

교량바닥판의 동적 변형률 응답을 이용한 민감도 기반 BWIM 시스템 Sensitivity-based BWIM System Using Dynamic Strain Responses of Bridge Deck Plate

김 병 화†·박 민 석*·여 금 수**·김 수 진**

Byeong Hwa Kim, Min Seok Park, Keum Soo Yeo and Soo Jin Kim

(2010년 3월 25일 접수 ; 2010년 6월 24일 심사완료)

Key Words : BWIM System(교량 축중 계측시스템), Bridge Deck Plate(교량 바닥판), Influence Line(영향선), Influence Sequence(영향 함수), Force Identification(하중 인식), System Identification(시스템 인식)

ABSTRACT

Using the responses of deck plate, a new bridge weigh-in-motion system has been introduced. The approach includes not only a systematic algorithm for the extraction of moment influence sequence but also a sensitivity-based system identification technique. The algorithm identifies the influence sequence, the axle loads, and axle location of moving vehicles on a bridge, simultaneously. The accuracy and practicability of the algorithm have been examined experimentally for a folded deck plate on Yongjong Grand suspension bridge. It turns out that the two-dimensional effects of the behavior of deck plate should be considered for further accuracy improvement.

1. 서 론

최근 국내 경제규모의 증대에 따른 물류이동의 증가 및 고유가 시대를 맞이하여, 과적차량의 도로 주행 및 교량 통행 빈도가 증가하고 있다. 과적차량은 도로 및 교량구조물의 주요 손상요인으로써 시설물의 내구성을 단축시키고 유지보수 비용을 증가시킨다. 또한, 과적차량은 차량의 제동 및 조종 능력이 떨어져 도로의 용량을 저하시킬 뿐 만 아니라 운전자의 안전에도 큰 위협이 되고 있다. 현행 도로 교 설계기준에서 사용되는 DB24 설계차량의 후륜 축하중이 9.8톤 이기 때문에, 국내에서는 개별 축

하중이 10톤 이상인 차량에 대하여 정적인 과적단속이 수행되고 있다. 현행 과적단속방법은 차량을 일정한 장소(계량소)까지 유도하고 정지시킨 후에 차량의 개별 축하중을 측정하는 정적인 방법이다. 정적인 과적단속은 매우 정밀한 측정이 가능하고 운전자와의 대화가 가능한 장점이 있는 반면, 측정 인원 및 장소가 필요하고 시간이 소요되며 위치가 노출되는 단점이 있다. 더욱이 정적인 측정은 혼입률과 차간거리 등 교통 관련 정보의 수집이 불가능하고, 운행차량 측면에서 보면 정상적인 운행경로에서 벗어남으로써 시간 및 경비를 낭비하게 된다. 이는, 최근 한국도로공사에서 시행중인 톨게이트의 승용차 하이패스 시스템(hi-pass system)에 대하여 화물차연대의 적용 확대 요구가 그 좋은 예이다.

이러한 문제의 해결을 위하여, 현재 도로에서 운용중인 과속단속 시스템과 같이, 주행중인 차량의 축하중을 측정할 수 있는 시스템에 대한 연구가 1990년대에 유럽을 중심으로 COST 323 Project⁽¹⁾ 및 WAVE Project⁽²⁾와 같은 대규모 연구가 진행되었다.

† 교신저자 ; 정회원, 경남대학교 토목공학과
E-mail : bhkim@kyungnam.ac.kr
Tel : (055)249-2667, Fax : (055)999-2165

* 한국도로공사 도로교통연구원

** 경남대학교 첨단공학과

이 논문 일부는 2010년 춘계 소음진동 학술대회에서 발표되었음.

주행 중 차량의 축하중을 측정할 수 있는 시스템은 고속 WIM(weigh-in-motion) 시스템과 BWIM(bridge weight-in motion) 시스템으로 구분된다. 고속 WIM 시스템은 도로의 포장층에 고감도 축하중 센서를 설치하여 주행 차량의 하중 및 교통 정보를 획득하는 방식이다. 이 시스템은 차량과 도로면의 상호 동적인 작용에 의해 속도와 원더링 효과(wondering effect)에 매우 민감하여 측정오차가 크게 발생하고 정확도 확보에 어려움이 있다. 또한 포장층 변형 및 파손에 따라 신호 왜곡이 심하게 발생함은 물론 센서 유지 보수 시 교통 차단을 하고 실시해야 하므로 관리에 어려움이 있다. 반면, BWIM 시스템은 교량을 저울로 이용하여 차량의 하중 및 교통 정보를 측정하는 시스템으로 포장층에 축 중 센서를 설치하는 고속 WIM 시스템에 비해 교량하부에 센서를 설치함으로써 운전자에게 보이지 않으므로 편중되지 않은 실제 차량하중에 대한 자료수집이 가능하다. 또한 유지관리 시 교통의 흐름을 방해하지 않아 미국의 F. Moses 등⁽³⁾에 의해 처음 시도된 후 여러나라(Peters⁽⁴⁾, Znidaric⁽⁵⁾, Dempsey⁽⁶⁾ 등)에서 개발하여 사용하고 있다. 고속 WIM 시스템과 달리 BWIM 시스템은 교량 자체를 저울로 이용함으로써 접근방식에는 큰 차이가 있다. 그러나 이 시스템도 축 중계로는 교량 거더에 변형률 센서를 부착하여 사용하므로 차량과 포장면의 상호 동적 효과가 고속 WIM 시스템만큼 민감하지는 않으나 축 감지기를 포장층에 설치하므로 이 센서의 유지보수에는 마찬가지로의 어려움이 있다.

