

### 교량 충격하중의 확률론적 모델

Reliability-Based Dynamic Load Model for Bridges

황 의 승\*  
Hwang, Eui-Seung

#### ABSTRACT

The purpose of this study is to develop the reliability-based dynamic load model for bridges. Analytical procedure to calculate the dynamic load is developed. Truck traffic is simulated using Monte Carlo method. Static and dynamic loads(deflections) are plotted on the normal probability paper to estimate the mean maximum dynamic load in bridge lifetime. The results may be served as a basis for new LRFD bridge design code.

#### I. 서론

현재 도로교의 설계시 고려하는 하중에는 사하중, 활하중, 충격하중, 풍하중, 지진하중 등 여러가지가 있다. 이 중에서 차량에 의한 하중으로 활하중과 충격하중이 있다.

활하중은 차량의 정적인 효과를 고려한 것이며 차량이 교량위에 정지하고 있다고 가정하여 그 값을 구하게 된다. 그러나 실제의 경우 차량은 교량 위에서 어느정도의 속도를 갖고 이동하며 이 이동함에 따라 부가적인 효과를 나타내게 된다. 각 시방서에서는 이를 동하중(Dynamic Load) 혹은 충격하중(Impact Load)이라 명명하여 활하중에 동하중 혹은 충격하중 계수를 곱한 값으로 고려하고 있다. 따라서  $S_{iH}$  충격하중계수는 차량 및 교량의 동적 특성 및 노면의 상태에 따라 크게 좌우되어 진다.

한편 시방서에서는 충격하중을 교량길이에 따라 (한국<sup>1)</sup>, 미국<sup>2)</sup>) 혹은 교량의 고유진동수에 따라 (캐나다 온타리오주<sup>3)</sup>, 스위스<sup>4)</sup>) 규정하고 있다. 그러나 현재 캐나다 온타리오주와 미국에서는 이의 개정을 서두르고있어 조만간 새로운 형태의 충격하중 계수 산정방법이 나올 전망이다. 또한 각 시방서에 확률론적 개념을 도입한 LRFD 방식으로의 전환이 불가피한 바 이를 위한 충격하중의 확률론적 모델 개발이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 충격하중을 교량 및 차량의 동적거동과 노면요철을 고려한 모의해석을 통하여 그 통계적 특성을 구하는 것을 목적으로 한다.

#### II. 동적모델

##### 1. 차량모델

동적 관점에서 보면 차량은 몸체, 현가장치, 바퀴로 구성되어 진다. 이 연구에서는 차량이 Multi-Leaf Spring형식 현가장치를 갖고 있는 것으로 가정된다. 이러한 Multi-Leaf 현가장치는 진동의 각 주기에 비선형적인 거동으로 에너지를 발산시키는 장치이며 Fancher<sup>5)</sup>가 개발한 식이 사용되었다.

바퀴는 탄성선형으로 거동되어짐으로 가정되어지며 Fancher<sup>5)</sup>에 의해 제안된 876 KN/m/tire가 사용되어 진다. 차량의 몸체는 강체운동을 하는 등분포 질량으로 표시되며 수직방향 처짐과 Pitching 회전이 고려되어 진다. 차량에 대한 운동방정식은 수직방향과 회전의 평형상태로부터 구해진다.

##### 2. 노면요철

노면요철의 영향을 나타내기 위해 노면형상이 구해지며, 이는 PSD(Power Spectral Density) 함수로 표시되는 Random Process에 의해 나타내어 진다. 이 Random Process는 Stationary Gaussian Random Process로 모델되어지며 Inverse Fourier Transform으로 다음과 같이 구해진다.

$$X(t) = \sum_{n=1}^N \sqrt{4 S(\omega_n) \Delta \omega} \cos(\omega_n t - \theta_n) \dots (1)$$

여기서  $S(\omega_n)$ 은 PSD 함수이고  $\omega_n$ 은 진동수,  $\theta_n$ 은 0 부터  $2\pi$ 까지 등분포된 random variable이다. 대표적인 PSD 함수는 다음과 같다.

$$S(\gamma) = a \gamma^{-n} \quad \gamma_a \leq \gamma \leq \gamma_b \dots (2)$$

여기서 a는 조도계수, n은 형상계수,  $\gamma$ 는 spacial frequency,  $\gamma_a$ ,  $\gamma_b$ 는  $\gamma$ 의 최저, 최고 경계치이다.

