

가속도 계측 자료를 이용한 콘크리트 교량의 처짐 산정

Calculation of Deflection Using the Acceleration Data for Concrete Bridges

윤 영 균^{1)*} 유 희 중²⁾
Yun, Young Koun Ryu, Hee Joong

Abstract

This paper describes a numerical modeling for deflection calculation using the natural frequency response that is measured acceleration response for concrete bridges. In the formulation of the dynamic deflection, the change amounts and the transformed responses about six kinds of free vibration responses are defined totally. The predicted response can be obtained from the measured acceleration data without requiring the knowledge of the initial velocity and displacement information. The relationship between the predicted response and the actual deflection is derived using the mathematical modeling that is induced by the process of a acceleration test data. In this study, in order to apply the proposed response predicted model to the integration scheme of the natural frequency domain, the Fourier Fast Transform of the deflection response is separated into the frequency component of the measured data. The feasibility for field application of the proposed calculation method is tested by the mode superposition method using the PSC-I bridges superstructures under several cases of moving load and results are compared with the actually measured deflections using transducers. It has been observed that the proposed method can assess the deflection responses successfully when the measured acceleration signals include the vehicle loading state and the free vibration behavior.

Keywords : Acceleration, Concrete bridge, Deflection, Natural frequency, Vibration

1. 서론

고속도로, 국도 및 지방도 상에 위치하는 콘크리트 교량의 공용 기간이 증가하면서 유지관리 대상이 되는 교량의 수도 급격히 증가하고 있다. 특히, 공용년수가 20년 이상이 되는 콘크리트 교량은 균열, 중성화 등과 같은 열화에 의해 교량의 손상이나 결함이 발생되어, 정밀안전진단을 통한 교량의 건전도와 내하력을 평가 자료가 보수보강 여부를 판단하는데 사용된다.

현재 수행되고 있는 정밀안전진단을 위한 재하실험은 교량에 설치된 계측기를 통해 변형률과 처짐 및 가속도와 같은 응답들을 측정하기 위해 실시된다, 그러나 이러한 응답들을 이용하여 교량의 모든 거동을 표현하기에는 어려움이 있다. 특히 지점부의 거동과 같이 측정하기 힘든 구조적 특성을 파악하거나 교량의 전체적 거동을 파악하기 위해서는 수많은 센서를 설치해야 하는데, 이는 실험에 많은 비용과 시간이 소요될 뿐만 아니라 현실적으로

어려운 문제이기도 하다(이종재 등, 2005; 신재인 등, 2007).

또한 재하실험에 사용되는 변형률계, 처짐계 및 가속도계와 같은 센서들은 교량 하부에 설치하여야 하므로 교량 주위 환경에 따라 정확한 설치가 어려운 경우가 많으며, 케이블 길이에 따른 잡음, 부착 부위의 상태 및 기타 환경 요인들에 의해 결과에서 매우 큰 편차를 보인다(이형진 등, 2007).

교량의 건전도 평가나 안전진단 시에는 일반적으로 실험차량에 의한 재하실험을 실시하는데 이때 표준차량에 의한 응답을 보다 정확히 측정하기 위해서 측정에 간섭을 일으키는 일반차량의 통행이 통제된 상태에서 실시한다. 교량 상부 통행차량의 부분통제 혹은 전면통행 제한은 심각한 교통체증과 이용객에게 큰 불편을 끼치며 그에 따른 막대한 물류비용의 손실을 초래하는 등 많은 문제점을 갖고 있다. 통행차량이 많은 대도시 주변의 교량에 대해서는 차량 통제가 거의 불가능하여 현실적으로 내하력 평가

1) 정희원, 호남대학교 토목환경공학과 박사과정

2) 정희원, 호남대학교 토목환경공학과 교수

* Corresponding author : yyk6960@korea.kr 062-940-5460

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

를 위한 실험 또한 불가능한 실정이다(조수진 등, 2007). 따라서 통행차량의 통제 또는 차단을 하지 않고 내하력을 평가할 수 있는 새로운 평가 시스템이 요구되고 있다.

본 연구에서는 재하실험을 통해서 측정되는 처짐 계측을 대체하기 위한 새로운 처짐 산정법을 제시하기 위하여 실제 교량에서 등속도로 주행하는 차량에 의해 발생하는 가속도 측정 데이터로부터 얻어지는 진동 모드별 고유진동수를 이용하여 동적처짐을 계산할 수 있는 방법을 제시하고, 실측된 변위 응답과 비교·분석을 실시하였다.

2. 주행하중에 의한 동적처짐 계산식

본 연구는 차량의 주행에 따른 고유진동수 계측 결과만을 이용하여 교량의 처짐을 예측하고 상태를 평가할 수 있는 모델을 개발하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 차량의 주행하중에 의해 발생하는 교량의 고유진동수를 이용한 처짐 계산식이 우선적으로 정의되어야 한다(정진환 등, 1998).

주행하는 차량에 의해 교량에 작용하는 하중은 차량으로 전달되는 하중이므로, 본 연구에서는 이 차량하중을 Fig. 1에 보인 바와 같이 등속도 v 로 이동하는 차륜하중(집중하중) F_0 로 간주하여 다음과 같은 과정에 의해 처짐을 예측하는 공식을 유도하였다(Joseph et. al., 1999).