Moses가 제안한 BWIM 시스템은 교량의 동적 응답으로부터 추출된 정적 모멘트 영향선을 이용하여 통과차량의 축하중을 추정한다. 그러므로 BWIM 시스템의 오차는 추출된 영향선의 정확성에 크게 의존된다. 그러나 현재까지 영향선을 현장계측을 통하여 체계적으로 추출하기 위한 알고리즘의 소개는 찾아보기 힘들다. 또한, 교량 거더의 응답들은 일반적으로 교량 전체 시스템의 재하 조건에 영향을 받는다. 특히, 장경간 교량은 평상시 많은 차량이 통행하고 있기 때문에, 계측구간 이외의 차량하중에 의한 영향은 추정 정확도에 많은 영향을 미친다. 그러므로 거더의 응답을 이용하는 BWIM 시스템은 장경간 교량에 적용하기 어렵다. 또한, 거더의 응답을 이용하는 BWIM 시스템은 총중량 추정에 대한

정확도는 높으나, 개별 축중에 대한 추정 정확도는 매우 낮다.

Moses가 제안한 BWIM 시스템의 단점들을 해결하기 위하여, 이 연구에서는 현장 실험을 통하여 영향선을 추출할 수 있는 체계적인 알고리즘을 소개하고, 거더의 응답 대신 교량 상판 슬래브의 응답을 이용하는 방법을 제안한다.

2. 본 론

2.1 영향함수의 추출

Fig. 1과 같이 임의의 3축 트럭이 교량의 상판을 통과할 때, 상판의 모멘트 $M(t)$ 은 임의의 지점 A 에서의 시간의 함수로 나타낼 수 있다. 만약, 트럭이 등속도 v 로 A 점을 통과한다면, 모멘트 함수는 식 (1)과 같이 거리 x 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$M(x) = w_1 I(x - s_1) + w_2 I(x - s_2) + w_3 I(x - s_3) \quad (1)$$

여기서, $I(x)$ 는 x 지점에서 모멘트의 영향함수를 나타낸다. w_i 와 s_i 는 각각 i 번째 축하중과 재하 위치를 나타낸다. 그러면 모멘트 함수는 모멘트 영향함수

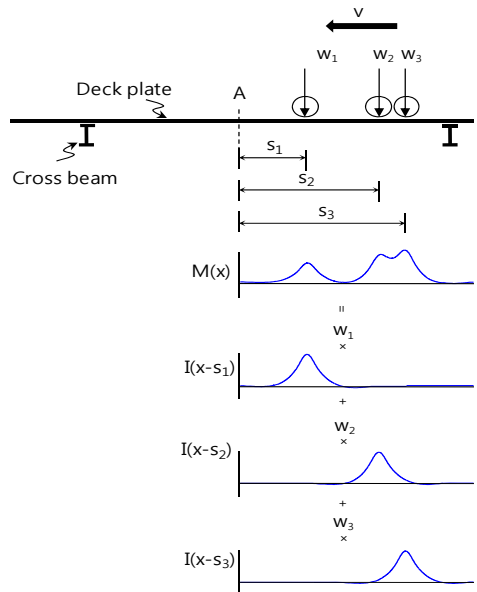


Fig. 1 Moment influence line

$I(x)$ 들의 선형 조합으로 나타낼 수 있다. 일반적으로 총 L 개의 차측을 갖는 모멘트에 대하여 총 N 개의 샘플(sample)이 획득되었다면, n 번째 모멘트 샘플 $M(n)$ 은 다음과 같이 이산형 함수로 기술할 수 있다.

$$M(n) = \sum_{k=1}^L w(k)I(n-s(k)) \quad (2)$$

여기서, $w(k)$ 와 $s(k)$ 는 k 번째 샘플 축하중과 재하 위치를 나타낸다. 계측된 모멘트 $M(n)^*$ 와 수치모델의 모멘트 $M(n)$ 사이의 평균오차제곱 값은 다음과 같다.