##### 3. 교량모델

교량을 모델하는데 정적 및 동적의 횡분배 계수는 같다고 가정하였다. 결과적으로 전체 교량이 하나의 단순보로 고려되어 다음과 같은 Modal equation of motion이 구해진다.

$$Z_n(t) + 2\xi_n \omega_n Z_n(t) + \omega_n^2 Z_n(t) = F_n(t)/M_n \dots (3)$$

\* 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원

$$\text{여기서 } M_n = \int_0^L \phi_n^2(x) \, dx = \frac{mL}{2} \quad (\text{modal mass})$$

$$F_n(t) = \int_0^L \phi_n(x) p(x, t) \, dx \quad (\text{modal force})$$

$$\phi_n(x) = \sin \frac{n\pi x}{L} \quad (\text{mode shape})$$

$$\omega_n = n^2 \pi^2 \sqrt{EI/mL^4} \quad (\text{natural frequency})$$

$EI$  = 상부구조단면의 휨강성  
 $P(x, t)$  = 차량축하중  
 $\xi_n$  = damping 계수  
 $m$  = 교량 상부구조 단위길이당 질량이다.

교량의 Damping 계수는 각 Mode에 2%로 가정되었다.

이러한 운동방정식은 Newmark  $\beta$  방법에 의해 풀어진다. 자세한 해석과정은 참고문헌을 참조바란다.<sup>6)</sup>

### III 교량량의 모델

충격하중의 확률론적 해석을 위하여 교량통과 차량, 특히 화물차 통행량 및 하중의 모델이 필요하게 된다. 본 연구에서 북미주에서 측정된 교량통과차량의 Data로부터 총 화물차의 20%가 3축 single truck, 80%가 5축 tractor-trailer로 가정된다. 각각의 화물차에 따라 다음과 같은 3가지 random variable이 고려된다.

- W : 차량 총하중
- D : 축간거리 (tractor-trailer의 경우에서 trailer의 축간거리)
- V : 차량속도

각 차량의 random variable에 대한 통계적 수치는 여러 통계치와 Weigh-in-Motion 방법을 통한 측정으로부터 추출되었으며 표 1, 2와 같다.

표 1. 3축 Single Truck의 통계치

random variable	분포함수	평균값	표준편차	최소값	최대값
W (kN)	정규	178	37	-	-
D (m)	등분포	-	-	3.0	7.6
V (km/h)	정규	97	16	-	-

표 2. 5축 Tractor-Trailer의 통계치

random variable	분포함수	평균값	표준편차	최소값	최대값
W(kN)	정규	290	76	-	-
D(m)	등분포	-	-	5.2	12.8
V(km/h)	정규	97	16	-	-

### IV 노면요철

노면의 요철은 PSI(Present Serviceability Index) 또는 IRI(International Roughness Index)에 의해 측정된다. PSI는 노면의 상태를 5(아주 좋음)부터 0(아주 나쁨)까지 검사관의 주관적인 판단에 의해 결정된다. IRI는 노면의 형상으로 부터 PSD를 구하여 수치적으로 계산되는데 PSI와 IRI의 관계는 그림 1에 보이는 것과 같다.

이 논문에서는 노면 요철이 PSD 함수로부터 결정되어지므로 식 (2)의  $n$ 을 일정하다고 가정할 때 조도계수  $a$ 에 따라 노면상태가 결정이 된다. 그림 2는 조도계수  $a$ 와 IRI의 관계를 보여주고 있다.

통상 도로의 노면은 최소 PSI값 2.5 이상으로 설계되고 있으며 PSI 값 2.5는 그림 1에 의해 IRI값 6에 대응되며 다시 그림 2에 의해  $a$ 값  $0.64 \times 10^{-6}$  cycle/m에 대응된다. 따라서 본 연구에서는 노면형상함수가 이  $a$  값의 PSD 함수로부터 추출되며 그 예는 그림 3에 보여진다.

### V Simulation 결과

교량의 충격하중 계수는 교량 중앙점의 최대 정적 처짐과 순수 동적 처짐의 비로 계산된다. Simulation은 Monte Carlo 방법에 의해 수행되어지며 시간이 12m, 18m, 24m, 30m의 단순 지지된 강함성 교량에 대해 각각 교량마다 100번의 Simulation이 행해진다.

