

밀도추정함수와 평균보정계수를 이용한 BWIM 알고리즘의 현장실험 적용

Application for a BWIM Algorithm Using Density Estimation Function and Average Modification Factor in The Field Test

한 아 름 샘¹⁾ 신 수 봉^{2)*}

Han, Ah Reum Sam Shin, Soobong

Abstract

The paper aims at developing a more reliable and accurate BWIM(Bridge Weigh-In-Motion) algorithm using measured strain data and examining its efficiency with various tests on bridges. It proposes a BWIM algorithm using density estimation function and average modification factor for moment-strain relationship. Density estimation function has been proved to be reliably applied when multiple axle loads are estimated. An average modification factor is applied to minimize overall error that can be encountered between theoretically computed moments and measured strains at multiple locations in a bridge. The developed algorithm has been successfully examined through numerical simulations, laboratory tests, and also by field tests on a multi-girder composite bridge.

Keywords : BWIM, Multi-girder bridge, Density estimation function, Average modification factor

1. 서 론

교량이나 국도 및 고속도로에서 중차량의 하중을 식별하는 것은 구조물의 포장설계 및 유지보수, 설계, 과적차량단속 및 도로세 부과 등에 매우 중요하다. BWIM(Bridge Weigh-In-Motion)은 교량을 일종의 저울로 삼아 교량에서 얻어지는 계측데이터를 이용해 하중을 간접적으로 식별하는 방법이다. BWIM은 센서를 매설하는 것이 아니라 교량의 부재에 변형률계나 가속도계 등을 부착하므로 교통을 통제하지 않을 수 있으며, 센서의 탈부착이 쉽고 가격대비 성능이 우수한 것으로 인식되고 있다.

대부분의 국내외에 소개된 BWIM 알고리즘들은 변형률계를 사용하여 트럭하중을 식별하는 방법을 적용하였으며, 가속도계를 사용한 방법은 극히 제한적으로 소개되었다(조재용 등 2007). 일본에서는 교량의 지점부근에 위치한 수직보강재에 변형률계를 부착하여 반력을 측정하고 그 영향선을 이용하여 하중을 추정하는 연구를 하였으며(Ojio and Yamada 2005), 홍콩에서는 L.Yu, T.H.T. Chan D.Xu 등이 교량의 다양한 응답을 이용해

MFIS(Yu 2002), TDM(Law et al 1997), FTDM(Law et al, 1999), IMI(O'Connor and Chan 1988), IMII(Chan et al, 1999) 등의 다양한 알고리즘을 제시하였다. 유럽에서는 WAVE(Weighing in motion of Axles and Vehicles for Europe) 프로젝트가 진행된 바 있고, 특히 Slovenia에서는 70개 이상의 교량에 상용 BWIM 시스템이 설치되어 운영되고 있다(Jacob, O'brien 2005). 국내에서도 Bridge Weighing System, Inc.의 BWIM시스템을 이용하여 한국도로공사에서 중차량의 통행특성을 분석한 사례가 있으며(박민석 2002), 그 외 다양한 BWIM 알고리즘을 적용한 사례들이 소개되고 있다. 그러나 이렇게 국내외적으로 BWIM 알고리즘들이 다양하게 개발되고 이를 사용한 장비들이 실교량들에 적용되고 있지만 아직도 트럭하중 추정의 정확성은 부족한 실정이다. 따라서 현재도 국제학술대회 등을 통해 보다 신뢰할 수 있고 보다 손쉽게 적용할 수 있는 알고리즘들이 소개되고 있다(IABMAS 2010).

본 논문에서는 보다 많은 계측정보를 사용하여 트럭하중 추정결과의 정확성을 높이는 다축모멘트 영향선을 이

1) 정회원, 인하대학교 토목공학과 석사과정

2) 정회원, 인하대학교 토목공학과 교수

* Corresponding author : sbshin@inha.ac.kr 032-860-7552

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2011년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

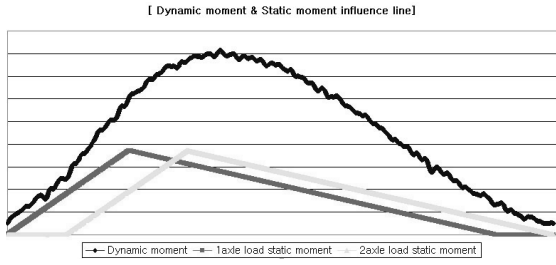


Fig. 1 Measured dynamic moment and moment influence line at a measurement point

용한 알고리즘(정지원, 신수봉 2006)에 밀도추정함수와 평균보정계수를 고려한 BWIM 알고리즘을 제시한다. 밀도 추정함수는 정지원과 신수봉(2006)에 의해 다축하중의 식별에 신뢰도 높게 적용할 수 있음을 실내실험을 통해 검토하였고, 이번 실교량의 실험데이터에 적용하여 그 정확성을 다시 검증하였다. 모멘트-변형률 평균보정계수는 현장에서 측정한 변형률 데이터와 이론식에 의해 계산한 모멘트와의 차이를 반영하기 위해 적용한 것으로, 실교량에 대한 다양한 오차성분을 단순화된 해석모델만으로는 충분히 고려할 수가 없기 때문에 고려된 계수이다. 따라서 초기 기준실험을 통해 이 평균보정계수를 결정한 후, 다양한 동적하중재하시험을 수행하도록 하였다. 다주형교량에 개발된 알고리즘을 적용하는 경우, 각 주형별로 계산된 보정계수를 평균하여 전체 교량에 대한 평균적인 보정계수를 계산하였고, 이 값을 전체 교량에 동일하게 적용하였다.