$$e = \sum_{n=0}^{(N-1)} [M(n)^* - \sum_{k=1}^L w(k)I(n-s(k))]^2 \quad (3)$$

식 (3)은 휨모멘트 영향함수에 대한 2차 함수이기 때문에, 최적 해는 다음의 선형방정식들로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{(N-1)} \gamma_{ww}(p-k)I(k) \\ = \gamma_{wM^*}(p) \text{ for } p = -N+1, \dots, 0, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $\gamma_{ww}(k)$ 는 $w(k)$ 의 자기상관(auto correlation)이고, $\gamma_{wM^*}(k)$ 은 $\{w(k)\}$ 와 $M(n)^*$ 의 상호상관(cross correlation)이다. 식 (4)의 행렬식 표현은 다음과 같다.

$$\Gamma_{ww} \mathbf{I}_N = \gamma_{wM^*} \quad (5)$$

여기서, Γ_{ww} 는 $\gamma_{ww}(p-k)$ 요소를 갖는 $(2N-1) \times (2N-1)$ Toeplitz 행렬⁽⁷⁾이고, γ_{wM^*} 는 $\gamma_{wM^*}(p)$ 요소를 갖는 $(2N-1) \times 1$ 상호상관 벡터이다. 그러면 모멘트 영향함수의 최적 해는 다음과 같이 추출될 수 있다.

$$\mathbf{I}_N = \Gamma_{ww}^{-1} \gamma_{wM^*} \quad (6)$$

2.2 축하중의 추출

모멘트 영향함수 $\{I(n)\}$ 이 식 (6)으로부터 추출되었고, 계측 모멘트 $M(n)^*$ 이 측정되었다고 가정하였다. 그러면 식 (3)은 축하중 $w(n)$ 에 대한 2차 함수이고, 최소오차에 대한 최적 해는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{(N-1)} \gamma_{II}(p-k)w(k) \\ = \gamma_{IM^*}(p) \text{ for } p = -N+1, \dots, 0, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, $\gamma_{II}(k)$ 는 모멘트 영향함수 $\{I(k)\}$ 의 자기상관이고, $\gamma_{IM^*}(k)$ 는 계측모멘트 $M(n)^*$ 와 모멘트 영향함수 $\{I(n)\}$ 의 상호상관이다. 식 (7)의 행렬 형식은 다음과 같다.

$$\Gamma_{II} \mathbf{w}_N = \gamma_{IM^*} \quad (8)$$

여기서, Γ_{II} 은 $\gamma_{II}(p-k)$ 요소를 갖는 $(2N-1) \times L$ 행렬이고, γ_{IM^*} 은 $\gamma_{IM^*}(p)$ 요소를 갖는 $(2N-1) \times 1$ 상호상관 벡터이다. 그러면 축하중 벡터는 다음 식에 의해서 추출된다.

$$\mathbf{w}_N = [\Gamma_{II}^T \Gamma_{II}]^{-1} \Gamma_{II}^T \gamma_{IM^*} \quad (9)$$

2.3 민감도 기반 시스템 인식

계측된 모멘트 $M(n)^*$ 를 확인한 후, 계측 모멘트의 침두 위치와 대응되는 침두 값은 각각 개별 축하중의 재하위치와 축하중 크기를 나타낸다. 그러면, 영향함수 $\{I(n)\}$ 는 식 (6)을 이용하여 산출될 수 있다. 영향함수가 추출되면, 구하고자 하는 축하중은 식 (9)를 통하여 간단히 산출할 수 있다. 산출된 축하중은 계측 모멘트의 침두값인 초기 근사값보다 개선된 값이다. 반면, 축하중의 재하위치는 여전히 계측 모멘트의 침두 위치로써 개선되지 않는 위치이다. 따라서, 축하중의 재하위치 인식을 위한 새로운 알고리즘의 개발이 필요하다. 이 절에서는 축하중 재하위치 변화에 따른 모멘트 변화의 민감도를 이용하여, 축하중 재하위치를 정확하게 인식하고 대응되는 개별 축하중을 추출할 수 있는 민감도 기반 시스템 인식 알고리즘을 제안한다. 민감도기반 시스템 인식이론은 다변수 시스템의 최적화 알고리즘으로서 토목분야 실무에 다양하게 적용되어 검증된 이론^(8,9)이다.

인식하고자 하는 변수들을 갖는 $L \times 1$ 벡터 \mathbf{U} 를 다음과 같이 정의하였다.

$$\mathbf{U} \equiv [(s_1 \dots s_L)]^T \quad (10)$$

여기서, s_j 는 j 번째 재하위치를 나타낸다. 식 (10)의 인식변수벡터를 가정하면, 대응되는 축하중은 계측 모멘트 $M(n)^*$ 로부터 추출할 수 있다. 그러면 모멘트 영향함수 $\{I(n)\}$ 는 식 (6)을 이용하여 추출되고

축하중은 식 (9)를 이용하여 추출 될 수 있다. 다음은 추출된 영향함수와 축하중을 조합하여 식 (1)의 모멘트 함수를 추정한다. 그러면 추정된 모멘트 함수는 계측 모멘트 함수와 동일하여야 한다. 따라서, 최적화를 위한 목적함수 벡터(objective vector)는 $N \times 1$ 계측 모멘트 벡터로 정의하였다.

