

동적 거동계측을 통한 이동하중 추정

Estimation of Moving Loads by Measuring Dynamic Response

조재용* 신수봉** 최광규*** 권순정****
Cho, Jae Yong Shin, Soobong Choi, Kwang-Kyu Kwon, Soon-Jung

Abstract

An algorithm is proposed for estimating axle loads of trucks moving over a bridge by measuring dynamic responses. The bridge was modeled by a beam structure in the current applications of the proposed algorithm. Among the state vectors, measured acceleration was used and displacement was computed from measured strain at the same location. Nodal force vectors were computed by using a ready-made database of equivalent nodal force transformation matrix. The algorithm was examined through simulation studies and laboratory experiments. The effects of measurement noise and velocity error were investigated through simulation studies.

요 지

본 논문에서는 교량상을 이동하는 차량의 차축하중을 교량의 동적거동을 계측하여 추정하는 알고리즘을 제안하였으며, 교량을 보로 모델하여 알고리즘을 적용하였다. 가속도는 교량에서 직접 계측하였으며, 변위는 가속도와 같은 위치에 부착한 변형률을 변환하여 계산하는 식을 제안하였다. 절점하중벡터는 속도별로 준비해둔 절점하중변환행렬 데이터베이스를 사용하여 구하였다. 개발된 알고리즘을 수치예제와 실내모형실험을 통해 검증하였다. 수치예제에서는 계측오차와 속도 및 위치오차가 하중식별에 미치는 영향을 분석하였다.

Keywords : Moving load, Dynamic response, Measurement noise, Velocity error

핵심 용어 : 이동하중, 동적거동, 측정오차, 속도오차

* 정희원, 인하대학교 토목공학과 박사후연구원

** 정희원, 인하대학교 토목공학과 부교수

*** 정희원, 동아대학교 토목공학과 교수

**** 정희원, 코레일 철도연구개발센터 기술연구팀 차장

E-mail : jryong72@chol.com 016-555-9131

• 본 논문에 대한 토의를 2007년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2007년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

구조물의 거동 예측자료를 이용하여 이동하중의 크기를 추정하는 방법은 정적인 방법과 동적인 방법들로 분류되고 있다. 지금까지 소개되어진 대부분의 방법들은 정적인 것으로 이동하중에 의한 구조물의 거동을 정적 하중에 의한 거동으로 가정하여 해석하는 방법들이다. 교량의 거더 하면에서 측정된 변형률 데이터로 거더의 모멘트를 계산하여 모멘트의 정적 영향선이나 영향면과 비교하여 이동하중의 크기를 구하려는 방법과 구조물의 변위를 측정하여 정적 지배방정식으로 이동하중의 크기를 추정하려는 시도가 있었다(황의성 등, 1999 ; 류지영 등, 2001 ; 홍진석 등, 2001, 정지원 등, 2006). 단경간 교량의 지점 바로 위 거더의 연직방향 변형률을 측정하여 반력을 계산하고 이를 반력의 정적 영향선과 비교하여 이동하중의 크기를 추정하는 알고리즘도 제안되었다.(Ojio et al., 2005) 이동하중에 의한 구조물의 거동은 필연적으로 진동과 충격의 효과가 발생하여 정적인 거동과 많은 차이를 보인다. 정적인 방법들은 알고리즘에서 정적인 방정식을 사용하므로 이 진동과 충격에 의해 발생한 정적 거동과의 차이를 기본적으로 에러로 다룰 수밖에 없다.

동적인 방법들은 알고리즘에서 동적 지배방정식을 사용한다. 동적 지배방정식을 사용하면 이동하중에 의해 발생하는 진동과 충격의 효과가 방정식에서 상쇄되는 장점이 있다. 동적 지배방정식을 사용하는 알고리즘은 주파수 영역과 시간영역에서 하중을 추정하는 것으로 분류할 수 있다. 가속도와 변형률의 시간이력을 측정하여 주파수 영역에서 이동하중의 크기를 구하는 알고리즘들이 Zhu et al(2003)과 Jiang et al (2003)에 의해 제안되었다. 그밖에 철도교의 열차하중에 의한 동적확대계수에 대한 연구(Savin, 2001), 이동하중에 의한 연속교의 거동에 대한 해석적 연구(Ichikawa et al., 2000), 구조물에 가해지는 하중의 간단하면서도 정확한 모델의 개발(Berzeri et al., 2000), 이동하중 모델에 대한 연구 등이 수행되었다(Jiang et al., 2004).

