐

그림 4와 그림 5에 나타난 바와 같이 대상교량의 정적 처짐은 처짐이 가장 큰 G5 거더의 경우 실험값과 수치해석 값이 각각 8.73mm와 10.0mm로 처짐의 차이가 1.27mm 발생하였으나 전체적인 경향은 매우 유사하다. 그리고 교량의 첫 번째 고유진동수는 본 연구에서 개발한 수치해석방법으로 구한 값이 2.34Hz이고 실험값이 2.25Hz로 약 4.0%의 오차가 있다.

그림 6에는 실험차량의 주행속도별 충격계수의 실험값과 해석값을 나타내었다. 충격계수는 G5 주형에 대하여 식 (33)을 사용하여 구하였으며, 차량의 주행속도는 5km/hr에서 100km/hr까지 5km/hr 간격으로 해석하였다. 그림 6에 나타난 바와 같이 G5 주형의 충격계수는 주행속도가 40km/hr, 60km/hr 및 78km/hr일 때 실험값과 해석값이 각각 8.1%, 와 10%, 6.0%와 2.0% 및 13.4%와 9.8%로 그 경향이 매우 유사하다. 그리고 수치해석에 의한 G5 주형의 충격계수는 주행속도가 30km/hr까지 3%에서 11% 정도의 값을 나타내다 점점 증가하여 50km/hr에서 20%의 값을 나타내고 다시 감소하여 60km/hr에서 2%의 값을 나타낸다. 그리고 이후의 주행속도에서는 점점 증가하는 추세로 20%에서 27%의 값을 나타내고 100km/hr에서 40%로 가장 큰 값을 나타낸다. 이상에서와 같이 본 연구에서 개발한 수치해석방법으로 구한 해석값은 실험값과 경향이 매우 유사함을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 개발한 4축 단일차량의 3차원 차량모델을 교량의 동적응답을 연구하는데 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 차량의 동적해석

본 연구에서 개발한 4축 차량모델의 동적 거동을 검토하기 위하여 차량이 스텝 범프를 통과할 때 발생하는 최대 충격계수를 구하였다. 4축 단일차량인 24톤 덤프트럭에 대한 제원은 표 1에 나타내었다. 24톤 덤프트럭이 스텝 범프를 통과할 때 발생하는 타이어력의 최대 충격계수를 구하였다. 스텝 범프는 폭이 45.0cm이고 높이가 각각 1.5cm, 2.0cm와 2.5cm이다.