개발된 알고리즘을 검증하기 위하여 수치시뮬레이션, 실내모형실험 및 다주형교량에 대한 현장실험을 수행하였으며, 적용한 다양한 하중조건에 대해 개발된 알고리즘이 효율적으로 사용될 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서는 이들 연구결과를 요약하여 정리하였다.

2. 밀도추정함수와 평균보정계수를 이용한 BWIM 알고리즘

2.1 다축 모멘트 영향선의 사용

교량 위를 이동하는 차량의 하중을 식별하기 위해서 제안된 알고리즘은 일반적으로 가속도를 측정하거나 변형률을 측정하여 적용하게 된다. 변형률은 가속도에 비해서 상대적으로 손쉽게 측정할 수 있으며 가격대비 효율이 우수하다. 본 논문에서는 변형률을 이용한 BWIM 알고리즘 개발을 통하여 하중을 식별하고자 한다. 다축 모멘트 영향선을 이용한 BWIM 알고리즘은 Fig. 1과 같이 교량 교

축방향의 여러 위치에서 측정한 변형률 값을 모멘트 값으로 환산하여 측정 모멘트들을 구하고, 각각의 측정지점에서 차축의 개수에 따라 정적모멘트 영향선을 구하여, 그 차이를 최소화하여 차축하중을 식별하는 방법이다.

측정위치에서 측정모멘트와 이론식에 의한 모멘트영향선을 비교할 때, N 개 시간창(time window)으로 나눈 임의의 구간에서 \tilde{M}_m 은 측정모멘트, $(\tilde{Z}_1, \tilde{Z}_2, \dots, \tilde{Z}_n)$ 은 하중 (P_1, P_2, \dots, P_n) 에 의한 모멘트영향선의 중기 값이라고 하면, 식(1)과 식(2)를 유도할 수 있다.

$$\tilde{Z}_1 \times P_1 + \tilde{Z}_2 \times P_2 + \dots + \tilde{Z}_n \times P_n = \tilde{M}_m$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{Z}_1(N \times 1), \tilde{Z}_2(N \times 1), \dots, \tilde{Z}_n(N \times 1), \tilde{M}_m(N \times 1) \\ N : \text{time window size} \end{array} \right. \quad (1)$$

$$[Z] \tilde{P} = \tilde{M}_m$$

$$\left\{ \begin{array}{l} [Z] = [\tilde{Z}_1 \ \tilde{Z}_2 \ \dots \ \tilde{Z}_n] \\ \{\tilde{P}\} = \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_n \end{Bmatrix} \end{array} \right. \quad (2)$$

식(2)에서 오차를 최소화하여 이동하중의 크기를 구하기 위하여 목적함수 $J(\tilde{P})$ 를 식(3)과 같이 정의하고, 이를 최소화하는 하중을 추정한다.

$$J(\tilde{P}) = \sum_{k=1}^N | [Z_{k1} \ \dots \ Z_{ki} \ \dots \ Z_{kn}] \tilde{P} - M_{m,k} |^2 \quad (3)$$

여기서, Z_{ki} 은 벡터 $\tilde{Z}_i(N \times 1)$ 의 k 번째 값이다. 식(3)의 목적함수 $J(\tilde{P})$ 를 최소화시켜 \tilde{P} 를 구하기 위해 식(3)을 \tilde{P} 에 대하여 편미분하면 식(4)를 구할 수 있다.

$$\nabla J(\tilde{P}) = 2 \sum_{k=1}^N [Z_{k1} \ Z_{k2} \ \dots \ Z_{kn}]^T \left([Z_{k1} \ Z_{k2} \ \dots \ Z_{kn}] \tilde{P} - M_{m,k} \right) = 0 \quad (4)$$

여기서 $[Z_k] = [Z_{k1} \ Z_{k2} \ \dots \ Z_{kn}] (n \times 1)$ 라고 정의하고 1차 필요조건을 만족하도록 최소제곱법을 적용하면 식(5)으로 하중을 구할 수 있다.

$$\tilde{P} = \left(\left(\sum_{k=1}^N [Z_k]^T \sum_{k=1}^N [Z_k] \right)^{-1} \left(\sum_{k=1}^N [Z_k]^T \sum_{k=1}^N M_{mk} \right) \right) \quad (5)$$

교축방향으로의 계측점의 개수가 하나 이상으로 증가할 경우에는 식(6)으로 계산할 수 있다.

$$\tilde{P} = \left(\left(\sum_{k=1}^N [[Z_k]_{sum}] \right)^T \sum_{k=1}^N [[Z_k]_{sum}] \right)^{-1} \left(\sum_{k=1}^N [[Z_k]_{sum}] \right)^T \sum_{k=1}^N [[M_{mk}]_{sum}] \quad (6)$$

여기서, $[[Z_k]_{sum}] = [[Z_k]_1 [Z_k]_2 \cdots [Z_k]_{nm}]$ 이고, $[[M_{mk}]_{sum}] = [[M_{mk}]_1 [M_{mk}]_2 \cdots [M_{mk}]_{nm}]$ 이다. 또한, nm 은 총계측점의 개수이다.

따라서 최종적으로 사용하는 일반화된 식은 식(6)이다. 여기서 구한 \tilde{P} 는 시간창의 개수 N 과 하중의 개수 n 에 의해 구해진 $(N \times n)$ 의 하중 벡터가 되며 시간 t 에 따라 구해지는 $\tilde{P}(t) (N \times n)$ 가 된다.

2.2 다축하중추정을 위한 밀도추정함수의 적용

2개 이상의 이동하중이 교량을 통과하면 일반적으로 하중 추정결과가 심하게 산란된다. 이 경우 시간에 대해 식별하중을 평균하면 산란 폭에 따라 편차가 심하게 된다. 따라서 식별하중의 산란 폭에 관계없이 식별하중의 대부분을 지배하는 하중을 찾아내는 방법으로 밀도추정함수(density estimation function)를 적용할 수 있다.

