

# BWIM방법을 이용한 차량 정보 추정시 정밀도 향상 방안에 관한 연구

황효상·경갑수\*·이희현\*\*·전준창\*\*

세보테크·\*한국해양대학교 건설공학과·\*\*씨티씨주식회사  
(2012. 12. 4. 접수 / 2013. 1. 30. 채택)

## A Study on Accuracy Improvement for Estimation of Vehicle Information Using BWIM Methodology

Hyo-Sang Hwang · Kab-Soo Kyung<sup>+</sup> · Hee-Hyun Lee<sup>\*\*</sup> · Jun-Chang Jeon<sup>\*\*</sup>

Department of Technical Planning, Sebo Tech Co., Ltd

<sup>\*</sup>Department of Civil Engineering, Korea Maritime University

<sup>\*\*</sup>Construction Technology Consultant Co., Ltd.

(Received December 4, 2012 / Accepted January 30, 2013)

**Abstract** : Dynamic strain history curve measured in the field is influenced by various factors such as vehicle type, speed, noise, temperature and running location etc.. Because such curve is used for vehicle weight estimation methodology suggested by Moses, exact strain history curve is the most important thing for exact estimation of vehicle weight. In this paper, effect of such factors mentioned above is investigated on the measured strain history curves, and results of weight estimation of vehicles are discussed quantitatively. From this study, it was known that temperature effect contained in the strain history curve measured for long time in-site gives the biggest effect on result of weight estimation and it can be removed by using the mode value. Furthermore, gross vehicle weight can be estimated within 5% error corresponding to A class of the European classification if effects of temperature and noise are removed and vehicle properties such as speed, axle arrangement and running location are considered properly.

**Key Words** : BWIM, Bridge Weigh-In-Motion, strain history curve, vehicle weight, weight estimation

### 1. 서론

최근 교통량 및 화물 적재량의 증가 등으로 인한 외력 환경의 변화에 따라 교량구조물의 피로손상이 증가하고 있다. 강교량의 피로손상을 정확하게 파악하기 위해서는 외력으로 작용하는 통행차량들의 하중의 크기 및 축간 간격 등을 정확하게 파악하는 것이 중요하다.

이러한 것을 조사하기 위한 방법의 하나로 차량하중으로 인한 교량부재의 응답 특성을 이용하는 BWIM(Bridge Weigh-In-Motion)방법이 사용되고 있다. BWIM이란 차량이 교량 위를 주행할 때 얻어지는 교량 부재의 응답이력곡선을 기본으로 하여 교량을 통과한 차량의 축중, 축간거리 및 속도 등을 추정하는 방법이다. BWIM방법은 1979년 Moses<sup>1)</sup>에 의해 처음 제안되었고, 일본<sup>2)</sup>, 호주<sup>3)</sup>, 슬로베니아<sup>4)</sup>, 아일랜드<sup>5)</sup> 등을 비롯한 많은 나라에서 독자적으로 개발하여 사용 중에 있다. 국내에서도 중차량의 통행특성 분석<sup>6)</sup> 및 고속도로상의 교량활하중 정형화를 위한 BWIM시스템 연구<sup>7,8)</sup>가 보고되어 있다. 최근에는 인공지능망 이론을 이용하는 BWIM시스템에 관한 연구<sup>9)</sup>, BWIM에 의한 하중추정에서의 민감도 분석 연구<sup>10)</sup> 등도 수행되었다.

인공신경망 이론을 적용하는 경우, 복잡한 구조형식을 갖는 교량에도 적용할 수 있는 장점이 있지만, 인공신경망의 구축을 위해 상대적으로 많은 수의 차량주행 신호가 필요하다는 보고가 있다. 또한 민감도 연구에서는 거더의 응답 대신에 교량 바닥판 슬래브의 응답을 이용하는 방법을 제안하였다. 여기서는 바닥판 슬래브의 응답이 거더의 응답과 다르게 매우 국부적이고 개별 축하중에 민감하다는 장점을 이용하여 영향함수 및 축하중을 추출할 수 있는 방법을 제안하였다. 그리고 현장실험을 통하여 영향선을 추출할 수 있는 민감도기반 시스템 인식 알고리즘을 소개하고, 각 차축의 재하위치도 추출할 수 있는 방법을 제안하였다.

또한 BWIM에<sup>11)</sup> 의한 트럭하중 추정결과와 정확성을 향상시키기 위하여 다축모멘트 영향선 및 밀도추정함수와 평균보정계수를 고려한 BWIM알고리즘을 제시하였다. 여기서 밀도추정함수는 다축하중의 식별에 신뢰도 높게 적용될 수 있는 것이 실내실험을 통해 검토되었으며<sup>12)</sup>, 실제교량의 실험데이터에 적용하여 그 정확성을 검증하였다. 또한 모멘트-변형을 평균보정계수는 현장 계측 데이터와 이론식에 의한 계산모멘트와의 차이를 반영하기 위해 적용하였다. 그러나 이 연구에서는 다양한 외적영향 인자가

<sup>+</sup>Corresponding Author: Kab-Soo Kyung, Tel : +82-51-410-4464, E-mail : kyungks@hhu.ac.kr  
Department of Civil Engineering, Korea Maritime University, 727, TaeJong-ro, Youngdo-Gu, Busan 606-791, Korea

중량추정에 미치는 영향에 대한 연구는 수행되지 않았다.

한편, 교량의 응답이력곡선에는 다양한 인자들의 영향이 포함되어 있어서 BWIM에 의한 차량의 중량추정시 오차를 유발시키는 요인이 된다. 오차발생의 원인으로는 차량의 주행속도, 고유진동수, 교량진입부의 단차, 차량의 횡방향 주행위치, 온도, 측정시 발생하는 노이즈 등을 생각할 수 있다. 이 가운데 차량의 주행속도 및 고유진동수, 교량진입부의 단차, 차량의 횡방향 주행위치 변화가 교량응답에 미치는 영향에 대한 기본적인 연구는 문헌<sup>13)</sup>에서 수행된 바 있다. 그러나 이들 영향인자가 BWIM에 의한 중량추정시 정확성에 미치는 연구는 수행되지 않았다.