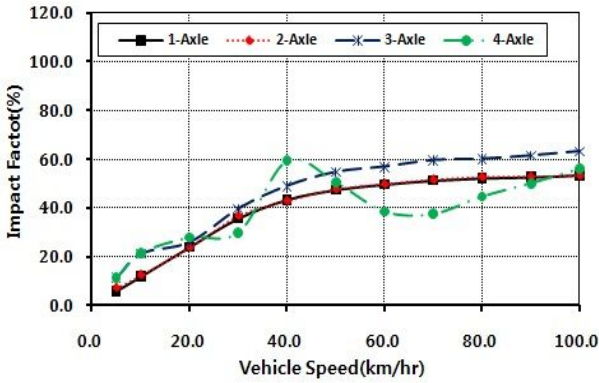


그림 7. 24톤 덤프트럭의 스텝 범프(H=1.5cm) 통과 시 타이어력의 최대 충격계수

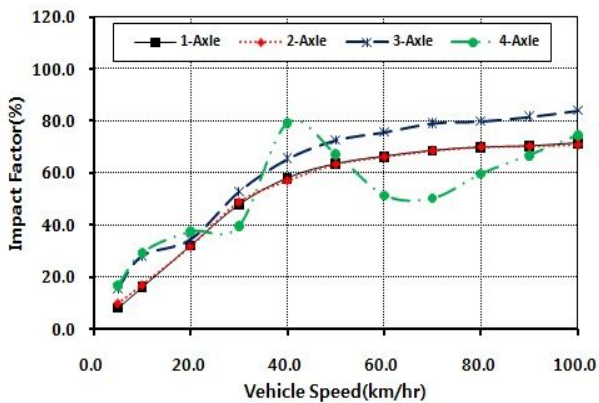


그림 8. 24톤 덤프트럭의 스텝 범프(H=2.0cm) 통과 시 타이어력의 최대 충격계수

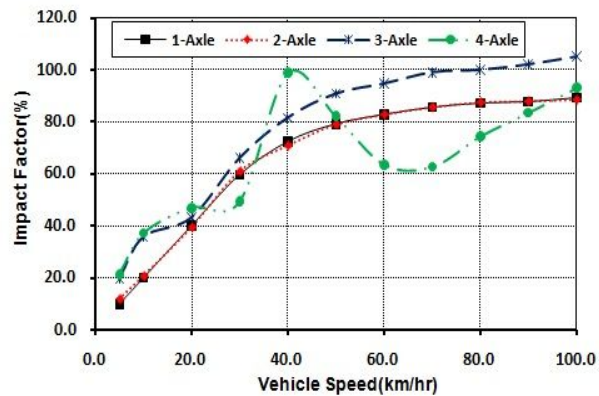


그림 9. 24톤 덤프트럭의 스텝 범프(H=2.5cm) 통과 시 뒷축 타이어력의 최대 충격계수

그림 7에는 24톤 덤프트럭이 높이가 1.5cm인 스텝 범프를 통과할 때 발생하는 각 차축 타이어력의 최대 충격계수를 주행속도별로 나타내었다. 1축과 2축의 충격계수는 거의 같은 경향을 나타내며, 그 값은 주행속도가 60km/hr일 때까지 점점 증가하여 50% 정도의 값을 나타내고 이 후의 주행속도에서는 53% 정도로 거의 일정한 값을 나타낸다. 3축의 충격계수는 1축과 2축의 값과 거의 유사한 경향을 나타내며 다만 그 값이 주행속도가 60km/hr일 때까지 점점 증가하여 55%

정도의 값을 나타내고 이 후의 주행속도에서는 63% 정도로 거의 일정한 값을 나타낸다. 그러나 4축의 충격계수는 차량속도가 40km/hr일 때 60%로 최대값을 나타내며 70km/hr일 때 38%로 감소하였다가 이후의 차량속도에서는 점차 증가하여 100km/hr일 때 56%로 1축, 2축 및 3축의 충격계수와 다른 경향을 나타낸다.

그림 8에는 24톤 덤프트럭이 높이 2.0cm의 스텝 범프를 통과할 때 발생하는 각 차축 타이어력의 최대 충격계수를 주행속도별로 나타내었다. 1축과 2축의 충격계수는 거의 같은 경향을 나타내며, 그 값은 주행속도가 70km/hr일 때까지 점점 증가하여 68% 정도의 값을 나타내고, 이 후의 주행속도에서는 70% 정도로 거의 일정한 값을 나타낸다. 3축의 충격계수는 1축과 2축의 값과 거의 유사한 경향을 나타내며 다만 그 값이 주행속도가 70km/hr일 때까지 점점 증가하여 80% 정도의 값을 나타내고 이 후의 주행속도에서는 82% 정도로 거의 일정한 값을 나타낸다. 그러나 4축의 충격계수는 차량속도가 40km/hr일 때 79%로 최대값을 나타내며 70km/hr일 때 50%로 약간 감소하다가 이후의 차량속도에서는 점차 증가하여 100km/hr일 때 75%로 중간축의 충격계수와는 다른 경향을 나타낸다.

그림 9에는 24톤 덤프트럭이 높이 2.5cm의 스텝 범프를 통과할 때 발생하는 각 차축 타이어력의 최대 충격계수를 차량속도별로 나타내었다. 1축과 2축의 충격계수는 거의 같은 경향을 나타내며, 그 값은 주행속도가 80km/hr일 때까지 점점 증가하여 87% 정도의 값을 나타내고 이 후의 주행속도에서는 89% 정도로 거의 일정한 값을 나타낸다. 3축의 충격계수는 1축과 2축의 값과 거의 유사한 경향을 나타내며 다만 그 값이 주행속도가 80km/hr일 때까지 점점 증가하여 100% 정도의 값을 나타내고 이 후의 주행속도에서는 105% 정도로 거의 일정한 값을 나타낸다. 그러나 4축의 충격계수는 차량속도가 40km/hr일 때 99%로 최대값을 나타내며 70km/hr일 때 62%로 약간 감소하다가 이후의 차량속도에서는 점차 증가하여 주행속도가 100km/hr일 때 93%의 값을 나타낸다.

4. 결론

본 연구에서는 4축 단일차량인 24톤 덤프트럭을 10-자유도 3차원 차량모델로 모델링하고 차량의 타이어 접지폭 및 텐덤 다판스프링의 현가장치에 두 개의 차축을 고려한 3차원 차량 모델을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 3차원 차량모델을 사용하여 수치해석방법으로 구한 해석값을 실제 교량에서 구한 실험값과 비교 검토한 결과 그 경향이 매우 유사하였다.