경간 $L(0 \leq vt \leq L)$ 인 단순교에서 Fig. 1에 보인 것과 같이 임의의 거리 $x(x = a = vt)$ 위치에 집중하중 F_0 가 작용할 때, 진동에 의한 n 차 모드에서의 modal-shape function $\phi_n(x)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_n(x) = \phi_n(vt) = \sin\left(\frac{n\pi vt}{L}\right) = \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (1)$$

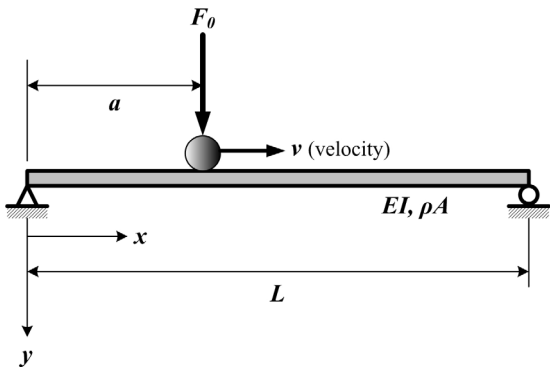


Fig. 1 Simply supported bridge girder subject to moving load

그리고 휨모멘트에 의한 영향을 주로 고려하는 교량에서 연직방향으로 자유 진동하는 교량의 n 번째 진동 모드에서 고유진동수 w_n 는

$$w_n = \beta \sqrt{\frac{k}{m}} = \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (2)$$

여기서, L 은 경간길이(m), ρ 는 단위질량(kg/m^3), A 는 단면적(m^2)이고 EI 는 휨강성이다.

또한 식 (2)와 같은 조건을 갖는 단순교에서 주행차량의 차륜하중에 해당하는 집중하중이 등속도 운동을 하는 경우의 n 번째 모드에서 운동방정식은 다음과 같다(Jung, 2003).

$$\ddot{q}_n + w_n^2 q_n = \frac{P_n(t)}{M_n} \quad (3)$$

여기서, M_n 은 n 번째 모드에서의 modal mass로서 다음과 같이 정의된다.

$$M_n = \int_0^L \rho A \phi_n^2(x) dx = \frac{\rho AL}{2} \quad (4)$$

이와 함께 식 (3)에서 P_n 은 n 번째 모드에서 작용하중 F_0 에 의해 발생하는 modal force로서 다음과 같이 정의된다.

$$P_n = \frac{F_0}{M_n w_n} \left[\frac{1}{\left(\frac{n\pi v}{L}\right)^2 - w_n^2} \right] \left(\frac{n\pi v}{L} \sin w_n t - w_n \sin \frac{n\pi v}{L} t \right) \quad (5)$$

이상과 같이 정의되는 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 교량의 길이가 L 인 단순교에서 집중하중 F_0 가 작용할 때 식 (3)의 운동방정식 $q_n(t)$ 의 해는 다음과 같이 결정된다.

$$q_n(t) = \frac{2F_0}{\rho AL w_n} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \left(\frac{w_n \sin \frac{n\pi v}{L} t - \frac{n\pi v}{L} \sin w_n t}{w_n^2 - \left(\frac{n\pi v}{L}\right)^2} \right) \quad (6)$$

식 (6)과 같이 정의되는 운동방정식의 해로부터 집중하중 F_0 에 의해 발생하는 자유진동 n 차 모드까지의 수직 처짐 $y(x, t)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$y(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(x) q_n(t) \quad (7)$$

이상으로부터 정의되는 수직처짐식 (7)에 식 (1)과 식 (6)을 대입하여 정리하면, 차량 축하중이 집중하중 F_0 로 작용하는 단순교에서 발생하는 수직처짐의 계산이 가능해진다. 즉, 주행하중에 의해 교량에 발생하는 가속도 응답 측정 데이터로부터 진동 모드별 고유진동수를 측정하고, 이 결과로부터 모드 중첩에 의해 처짐을 계산할 수 있는 다음과 같은 식을 얻게 된다.

$$y(x,t) = \sum_{n=1}^N \frac{2F_0}{\rho A L w_n} \left[\frac{1}{\left(\frac{n\pi v}{L} \right)^2 - w_n^2} \right] \left(\frac{n\pi v}{L} \sin w_n t - w_n \sin \frac{n\pi v}{L} t \right) \sin \frac{n\pi x}{L} \quad (8)$$

식 (8)로 유도된 식은 주행하는 차량의 1축에 해당하는 차륜하중에 의한 처짐만을 계산하는 것이다. 그러나 주행 차량 또는 설계하중은 2축 또는 3축 차량이므로 Fig. 2와 같은 차량하중 및 교량제원을 갖는 조건을 갖는다. 따라서 각 축별 차륜하중에 의한 처짐을 식 (8)로부터 계산하고 중첩법에 의하여 각 차륜별로 발생하는 처짐의 합을 주행 차량에 의해 발생하는 교량의 총처짐으로 산정한다.

이상과 같은 고유진동수 모드 중첩법과 차륜별 처짐의 합을 계산하는 과정이 매우 복잡하기 때문에 수계산을 통한 결과의 정확성을 신뢰하기 힘들다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 계산 결과의 정확성과 자동화를 위하여 Fig. 3에 보인 것과 같은 처짐 계산 알고리즘을 구현하기 위하여 Microsoft사의 MS-Excel을 이용하여 스프레드 시트를 작성하고, 이를 이용하여 처짐 계산을 수행하였다.