모멘트 함수는 재하위치의 함수이므로 k 번째 모멘트의 변화는 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$\delta M(k) = \sum_{j=1}^L \frac{\partial M(k)}{\partial U_j} dU_j \quad (11)$$

여기서, U_j 는 인식변수벡터 \mathbf{U} 의 j 번째 요소이다. 식 (11)은 다음과 같이 보다 간단하게 정의할 수 있다.

$$\mathbf{z} = \mathbf{F}\boldsymbol{\alpha} \quad (12)$$

여기서, $N \times 1$ 벡터 \mathbf{z} 는 k 번째 모멘트수의 변화를 나타내며 다음과 같이 정의되었다.

$$\mathbf{z} = [(\delta M(1) \ \dots \ \delta M(N))]^T \quad (13)$$

$L \times 1$ 벡터 $\boldsymbol{\alpha}$ 는 인식변수의 변화를 나타내며 다음과 같이 정의되었다.

$$\boldsymbol{\alpha} = [dU_1 \ \dots \ dU_L]^T \quad (14)$$

그리고, $N \times L$ 벡터 \mathbf{F} 는 재하위치에 대한 모멘트의 민감도로써 다음과 같이 나타낸다.

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \frac{\partial M(1)}{\partial U_1} & \dots & \frac{\partial M(1)}{\partial U_L} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial M(N)}{\partial U_1} & \dots & \frac{\partial M(N)}{\partial U_L} \end{bmatrix} \quad (15)$$

반복법을 이용하여 민감도 방정식 식 (12)의 해를 구하기 위한 과정은 다음과 같다. 먼저, 번째 i 반복 단계에서 인식변수벡터를 식 (16)과 같이 임의로 가정한다.

$$\mathbf{U}^i \equiv [(s_1^i \ \dots \ s_L^i)]^T \quad (16)$$

여기서, 위첨자 ' i '는 반복 단계를 나타낸다. 다음은 계측 모멘트로부터 축하중의 근사치를 추출한다. 그리고 식 (6)로부터 영향 함수를 추출하고, 식 (9)로부터 축하중을 추출한다. 다음은 추출된 영향 함수와

축하중을 이용하여 식 (1)의 모멘트와 계측 모멘트의 차이를 다음 식 (17)로부터 구한다.

$$\mathbf{z} = [(M^*(1) - M(1) \ \dots \ M^*(N) - M(N))]^T \quad (17)$$

여기서, $M^*(k)$ 와 $M(k)$ 는 각각 번째 샘플에서 계측된 모멘트와 식 (1)에서 추출된 모멘트를 의미한다. 다음은 식 (15)에서 주어진 민감도 행렬 \mathbf{F} 를 선형 근사해법을 이용하여 계산한다. 그러면 인식변수의 변화는 다음 식 (18)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\boldsymbol{\alpha} = \mathbf{F}^{-I} \mathbf{z} \quad (18)$$

여기서, \mathbf{F}^{-I} 는 민감도행렬 \mathbf{F} 의 의사역행렬(pseudo inverse matrix)이고, 다음 식에 의해서 근사 될 수 있다.

$$\mathbf{F}^{-I} = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} [\mathbf{F}^T \mathbf{F} + \epsilon]^{-1} \mathbf{F}^T \quad (19)$$

마지막으로, 인식변수는 $(i+1)$ 번째 반복단계에서 다음과 같이 갱신된다.

$$U_j^{i+1} = U_j^i + \alpha_j \quad (20)$$

여기서, U_j^i 와 α_j 는 각각 i 번째 반복단계에서 인식변수벡터 \mathbf{U}^i 와 인식변수의 변화벡터 $\boldsymbol{\alpha}$ 의 j 번째 항이다. 따라서, 새롭게 갱신된 인식변수들에 대하여 식 (17)부터 (20)까지를 인식변수의 변화가 영이 될 때까지 반복한다.

3. 현장실험

3.1 현장 실험 개요

제안된 축하중 인식 알고리즘은 서울과 인천국제공항을 연결하는 신공항고속도로에 건설된 영종대교 상판 슬래브의 BWIM 시스템 설치를 위한 주행 실험 결과에 대하여 적용하였다. 영종대교는 총 경간장이 550 m인 복층식 자정(self-anchored) 현수교 형식의 교량으로써, 중앙 경간장 300 m와 양쪽 측 경간장은 125 m으로 구성되어 있다. 주탑 높이는 107 m이고, 상판의 폭은 35 m이다. 상판의 2층은 6차선 도로로 사용되고 있으며, 상판의 1층은 4차선 도로와 복선철도로 사용되고 있다. 상판 1층은 두 개의 독립된 슬래브로 구성되어 있다. 상판 슬래브는 강제 폴디드 플레이트(folded steel plate)로 제작