밀도추정함수는 벡터 $\{x\} (\ell \times 1)$ 에서 벡터 $\{x\}$ 의 각 요소값에 대한 식(7)과 같은 핵심함수(kernel function)를 구하여 유도한다.

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{\ell} \sum_{i=1}^{\ell} w(x - x_i; h) \quad (7)$$

여기서 함수 w 는 핵심함수로 평균이 0인 대칭함수이다. 따라서 함수 w 는 식(8)과 같이 정의할 수 있다.

$$w(x - x_i; h) = \phi(x - x_i; h) \quad (8)$$

여기서 $\phi(z; h)$ 는 평균 0, 표준편차 h 인 z 에서의 정규밀도함수이다. 밀도추정함수 w 가 수식을 간략화하기 하기 때문에 밀도추정함수 \hat{f} 는 부드러운 곡선이 된다.

밀도추정함수는 가장 큰 밀도를 보이는 값을 가장 대표되는 값으로 정하며, 하중식별 알고리즘은 시간에 따른 식별하중을 제공하므로 이 개념을 적용하여 최종적인 하중을 식별한다. 이 방법은 하중식별 결과의 산란이 심하여도 밀도가 작은 값은 의미 없는 값이 되므로, 하중식별을 보다 정확하게 수행한다.

2.3 모멘트-변형률 평균보정계수

계측된 변형률을 모멘트 값으로 환산하기 위해서는 식(9)을 적용한다.

$$M = \frac{EI}{c} \epsilon = \beta \epsilon \quad (9)$$

여기서 EI 는 휨강성도, c 는 중립축에서부터의 거리, ϵ 은 변형률이다.

수치예제 및 실내실험에서는 구조성질 및 치수변수인 EI , c 의 값이 계산 및 측정에 의해 결정된 기지의 정보가 될 수 있다. 그러나 실교량에서는 이와 같은 값들을 측정하거나 계산하는 것이 어렵고 모델에 따라 정확성이 일정하지 않기 때문에 다양한 오차와 교량의 동적 거동특성을 고려해야만 한다. 따라서 본 논문에서 제안하는 알고리즘에서는 위의 사항들을 반영하여 실교량 계측결과와 이론계산에 의한 값을 기준 정적재하시험을 통해 보정하는 평균보정계수($\bar{\beta}$)를 적용하였다.

평균보정계수를 정식화하기 위해 다주형 교량에 대한 모멘트를 식(10)과 같이 정의한다.

$$M = E \left(\frac{I_1}{c_1} \epsilon_1 + \frac{I_2}{c_2} \epsilon_2 + \cdots + \frac{I_l}{c_l} \epsilon_l \right) \quad (10)$$

$$= \beta_1 \epsilon_1 + \beta_2 \epsilon_2 + \cdots + \beta_l \epsilon_l$$

여기서, β 는 EI/c 이고, l 은 교량 주형의 개수이다. 만약 계측점의 수가 많아지고 정적재하시험의 하중경우가 증가한다면, 식(10)은 식(11)로 확장될 것이다.

$$M_1^{(1)} = \beta_1 \epsilon_{11} + \beta_2 \epsilon_{21} + \cdots + \beta_l \epsilon_{l1} \quad (11)$$

$$M_2^{(2)} = \beta_1 \epsilon_{12} + \beta_2 \epsilon_{22} + \cdots + \beta_l \epsilon_{l2}$$

$$\vdots$$

$$M_q^{(p)} = \beta_1 \epsilon_{1q} + \beta_2 \epsilon_{2q} + \cdots + \beta_l \epsilon_{lq}$$

여기서, l 는 주형의 개수, q 는 축점의 개수, p 는 정적재하 하중경우의 수이다. 축점의 개수와 주형의 개수에 따라 식(11)은 식(12)으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \{M\} &= [\epsilon] \{\beta\} \\ [\epsilon]^T \{M\} &= [\epsilon]^T [\epsilon] \{\beta\} \\ \therefore \{\beta\} &= ([\epsilon][\epsilon]^T)^{-1} [\epsilon]^T \{M\} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, $\{M\}$ ($q \times 1$)은 모멘트 벡터, $[\epsilon]$ ($l \times q$)은 변형률 행렬, $\{\beta\}$ ($q \times 1$)은 보정계수 벡터이다.

교량의 주형은 개별적으로 거동하지 않고, 수평 또는 수직보강재 등에 의해 유기적으로 동적거동을 하기 때문에, 평균보정계수로 교량의 전체적인 동적거동을 반영할 수 있을 것이다. 따라서 식(12)에서 구해진 각 주형의 보정계수의 평균인 식(13)의 평균보정계수를 정의한다.

$$\bar{\beta} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \beta_i \quad (13)$$

여기서, $\bar{\beta}$ 는 평균보정계수, l 은 주형의 개수이다.