3. 재하실험

3.1 대상교량

본 연구에서 제안하는 처짐 계산식에 적용하기 위한 고유진동수 측정 및 예측 모델의 검증이 필요하다. 따라서 동적처짐 측정을 위하여 Table 1에 보인 것과 같은 제원을 갖는(국토해양부, 2009) 국도 및 지방도 상에 위치하는 교량 중 상부구조 형식이 PSC I형 거더인 교량 12개를 대상으로 동적재하 실험을 실시하여 시험차량의 주행 속도별로 가속도와 처짐을 측정하고, 이로부터 고유진동

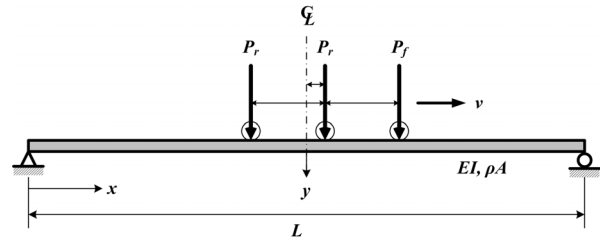


Fig. 2 Multi-Axial Vehicle Loads

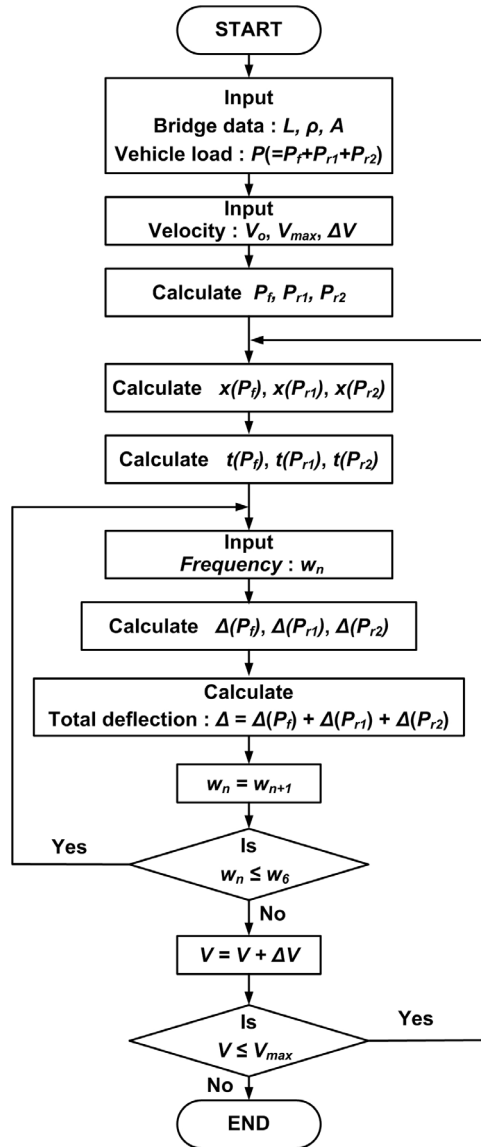


Fig. 3 Flow-Chart of Deflection Calculation

수를 측정하였다.

처짐 계산식의 적용성을 검증하기 위하여 측정 대상 교량들을 선정할 때 공용년수, 교장, 최대 경간장, 거더 개수, 교통량 등을 주요 변수로 고려하였다. 공용년수는 5

Table 1 Specification of PSC-I Girder Bridges

| Bridge | Length (m) | Max. Span length (m) | Width (Effective width) (m) | Num. of Span (Girder) | Traffic | Completion Date |
|-------------|------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------|---------|-----------------|
| Gwangsinsin | 510 | 30 | 35(29) | 17(7) | 20168 | 1983 |
| Daechon | 60 | 30 | 20(20) | 2(10) | 2000 | 2006 |
| Samdo | 110 | 19 | 10(8) | 6(5) | 1500 | 1993 |
| Sungnae | 490 | 35 | 9(8) | 17(6) | 1100 | 1987 |
| Songsan | 245 | 30.7 | 10(8.5) | 8(5) | 350 | 1977 |
| Youngsan | 404 | 30 | 16(13) | 14(8) | 25219 | 1972 |
| Ungok | 150 | 30 | 23(18) | 5(13) | 17314 | 1992 |
| Wonimgok | 442 | 35 | 8(6.5) | 14(6) | 2670 | 1986 |
| Imgok | 160 | 27 | 9(7) | 6(5) | 1800 | 1993 |
| Imdong | 190 | 19 | 8.5(7) | 10(5) | 3370 | 1973 |
| Hanam | 61 | 30.5 | 18.7(17.5) | 2(9) | 7302 | 1985 |
| Hancheon | 230 | 42 | 4.6(4) | 5(5) | 330 | 1967 |

년에서 44년, 교장은 19m에서 약 510m, 최대 경간장은 19m에서 42m, 거더 개수는 5개에서 13개, 일교통량은 330대에서 약 25,000대까지로 다양하게 선정하여 처짐 계산식의 적용성을 검증하는데 이용하였다.

검증 대상 교량의 변수를 다양하게 선정한 이유는 교량의 내하력 및 사용성능에 교량의 공용년수가 상당한 영향을 주고 있는 것으로 알려져 있기 때문이며, 공용년수와 함께 대상 교량을 통과하는 일 교통량 또한 내하력에 상당한 영향이 있다는 연구결과(조수진 등, 2007)를 참고하여 반영하였다. 그리고 구조물의 처짐에 영향을 주는 역학적 변수는 구조물의 길이와 단면의 성질이기 때문에 대상 교량의 교장 및 거더 개수를 추가적인 변수로서 선정하였다.