각각의 결과는 교량의 수명(50년으로 가정) 동안의 최대치를 구하기 위해 Inverse Normal Probability 눈금치 위에 그려진다. 그 최대치는 선형회기분석에 의해 추정되어진다. 각 교량에 대한 결과는 그림 4와 같다. 이 그림에서 동적 처짐은 대응되는 정적처짐과 같은 Inverse Normal Probability 값을 갖도록 그려지며, 따라서 동적 처짐의 선형회기분석선의 기울기가 정적 처짐과 동적 처짐의 상관관계를 나타낸다. 그림 4에서 보는 바와 같이 30m 지간에서는 아주 약한 상관관계가 나타났으며 18m, 24m 교량에서는 상관관계가 없으며 12m 교량에서는 약간의 역상관관계를 나타냈다. 전반적으로 서로 거의 상관관계가 없음을 알 수 있다. 선형회기분석을 한 결과는 표 3에 보여지고 있다. 최대 정적처짐은 Nowak<sup>7)</sup>에 의해 개발된 모델에서 계산된 값과 거의 일치하였다. 결과적으로 나온 평균 최대 충격하중 계수값도 역시 표 3에 보여지고 있다. 변이계수 역시 계산되어 표 3에 보여지고 있다.

표 3. 충격하중계수의 통계치

지간 (m)	12	18	24	30
동적처짐 (cm)	0.050	0.075	0.115	0.310
정적처짐 (cm)	0.38	0.67	1.17	1.87
평균최대 충격하중계수	0.13	0.11	0.10	0.17
충격하중계수의 변이계수	0.69	0.44	0.54	0.58

VI 결론

이상의 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- ◆ 충격하중과 정적하중은 상관관계가 없는 것으로 간주할 수 있다.
- ◆ 충격하중의 교량수명(50년) 평균 최대값은 약 10~17%이며 30m에서 크고 12, 18, 24m 에서 약간 작은 값을 나타내고 있다.
- ◆ 충격하중의 변이계수는 상대적으로 크며 그 값은 지간길이에 따라 45~70%로 변하고 있다.

참고문헌

1. 한국 도로교 시방서, 건설부
2. AASHTO, "Standard Specifications for Highway Bridges," America Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1983
3. OHBDC, "Ontario Highway Bridge Design Code," Ministry of Transportation and Communications, Downsview, Ontario, 1983
4. SIA, "Schwener Norm," SIA, Switzerland, November 1985
5. Fancher, P.S., et al, "Measurement and Representation of the Mechanical Properties of Truck Leaf Springs," Society of Automotive Engineers Technical Paper Series 80095, Warrendale, Pennsylvania, 1980
6. Hwang, E.S., "Dynamic Loads for Girder Bridges," Ph.D Thesis, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 1990
7. Nowak, A.S., et al, "Load and Resistance Factors for OHBD Code," Report UMCE 90-06, Department of Civil Engineering, The University of Michigan, 1990