계측점별로 구해지는 모멘트 벡터 $\{M\}$ 은 정적재하시험에서 가해진 하중 P 의 위치를 확인하고, 해당하는 계측점에서의 모멘트 영향선의 종거값 Z 를 구하여, 식(14)와 같이 계산할 수 있다. 식(14)에서 n , k 는 각각 하중과 축점의 개수를 나타내며, p 는 정적재하시험의 하중경우를 의미한다.

$$\begin{aligned} M_A^{(1)} &= Z_1 \times P_1 + Z_2 \times P_2 + \dots + Z_n \times P_n \\ M_B^{(1)} &= Z_1 \times P_1 + Z_2 \times P_2 + \dots + Z_n \times P_n \\ &\vdots \\ M_k^{(p)} &= Z_1 \times P_1 + Z_2 \times P_2 + \dots + Z_n \times P_n \end{aligned} \quad (14)$$

3. 다주형교량에 대한 알고리즘의 적용 및 검증

3.1 수치예제의 의한 검증

상용프로그램인 MIDAS를 사용하여 실교량의 거동과 유사한 교량모델을 Fig. 2와 같이 설정하였다. 교량모델은 지간이 20m인 4주형 슬래브 교량으로써 각 주형을 개별적인 단선보로 가정하여 각 주형이 분담하는 2축의 이동 하중을 추정하였고, 주형별로 추정된 하중의 합으로 최종 축하중을 산정하였다. 변형률은 주형별로 5m,

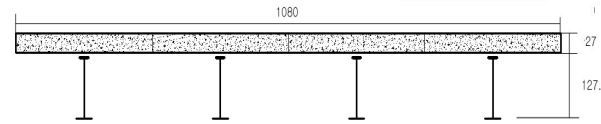
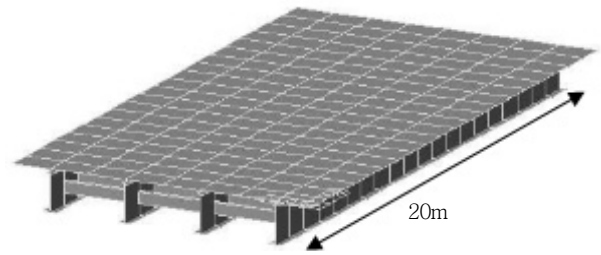


Fig. 2 4-girder composite slab bridges

Table 1 Load sharing of girders at various vehicle speeds

| axel dist. | axle load | velocity (km/hr) | G1 (kN) | G2 (kN) | G3 (kN) | G4 (kN) | sum (kN) | avg. error (%) |
|------------|----------------|------------------|---------|---------|---------|---------|----------|----------------|
| 4m | P ₁ | 3.6 | 4.13 | 2.60 | 2.06 | 1.38 | 10.17 | 1.65 |
| | | 36. | 4.09 | 2.72 | 2.01 | 1.17 | 9.98 | 0.24 |
| | | 72. | 4.12 | 2.75 | 1.96 | 1.41 | 10.24 | 2.39 |
| | P ₂ | 3.6 | 5.49 | 5.64 | 4.04 | 3.44 | 18.61 | 5.97 |
| | | 36. | 5.54 | 5.00 | 3.99 | 3.32 | 17.86 | 10.72 |
| | | 72. | 5.46 | 5.53 | 4.09 | 3.23 | 18.31 | 8.43 |
| 8m | P ₁ | 3.6 | 6.33 | 5.51 | 4.19 | 2.78 | 18.80 | 5.98 |
| | | 36. | 6.28 | 5.46 | 4.18 | 2.69 | 18.60 | 7.01 |
| | | 72. | 6.26 | 5.38 | 3.95 | 3.01 | 18.60 | 7.01 |
| | P ₂ | 3.6 | 18.64 | 17.06 | 11.84 | 7.86 | 55.37 | 7.72 |
| | | 36. | 18.97 | 16.93 | 12.20 | 7.76 | 55.85 | 6.91 |
| | | 72. | 19.21 | 17.06 | 12.45 | 7.67 | 56.38 | 6.04 |

10m, 15m 지점, 총 12곳에서 측정하였으며, 이동하중의 크기는 축간거리가 4m일 때 선행하중 P₁은 10kN, 후행하중 P₂는 20kN, 축간거리가 8m일 때 선행하중 P₁은 20kN, 후행하중 P₂는 60kN로 하였다. 또한, 속도를 1m/sec(3.6km/hr), 10m/sec(36km/hr), 20m/sec(72km/hr)로 구분하여 수행하였다.

3.1.1 주형별 하중분담 결과분석

축간거리가 4m일 때와 8m일 때 모두 하중을 주형 1~2 사이와 주형 2~3 사이를 지나게 시뮬레이션 하였다. Table 1에 정리한 축간거리별, 차량속도별 하중 식별 결과표에서 차량속도에 상관없이 주형별 하중분담율은 일정하게 변함을 확인할 수 있다.

Table 2 Identification error depending on ASSR

| axle dist. (ASSR) | axle load | 3.6 (km/hr) | 36 (km/hr) | 72 (km/hr) | avg. error(%) | |
|-------------------|----------------|-------------|------------|------------|---------------|------|
| 4m (0.2) | P ₁ | 1.65 | 0.24 | 2.39 | 1.43 | 5.07 |
| | P ₂ | 6.97 | 10.72 | 8.43 | 8.71 | |
| 8m (0.4) | P ₁ | 5.98 | 7.01 | 7.01 | 6.67 | 6.78 |
| | P ₂ | 7.72 | 6.91 | 6.04 | 6.89 | |

Table 3 Identification error depending on vehicle speeds

| axel dist. | axle load | 3.6 km/hr | 36 km/hr | 72 km/hr |
|------------|----------------|-----------|----------|----------|
| 4m | P ₁ | 1.65 | 0.24 | 2.39 |
| | P ₂ | 6.97 | 10.72 | 8.43 |
| average(%) | | 4.31 | 5.48 | 5.41 |
| 8m | P ₁ | 5.98 | 7.01 | 7.01 |
| | P ₂ | 7.72 | 6.91 | 6.04 |
| average(%) | | 6.85 | 6.96 | 6.53 |



Fig. 3 Laboratory setup for moving vehicle tests

3.1.2 오차분석

1) 축간경간비의 영향

축간경간비(ASSR)가 너무 작을 경우 하중추정의 정확성이 현저히 떨어지므로 알고리즘의 식별능력을 검증할 수 있도록 차축의 거리를 4m와 8m로 하였다. Table 2에서 하중 추정결과는 축간경간비에 관계없이 전체 하중의 추정값은 대체적으로 5~6%의 오차범위에 들어옴을 확인할 수 있었으나 표에서 축간 경간비가 클수록 각각의 하중이 비슷한 오차범위를 가지고 식별할 수 있음을 알 수 있다.