이 연구에서는 차량형식, 주행속도, 온도, 노이즈 및 주행 위치 등이 BWIM에 의한 차량 중량추정시 정확도에 미치는 영향에 대한 이론적인 연구를 수행하였다. 이를 위해 연구에서는 플레이트거더교를 대상교량으로 선정하고, 거더의 하부플랜지 및 수직보강재의 응답이력곡선에 이들 인자가 미치는 영향을 도출하였다. 동적응답이력곡선은 3.2절에서 설명하는 동적해석 프로그램을 사용하여 산출하였다. 그리고 이들 인자들이 BWIM에 의한 중량추정시 미치는 영향을 정량적으로 분석함으로써, 현장에서 BWIM 방법에 의한 중량추정시 정밀도 향상을 위한 기본적인 자료로 활용하고자 한다.

## 2. BWIM에 의한 중량추정방법

### 2.1. 주행차량의 중량추정

이 연구에서 BWIM에 의한 주행차량의 중량추정은 Moses<sup>1)</sup>가 제안한 이론에 기초하여 실시하였다.

Moses가 제안한 중량추정의 기본식을 식 (1)에 나타내었다. 식 (1)에서  $\varepsilon_i(t)$ 는 계산변형률,  $\varepsilon_i^*(t)$ 는 측정변형률을 나타내며,  $E$ 는 각 측정점에서의 계산과 실측변형률에서의 오차의 제곱의 합계를 나타낸다.

$$E = \sum_{i=1}^{I_{\max}} \sum_{j=0}^{T_{\max}} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_i^*(t)]^2 \quad (1)$$

$$t = j\Delta t \quad (2)$$

여기서,  $T_{\max}$  : 측정변형률의 전체 샘플링 수

$\Delta t$  : 변형률 데이터의 샘플링 시간간격

$I_{\max}$  : 변형률 측정 위치 수

식 (1)에서 계산변형률  $\varepsilon_i(t)$ 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_i(t) = \sum_{n=1}^{N_{\max}} A_n \cdot I_{ni}(x_n(t)) \quad (3)$$

여기서,  $N_{\max}$  : 차축의 수,  $A_n$  :  $n$ 번째 축의 중량

$I_{ni}(x_n)$  : 측정지점  $i$ 에서  $n$ 번째 축이  $x_n$ 에 위치할 때 영향선의 값

$x_n(t)$ :  $t$  시간일 때  $n$ 번째 축의 위치

이때 각 축의 중량은 식 (4)와 같이 각 축에 대한  $E$ 의 편미분 값을 0으로 두면 구할 수 있다.

$$\frac{\partial E}{\partial A_m} = 2 \sum_{i=1}^{I_{\max}} \sum_{j=0}^{T_{\max}} \left[ \sum_{n=1}^{N_{\max}} A_n \cdot I_{ni}(x_n(j\Delta t)) \right] \cdot I_{mi}(x_m(j\Delta t)) - 2 \sum_{i=1}^{I_{\max}} \sum_{j=0}^{T_{\max}} \varepsilon_i^*(j\Delta t) \cdot I_{mi}(x_m(j\Delta t)) = 0 \quad (4)$$

### 2.2. 영향선 해석방법

변형률의 영향선 함수  $f(x(t))$ 는 식 (5)와 같이 다항식으로 나타낼 수 있다.

$$f(x(t)) = a_0 + a_1x(t) + a_2x(t)^2 + \dots + a_dx(t)^d \quad (5)$$

여기서,  $a$  : 다항식의 계수,  $d$  : 다항식의 차수

식 (3)의 계산변형률  $\varepsilon_i(t)$ 는 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$\varepsilon_i(t) = \sum_{n=1}^{N_{\max}} A_n \cdot f_i(x(t)_n) \quad (6)$$

$$x_n = x_0 + v(t - t_n) \quad (7)$$

여기서,  $x_n$  :  $n$ 번째 축의 위치,  $A_n$  :  $n$ 번째 축의 중량

$t$  : 시간,  $x_0$  : 기준 측정위치

$t_n$  :  $n$ 번째 축이 기준 측정위치를 통과할

때의 시간

$v$  : 차량 속도

그러면 계산변형률  $\varepsilon_i(t)$ 와 측정변형률  $\varepsilon_i^*(t)$ 와의 오차의 제곱의 합계  $E$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있고, 영향선 함수의 계수 값들은 식 (8)과 같이 각 계수에 대한 식 (1)의 편미분 값을 0으로 두면 구할 수 있다.

$$\frac{\partial E}{\partial a_e} = 2 \sum_{j=0}^{T_{\max}} \left[ \sum_{n=1}^{N_{\max}} P_n \left( \sum_{d=0}^{D_{\max}} a_{id} \cdot x_n(j\Delta t)^d \right) \right] \left[ \sum_{n=1}^{N_{\max}} P_n \cdot x_n(j\Delta t)^e \right] - 2 \sum_{j=0}^{T_{\max}} \sum_{n=1}^{N_{\max}} P_n \cdot x_n(j\Delta t)^e \cdot \varepsilon_i^*(j\Delta t) = 0 \quad (8)$$

식 (8)을 정리하면 영향선함수의 계수를 추정할 수 있다.

### 2.3. 차량중량추정시의 오차기준

이 연구에서는 추정된 BWIM에 의한 차량중량추정시 발생하는 오차에 대해 유럽에서 사용하고 있는 분류법<sup>14)</sup>을 사용하여 정확도를 나타내었다. Table 1에 정확도 분류의 허용오차를 설명하였다.

Table 1. Tolerances of the accuracy classes

Type of Measurement	Domain of use	Accuracy Classes:					
		Confidence	interval	width	error	ration(%)	
-	-	A	B+	B	C	D	E
Gross Weight Axle Load	Gross weight>3.5t Axle Load>1t	5	7	10	15	25	>25

### 3. 대상교량의 응답이력곡선 해석

#### 3.1. 대상교량의 개요

이 연구에서는, 이론적 해석을 위하여 도로설계편람<sup>15)</sup>의 경간 40 m의 직교이면서 단순교인 강합성 플레이트 거더교를 대상교량으로 선정하였다. Fig. 1에 대상교량의 개략적인 제원을 나타내었다.