3.2 재하차량 및 계측

재하시험에 사용된 재하차량은 3축의 15 tonf 덤프트럭 1대를 사용하였으며, 사용된 시험차량의 총중량은 DB-24 설계하중의 약 67% 수준을 유지할 수 있도록 모래를 만재하였다. 재하차량의 총중량과 전륜 및 후륜의 축별 하중의 계량 값은 Table 2에 정리하였다.

동적재하 시험을 통하여 가속도 및 처짐을 계측해야 하는 대상 교량 12개에 대해서 각 교량별로 경간장이 가장 긴 경간을 동적재하시험 대상 구간으로 선정하였다. 각 교량의 측정 대상 경간에 대해서 최대 처짐 계측을 위하여 50mm 용량의 전기식 변위계(LVDT)를 경간 중앙에 설치하였다. 그리고, 가속도 계측을 위하여 용량 1g(응답 주파수 50 Hz, 고유진동수 100Hz)의 가속도계를 이용하

Table 2 Specified Axial Load of Test Vehicle

| Test Vehicle | truck loads (tonf) | front wheel (tonf) | rear wheel (tonf) | rear wheel (tonf) |
|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| 3 axle Dump Truck | 28.89 | 6.6 | 11.145 | 11.145 |

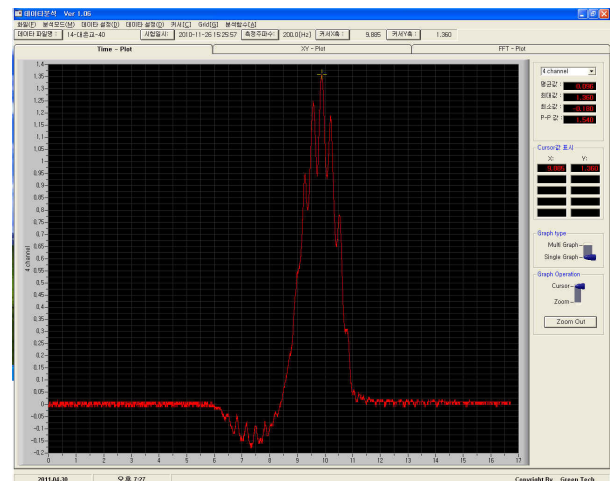


Fig. 4 Measured Dynamic Deflection Time History (Imgok bridge)

였다. 대상 교량별로 거더 중앙 하면에 변위계와 가속도계를 각각 부착하여 재하차량의 주행속도를 20km/h로부터 시작하여 각 교량의 재하시험 조건에 따라서 10km/h 또는 20km/h의 속도로 증가시키면서 주행속도별로 가속도 및 처짐을 계측하였다.

대상 교량에서 계측된 처짐 및 가속도 응답 결과의 형태는 Fig. 4 및 Fig. 5에 보인 바와 같으며, 계측을 위한 재하차량의 최대 주행속도는 측정 대상 교량의 선형 조건에 따라서 40km/h에서 75km/h까지로 하였다.

본 연구에서 제안하는 고유진동수를 이용한 동적처짐

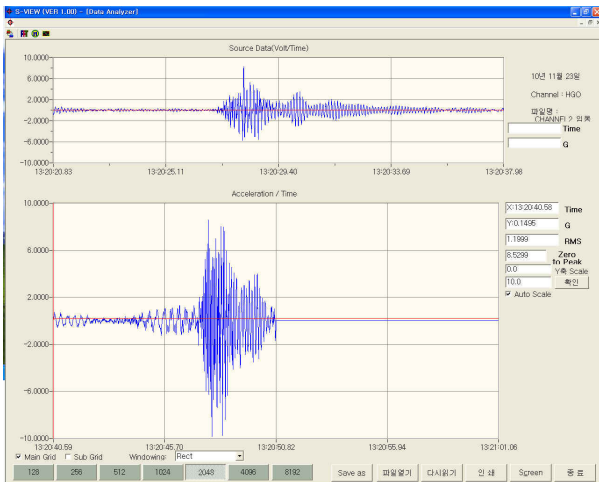


Fig. 5 Measured Acceleration Time History (Imgok bridge)

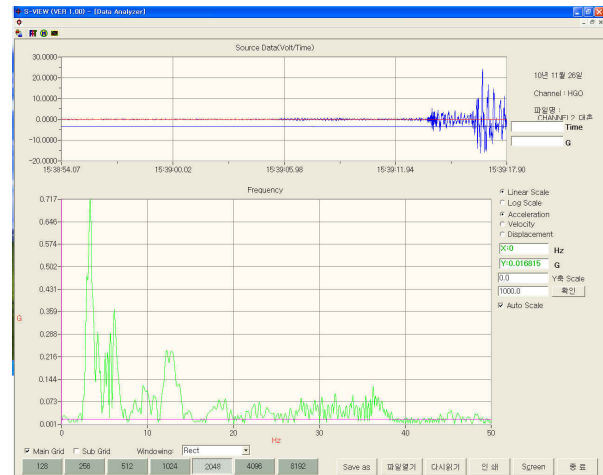


Fig. 6 Measured Natural Frequency (Imgok bridge)

계산을 위하여 Fig. 5에 보인 것과 같은 가속도 측정 결과로부터 고유진동수를 측정하기 위하여 샘플링 주파수를 100Hz로 하고, 보다 개선된 측정 결과를 얻기 위하여 저주파 통과 필터를 사용하였다.