본 논문에서는 동적 지배방정식을 사용하고 시간영역에서 이동하중을 추정하는 알고리즘을 제안하고자

한다. Zhu 등(2003)과 Jiang 등(2003)은 동적 알고리즘을 사용하지만 변형률 데이터를 가공하여 사용하므로 실시간 해석에 어려움이 있다. 제안하는 알고리즘은 가속도와 변형률의 측정위치를 일치시켜 그러한 문제가 없도록 하였다. 제안한 알고리즘은 유한요소 해석모델을 사용하므로 모델 설정이 가능한 모든 경우에 사용할 수 있으나 본 논문에서는 보모델만을 사용하였다. 개발된 알고리즘을 검증하기 위하여 수치모의해석과 실내실험을 수행하였다.

2. 이동하중 추정 알고리즘

2.1 지배방정식

시간영역에서의 구조물 동적 지배방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = f(t) \quad (1)$$

여기서, M , C , K 는 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬이고 \ddot{u} , \dot{u} , u , f 는 가속도, 속도, 변위, 하중벡터이다.

질량행렬은 재료 및 단면에 대한 정보가 주어지면 근사적으로 계산할 수 있으며, 강성행렬은 복잡하지 않은 구조물의 경우 간단한 재하실험을 통해 추정할 수 있다. 복잡한 구조물의 경우에도 질량과 강성행렬을 system identification 기법의 적용에 의해 추정할 수 있기 때문에 본 논문에서는 질량행렬과 강성행렬은 기지의 값으로 가정하였다(권순정 등, 2004). 또한 본 연구에서는 차량이 교량을 통과하는 시간이 일반적으로 길지 않기 때문에 진동에 미치는 감쇠의 영향은 무시할 수 있다는 가정 하에 식(2)에서와 같이 감쇠행렬은 생략하였다.

$$M\ddot{u}(t) + Ku(t) = f(t) \quad (2)$$

2.2 미측정 자유도에서의 가속도 계산

실구조물에 대한 해석모델은 일반적으로 대상 구조물의 거동을 충분히 표현할 수 있을 만큼의 제한된 개

수의 자유도를 가진다. 그러나 토목 구조물은 대부분 그 규모가 크기 때문에 구조물의 거동을 충분히 표현 하려면 해석모델은 많은 수의 자유도를 가지게 된다. 그리고 절점의 회전 자유도와 교량의 변위 등은 현재의 기술로서도 정확하고 충분히 측정하기 어렵기 때문에 필연적으로 측정데이터의 공간적 불완전성이 발생하게 된다. 따라서 제한하는 알고리즘은 이러한 측정 데이터의 불완전성을 고려할 수 있도록 개발되어야 한다.

가속도벡터에 대해 측정된 자유도와 미측정 자유도를 구분해서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\ddot{\mathbf{u}}(t) = \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_1 \\ \ddot{\mathbf{u}}_2 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

여기서, 총 자유도수는 N 으로 $N=N_1+N_2$, \mathbf{u}_1 ($N_1 \times 1$)은 측정된 자유도의 가속도벡터, \mathbf{u}_2 ($N_2 \times 1$)는 미측정 자유도에서의 가속도벡터이다. 위의 구분은 속도벡터, 변위벡터에도 같은 방식으로 적용된다.

식(2)의 동적 지배방정식을 사용하려면 해석모델의 모든 자유도에서의 가속도벡터와 변위벡터를 알아야 한다. 모드중첩법을 가속도벡터에 대해 측정 자유도와 미측정 자유도를 분리하여 표현하면 다음과 같다.

$$\ddot{\mathbf{u}} = \begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_1 \\ \ddot{\mathbf{u}}_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} = \Phi \ddot{\mathbf{q}} \quad (4)$$

여기서, Φ ($N \times N_m$)는 모드형상행렬, \mathbf{q} ($N_m \times 1$)는 일반화좌표벡터, Φ_1 ($N_1 \times N_m$)와 Φ_2 ($N_2 \times N_m$)는 각각 측정 자유도와 미측정 자유도에서의 모드형상행렬이다.