#### 3.2. 응답이력해석

##### 3.2.1. 해석개요

이 연구에서는 이동하중에 의한 대상교량의 동적변형을 응답을 시뮬레이션 하기 위하여 동적해석 전용 프로그램(DAP-1, Dynamic Analysis Program)을 사용하였다. 이 프로그램에서는 차량을 주행하중, 주행질량 및 1자유도계로 모델링 할 수 있으며, Newmark- $\beta$ 법을 이용하여 운동방정

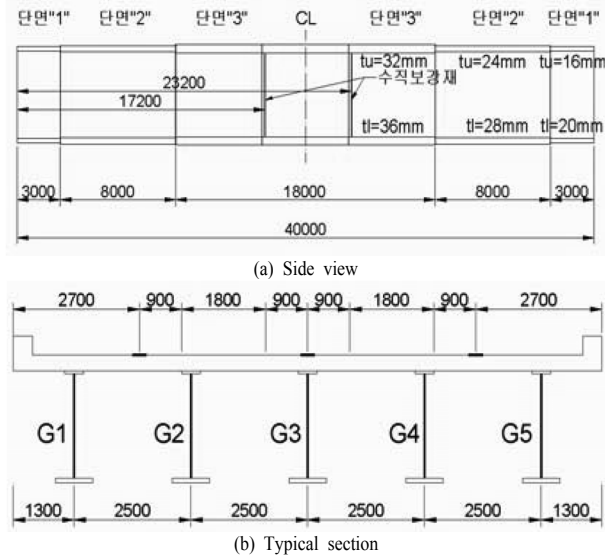


Fig. 1. Target bridge(unit : mm).

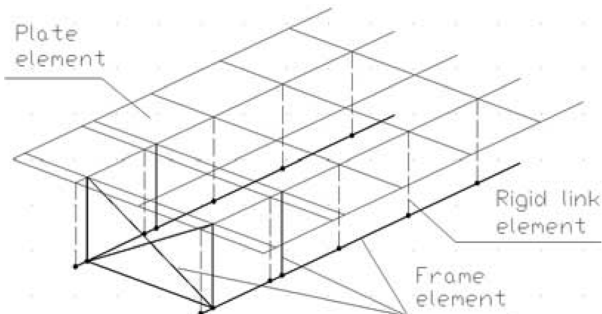


Fig. 2. Structural analysis model of target ridge.

식의 해를 구하는 특징을 가지고 있다. 이 프로그램은 다양한 연구결과로부터 차량주행에 따른 동적특성을 잘 구현할 수 있는 것으로 입증되어, 다수의 연구에 사용된 실적<sup>16-22)</sup>을 갖고 있어 그 유용성이 검증되어 있다.

Fig. 2에 대상교량의 구조해석모델을 나타내었다. 해석에서는 거더, 가로보 및 수직보강재는 Frame 요소, 바닥판은 Plate 요소, 바닥판과 거더와의 연결은 Rigid link 요소를 사용하여 모델링하였다.

##### 3.2.2. 해석변수 및 조건

연구에서는 차량 종류에 따른 중량 및 축간거리 등의 영향을 조사하기 위하여 국내에서 주행빈도가 높은 3축 및 4축차량을 사용하여 응답이력해석을 실시하였다. Table 2에 이들 차량의 제원을 나타내었다.

차량은 Fig. 3과 같이 대상교량의 1차로만을 주행하는 것으로 가정하였다. 이것은 이 연구의 목적이 차량정보 추정의 정확도에 영향을 주는 인자를 도출하고, 이에 따른 개선방안을 제시하는 것이기 때문이다. 그러므로 차량의 주행패턴(병행, 연행, 무작위 주행)에 따른 영향에 관한 연구는 추후 과제로 남겨 두었다. 그리고 속도에 따른 영향을 조사하기 위하여 주행차량의 속도는 30, 60 및 90 km/h로 하였다.

##### 3.2.3. 시간이력해석에 의한 대상교량의 동적응답 특성

BWIM에서 사용하는 교량부재의 영향선은 거더와 같

Table 2. Properties of 3- and 4-axle vehicles

Vehicle	Information	1st Axle	2nd Axle	3rd Axle	4th Axle	
3 Axle - A Vehicle	Weight(kN)	316	76	120	120	
	Axle Distance (m)	-	-	3.2	1.3	
3 Axle - B Vehicle	Weight(kN)	252	66	93	93	
	Axle Distance (m)	-	-	3.3	1.35	
4 Axle Vehicle	Information	1st Axle	2nd Axle	3rd Axle	4th Axle	
	Weight(kN)	308	74	74	80	80
	Axle Distance (m)	-	-	1.88	3.02	1.3

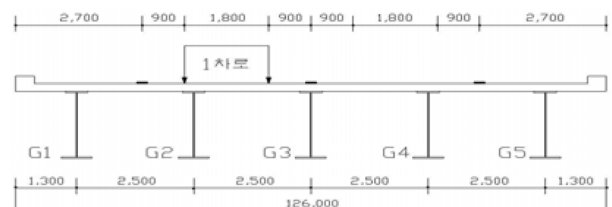


Fig. 3. Moving lane of vehicle.

이 영향선이 긴 부재, 그리고 수직보강재 또는 가로보 등과 같이 영향선이 짧은 부재로 구분된다<sup>21-22)</sup>. 이 연구에서는 거더와 수직보강재의 응답이력곡선에 BWIM방법을 적용하여, 차량중량, 속도 및 축간거리 등을 추정하였다. BWIM 적용시 응답 해석위치는 거더 G2의 하부플랜지 1개소, 거더 G2의 수직보강재 2개소를 대상으로 하였다. 하부플랜지는 거더의 중앙부, 수직보강재는, Fig. 1(a)에 표시한 바와 같이 지점에서 교축방향으로 각각 17.2 m, 23.2 m에 위치한 것을 대상으로 하였다.

Fig. 4에 3축-A차량이 1차로를 단독 주행하는 경우 거더 G2의 하부플랜지 및 수직보강재에서 발생하는 응답이력곡선의 일례를 나타내었다. Fig. 4에서의 응답이력곡선은 거더의 경우 휨모멘트, 수직보강재의 경우 축력에 의한 변형률 이력곡선이다. Fig. 4의 수직보강재 응답이력곡선에는 3축의 영향이 뚜렷하게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

**3.3. 응답이력곡선에서의 차량정보 산정**

거더에 부착되어 있는 수직보강재는 구조부재의 특성상 교량의 거더와는 달리 차량하중이 수직보강재 근처에 위치하는 경우에만 응답을 나타내는 구조특성을 갖는다. 그러므로 차량통과에 따른 수직보강재의 응답이력곡선을 분석하면 통과차량에 대한 정보를 파악할 수 있다. 그러므로 이 연구에서는 기존 연구<sup>21-22)</sup>에 적용한 수직보강재의 응답이력곡선을 이용하여 주행차량의 축간거리, 속도 및 주행차로 검지에 대해 검토하였다.