Table 1 Measured static axle weight of the calibration trucks

Wheel axles	Three axle truck (kN)	Four axle truck (kN)
First axle	48.608	89.572
Second axle	73.206	80.654
Third axle	70.756	90.846
Fourth axle	-	90.356
Gross weight	192.570	351.428

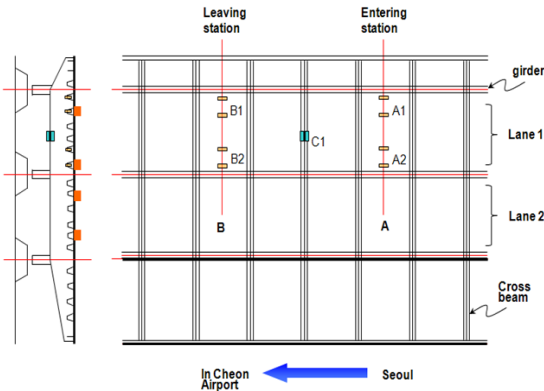


Fig. 2 Sensor map

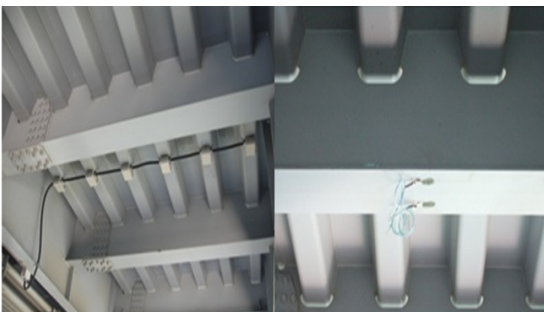


Fig. 3 Sensor attachment on the deck plate of bridge



Fig. 4 Field tests

되었다.

주행실험은 1층 상판 슬래브에 대하여 수행되었으며, Fig. 2는 변형률계의 설치 위치를 나타낸다. 변형률계는 1차선 두 군데, A와 B 위치에 부착시켰다. 여기서, 위치 A와 B는 각각 차량의 진입부와 탈출부를 나타낸다. 바닥 슬래브의 변형률 신호는 총 4개소(A1, A2, B1 그리고 B2)에서 계측되었으며, 가로보의 변형률은 C1에서 계측되었다. 각각의 변형률 계측위치에서는 두 개의 변형률계를 Half bridge로 결선하여 잡음을 개선하였다. Fig. 3은 바닥판 하부의 폴디드 플레이트(folded plate)에 변형률계를 부착시킨 모습을 보인다. Fig. 4와 같이 두 대의 시험차량이 투입되었다. 시험차량 주행에 따른 변형률 신호들의 기록은 NI Compact-RIO 데이터 로거(data logger)를 사용하였으며 2000 Hz로 샘플링 되었다. 시험차량은 Table 1과 같이 3축 공차와 4축 만재 트럭을 사용하였다.

3.2 제안된 기법을 이용한 축하중 추출

Table 2와 같이 총 8회의 주행실험이 수행되었다. Test No. 1~4는 3축 시험차량의 주행에 따른 변형률 신호에 제안기법을 적용하여 추정된 결과이고, Test No. 5~8은 4축 시험차량에 대한 제안기법의 추정 결과이다. 트럭의 속도는 A와 B구간 사이의 바닥판 변형률 신호의 상호상관으로부터 추출하였다. Table 2로부터 최소 축간 거리는 1.15 m, 최고 속도는 78.49 km/hr임을 알 수 있다. 그러므로 변형률 신호로부터 개별 차량들의 식별을 위해서는 18.96 Hz이상으로 데이터 샘플링이 수행되어야 한다. 그러므로 계측 변형률 신호에 혼입된 동적 응답 성분을 최소화하기 위하여 계측된 모든 변형률 신호를 20 Hz의 디지털 저역통과필터(low pass filter)를 사용하여 필터링하였다.

힘부재의 모멘트는 변형률과 선형 비례하기 때문에, 이후, 계측 변형률은 계측 모멘트 $M(n)^*$ 로 표기한다. 여기서, 모멘트와 변형률 사이의 비례계수는 제안기법을 이용하여 추정된 축하중의 총중량과 Table 1에 보이는 시험차량의 총중량을 비교하여 추후 산출하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 Test No. 1과 5에서 각각 계측된 모멘트의 필터링 결과를 나타낸다.