측정된 자유도에서의 가속도벡터로부터 미측정 자유도의 가속도벡터를 구하기 위해 식(5)와 같이 최소제곱법을 사용하여 일반화좌표벡터를 계산하고, 이렇게 구한 일반화좌표벡터로부터 미측정 자유도의 변위벡터를 구한다.

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{q}} &= [\Phi_1^T \Phi_1]^{-1} \Phi_1^T \ddot{\mathbf{u}}_1 \\ \ddot{\mathbf{u}}_2 &= \Phi_2 \ddot{\mathbf{q}} \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)는 기본적으로 최소제곱법을 사용하기 때문에 모드중첩법에 사용할 수 있는 모드의 수는 측정된 자유도의 수를 넘어설 수 없다는 식(6)의 식별 제한이 생긴다.

$$N_m \leq N_1 \quad (6)$$

해석에 사용되는 모드의 수가 많을수록 좋은 결과를 줄 것이 쉽게 예상되기 때문에 사용되는 모드의 수는 최대로 잡아 측정 자유도의 수로 한다. 변위벡터도 모드중첩법을 가속도벡터와 같은 방식으로 적용하여 미측정 자유도에서의 변위벡터를 구한다.

2.3 측정 자유도에서의 변위 계산

교량의 변위는 직접 측정하기 어려운 경우가 대부분이므로 제안된 알고리즘에서는 비교적 측정하기 쉬운 변형률 데이터를 사용한다(황의성 등, 1999 ; Zhu et al., 2003). 거더의 하부 플랜지에서의 교축방향 변형률이나 슬래브교 하면의 교축방향 변형률을 측정 한 경우에는 변형률 데이터로 일반화좌표벡터를 구할 수 있다.

보에서 변형률과 모멘트 사이의 관계는 아래의 식(7)과 같다.

$$\epsilon_b = \frac{M}{EI} \frac{h}{2} \quad (7)$$

여기서, ϵ_b 는 보 하면의 교축방향 변형률, h 는 보의 깊이이다.

보의 곡률과 모멘트는 다음의 관계를 가진다.

$$u'' = - \frac{M}{EI} \quad (8)$$

여기서, u'' 는 변위를 공간에 대해 두 번 미분한 것으로 곡률과 같다.

모드 중첩법은 공간의 함수인 모드형상행렬과 시간의 함수인 일반화좌표벡터로 이루어져 있으므로 모드

형상행렬을 공간에 대해 미분하면 곡률에 대한 식이 된다.

$$\mathbf{u}'' = \boldsymbol{\Phi}'' \mathbf{q} \quad (9)$$

위의 식(7),(8),(9)를 변형률과 일반화좌표벡터 사이의 관계로 정리하면 아래의 식(10)이 구해진다.

$$\boldsymbol{\epsilon}(t) = -\frac{h}{2} \mathbf{u}''(t) = -\frac{h}{2} \boldsymbol{\Phi}'' \mathbf{q}(t) \quad (10)$$

위 식(10)으로 변형률 데이터에서 일반화좌표벡터를 구하여 전체 자유도에 대한 변위벡터를 얻을 수 있다. 수치적 오차를 줄이기 위해서는 측정치의 미분이나 적분과정을 피하는 것이 바람직하다. 본 논문에서는 가속도 계측위치와 변형률의 계측위치를 일치시킴으로써 변위와 가속도를 적분이나 미분과정 없이 구하였다.

2.4 이동하중과 하중벡터의 관계

지배방정식에서의 하중벡터 $f(t)$ 는 유한요소모델의 등가절점하중이고 이동하중은 구조물 상을 통과하는 하중이므로 이 두 벡터 사이의 관계를 식(11)과 같이 정의할 수 있다.

$$\mathbf{f}(t) = \mathbf{D}(t, v) \mathbf{p}(t) \quad (11)$$

여기서, $\mathbf{p}(N_p \times 1)$ 는 이동하중벡터, N_p 는 통과차량의 차축의 개수이다. $\mathbf{D}(N \times N_p)$ 는 이동하중벡터를 절점하중벡터로 변환해 주는 절점하중변환행렬이다. 실제 통과차량의 중량은 고정된 값이지만 차량이 이동하면서 진동하기 때문에 이동하중 $\mathbf{p}(t)$ 는 시간에 따라 변하는 하중으로 식(11)에서와 같이 시간의 함수로 표현하였다.