Fig. 5에 3축-A차량이 60 km/h 속도로 대상교량의 1차로

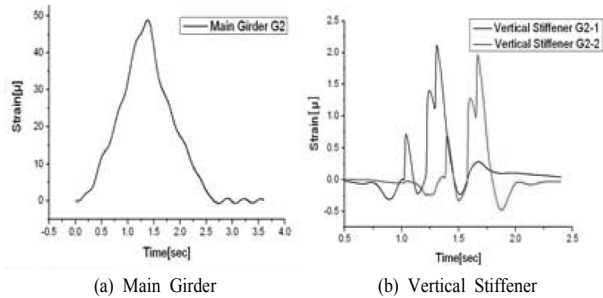


Fig. 4. Examples of response history curve of bridge member.

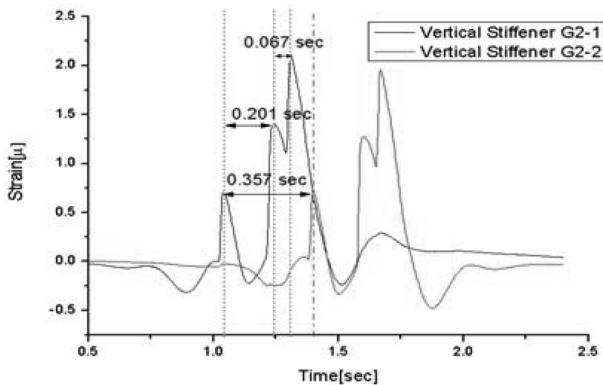


Fig. 5. Analysis of vehicle information using response history curves of vertical stiffener.

Table 3. Calculation result of axle distance and velocity for 3 axle-A vehicle.

Item	Velocity (km/h)	Axle Distance	
		L1(m)	L2(m)
3 Axle - A Vehicle	60.505	3.378	1.126
Error Ratio(%)	(0.84)	(5.56)	(-13.38)

를 통과하였을 경우의 수직보강재에 대한 응답이력곡선을 나타내었다. Fig. 5의 기호에서 G2는 2번째 거더, -1 및 -2는 각각 지점에서 17.2 m, 23.2 m에 위치한 수직보강재를 나타낸다.

Fig. 5를 보면 2개의 수직보강재에 대한 응답이력곡선에서 피크치는 주행차량의 차축이 대상 수직보강재 위를 통과할 때마다 발생하여, 3개의 피크치가 명확하게 나타나고 있다. 따라서 응답이력곡선에서 발생된 피크치에 기초하여 주행차량의 축간거리 분석과 차량형식을 분류하였고, 또한 주행차량의 속도를 추정하여 교량에서의 주행정보를 파악하였다.

Table 3에 주행차량에 대한 축간거리 및 속도의 추정결과를 나타내었다.

이상의 계산결과는 실제의 주행속도와 비교하여 1% 미만의 오차를 나타내고 있고, 축간거리는 다소 큰 최대 -13.38%의 오차를 나타내고 있다. 이로부터 수직보강재를 이용하여 주행차량의 정보인 속도 및 축간거리를 비교적 높은 정확성을 가지고 추정할 수 있다.

**4. 추정결과에 영향을 주는 요인**

**4.1. 차량특성에 따른 중량추정오차**

BWIM방법에 의한 중량추정시에서 차량특성이 어떠한 영향을 미치는지 조사하기 위하여 차량특성에 따른 중량 추정을 실시하였다. Table 2의 3가지 형식의 차량이 60 km/h로 주행하는 경우에 대한 응답이력해석을 실시하고, Fig. 6에 그 결과를 나타내었다.

3축-A차량의 경우 중량 차이로 인해 3축-B차량의 경우에 비해 응답이력곡선의 형태는 유사하나 최대응답은 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

한편 4축차량의 경우 축배치의 차이로 인해 3축 차량과 달리 응답이력곡선에는 피크치가 유사한 두 개의 봉우리를 나타내고 있다.

Table 4에 중량추정시 사용한 차량별 Case를 나타내었다. Case I-II은 기지차량이 3축-A차량일 때 3축-B 차량 및 4축 차량의 중량을 추정하는 경우이고, Case III은 기지차량이 4축차량일 때 4축 임의주행차량의 중량을 추정하는 경우이다.

Table 5에 임의차량의 3축차량 및 4축차량에 대한 중량 추정 결과를 나타내었다. 여기서는 축중량 추정시에 축중의 배치 및 응답특성을 고려하여, 3축차량의 경우 2축과 3축을 하나의 축으로, 4축차량의 경우 3축과 4축을 하나의 축으로 간주하여 축중량을 추정하였다.

Table 5를 보면 3축-A차량의 응답이력곡선과 유사한 형

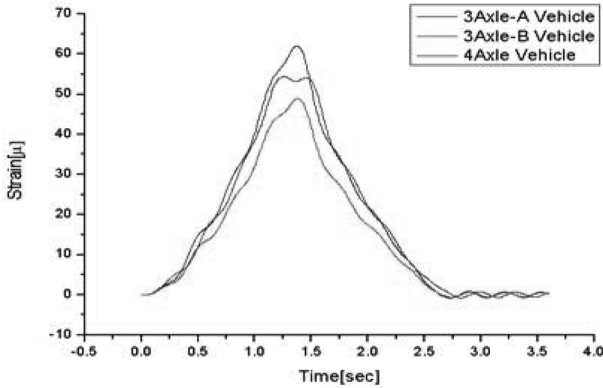


Fig. 6. Characteristic of response history curves due to vehicle type.