2) 속도의 영향

차량속도에 따라 알고리즘이 경향성을 보인다면 개발된 BWIM 알고리즘을 적용하는 차량속도에 대한 제약이 발생할 수 있기 때문에, 차량속도에 따른 추정오차의 분석이 필요하다. Table 3에 속도별 하중식별 오차를 정리하였다. 대체적으로 하중식별 오차가 저속이나 고속일 경우에 편중되는 경향이 나타나지 않고, 일정하게 하중식별이 가능함을 알 수 있다. 또한, 하중식별이 오차범위 5~6%내외로 가능하기 때문에 식별능력 또한 만족할만한 수준임을 확인할 수 있었다.

3.2 실내모형실험에 의한 검증

실내모형실험은 Fig. 3에 보이는 창원대학교 토목공학과의 이동하중 모형실험시설을 이용하여 수행하였다. 모형교량은 지간 6m, 폭 1m의 단순보 모델의 교량으로

써, 모형차량은 차량위에 추를 단계적으로 올려놓음으로써 하중을 변화시킬 수 있고, 속도제어장치를 통하여 모형차량의 속도조절이 가능하다.

변형률은 광섬유센서를 사용하여 계측하였으며, 단면에서는 교량의 왼쪽과 오른쪽 주형에 각각 부착하였고, 길이 방향으로서는 지점에서 2m, 3m, 4m 떨어진 곳에 부착하여 총 6개의 광섬유센서를 사용하였다. 하중은 중앙에서 17cm 편심되게 이동하였다. 주형별 분담과 이의 합으로 축하중을 구하는 것을 구현하기 위해, 모형교량은 총 3개의 단순보로 구분하였다. 즉 왼쪽(L)과 오른쪽(R) 플랜지형 주형과 중앙(C) 바닥판을 각각의 단순보로 간주하였다. 측정된 변형률은 식(15)에 의하여 모멘트로 환산하였다.

$$\text{Moment} = E_{steel} \left(\frac{I}{c} \epsilon \right) \quad (15)$$

여기서, c 는 중립축에서 연단까지의 거리이다.

Fig. 4는 차량 2대가 일정한 속도가 1.11m/sec로 달릴 때, 중앙(C) 주형에서 개발된 알고리즘으로 각 차량의 하중을 추정밀도함수로 구한 것을 보여준다. 그림은 모형차량이 작은 관계로 차량당 하나의 하중으로 간주하고 구한 것이다.

3.2.1 각 주형별 하중분담

Table 4는 각 주형이 분담하는 하중을 속도별로 정리

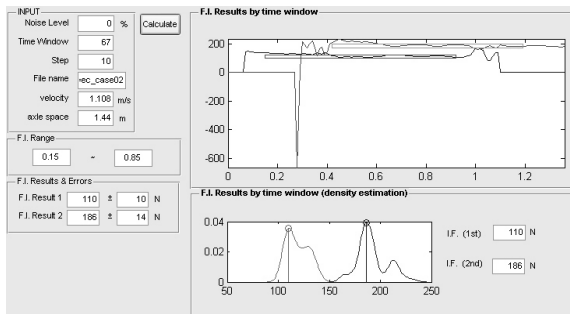


Fig. 4 Identified vehicle loads

Table 4 Load sharing of girders at various vehicle speeds

| axle load | velocity (m/sec) | L (N) | C (N) | R (N) | sum (N) | avg.error (%) |
|----------------|------------------|-------|-------|-------|---------|---------------|
| P ₁ | 1.11 | 234 | 110 | 237 | 581 | 4.47 |
| | 1.91 | 214 | 121 | 238 | 573 | 5.79 |
| P ₂ | 1.11 | 320 | 186 | 377 | 883 | 2.16 |
| | 1.91 | 296 | 180 | 365 | 841 | 6.81 |

Table 5 Identification error at different vehicle speeds

| velocity | load | identification error (%) |
|------------|----------------|--------------------------|
| 1.11 m/sec | P ₁ | 4.47 |
| | P ₂ | 2.16 |
| 1.91 m/sec | P ₁ | 5.79 |
| | P ₂ | 6.81 |

한 것이다. 실내실험을 수행 할 때, 하중이 오른쪽으로 17 cm 편심되어 이동하였으므로 오른쪽(R) 플랜지 주형의 하중분담 이 왼쪽(L) 플랜지 주형의 하중분담보다 더 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. Table 4에서 차량속도에 상관없이 주형별 하중분담율은 일정하게 변함을 확인할 수 있다.

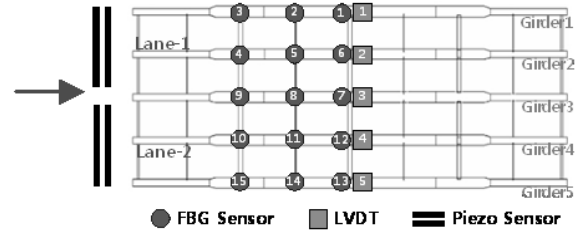
3.2.2 오차 분석

Table 5는 속도별 하중식별 오차를 나타낸 것이다. 수치예제에서는 속도에 따른 오차가 거의 일정하였으나, Table 5의 결과는 차량속도가 빨라지면 추정오차 역시 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그러나 고려한 두 경우 모두 실내실험시설의 환경조건에 따라 저속으로 실험을 수행한 것이기 때문에 이 결과로 속도에 대한 경향성을 판단하기에는 무리가 있는 것으로 보인다. Table 5에서 추정오차는 전체적으로 수치예제와 동일하게 약 5~6% 내외의 추정오차로 만족스러운 결과를 보이고 있다.