제안한 민감도 기반 시스템 인식 알고리즘을 적용하여 축하중과 재하위치를 추정하였다. 축하중의

Table 2 Estimated axle weight of calibration trucks

Test case No.	Vel. (km/h)	Wheelbase(m)			Estimated axle weight(kN)				Gross weight (kN)
		First~second	Second~third	Third~fourth	First	Second	Third	Fourth	
1	69.36	3.36	1.21	-	50.53 (3.96)	71.45 (-2.40)	76.34 (7.89)	-	198.32 (2.98)
2	73.67	3.32	1.21	-	44.32 (-8.83)	66.31 (-9.42)	69.81 (-1.34)	-	180.43 (-6.30)
3	71.17	3.37	1.20	-	51.00 (4.92)	70.51 (-3.69)	79.43 (12.26)	-	200.93 (4.34)
4	70.89	3.41	1.17	-	50.77 (4.44)	72.22 (-1.35)	81.76 (15.56)	-	204.75 (6.32)
5	71.45	1.64	3.00	1.16	81.99 (-8.47)	78.49 (-2.68)	87.98 (-3.15)	98.98 (9.54)	347.44 (-1.13)
6	78.49	1.66	3.00	1.18	83.23 (-7.08)	78.95 (-2.11)	80.70 (-11.17)	93.94 (3.97)	336.82 (-4.16)
7	77.48	1.65	3.03	1.16	86.02 (-3.97)	82.47 (2.26)	82.07 (-9.66)	96.86 (7.20)	347.42 (-1.14)
8	75.66	1.64	3.02	1.15	88.62 (-1.06)	82.56 (2.36)	95.89 (5.55)	103.89 (14.98)	370.96 (5.56)