Table 4. Vehicle case used in weight calculation

Case	Known Vehicle	Random Vehicle
I	3 Axle-A Vehicle	3 Axle-B Vehicle
II	3 Axle-A Vehicle	4 Axle Vehicle
III	4 Axle Vehicle	4 Axle Vehicle

Table 5. Result of weight calculation for vehicle type

(unit : kN)					
Item	1st Axle	2nd Axle + 3rd Axle		Gross	
case I	Cal.	62.49	188.80		251.29
	Real	66.00	186.00		252.00
	Err.	(-5.32%)	(1.51%)		(-0.28%)
case II	Cal.	79.30	57.57	172.11	308.97
	Err.	(7.16%)	(-22.20%)	(7.57%)	(0.32%)
	Cal.	72.79	59.21	174.36	306.36
Err.	(-1.64%)	(-19.88%)	(8.98%)	(-0.53%)	

상의 3축-B차량의 축중량 및 총중량에 대한 오차는 비교적 적게 산출되었다. 이들의 오차는 Table 1의 등급 A의 조건을 충족하고 있다.

한편 Table 5에서 3축-A차량에 대한 응답이력곡선과 비교하여 차량특성의 차이가 있는 4축차량에서의 중량추정의 오차는 총중량의 경우 1%미만으로 등급 A를 충족하고 있다. 그러나 축중량의 경우는 최대 -22.2%까지 크게 발생하여 등급 D에 해당하고 있다. 그리고 4축차량을 기지차량으로 사용한 Case III의 총중량 오차는 등급 A를 만족하나, 축중량 오차는 최대 -19.88%로 등급 C에 해당한다. 이와 같이 4축차량에 대한 축중량 오차가 크게 발생하는 것은 연구대상 4축차량의 1축과 2축의 간격이 짧고, 축중의 크기가 동일하여 응답이력곡선에 축중의 영향이 뚜렷이 반영되기 어려운 특성을 갖고 있기 때문으로 판단된다.

이상의 차량특성에 따른 BWIM에 의한 중량추정 결과, 전체적으로 총중량에 대해서는 충분한 정확도를 갖고 있으나, 축중량에 대해서는 차량 특성에 따른 축간격 및 축중의 영향에 따라 오차의 발생정도가 크게 영향을 받는 것으로 조사되었다. 그러므로 실측에 기초한 임의차량의 BWIM에 의한 중량추정시에는 각 차량의 특성이 반영되는 응답

이력곡선에 기초하여 중량추정을 실시하는 것이 오차를 최소화 할 수 있는 방안의 하나로 판단된다. 따라서 향후 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것이다.

#### 4.2. 속도에 따른 중량추정오차

차량 주행속도가 응답이력곡선에 미치는 영향을 조사하기 위해 속도 30, 60, 90 km/h의 3축-B차량에 대한 응답이력해석을 실시하였다.

Fig. 7에 속도별 응답이력곡선을 나타내었고, Fig. 8에 거더 하부플랜지에서 발생하는 응답이력곡선에서 속도별 파형차이를 나타내기 위하여 영향선으로 바꾸어 나타내었다. Fig. 8로 부터 속도에 따른 동적효과로 인해 영향선에 다소 차이가 있으며, 이것이 중량 추정결과에 다소 영향을 줄 것으로 판단된다.

Table 6에 3축-B차량이 30 km/h, 60 km/h 및 90 km/h의 3가지 속도로 주행하였을 때, Table 4에서의 Case I에 대한 차량중량 추정결과를 나타내었다. Table 6의 중량추정 결과, 3가지 속도에 대한 3축 주행차량의 총중량 오차는 모두 0.5% 이내로 정확도가 높게 나타났다. 한편 속도별 축중량 오차는 속도 30 km/h, 60 km/h 및 90 km/h에서 1축이 -0.10%, -5.32%, -6.76%의 최대오차를 나타내었다. 여기서의 총중량 및 축중량의 오차는 대부분 등급 A를 충족하는 것으로 나타났다. 따라서 BWIM에 의한 중량추정에서 주행속도는 총중량 추정에 미치는 영향이 미소하지만, 축중

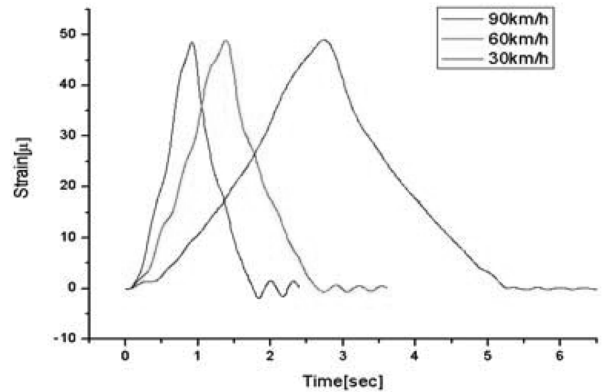


Fig. 7. Time history curves due to vehicle velocity of 3 axle-B vehicle.

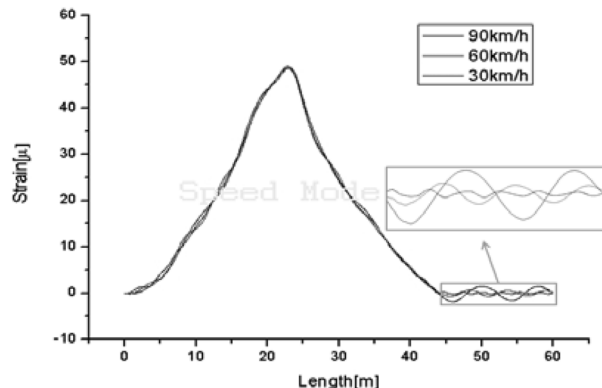


Fig. 8. Influence lines due to vehicle velocity of 3 axle-B vehicle.

Table 6. Result of weight calculation for velocity variation of 3 axle-B vehicle

(unit : kN)				
Division		1st Axle	2nd Axle + 3rd Axle	Gross
Real		66	186	252
30km/h	Cal.	65.93	184.91	250.84
	Err.	(-0.10%)	(-0.58%)	(-0.46%)
60km/h	Cal.	62.49	188.80	251.29
	Err.	(-5.32%)	(1.51%)	(-0.28%)
90km/h	Cal.	61.54	190.87	252.41
	Err.	(-6.76%)	(2.62%)	(0.16%)

량의 추정결과에는 다소 큰 영향을 줄 것으로 판단된다.