(a) Girders

(b) Load test



(c) Sensor layout

Fig. 5 Field test on a multi-girder composite bridge

Table 6 Weights of test trucks

| truck | axle weight (kN) | | | | total weight (kN) |
|----------------|------------------|--------|--------|--------|-------------------|
| | axle 1 | axle 2 | axle 3 | axle 4 | |
| W ₁ | 90.65 | 103.10 | 99.57 | 97.61 | 390.92 |
| W ₂ | 41.06 | 43.51 | 25.09 | 25.09 | 134.75 |

3.3 현장실험에 의한 검증

수치예제와 실내모형 실험에서는 구조물 치수에 대한 거의 정확한 정보를 사용하기 때문에 모멘트-변형률 보정계수의 적용이 필요 없었으나, 현장실험에서는 식(13)의 평균보정계수를 구하여 적용하였다.

3.3.1 현장실험 상세

현장실험은 Fig. 5에 보이는 지간 39.8 m, 폭 12.6 m 인 단경간 5주형 합성형교량에서 수행하였다. 계측센서로 가속도계와 광섬유변형률계를 그림과 같이 설치하였다. 본 연구에서는 광섬유센서의 계측값을 사용하였으며, 계측 종료 후 값을 주지 못한 센서위치에서의 변형률은 인접한 주형에서 계측된 값들의 평균으로 대체하였다.

재하차량은 Table 6에 정리한 4축인 트럭 2대를 사용하였으며, 재하시험은 Table 7에 정리한 하중경우들에 대해 수행하여 그 결과를 정리하였다. 하중경우는 W₁ 차량이 차선 L1을 지나는 하중경우-1과 W₁ 차량이 차선 L2를 지나는 하중경우-2 및 W₁, W₂ 차량이 각각 차선 L1과 L2를 나란히 지나는 하중 경우-3으로 구분하였다. 각 하중경우마다 차량속도는 5 km/hr, 40 km/hr 및

Table 7 Load test plan

| test type | load case | velocity (km/hr) | vehicle | lane | note |
|-------------|-----------|------------------|----------|----------|----------|
| static load | S-1 | Center | W1 | L1 | parallel |
| | S-2 | | W1 | L2 | |
| | S-3 | | W1 W2 | L1 L2 | |
| dynam. load | 1-1 | 5 | W1 | L1 | parallel |
| | 1-2 | 40 | | | |
| | 1-3 | 80 | | | |
| | 2-1 | 5 | W1 | L2 | |
| | 2-2 | 40 | | | |
| | 2-3 | 80 | | | |
| | 3-1 | 5 | W1 | L1 | |
| | 3-2 | 40 | | | |
| | 3-3 | 80 | | | |

Table 8 Average modification factor

| load case | section (sensor location) | | | average | avg. mod. factor |
|-----------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|---------|------------------|
| | section 1 (3,4,9,10,15) | section 2 (2,5,8,11,14) | section 3 (1,6,7,12,13) | | |
| S-1 | 22871.3 | 21602.7 | 18734.1 | 21069.3 | 22311.8 |
| S-2 | 23703.2 | 21550.8 | 21034.3 | 22096.1 | |
| S-3 | 27836.6 | 23044.9 | 20428.8 | 23770.1 | |

80 km/hr 3가지 경우로 구분하여 하중경우별로 1~3번 씩 상황에 따라 동일한 재하시험을 반복하여 수행하였다.

3.3.2 보정계수의 산정

보정계수는 정적재하시험 하중경우(S) 결과를 사용하여 산정하였다. 정적재하시험은 차량의 무게중심이 교량의 중앙에 오도록 하여 수행하였으며, 실제 보정계수 산정에 쓰인 정적재하시험의 하중경우는 동적재하시험에서 쓰인 하중경우와 동일하다. 이는 교량위의 차량의 종류, 위치 등에 대한 실제 교량의 거동을 더 잘 반영한 계수값을 찾기 위함이었다. 또한, 주형별 보정계수를 사용하는 방법과 전체 평균보정계수를 산정하는 방법을 적용하여 하중 추정결과를 비교분석하였다.

우선 식(9)를 적용하여 정적재하 하중경우별로 구한 전체평균보정계수를 Table 8에 정리하였으며, 각 주형별로 평균하여 계산한 주형별평균보정계수를 Table 9에 정리하였다. 산술적으로 Table 9에서 계산된 주형별평균보정계수의 평균을 구하면 Table 8의 전체평균보정계수가 된다.