측정된 교량 가속도 데이터를 Fig. 6에 보인 것과 같이 필터링 주파수 256Hz로 고속 푸리에 변환(FFT)하여 1차에서부터 7차까지의 진동 모드에 대한 고유진동수를 측정하였다. 그러나 본 연구에서는 가속도 측정시 현장에서 발생할 수 있는 여러 가지 제약조건 및 측정장치의 노이즈 등을 고려하여 1차 고유진동수를 무시하고, 측정된 2차 모드부터 신뢰할 수 있다고 판단하여 이를 1차 모드로 하여 6차 모드까지의 고유진동수를 측정하였다.

4. 처짐 계산식 비교 및 통계 분석

본 절에서는 대상 교량별로 동적재하시험을 통해 측정된 주행속도별 실제 처짐과 진동 모드 적용에 따른 처짐 계산값을 비교하여 누적 진동 모드와 주행속도에 따른 통계분석을 실시하여 신뢰성을 검증하였다.

먼저 동적재하시험을 통하여 측정된 재하차량의 주행속도별 가속도 응답 데이터를 이용하여 측정된 고유진동수를 본 연구에서 제안하는 처짐 계산식에 적용하여 주행속도에 따른 동적처짐을 예측하였다. 처짐 계산식은 진동 모드에 따른 고유진동수를 고려할 수 있도록 유도되었기 때문에 본 연구에서는 처짐 계산시 재하차량의 주행속도별로 적용 진동 모드를 1차 모드에서부터 순차적으로 진동 모드를 계속 누적하여 6차 모드까지 반영하였다.

Fig. 7과 Fig. 8은 대상 교량 중 임곡교의 처짐 예측값과

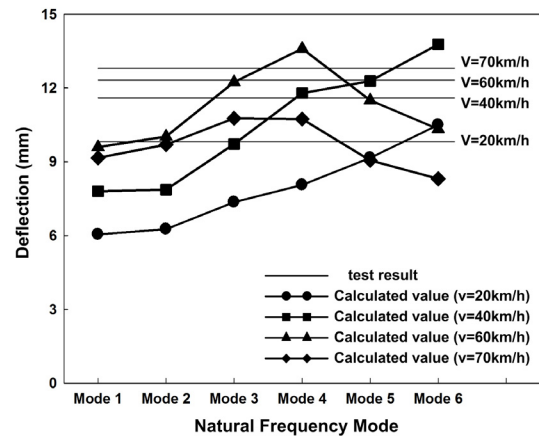


Fig. 7 Comparison of Test Results and Calculation Value by Natural Frequency Mode

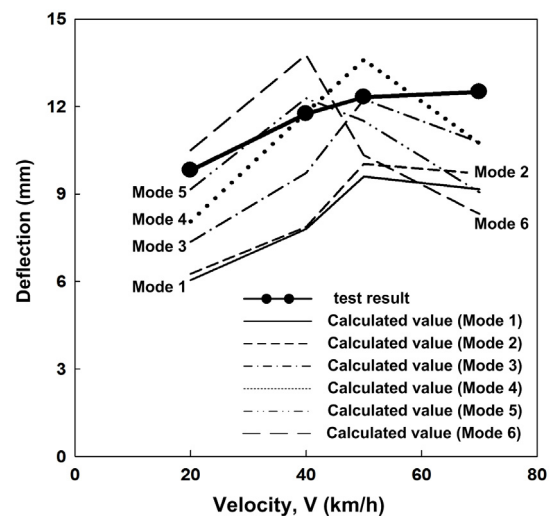


Fig. 8 Comparison of Test Results and Calculation Value by Vehicle Velocity

계산 결과를 진동 모드와 주행속도별로 비교하여 도해한 것이다. 주행속도에 따른 진동 모드별 처짐 예측 결과를 나타낸 Fig. 7을 살펴보면, 진동 모드가 낮은 경우에는 처짐을 비교적 작게 예측하고 있지만, 적용하는 진동 모드의 차수가 높아질수록 실제 처짐을 비교적 정확하게 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 진동 모드에 따른 주행속도별 처짐 예측 결과를 정리한 Fig. 8을 살펴보면 처짐 산정식에 적용하는 진동 모드가 높아질수록, 주행속도가 빨라질수록 실제 처짐과 유사한 계산 결과를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

본 연구에서 대상으로 하는 12개 교량에 대해서 이상과 같은 비교를 실시한 결과, 모든 교량에서 Fig. 7 및 Fig. 8에 정리한 것과 유사하거나 반대의 결과를 얻었다.

이에 본 연구에서는 검증 대상 교량 전체에 대한 종합적인 정확성 및 신뢰성 분석을 실시하여 처짐 계산식을 검증하는 것이 타당하다고 판단하였다. 이를 위하여 12개 교량 전체를 대상으로 처짐 산정식에 의한 계산 결과와 실제 측정된 처짐값의 비를 구한 후, 진동 모드와 주행속도별로 통계분석을 수행하였다.