불완전 측정의 경우가 아닌 모든 자유도에서 거동을 측정하였다면 수직방향의 절점하중은 그 절점을 지나

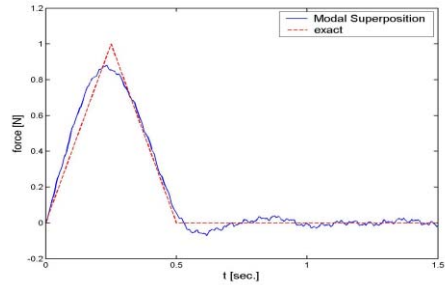


Fig. 1 절점하중변환행렬의 구성

는 시점에서 최고점을 가지고 인접 절점을 지날 때 0이 되는 삼각형 모양이어야 한다. 그러나 미측정 자유도의 거동을 구하기 위해 모드중첩법을 사용하면 삼각형 모양이어야 할 절점하중이 변화하는데 Fig. 1과 같은 양상을 보인다. 그러나 해석에서 사용할 모드형상의 개수가 정해지면 절점하중이 변하는 양상 또한 고정되므로, 변화한 절점하중의 형상을 절점하중변환행렬이 정확히 모사할수록 해석결과는 정확해진다.

알고리즘의 검증과 다양한 오차의 영향을 고려하기 위한 수치예제에서는 해석모델에 단위하중을 적용하여 절점하중을 계산한 것을 절점하중변환행렬로 사용하였다. 이동하중의 통과속도에 따라 절점하중의 변화양상이 달라지지는 않으므로 실내 모형실험에서는 재하실험을 통해 얻어진 데이터로 추세선을 만들어 각 속도에 대한 절점하중변환행렬 데이터베이스를 구축하여 사용하였다.

3. 수치예제

3.1 해석모델

단순지지된 보모델에 대하여 모의해석을 수행하였다. 측정점에서의 가속도와 변형률 데이터는 식(12)의 Biggs의 이론식을 사용하여 모사하였다.

$$\mathbf{u} = \frac{2P}{mL} \sum_{r=1}^{n_m} \frac{\sin \Omega_r t - \frac{\Omega_r}{\omega_r} \sin \omega_r t}{\omega_r^2 - \Omega_r^2} \sin \frac{n\pi x}{L} \quad \text{where} \quad \Omega_r = \frac{r\pi v}{L} \quad (12)$$

여기서, u 는 측정점의 수직변위, P 는 이동하중의 크기, m 은 보의 단위길이당 중량, L 은 보의 지간, r 은 모드넘버, n_m 은 사용된 모드의 수, ω 는 보의 고유진동수, t 는 시간, x 는 측정점의 위치이다.

식(12)를 시간에 대한 변수 t 에 대해 두 번 미분하여 가속도 데이터를 구하고 공간에 대한 변수 x 에 대해 두 번 미분하여 얻어지는 곡률로써 변형을 데이터를 구하였다. 해석모델의 지간 $L=30$ m이고, 휨강성 $EI=4.41 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^2$, 단위길이당 질량 $m=7650 \text{ kg/m}^2$ 이다. 절점은 7개, 총 자유도수는 12개이고 측정된 자유도는 5개로 하였다. Biggs 식 계산에 사용된 모드의 수 $n_m=100$ 이다.

3.2 속도오차의 영향 분석

이동하중이 교량에 진입할 때 속도측정이 부정확했거나 교량진입 후 속도의 변화로 인한 오차를 고려해보았다. 알고리즘은 이동하중이 교량을 등속도로 통과한다고 가정하고 하중의 위치를 추정하므로 속도오차는 곧 하중의 위치오차이기도 하다. 오차는 통과속도의 1, 2, 5%를 고려하였다. 각 측정속도에 대한 오차의 영향은 Fig. 2, 3, 4와 같다.