Table 9 Average modification factor by each girder

| girder | load case | | | avg. mod. factor by girder |
|---------------------|-----------|---------|---------|----------------------------|
| | S-1 | S-2 | S-3 | |
| exterior (G1,G5) | 24810.0 | 25736.1 | 27857.7 | 26134.6 |
| interior (G2,G3,G4) | 17328.7 | 18456.1 | 19682.5 | 18489.1 |

3.3.3 하중추정 결과 분석

축간경간비(ASSR)를 앞서 수행했던 수치예제와 비슷한 범위로 유지하여 현장실험부터 적용된 평균보정계수의 효용성을 확인하고자 하였다. 따라서 4축의 트럭을 교량의 길이에 비해 비교적 차축사이의 거리가 가까운 축들을 하나로 묶어 2축의 하중으로 가정하였다. 즉 선행하중 P_1 과 후행하중 P_2 를 추정하는 것으로 하였고, P_1 과 P_2 의 축간경간비는 식(16)과 같다.

$$\begin{aligned}
 ASSR &= \frac{\text{차축사이의 거리}}{\text{교량의 길이}} \quad (16) \\
 &= \frac{4.725}{39.8} = 0.119
 \end{aligned}$$

각 하중경우별 전체 평균보정계수와 거더별 평균보정계수를 사용하여 추정된 하중의 오차를 Table 10에 정리하였다. 표에서 두 가지 보정계수를 적용하여 추정된 하중 P_1 과 P_2 는 거의 비슷한 수준의 하중추정오차를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 주형별 평균보정계수를 적용하는 경우에는 오차의 편차가 보다 큰 것을 관찰할 수 있다. 따라서 주형별로 구분하여 보정계수를 적용하는 것과 동일한 수준의 오차를 주면서 사용하기가 쉬운 하나의 평균보정계수를 적용하는 것이 합리적이라 결론지을 수 있다.

재하시험을 수행한 결과인 Table 9에서 전반적인 하중 추정오차의 범위는 10% 내외의 정확도를 보여주고 있음을 확인할 수 있다. 또한 하중경우에 따라서는 5% 내의 결과를 보여주는 경우도 있기 때문에 일반적으로 신뢰받는 BWIM 알고리즘에 기대되는 수준의 결과에 도달하였다고 할 수 있다.

3.3.4 속도영향의 분석

Fig. 6은 각 하중경우별로 속도에 따른 오차율을 보여주고 있다. 그림에서 하중경우-1은 속도에 무관하게 모

Table10 Identification error(%) depending on modification factor

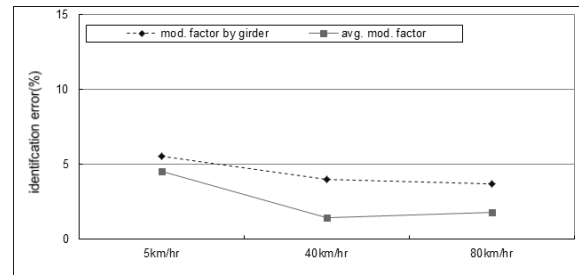
| load case | | identification error(%) | | | | | |
|------------------|----------------------|-------------------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|
| | | 1-1 ~ 1-3 | | 2-1 ~ 2-3 | | 3-1 ~ 3-3 | |
| velocity (km/hr) | axle load | avg. by girder | total average | avg. by girder | total average | avg. by girder | total average |
| 5 | P ₁ error | 3.23 | 0.10 | 5.46 | 6.62 | 0.05 | 2.98 |
| | P ₂ error | 7.83 | 9.02 | 6.27 | 5.98 | 12.7 | 11.3 |
| | avg. error | 5.53 | 4.56 | 5.87 | 6.30 | 6.38 | 7.14 |
| 40 | P ₁ error | 7.00 | 2.06 | 4.27 | 7.26 | 0.86 | 0.88 |
| | P ₂ error | 0.99 | 0.87 | 9.90 | 8.83 | 8.33 | 6.88 |
| | avg. error | 4.00 | 1.47 | 7.09 | 8.05 | 4.60 | 3.88 |
| 80 | P ₁ error | 2.99 | 0.19 | 9.22 | 9.04 | 1.72 | 2.37 |
| | P ₂ error | 4.42 | 3.37 | 16.2 | 12.2 | 18.9 | 13.3 |
| | avg. error | 3.71 | 1.78 | 12.71 | 10.62 | 10.31 | 7.84 |

든 경우에서 거의 일정한 수준의 오차범위 내에서 하중을 식별하고 있음을 알 수 있으나, 하중경우-2와 하중 경우-3의 경우에는 속도에 따라 다소 오차율이 변동함을 볼 수 있다. 특히 하중 경우-2의 경우에는 속도가 증가함에 따라 오차율로 거의 선형으로 증가하고 있다. 그러나 하중 경우-3의 경우에는 본 연구에서 수행한 결과만으로는 차량속도에 선형적으로 오차가 증가되는 현상을 볼 수 없고 일정한 양상을 보이지 않는다.

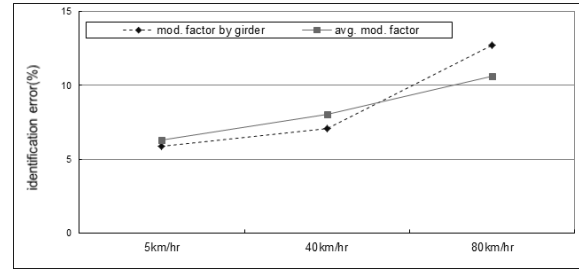
따라서 위의 결과를 바탕으로 개발된 BWIM 알고리즘은 차량속도에 따른 경향성을 띤 영향을 받지 않으며, 오히려 계측 데이터의 양과 질에 따라 영향을 받는 것임을 알 수 있다. 즉, 변형률 계측이 정확히 이루어지고, 적절한 위치에서 계측이 이루어진다면 고속주행하는 차량의 경우에도 이동하중의 식별이 신뢰성을 가질 수 있을 것이라 기대된다.