4.1 주행속도별 진동 모드에 따른 분석

본 연구의 산정식으로 계산한 처짐과 재하시험을 통하여 측정된 실제 처짐의 비교검증 결과를 바탕으로 계산식의 정확성과 신뢰성을 분석하기 위하여 처짐 예측값과 실측 처짐값의 비를 계산하여 고유진동수를 적용한 주행속도 구간별로 통계분석한 결과를 Fig. 9에 정리하였다.

이 그림을 살펴보면, Fig. 9(a)에 보인 주행속도가 20 km/h 이하일 때 처짐을 계산한 경우에는 실측 처짐값에 비하여 약 77% 정도 높게 처짐이 계산되었다. 그리고 분산과 변동계수는 각각 0.755 및 0.491로서 오차가 비교적 크게 발생하였다.

다음으로 Fig. 9(b)에 보인 주행속도 20km/h 이상 40 km/h 이하일 때는 실제 처짐보다 약 53% 높게 계산되었지만, 분산과 변동계수는 각각 0.190과 0.285로서 저속의 주행속도보다 신뢰성이 개선되었다.

이와는 다르게 Fig. 9(c)에 보인 주행속도 40km/h 이상 60km/h 이하인 경우에는 실측 처짐과 계산값의 비가 약 1.124, 분산과 변동계수 또한 0.090 및 0.268로서 통계적으로 만족할만한 신뢰도 및 정확성을 확보하였다.

이와 함께 주행속도가 60km/h 이상인 경우에는 Fig. 9(d)에 보인 것처럼 계산식에 의한 처짐과 실측 처짐의

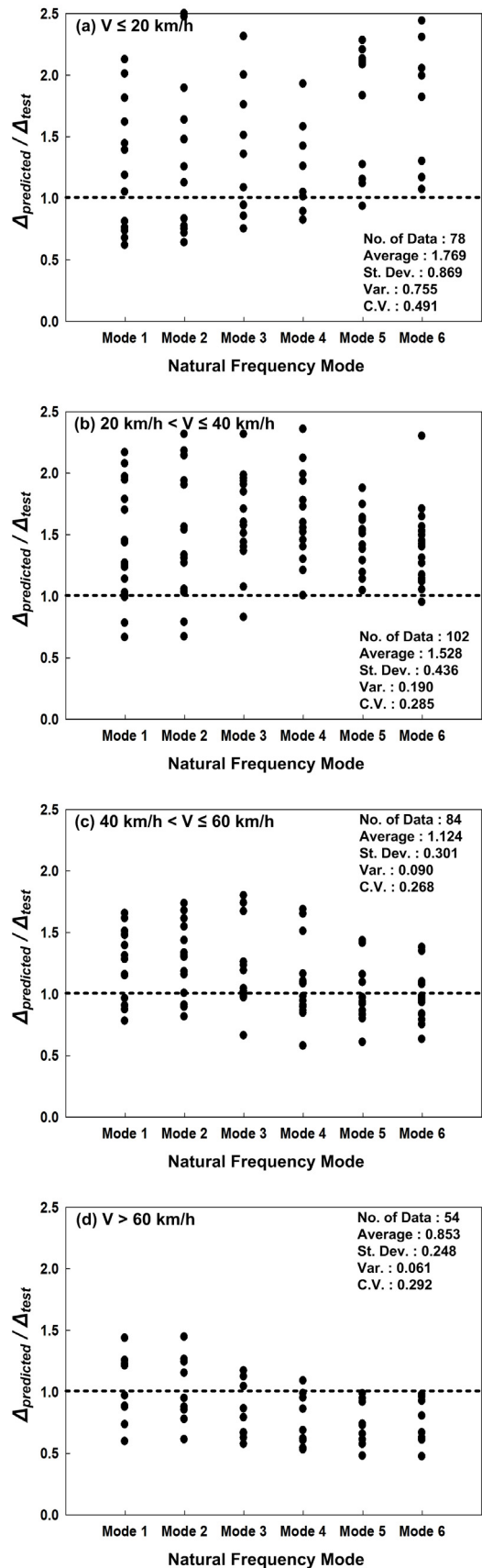


Fig. 9 Statistical Analysis by Velocity

비가 약 0.85로서 실제 처짐을 과소평가하지만, 분산과 변동계수가 0.061과 0.292로서 비교적 양호한 신뢰도를 확보하였다.

이상의 결과를 종합하면, 본 연구의 처짐 계산식은 주행속도가 저속인 경우에는 처짐을 비교적 크게 예측하고 있지만, 주행속도가 40 km/h 이상인 경우에는 적용 진동 모드에 따라서 처짐 예측의 정확도 및 신뢰도가 상당히 확보되었다고 판단된다.

4.2 진동 모드별 주행속도에 따른 분석

적용 진동 모드에 따른 처짐 산정식의 정확성을 파악하기 위해서 주행속도에 따른 진동 모드별로 계산한 처짐값과 재하시험을 통하여 측정된 실제 처짐값의 비를 계산하여 Fig. 10에 정리하였다.

이 그림을 살펴보면, Fig. 10(a)에 보인 1차 모드에 해당하는 고유진동수만을 고려하여 처짐을 계산한 경우에는 실측 처짐값을 약 1.26배 크게 산정하였으며, 분산과 변동계수는 각각 0.179 및 0.335로 분석되었다.