오차의 크기를 정량화하기 위해 식(13)의 평균치 오차(AE)와 RMS 오차(RE)를 정의하여 사용하였다. 식(13)에서는 $z(t_i)$ 는 시간단계에서의 이동하중의 추정값이고 $\hat{z}(t_i)$ 는 정해이다. 평균치 오차 AE는 전체 통과시간 동안의 추정하중 평균치와 정해의 차이이고 RMS 오차 RE는 각 시간단계에서 얼마나 큰 오차가 발생했는가를 정량화한 것이다.

$$AE = \left| \frac{\sum z(t_i) - \sum \hat{z}(t_i)}{\sum \hat{z}(t_i)} \right| \times 100\% \quad (13)$$

$$RE = \frac{\sqrt{\sum (z(t_i) - \hat{z}(t_i))^2}}{\sqrt{\sum \hat{z}(t_i)^2}} \times 100\%$$

Fig. 2, 3, 4에서 확인할 수 있듯이 속도오차의 영

향은 시간단계가 진행될수록 커지는 양상을 보여준다. 시간단계가 진행될수록 추정된 이동하중이 점점 작아지는 것은 실제로 통과한 이동하중의 속도에 비해 측정된 속도가 저평가된 것으로 오차를 모사하였기 때문이다.

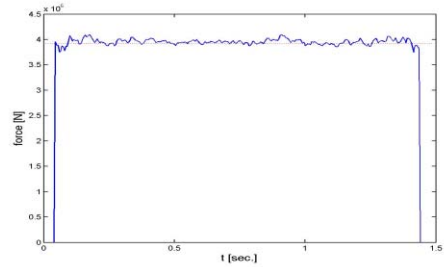


Fig. 2 속도오차 1%일 때의 하중식별 결과

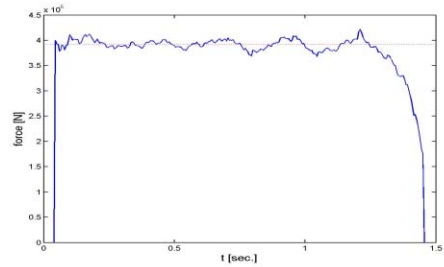


Fig. 3 속도오차 2%일 때의 하중식별 결과

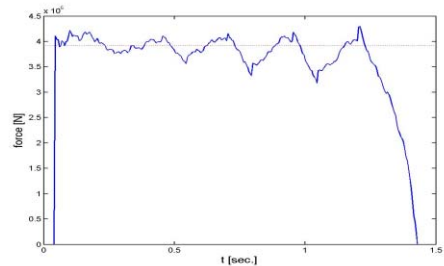


Fig. 4 속도오차 5%일 때의 하중식별 결과

Table 1 속도오차에 따른 해석결과의 오차

속도오차	1%	2%	5%
AE(%)	0.944	0.408	3.49
RE(%)	1.54	3.01	8.64

속도오차에 따른 오차의 크기는 Table 1과 같다. 속도오차가 5% 이하인 경우 평균치의 오차는 4% 이내이다. 현재 개발된 센서는 통과하중의 횡방향 위치까지 측정이 가능하므로 차량의 속도는 상당히 정확하게 측정할 수 있다. 따라서 실제 교량에 적용되는 시스템에서 통과하중의 속도오차는 1% 이내 정도로 해석에 크게 영향을 미치지 않을 것으로 예상된다.

3.3 측정오차의 영향 분석

계측장비를 사용해 데이터를 얻을 때 필연적으로 발생하는 측정오차의 영향을 분석하였다. 알고리즘이 가속도와 변형률 측정치를 사용하도록 구성되었으므로 측정위치의 가속도와 변형률 측정치에 각각 같은 수준의 오차를 적용하여 그 영향을 분석하였다. 측정오차는 식(14)과 같이 적용하였다.

$$\epsilon_e = \epsilon_1 + \text{avg}(\epsilon_1) \times \text{ran}[-1, 1] \times nl \quad (14)$$

$$\ddot{u}_e = \ddot{u}_1 + \text{avg}(\ddot{u}_1) \times \text{ran}[-1, 1] \times nl$$

여기서 avg는 해당 데이터의 절대값의 평균치, nl은 오차수준, ran[-1,1]은 '-1'과 '1' 사이에서 임의로 선택한 백색오차(white noise)이다.

가속도와 변형률에 각각 1% 수준의 오차를 적용하여 해석한 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 평균치 오차 AE는 0.842%로 전체 통과시간에 대한 해석결과의 평균치는 상당히 정확한 값을 주지만 RMS 오차 RE는 19.8%로 해의 분산이 심하다.

가속도 측정치의 오차와 변형률 측정치의 오차 중 어느 쪽이 해석결과에 미치는 영향이 지배적인지 알아보기 위해 각각을 적용한 데이터를 해석해 보았다.