4. 결론

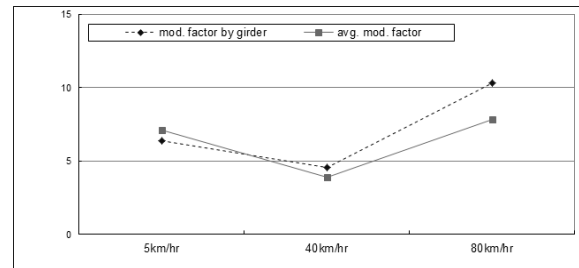
본 논문에서는 밀도추정함수를 적용하고 평균보정계수를 이용하는 BWIM 알고리즘을 제시하고, 이를 다주형 교량에 적용하여 그 효율성을 검증하였다. 수치예제와 실내실험을 통해 제시된 알고리즘을 적용하기 위한 교량의 모델 분리, 밀도추정함수의 적용성 및 계측값의 처리문제를 1차 검토하였다. 현장재하시험을 통해서 본 논문에서 제시하는 평균보정계수를 추정하고 이를 적용하여 다양한 하중경우에서 교량상을 이동하는 트럭하중을 추정하였다. 특히 평균보정계수는 주형별보정계수와 전체 평균보정계수로 구분하여 산정한 후, 각각을 하중추정에 적용하여 그 결과를 비교분석하였다.



(a) Load case-1



(b) Load case-2



(c) Load case-3

Fig. 6 Identification error of each load case depending on the vehicle velocity

- 1) 개발한 알고리즘을 수치예제에 적용한 결과 약 5% 내외의 오차를 보이며 만족할만한 하중추정 능력을 보였다. 또한, 하중 축간거리 및 차량속도는 하중추정 결과 및 주형별 하중분담율에도 큰 영향을 주지 않았다.
- 2) 개발한 알고리즘을 실내실험에 적용한 경우, 모형교량을 3개의 단순보로 나누어 모델링하였으며, 각 부분주형별로 추정된 결과의 합으로 차량축하중을 추정하였다. 추정 결과 약 5~6%내외의 오차를 보이며 만족할만한 하중추정 능력을 보였다.
- 3) 현장실험에서는 정적재하시험을 통해 평균보정계수를 전체 평균과 각 주형별의 값으로 산정하였으며, 각 평균보정계수를 적용하여 하중을 추정하였다. 두 가지 경우 모두 10%내외의 비슷한 수준의 오차를 보였지만, 전체 평균보정계수를 적용한 경우가 오차

의 편차가 다소 작았다. 두 경우의 결과 하중추정 능력은 큰 차이가 없었다. 따라서 적용하기가 용이하고 결과도 우수한 전체 평균보정계수를 적용하는 것이 더욱 합리적이다.

- 4) 현장실험의 결과에서도 차량속도에 따른 뚜렷한 경향성은 찾기 어려웠으며, 하중의 축간거리 및 차량 속도에 추정결과가 크게 영향을 받지 않는다고 할 수 있다. 오히려 하중추정 결과에는 계측한 변형률의 정확성이 보다 영향을 미칠 것으로 보인다.
- 5) 본 논문의 모든 결과를 토대로 다축 모멘트영향선을 이용한 BWIM 알고리즘의 가능성을 확인할 수 있었으며, 향후 여러 기설교량들에 대해 이 알고리즘의 적용이 가능할 것이라고 생각된다.

감사의 글

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음. 현장실험을 수행할 수 있도록 도움을 주신 창원대학교 이형진교수께 감사드립니다.

참고문헌

1. 김성곤, 박민석, 이정휘, 조병완, "BWIM시스템을 이용한 사장교의 차량하중분석", 한국지진공학회는논문집, 제10권 6호, 2006, pp.1-8.
2. 박민석, 조병완, "주행중인 차량하중 측정을 위한 BWIM시스템 개발", 한국구조물진단학회지, 제10권 2호, 2004, pp.111-122.
3. 박민석, 배두병, 황의승, "고속도로 교량 활하중정형화를 위한 BWIM SYSTEM 개발", 한국도로공사 제19회 도로기술연구성과발표회논문집(구조분야), 제22권 1호, 2002, pp.27-46.
4. 정지원, 신수봉, "다축모멘트 영향선과 밀도추정함수를 사용한 이동하중 식별 알고리즘의 개발", 한국구조물진단학회지, 제10권 6호, 2006, pp.87-94.
5. 조재용, 신수봉, 최광규, 권순정, "동적 거동계측을 통한 이동하중 추정", 한국구조물진단학회지, 제11권 4호, 2007, pp.129-137.
7. Brozovic, R., Znidaric, A., Vodopivec, V., "Slovenian experience of using WIM data for road planning and maintenance", Proceedings of the Fourth International Conference on Weigh-In-Motion, ICWIM4, 2005, pp.363-370.
6. Chan, T.H.T., Law S.S., Yung, T.H., and Yuan, X.R., "An interpretive method for moving force identification", Journal of Sound and Vibration", Vol. 219, No. 3, 1999, pp.503-529.
8. IABMAS, Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization, 2010.

(접수일자 : 2010년 8월 16일)

(수정일자 : 2010년 11월 4일)

(심사완료일자 : 2010년 11월 11일)

요 지

본 논문은 변형률 계측데이터를 사용하는 신뢰성 및 정확성을 증진된 BWIM(Bridge Weigh-In-Motion) 알고리즘을 개발하고, 이를 교량에 대한 다양한 실험을 통해 검증하고자 하는 것이다. 본 논문에서는 밀도추정함수와 평균보정계수를 이용한 BWIM 알고리즘을 제시한다. 밀도추정함수는 다축하중을 추정할 때 신뢰할 수 있게 적용할 수 있음을 입증하였으며, 평균보정계수는 이론 계산된 모멘트와 계측된 변형률에서 계산한 모멘트 사이의 전반적인 오차를 최소화하기 위해 적용된다. 개발된 알고리즘은 수치예제, 실내모형실험 그리고 다주형 합성교량에 대한 현장실험을 통해 성공적으로 검증하였다.

핵심 용어 : BWIM, 다주형교량, 밀도추정함수, 평균보정계수