### 4.3. 온도에 따른 중량추정오차

#### 4.3.1. 온도하중의 영향

일반적으로 교량은 대기 중에 노출되어 있으므로, 태양으로부터의 일사량 및 일사각도 등에 의한 일사조건에 따른 온도 변화가 교량의 거동에 다양한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다<sup>2),23-24)</sup>. 일일동안 일사의 영향으로 변화하는 교량부재의 온도변화가 BWIM시스템의 차량중량 추정에 미치는 영향을 알아보기 위하여 대기의 온도변화가 구조물 응답에 미치는 영향을 조사하였다.

연구에서는 상부 및 하부플랜지에서의 24시간동안의 온도 변화를 가정하였고, 24시간동안의 온도변화에 따른 하부플랜지변형률을 추정하였다. 기온 및 상부·하부플랜지의 온도변화는 문헌<sup>2)</sup>에 제시된 실측치를 참고하여 가정하였고, 식 (9)에 기초하여 상부·하부플랜지의 온도변화에 따른 변형률을 계산하였다.

$$\epsilon_1 = (T_2 - T_0) \times \alpha - \frac{(T_1 - T_0) + (T_2 - T_0)}{2} \times \alpha \quad (9)$$

여기서,  $\alpha$  : 열팽창계수,  $T_0$  : 대기온도

$T_1$  : 하부플랜지 온도,  $T_2$  : 상부플랜지 온도

Fig. 9 및 Fig. 10에 각각 맑은 날 및 흐린 날의 대기온도 변화, 상부·하부플랜지의 온도변화, 그리고 이들 온도 변화에 따른 하부플랜지의 변형률을 나타내었다. Fig. 9로부터 맑은 날의 24시간동안 온도변화에 따른 하부플랜지 변형률은  $-41.4 \mu\sim 15 \mu$ 로, 온도에 의한 변형률 변화량이 크게 나타났다. 그러나 Fig. 10에 나타난 흐린 날은 일사의 영향이 크지 않아 24시간동안 온도변화에 따른 하부플랜지 변형률은  $-7.2 \mu\sim 1.2 \mu$ 로, 온도에 의한 변형률 변화량은 미미한 것으로 나타났다. 이상으로부터 대기온도 변화에 따른 하부플랜지에서의 측정변형률은 On-Line에서 실시되는 장기계측의 변형률 데이터를 사용하는 BWIM에 의한 차량중량 추정에는 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

응답이력곡선에서의 차량하중, 온도변화 및 노이즈에 대한 변형률 특성은 각각 다른 특성을 나타내고 있다. 즉 차량하중에 의한 변형률은 하중의 작용시에만 응답이 변화하는 단주기의 특성을 나타내지만 온도변화에 따른 변형률 응답은 온도변화가 급격하게 변화하는 것이 아니므

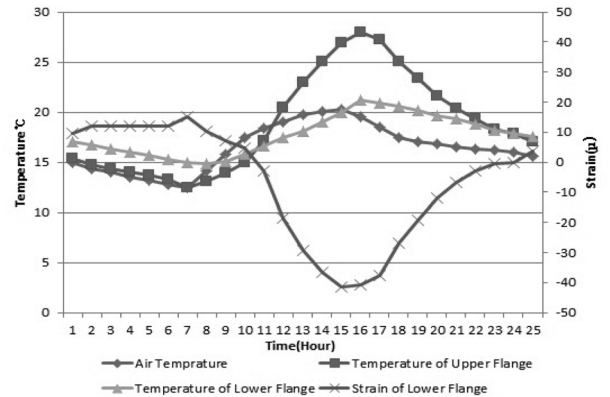


Fig. 9. Strain due to temperature variation at upper and lower flange (sunny day).

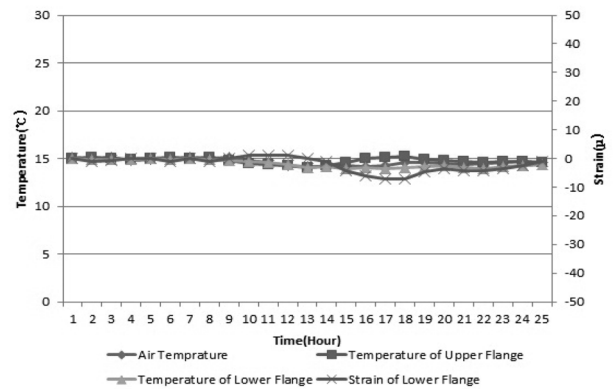


Fig. 10. Strain due to temperature variation at upper and lower flange (cloudy day).

로, 차량하중이 작용하는 몇 초 동안에도 일정 변형률을 유지하는 장주기의 특성을 가지면서 차량하중 응답에 포함되어 나타난다. 한편 노이즈에 대한 영향은 응답이력곡선에서 지속적으로 white band의 특성으로 나타난다.

그러므로 온도에 의한 변형률이 장주기의 특성을 갖는 응답이라는 것을 고려하면, 응답이력곡선에서 온도에 의한 영향만을 추출할 수 있다.

#### 4.3.2. 온도영향에 따른 BWIM중량추정

Fig. 11에 온도변화에 따른 3축-B차량이 60 km/h로 주행하는 경우에 대한 응답이력곡선을 나타내었다. Fig. 11(a)에 온도변화에 따른 온도변형률이 포함된 응답이력곡선, Fig. 11(b)에 온도변형률 추출 후의 응답이력곡선을 나타낸다. 여기서의 온도변형률은 온도변화 1°C에 대한 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 11의 오른쪽 그래프에 차량통과에 따른 응답이력곡선에서의 응력범위별 히스토그램 분석을 나타내었다. 앞에서 기술한 것과 같이 온도변화에 따른 변형률 응답은 장주기를 나타내므로 응답이력곡선을 적정 간격으로 분할하는 경우, 히스토그램에서 가장 빈도가 높게 나타나는 한 개의 최빈치를 얻을 수 있다. 따라서 이 최빈치가 온도에 대한 변형률응답이 되므로 응답이력곡선에서 온도에 대한 변형률응답을 분리할 수 있게 된다.