Fig. 10(b)에 보인 2차 모드까지 고유진동수를 고려하였을 때는 실제 처짐을 약 1.32배 크게 계산하였으며, 분산과 변동계수는 각각 0.238과 0.368이었다. 따라서 1차 모드 및 2차 모드까지의 고유진동수를 본 연구의 처짐 계

산식에 적용하여 산정하는 경우에는 정확성 및 신뢰도가 비교적 양호한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

이와는 다르게 Fig. 10(c)–(d)에 보인 것과 같이 3차 모드와 4차 모드까지 고유진동수를 고려하여 처짐을 산정한 경우에는 실측 처짐과의 비가 1.404 및 1.464로서 비교적 처짐에 크게 계산되었다. 분산과 변동계수 또한 0.361과 0.633 및 0.428과 0.543으로서 2차 모드 이하의 저차 모드만을 적용하는 경우와 비교하여 신뢰성 및 정확도가 상당히 부족하다는 것을 확인할 수 있다.

그러나 Fig. 10(e)–(f)에 도해한 5차 모드와 6차 모드까지의 고유진동수를 처짐 계산식에 적용한 경우에는 저차모드만을 적용한 결과와 유사하게 실제 처짐을 약 1.36–1.38배 정도 크게 산정하였다. 그러나 통계적 신뢰도를 의미하는 분산이 0.421과 0.502, 변동계수는 0.475와 0.513으로서 계산 결과의 정확성에 비하여 신뢰도가 상당히 부족한 것으로 나타났다.

이상의 결과를 종합하여 보면, 본 연구의 처짐 산정식은 고유진동수를 고려하는 진동 모드의 차수가 낮은 경우에 분산 및 편차가 작으면서 비교적 정확한 처짐을 계산하는 것으로 분석되었다. 그리고, 주행속도가 낮은 경우에는 적용 진동 모드에 상관없이 처짐을 크게 계산하지만, 주행속도가 빠를수록 비교적 정확하고 신뢰도가 양호한 처짐 계산이 가능할 것으로 판단된다.