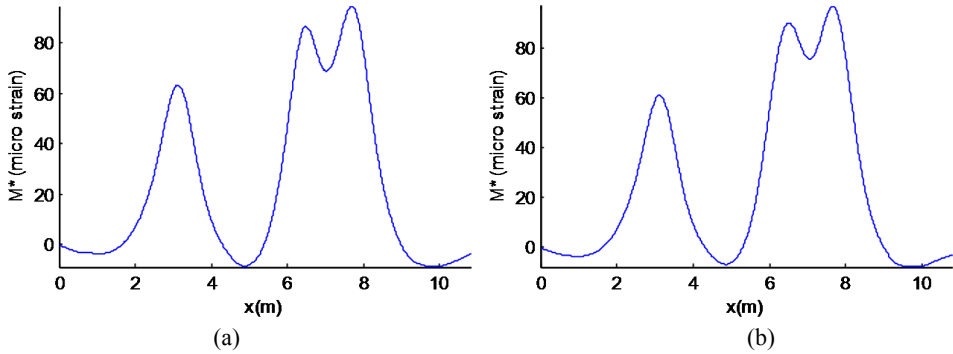


Fig. 5 Measured moment sequence in Test No.1 : (a) Sensor B1; (b) Sensor B2

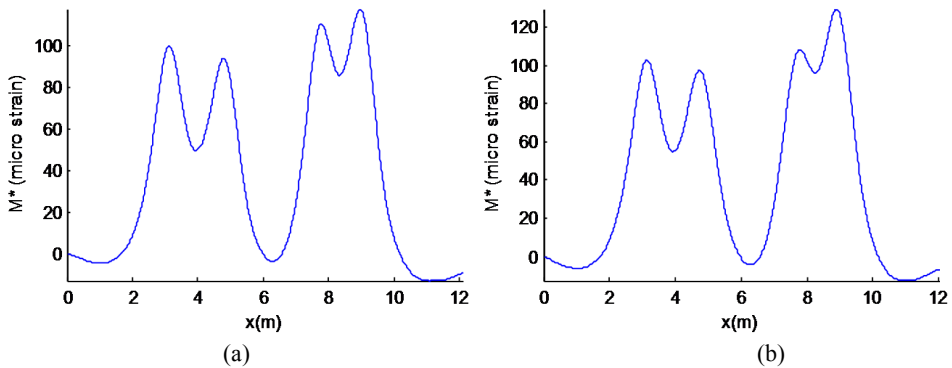


Fig. 6 Measured moment sequence in Test No.5 : (a) Sensor B1; (b) Sensor B2

수 및 각각의 인식변수 초기값들은 Fig. 5와 Fig. 6에 보이는 계측 모멘트로부터 선택 되었다. Test

No. 1의 경우에, 계측 샘플의 수가 $N=1055$ 이기 때문에, 식 (5)의 2109×2109 Toeplitz행렬 Γ_{ww} 과

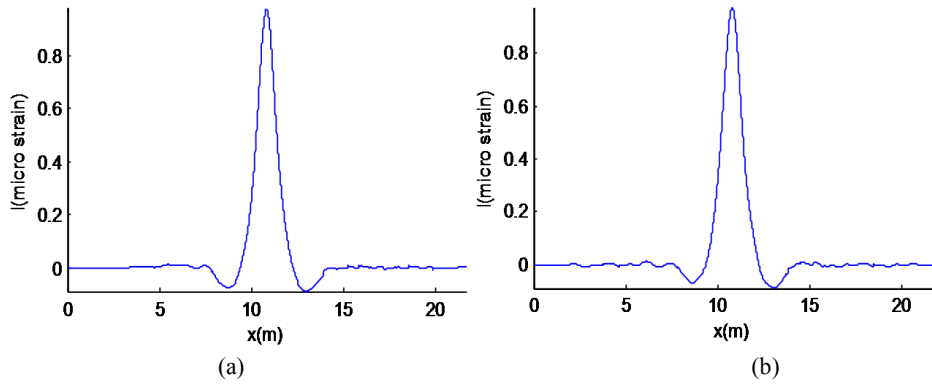


Fig. 7 Evaluated influence sequence in Test No.1: (a) Sensor B1; (b) Sensor B2

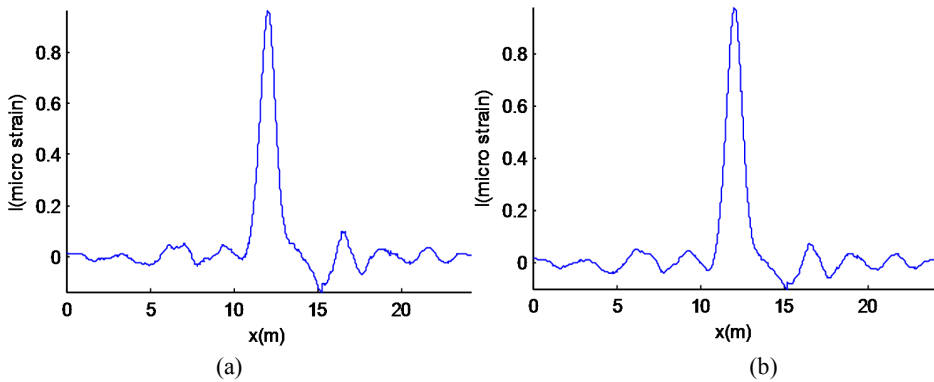


Fig. 8 Evaluated influence sequence in Test No.5: (a) Sensor B1; (b) Sensor B2

2109×1 상호상관 벡터 $\gamma_{w,M}$ 을 구성하였다. 식 (6)을 통하여 영향함수 벡터 $I(n)$ 은 산출되었으며, 추출된 영향함수가 Fig. 7에 보인다. Test No.5의 경우에, 모멘트 샘플 수는 $N=1219$ 이고, Toeplitz행렬의 크기는 2437×2437 이다. Fig. 8은 Test No.5에서 추출된 영향함수를 보여준다.

추출된 영향함수를 이용하여, 식 (8)의 행렬 Γ_H 과 γ_{IM} 을 구성하였다. 그리고 식 (9)을 이용하여 개별 축하중 w_N 이 산출되었다. 다음은, 추출된 영향함수와 축하중을 이용하여 민감도 방정식 (12)를 푼다.

이때, 민감도 방정식은 식 (16)~(20)을 이용한다. 갱신된 재하위치 및 추출된 영향함수와 축하중를 이용하여 갱신된 모멘트는 식 (1)로부터 산정한다. 갱신된 모멘트가 계측 모멘트로 수렴될 때까지 상기 민감도기반 시스템 인식 알고리즘을 반복 수행한다. Fig. 9와 Fig. 10은 Test No. 1과 5에 대하여

수렴된 모멘트와 계측 모멘트를 나타내고 있다. 추정된 모멘트와 계측된 모멘트는 매우 일치하는 것을 알 수 있다. 즉, 제안 알고리즘은 현장 여건에 매우 효과적이다.

주행실험 8회의 분석결과 및 추정오차는 Table 2에 보인다. 총 중량 오차는 개별 축하중의 오차보다 매우 적다. 3축 트럭 및 4축 트럭의 최대 오차는 각각 Test No. 4와 8에서 각각 발생하였다. Fig. 5와 Fig. 6의 계측 모멘트에서 후륜 텐덤축(tandem axes)을 자세히 살펴보면, 마지막 텐덤축의 하중이 가장 크게 나타남을 볼 수 있다. 마지막 텐덤축 하중이 가장 큰 이유는 상판 슬래브의 2차원 거동이 원인일 수 있다. 영향함수의 영향폭은 대략 3.4 m~4 m이나 좌우 바퀴 사이의 간격은 3 m보다 작다. 따라서, B1지점에서 축하중은 B2지점의 모멘트에 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 제안된 방법의 정확도를 높이기 위해서는, 향후 2차원 거동이 고려되어야 할 것이다.