그리고 24톤 덤프트럭이 스텝 범프를 통과할 때 발생하는 타이어력의 충격계수를 구하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 개발한 텐덤 다관스프링의 현가장치와 타이어 접지폭을 고려한 3차원 차량모델을 사용하여 수치해석적으로 구한 해석값을 실험값과 비교 검토한 결과, 충격계수는 주행속도가 40km/hr, 60km/hr 및 78km/hr 일 때 실험값과 해석값이 각각 8.1%와 10%, 6.0%와 2.0% 및 13.4%와 9.8%로 그 경향이 매우 유사하였다. 이를 통하여 본 연구에서 개발한 4축 단일차량의 3차원 차량모델의 타당성을 입증하였다.
- (2) 4축 단일차량인 24톤 덤프트럭이 높이가 1.5cm, 2.0cm 및 2.5cm인 스텝 범프를 각각 통과할 때 1축과 2축의 충격계수는 주행속도 60km/hr일 때까지 점점 증가하여 각각 50%에서 80%의 값을 나타내고 이 후의 주행속도에서는 56%에서 87%의 값을 나타낸다. 그러나 후륜인 4축의 충격계수는 1축 및 2축과 서로 다른 경향을 나타내며 그 값도 주행속도가 100km/hr일 때보다 40km/hr일 때 60%에서 100%로 최대값을 나타낸다. 따라서 4축 단일차량의 전륜축과 후륜축의 동적거동이 서로 다르게 나타나므로 이를 고려하여야 할 것으로 판단된다.

본 논문에서는 본 연구에서 개발한 3차원 4축 차량모델을 사용하여 수치해석을 통해 구한 해석값과 실험값을 비교하여 그 타당성만을 입증하였으나 향후 여러 가지 형식의 도로교에 대한 동적응답에 대하여 연구할 계획이다.

감사의 글

이 연구는 2008년도 한라대학교 교내연구비 지원에 의한 것임.

참 고 문 헌

건설교통부(2005) 도로교설계기준.
국토해양부(2008) 2008년도 도로교량 및 터널 현황조사.

김철우(1997) 도로교상의 교통유발진동에 관한 실험 및 이론적 연구, 박사학위논문, 중앙대학교.
박영석, 정태주의의 다수(1995) 국도 34호선 임동교 안전진단 보고서, 대한산업안전협회.
정수형, 지승구이의 다수(2005) 국도 34호선 임동교 정밀안전진단 보고서, 한국시설안전기술공단.
정태주(1993) 3차원 차량모델에 의한 강도교의 노면조도를 고려한 동적해석, 박사학위논문, 명지대학교.
정태주(2002) 타이어 접지폭을 고려한 3차원 차량모델에 의한 동적 차륜하중에 의한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제14권, 제1호, pp.95-104.
정태주(2006) 타이어 접지폭을 고려한 3차원 차량모델에 의한 도로교의 동적해석, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제26권, 제6A호, pp.989-999.
정태주, 신동구, 박영석(2008) 동적해석에 의한 강관형교의 동적응답, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제28권, 제1A호, pp.39-49.
정태주, 신동구, 박영석(2008) LRFD 보장을 위한 동적해석에 의한 도로교의 동적하중허용계수, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제28권, 제3A호, pp.305-313.
Blejewas, T.E., Feng, C.C., and Ayre, R.S. (1979) Dynamic Interaction of Moving Vehicles and Structures, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 67, No. 4. pp.513-521.
Dodds, C.J. and Robson, J.D.(1973) The Description of Road Surface Roughness, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 31, No. 12, pp.175-183.
Gupta, R.K. (1980) Dynamic Loading of Highway Bridges, ASCE, Vol. 106, No. EM2, pp.377-394.
Huang, T. (1960) Dynamic Response of Three Span Continuous Highway Bridge, PhD. Dissertation, University of Illinois, IL.
Hwang, E.S. (1990) Dynamic Loads for Girder Bridges, PhD Thesis, University of Michigan.
Inbanathan M.J. and Wieland M. (1987) Bridge Vibrations Due to Vehicle Moving over Rough Surface, ASCE, Vol. 113, No. ST9, pp.1994-2008.
Wang, T.L., Huang, D., and Shahawy, M. (1992) Dynamic Response of Multi girder Bridges, ASCE, Vol. 118, No. ST8. pp.2222-2238.

(접수일자 : 2011. 3. 10 / 심사일 2011. 3. 15 /
심사완료일 2011. 5. 27)