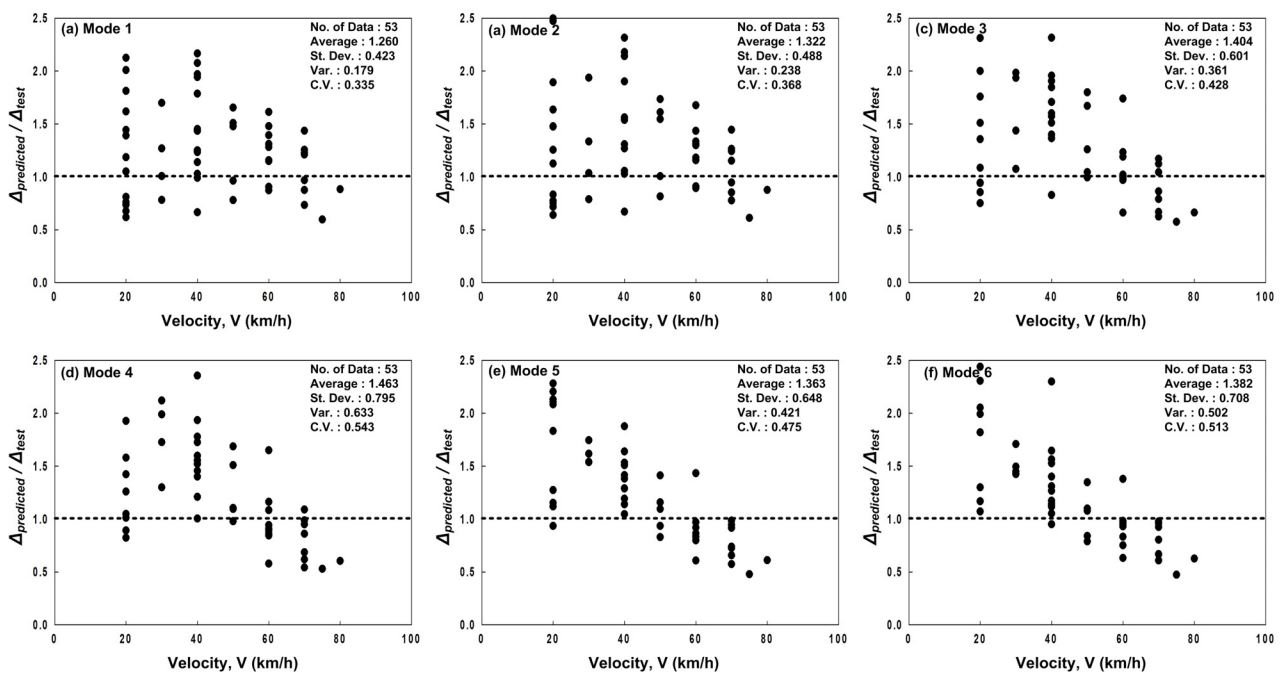


Fig. 10 Statistical Analysis by Frequency Mode

이와 함께, 본 연구의 처짐 계산식은 주행속도가 40~60km/h인 경우에는 적용하는 진동 모드에 상관없이 비교적 정확한 처짐 계산이 가능하며, 고유진동수를 적용하는 진동 모드의 차수가 낮을수록 처짐 계산의 정확도가 개선될 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 실제 교량에서 차량 주행에 따른 가속도 측정 자료를 이용하여 교량의 고유진동수를 진동모드별로 파악한 후, 수치 모델링을 통하여 유도된 동적하중에 따른 고유진동수를 고려한 처짐 산정식을 이용하여 교량의 내하력 및 손상도 평가에 이용되는 처짐을 재하실험을 통한 측정 없이 직접 계산할 수 있는 방법을 제시하였다. 그리고, 처짐 계산식을 검증하기 위하여 12개의 교량을 대상으로 동적재하시험을 실시하여 처짐을 측정하고 이 값을 본 연구의 처짐 계산식과 비교를 통한 통계분석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 모드중첩법에 의한 비감쇠 강제진동 이론을 이용하여 등속도로 이동하는 동적 주행하중에 의해 콘크리트 단층 거더 교량에 발생하는 처짐을 계산할 수 있는 수치 모델링 및 산정식을 제시하였다.
- (2) 본 연구의 처짐 산정식은 주행속도가 40km/h 이하의 저속인 경우에는 실제 처짐을 50% 이상 크게 계산하며, 이에 따른 표준편차는 0.87, 분산은 0.76으로 분석되었다. 그러나, 주행속도가 약 40km/h 이상인 경우에 대해서는 적용하는 진동 모드에 따라, 실측 처짐값을 약 85~112% 범위 내에서 비교적 정확하게 계산하고 있으며, 이에 따른 표준편차와 분산 또한 0.26 및 0.07로서 주행속도가 상대적으로 빠른 경우에 정확성 및 통계적 신뢰도가 비교적 우수하다고 할 수 있다.

- (3) 본 연구의 처짐 산정식은 주행속도 40~60km/h 구간에서 계산 처짐과 실측 처짐의 비가 약 1.12로서, 비교적 정확한 계산이 가능하며, 표준편차 0.30, 분산 0.09 및 변동계수 0.27로서 다른 주행속도에 비해서 양호한 신뢰도를 확보하였다. 그리고, 60km/h 이상의 고속 주행속도인 경우에는 계산에 적용하는 고유진동수의 진동 모드를 2차 모드 이하로 하였을 때, 계산 결과의 정확성 및 신뢰도를 확보할 수 있다.

참고문헌

1. 국토해양부 도로운영과, 2008년 도로현황조사, 국토해양부, 서울, 2009.
2. 신재인, 박창호, 이상순, 이병주, "PSC박스 교량의 통행차량에 의한 내하력 평가기법 개선", 한국구조물진단학회논문집, 제11권 제4호, 2007, pp.147-151.
3. 이종재, 이종원, 윤정방, "상시진동 데이터를 이용한 교량의 손상추정기법", 대한토목학회논문집, 제25권 제2A호, 2005, pp.375-385.
4. 이형진, 박정식, "수정된 웨이블릿 변환 개념을 이용한 계측 가속도 기록의 이중 적분법", 한국지진공학학회논문집, 제7권 제5호, 2003, pp.11-17.
5. 정진환, 김성도, 김영찬, 계만수, "교량의 실측 가속도 자료의 적분을 통한 변위 응답 추정에 대한 연구", 부산대학교 생산기술연구소논문집, 제55집, 1998, pp.105-114.
6. 조수진, 이진학, 이창근, 윤정방, "상시진동계측에 의한 교량의 공용내하력 평가", 대한토목학회논문집, 제27권 제1A호, 2007, pp.79-89.
7. Joseph, W. H., William, G. M. and Allen R., "Structural Dynamics-Theory and Applications", Addison-Wesley, CA, 1999, pp.460-467.
8. Jung, B. S., "Estimation of Displacements Using the Transformed Response in Time and Frequency Domain", Journal of Ocean Engineering and Technology, vol. 17, No. 2, 2003, pp.27-33.

(접수일자 : 2011년 5월 31일)

(수정일자 : 2011년 7월 5일)

(심사완료일자 : 2011년 7월 12일)

요 지

본 연구는 실제 교량에서 차량 주행에 따른 가속도 측정 자료를 이용하여 교량의 고유진동수를 진동 모드별로 파악한 후, 수치 모델링을 통하여 유도된 동적하중에 따른 6차 모드까지의 고유진동수를 고려하여 처짐을 계산할 수 있는 산정식에 관한 것이다. 처짐 계산식은 모드중첩법에 의한 비감쇠 강제진동 이론을 이용하여 교량을 등속도로 이동하는 동적 주행하중에 의해 발생하는 처짐을 계산할 수 있도록 수치 모델링을 하였으며, 이를 검증하고 자동으로 계산할 수 있도록 하였다. 그리고, 제안된 처짐 계산식을 검증하기 위하여 콘크리트 교량을 대상으로 동적재하시험을 실시하여 처짐을 측정하고 이 값을 본 연구의 처짐 계산식의 결과와 비교하여 정확성 및 타당성 검증을 실시하였다. 이 결과, 본 연구에서 제시하는 처짐 계산식은 고유진동수를 고려하는 진동모드의 차수가 낮은 경우에 비교적 정확한 처짐을 예측하며, 주행속도에 따라서는 적용하는 진동 모드 차수에 의하여 처짐 예측의 정확도가 영향을 받는 것을 확인하였다. 그리고, 주행속도가 비교적 빠른 경우에 한하여 본 연구에서 제시하는 처짐 계산식은 진동 모드에 상관없이 비교적 정확하고 신뢰도가 양호한 계산 결과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

핵심 용어 : 가속도, 콘크리트 교량, 처짐, 고유진동수, 진동