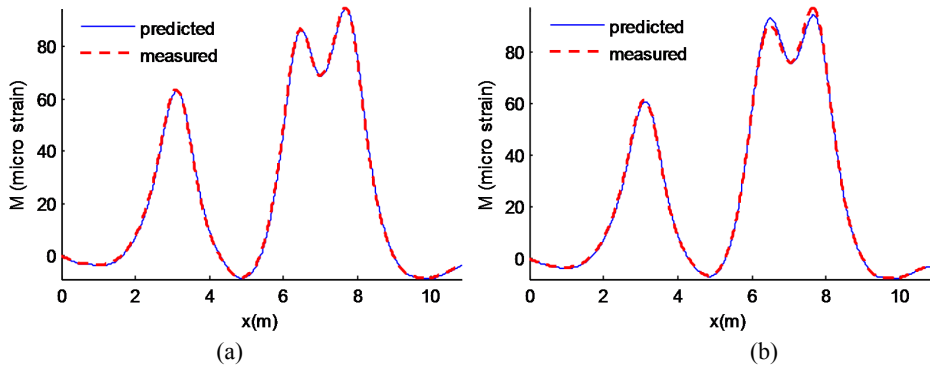


Fig. 9 Predicted moment sequence in Test No.1 : (a) Sensor B1; (b) Sensor B2

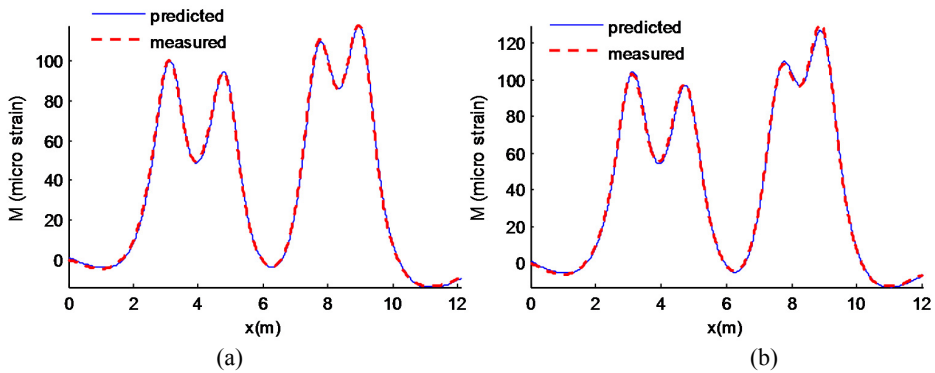


Fig. 10 Predicted moment sequence in Test No.5 : (a) Sensor B1; (b) Sensor B2

3. 결 론

거더의 응답과 다르게 바닥판의 응답은 매우 국부적이고 개별 축하중에 민감하다. 이러한 장점을 이용하기 위하여, 영향함수 및 축하중을 추출할 수 있는 체계적인 방법을 제안하였다. 다음은 민감도 기반 시스템 인식 알고리즘을 이용하여 개별 축의 재하위치까지 추출할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안 방법들의 실용성 및 정확도를 현장데이터를 이용하여 검증하였다.

실험결과로부터 적어도 다음의 두 가지 결론에 이른다. 첫째, 제안된 영향함수 추출 알고리즘은 현장 여건에서 매우 체계적이고 효과적이다. 둘째, 바닥판 슬래브의 응답을 이용하여 개별 축하중 및 재하위치 추출하는 민감도 기반 시스템 인식 알고리즘은 현장 여건에서 매우 실용적이고 기준에 거더를 이용한 방법보다 정확하다. 또한, 제안된 축하중

인식 알고리즘의 정확도 개선을 위해서는, 향후 2차원 영향면(influence surface)을 이용하는 확장연구가 기대된다.

후 기

이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2010-0016032)

참 고 문 헌

- (1) COST 323, 1999, Weigh-in-motion of Road Vehicles, Final Report.
- (2) WAVE, 2002, Weigh-in-motion of Axles and Vehicles for Europe, ed. B. Jacob, LCPC, Paris.
- (3) Moses, F., 1979, "Weigh-in-motion System

Using Instrumented Bridges,” Transportation Engineering Journal, ASCE, 105, TE3, pp. 233~249.

(4) Peters, R. J., 1986, “CULWAY - an Unmanned and Undetectable Highway Speed Vehicle Weighing System,” Proceedings of the 13th AARB Conference, Australian Road Research Board.

(5) Znidaric, A., Moses, F., 1995, Bridge Weigh-in-motion Testing of Vehicle Gross Weights in Slovenia, the First European WIM Conference, Zurich, March

(6) Dempsey, A. T., Jacob, B. and Carracilli, J., 1999, Orthotropic Bridge WIM for Determining Axle and Gross Vehicle Weights, Proceedings of the Final Symposium of the project WAVE, Ed. B. Jacob,

Hermes Science Publications, Paris, France, pp. 227~238.

(7) Proakis, J. G., Manolakis, D. G., 1996, Digital Signal Processing : Principles, Algorithms, and Applications, 3rd Ed., Prentice Hall, New Jersey.

(8) Kim, B. H., 2008, “Modal Parameter Extraction Using a Digital Camera,” Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 12, pp. 1229~1236.

(9) Kim, B. H., Park, T., 2007, “Estimation of Cable Tension Force Using the Frequency-based System Identification Method,” Journal of Sound and Vibration, Vol. 304, pp. 660~676.