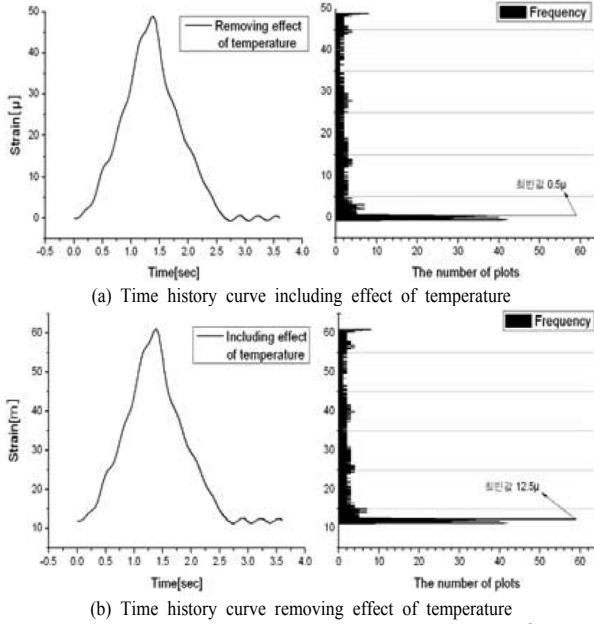


Fig. 11. Time history curve due to temperature variation of 3 axle-B vehicle.

Table 7. Calculated weight of 3 axle-B vehicle due to including and removing temperature (unit : kN)

Division		1st Axle	2nd Axle + 3rd Axle	Gross
Real		66	186	252
Including	Cal.	248.55	110.09	358.64
	Err.	(276.59%)	(-40.81%)	(42.32%)
Removing	Cal.	62.49	186.00	251.29
	Err.	(-5.32%)	(1.51%)	(-0.28%)

온도하중의 영향이 포함된 응답이력곡선 Fig. 11(a)는 온도변화에 따른 변형률 변화만큼의 평균값 증가를 나타내는 응답이력곡선을 나타내고 있다. 그러므로 온도변화에 따른 변형률이 포함된 응답이력곡선을 사용하여 중량추정을 하는 경우 상당한 오차가 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 7에 Fig. 11에 나타난 온도변화에 따른 응답이력곡선을 사용하여 추정된 3축-B차량의 축중량 및 총중량추정 결과를 나타내었다. 온도변화가 포함된 응답이력곡선을 사용한 중량추정은 축중량 및 총중량의 오차가 매우 크게 발생하여 중량추정의 의미를 갖기 어려운 값을 나타내고 있다.

그러나 온도변화에 따른 변형률을 추출한 후의 응답이력곡선을 사용한 축중량 및 총중량의 오차는 앞에서 기술한 3축-B차량에서 발생하는 오차와 동등하게 나타났다. 이로부터 대기온도 변화에 따른 온도변형률을 추출하는 온도추출기법은 BWIM에 의한 차량중량 추정에서의 오차를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4.4. 노이즈에 따른 중량추정오차

##### 4.4.1. 노이즈의 영향

교량부재에서 측정된 응답이력곡선의 파형에는 자동차

Table 8. Noise condition due to NSR value

Case	NSR	Case	NSR
1	0	5	0.15
2	0.01	6	0.20
3	0.05	7	0.25
4	0.1	8	0.3

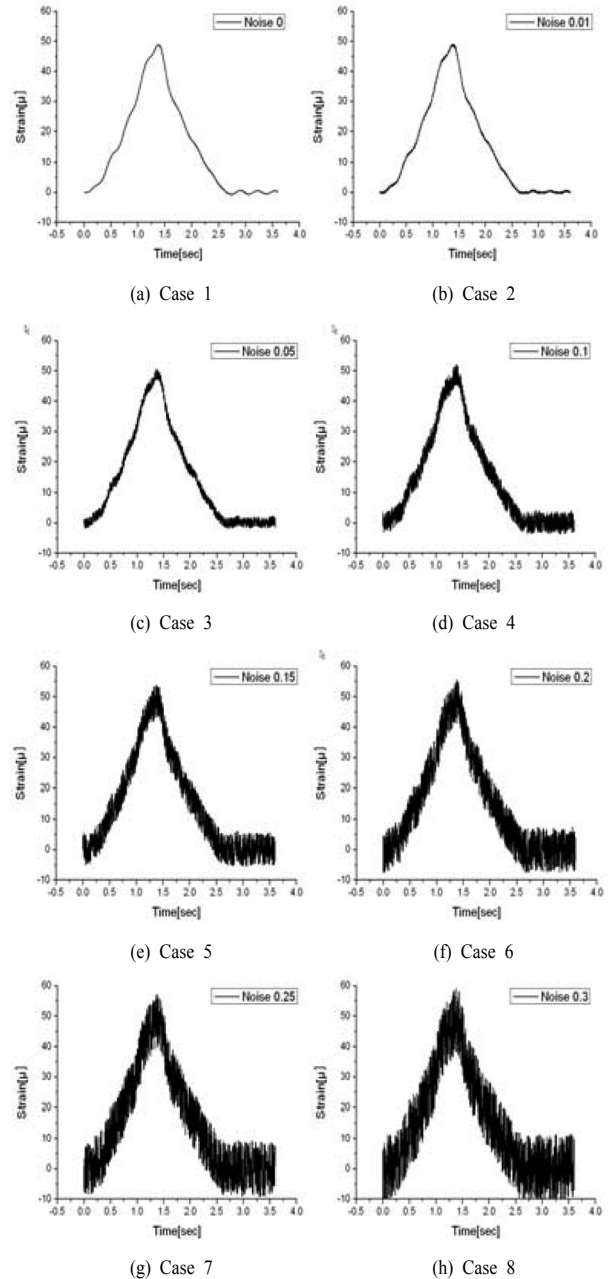


Fig. 12. Time history curves due to NSR value for 3 axle -B vehicle.

하중 이외의 하중에 의한 진동이나 측정전압의 변화, 전파 무선의 영향 등에 의한 여러 가지 노이즈가 혼입될 수 있다. 이러한 노이즈가 BWIM에 의한 차량중량 추정에 상당한 오차를 유발할 수 있으므로 이를 제거하는 기술이 필요하다.

측정된 응답이력곡선에서의 노이즈 크기(NSR : Noise-to-Signal Ratio)는 계측 대상 부재, 계측조건 및 계측시의 주변 환경 등에 따라 달라질 수 있다. 이 연구에서는 노이즈의 영향이 교량의 구조 및 부재 등의 특성과 현장조건에 따라서 크게 변화할 수 있다는 것을 고려하여 NSR을 30%까지 고려하였다.