Fig. 6은 가속도에만 1% 수준의 오차를 적용한 해석결과이고, Fig. 7은 변형률에만 1% 수준의 오차를 적용한 해석결과이다. 가속도에만 측정오차를 적용한 경우는 평균치 오차 AE가 0.383%, RMS 오차 RE는 1.12%로 가속도 데이터의 측정오차는 해석결과에 미치는 영향이 미미한 것으로 나타났다. 그러나 변형

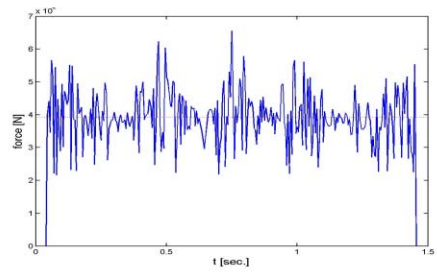


Fig. 5 모든 측정오차 1%일 때의 하중식별 결과

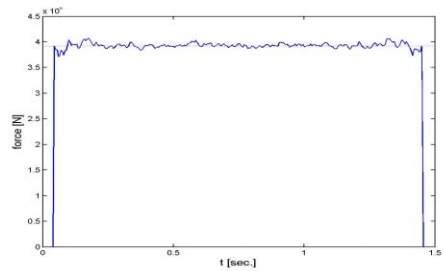


Fig. 6 가속도 측정오차 1%일 때의 하중식별 결과

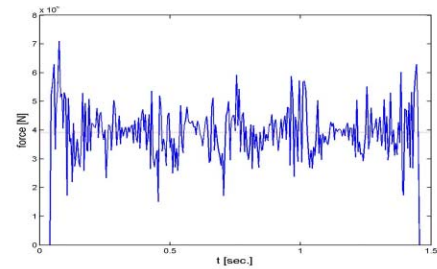


Fig. 7 변형률 측정오차 1%일 때의 하중식별 결과

률에만 측정오차를 적용한 경우는 평균치 오차 AE가 1.07%, RMS 오차 RE는 18.8%로 변형률 데이터의 측정오차가 해석결과에 미치는 영향이 지배적임을 확인하였다.

측정오차가 해석결과의 평균치에는 크게 영향을 주지 않으나 해의 분산을 유발하는 것을 확인하였으므로 이를 줄이기 위해 지배방정식으로 구한 절점하중에 시간창(time window)을 적용하고 이동평균(moving average)값을 구하여 이동하중 해석에 사용하였다. 가속도와 변형률에 1, 2, 5% 수준의 측정오차를 각각 적용하여 해석한 결과는 Fig. 8, 9, 10과 같다.

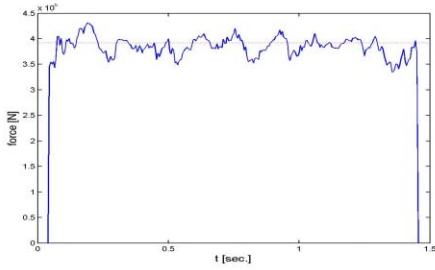


Fig. 8 측정오차 1%일 때의 이동평균 결과

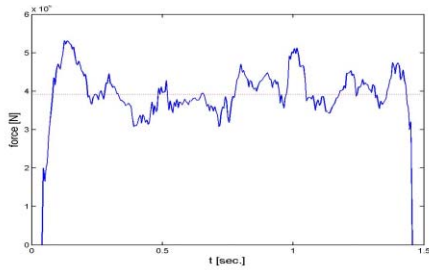


Fig. 9 측정오차 2%일 때의 이동평균 결과

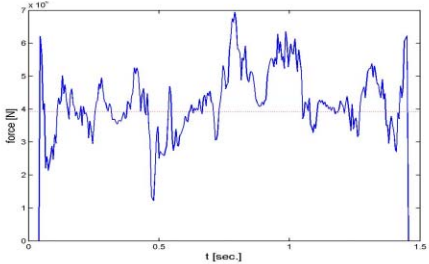


Fig. 10 측정오차 5%일 때의 이동평균 결과

측정오차에 따른 해석결과의 오차는 Table 2에 정리하였다. 평균오차 AE는 모든 경우 10% 이내이며, RMS 오차 RE는 측정오차가 2% 수준을 넘어서면서 10% 이상의 오차를 보인다. 그러나 측정오차를 적용할 때 변형률은 측정치의 평균값을 기준으로 하였으므로 적용한 측정오차의 크기가 과다한 것일 수 있다. 이는 실내 모형실험의 해석결과로 살펴볼 것이다.