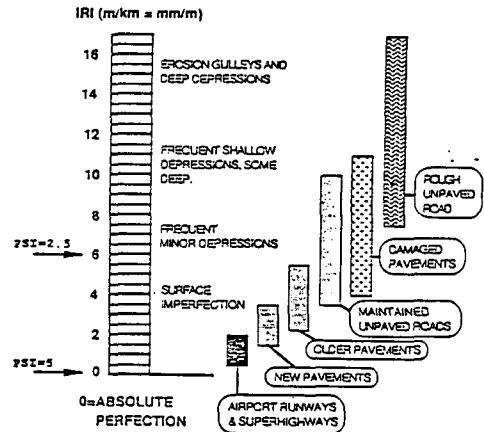


그림 1. PSI와 IRI의 관계

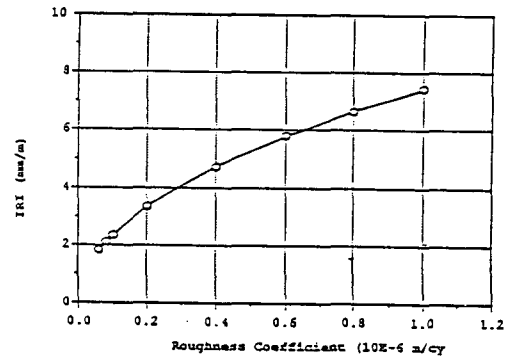


그림 2. 조도계수와 IRI의 관계

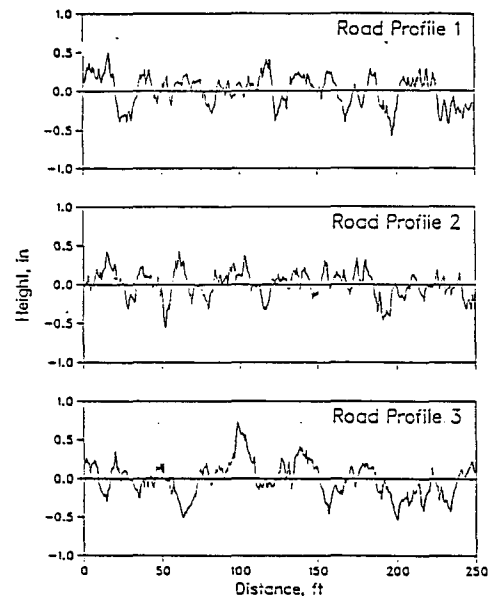


그림 3. 대표적 노면형상 함수

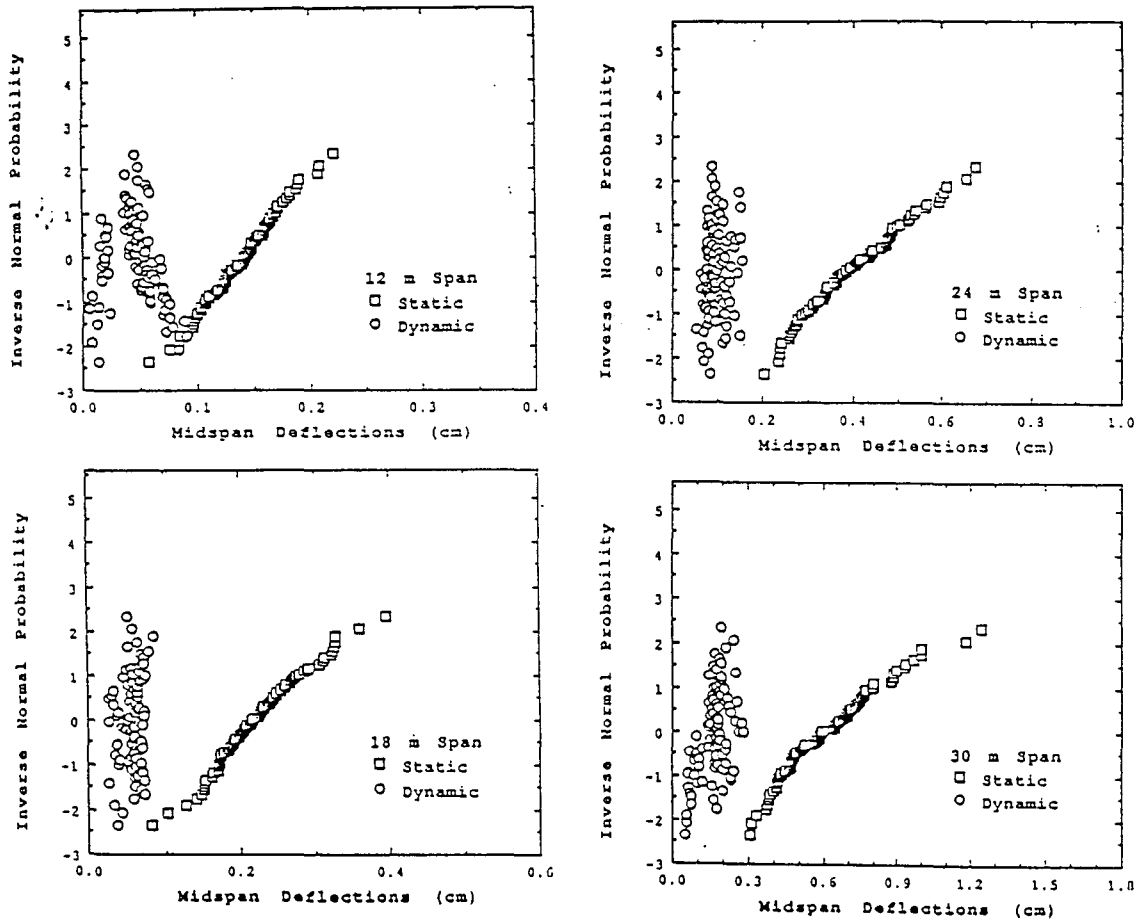


그림 4. 모의해석의 결과