Table 2 측정오차에 따른 해석결과의 오차

속도오차	1%	2%	5%
AE(%)	1.33	0.928	9.01
RE(%)	4.48	11.5	25.3

4. 실내 모형실험

실내 모형실험을 통해 제안된 알고리즘의 적용성을 검토하였다. 실험에 사용된 모형교량은 Fig. 11에 보이는 지간 6m의 단순지지된 강교량이며 단면은 슬래브 양측에 보강재가 붙어있는 H형상이다. 양측 보강재의 측면에 가속도계를 부착하고 하면에 광섬유 센서를 부착하였다. 가속도와 변형률은 양쪽에 각각 5군데 등간격으로 측정하였다. 한 대의 차량이 통과하는 경우와 두 대의 차량이 통과하는 경우를 실험하였다. 모형차량의 속도는 등속을 유지하면서 여러 단계로 조절 가능한 장치를 사용하였다. Load Case 설정은 Table 3에 정리하였다.

Fig. 12는 광섬유 센서로 측정한 변형률로부터 계산된 변위와 LVDT에서 측정한 변위를 비교한 것으로 측정된 변위와 계산된 변위가 진동의 양상까지 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 13~Fig. 16은 각 경우의 해석결과이다. 각 경우의 평균치 오차 AE와 RMS 오차 RE를 Table 5에 정리하였다. 하나의 차량이 통과하는 경우 RMS 오차 RE는 5% 이내로 해의 분산정도가 심하지 않다. 수치 예제에서 측정오차의 영향을 분석한 것과 비교하면 백색오차는 측정치 평균값의 2% 이하로 추정된다.

Table 3 Load Case 설정

Load Case	차량 수 / 질량	속도단계 / 추정속도
1	1 / 121.5 kg	3 / 1.5 m/s
2	1 / 121.5 kg	6 / 3.0 m/s
3	2 / 61.5+91.5 kg	2 / 1.0 m/s
4	2 / 61.5+91.5 kg	4 / 2.0 m/s



Fig. 11 실내실험을 위한 모형 교량

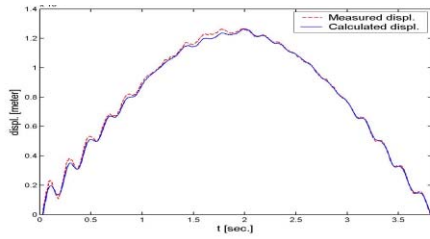


Fig. 12 계측된 변위와 계산한 변위의 비교

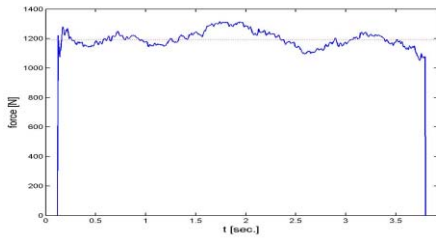


Fig. 13 Load Case 1의 하중식별 결과

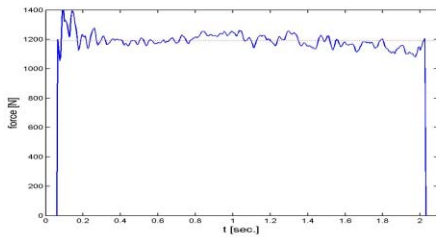


Fig. 14 Load Case 2의 하중식별 결과

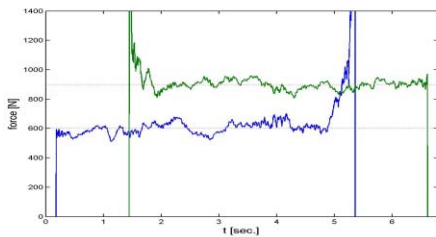


Fig. 15 Load Case 3의 하중식별 결과

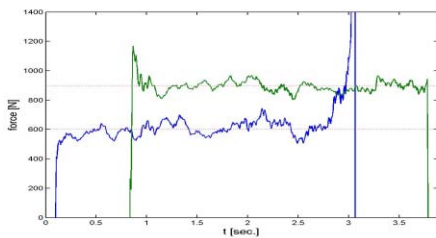


Fig. 16 Load Case 4의 하중식별 결과

Table 4 Case별 최대오차

Load Case	AE(%)	RE(%)
1	0.923	4.41
2	1.26	3.70
3	3.15	7.93
4	2.00	10.0

5. 결론

본 연구에서는 기존의 정적 알고리즘의 한계를 극복하기 위해 동적 지배방정식을 사용하는 이동하중추정 알고리즘을 제안하였다. 정적 알고리즘에서는 기본적으로 오차로 고려할 수밖에 없는 이동하중에 의한 충격의 효과와 교량의 진동을 동적 지배방정식을 이용한 제안된 알고리즘에서는 상쇄되어 해석결과에 영향을 주지 않는 것을 확인하였다.

수치 예제에서 이동하중의 속도오차와 측정치의 오차를 고려하였다. 속도오차는 그 크기에 따라 결과에 미치는 영향이 비례하는 양상을 보여준다. 반면 측정치의 오차는 해석결과에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 제안된 알고리즘은 측정오차에 매우 민감한 성질을 지닌다고 볼 수 있다.

알고리즘을 검증하기 위해 실내 모형실험을 수행하였다. 모든 경우에 있어서 평균치 오차가 5%이하, RMS 오차는 10%이하로 이동하중을 추정하였다. 알고리즘은 측정오차에 매우 민감한 성질을 지니지만 실제 측정에 있어서 측정오차는 측정 데이터의 평균값의 2% 이내 수준으로 알고리즘은 상당한 정도로 이동하중을 추정함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2004-000-11009-0(2004)) 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 권순정, 임동환, 신수봉, "Modal SI 기법을 위한 최

- 적 측정위치 결정," 대한토목학회논문집, 24권 1A호, 2004. 1. pp. 177-183.
2. 류지영, 조재용, 신수봉, "영향면을 사용한 이동하중 식별," 한국전산구조공학회 2001년도 가을 학술발표회 논문집, 2001. 10. pp. 261-268.
 3. 홍진석, 조재용, 신수봉, "구조물에 작용하는 정적하중의 식별," 대한토목학회 2001년도 학술발표회, 논문집 CD, 2001. 11.
 4. 황의성, 배두병, 정경섭, 조재병, "BWIM시스템을 이용한 중차량의 통행특성 분석," 한국강구조학회논문집, 11권 2호, 1999, 4. pp. 223-232.
 5. 정지원, 신수봉, "다축모멘트 영향선과 밀도추정함수를 사용한 이동하중식별 알고리즘의 개발," 한국구조물진단학회 논문집, Vol. 10(5), 2006.
 6. Berzeri, M. & Shabana, A.A. "Development of simple models for the elastic forces in the absolute nodal co-ordinate formulation," Journal of Sound and Vibration, Vol. 235(4), 2000. pp. 539-565.
 7. Ichikawa, M, Miyakawa, Y. & Matsuda, A. "Vibration analysis of the continuous beam subjected to a moving mass," Journal of Sound and Vibration, Vol. 230(3), 2000. pp. 493-506.
 8. Jiang, R.J., Au, F.T.K., Cheung, Y.K. "Identification of masses moving on multi-span beams based on a genetic algorithm," Computers and Structures, 81, 2003. pp. 2137-2148.
 9. Jiang, R.J., Au, F.T.K., Cheung, Y.K., "Identification of vehicles moving on continuous bridges with rough surface," Journal of Sound and Vibration, Vol. 274, 2004. pp.1045-1063.
 10. Ojio, T., Yamada, K., "Bridge WIM by Reaction Force Method", Proceedings of the Fourth International Conference On Weigh-In-Motion. ICWIM4, 2005. pp. 107-118.
 11. Savin, E., "Dynamic amplification factor and response spectrum for the evaluation of vibrations of beams under successive moving loads," Journal of Sound and Vibration, Vol. 248(2), 2001. pp. 267-288.
 12. Zhu, X.Q, Law, S.S., "Dynamic axle and wheel loads identification : laboratory studies," Journal of Sound and Vibration, Vol. 268, 2003. pp. 855-879.
 13. Zhu, X.Q. & Law, S.S., "Identification of moving interaction forces with incomplete velocity information," Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 17(6), 2003. pp. 1349-1366.

(접수일자 : 2006년 8월 8일)