Table 8에 NSR 크기에 따른 각 Case별 조건을 나타내었다. Fig. 12에 3축-B차량이 60 km/h로 주행하는 경우에 대한 거더의 응답이력곡선에 대해 Table 8의 NSR의 조건에 따른 노이즈를 포함한 응답이력곡선을 나타내었다. Fig. 12에 나타낸 것과 같이 NSR의 크기가 커질수록 응답이력곡선에서의 노이즈의 영향이 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 12의 응답이력곡선에 포함된 노이즈 응답은 차량 하중 및 온도 변화에 따른 응답특성 신호보다 높은 주파수 특성을 나타내므로 일반적으로 로우패스필터(Low pass filter)를 사용하여 제거할 수 있다. 노이즈 제거를 위하여 먼저 대상교량의 고유진동수를 조사하기 위해 FFT분석을 실시하였다.

Fig. 13에 대상교량의 하부플랜지에서 얻어진 응답이력곡선에 대한 FFT분석 결과를 나타내었다. 분석결과 대상교량의 고유진동수는 3.05 Hz로 분석되었다. 일반적으로 플레이트거더교 거더의 고유진동수는 3 Hz정도로 보고되고 있으므로 본 연구에서 얻어진 FFT분석 결과는 타당한 것으로 판단된다<sup>25)</sup>. 그러므로 Fig. 12의 하부플랜지 응답이력곡선에 포함된 노이즈를 제거하기 위해서는 4 Hz의 로우패스필터를 사용하였다.

Fig. 14에 각 Case별 조건에서 노이즈가 제거된 응답이력곡선을 나타내었다. 노이즈가 제거된 응답이력곡선은 NSR 크기에 상관없이 일치하는 것을 알 수 있다.

4.4.2. 노이즈영향에 따른 BWIM중량추정

노이즈의 크기(NSR)가 BWIM에 의한 차량중량추정에

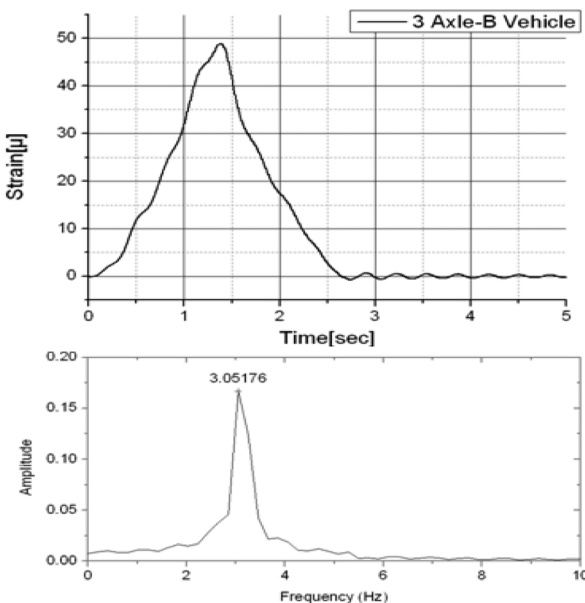


Fig. 13. FFT analysis of time history curve.

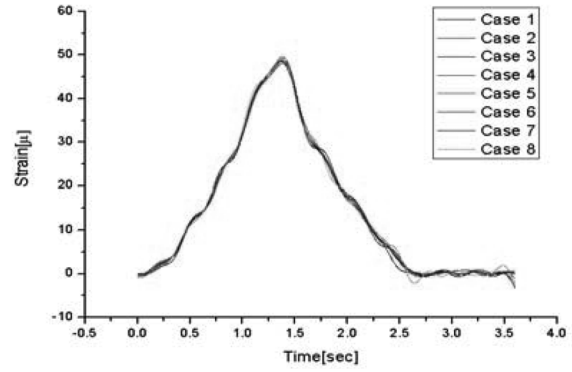


Fig. 14. Time history curves removing noise.

Table 9. Result of weight calculation due to NSR variation of 3 axle-B vehicle

(unit : kN)

Division	1st Axle	2nd Axle + 3rd Axle	Gross	
Real	66	93	93	
Case 1	Cal.	62.49	188.80	251.29
	Err.	(-5.32%)	(1.51%)	(-0.28%)
Case 2	Cal.	62.61	188.77	251.38
	Err.	(-5.14%)	(1.49%)	(-0.25%)
Case 3	Cal.	65.07	186.30	251.37
	Err.	(-1.41%)	(0.16%)	(-0.25%)
Case 4	Cal.	59.95	194.14	254.09
	Err.	(-9.17%)	(4.38%)	(0.83%)
Case 5	Cal.	59.51	191.29	250.80
	Err.	(-9.83%)	(2.84%)	(-0.48%)
Case 6	Cal.	50.11	200.16	250.27
	Err.	(-24.07%)	(7.61%)	(-0.69%)
Case 7	Cal.	57.44	195.99	253.43
	Err.	(-12.97%)	(5.37%)	(0.57%)
Case 8	Cal.	79.81	172.72	252.53
	Err.	(20.92%)	(-7.14%)	(0.21%)

미치는 영향을 조사하기 위하여 Fig. 12에 나타낸 응답이력곡선을 사용하여 차량중량을 추정하였다.

Table 9에 NSR 크기에 따른 3축-B 차량의 중량추정결과를 나타내었다. NSR의 크기가 10%이하인 Case 2-3의 경우에는 NSR이 커지더라도 총중량 및 축중량의 오차가 노이즈가 없는 Case 1의 오차와 비슷하다. 그러나 NSR의 크기가 10%를 초과한 Case 4-8에서는 NSR이 커지면서 축중량의 오차가 더 크게 증가하는 경향을 나타내어, 축중량의 오차가 등급 B 이하를 나타내고 있다.

그러므로 BWIM에 의한 차량중량 추정에서 노이즈 제거는 중량추정의 정확도를 향상시킬 수 있으며, 또한 NSR의 크기가 10%를 초과하는 경우에는 노이즈 제거에 따른 중량 추정의 정확도가 크게 향상될 것으로 판단된다.

4.5. 횡방향 주행위치에 따른 중량추정오차



4.5.1. 횡방향 주행위치의 영향

일반적으로 차량이 도로 등을 주행할 때, 차량은 차로의 중앙을 항상 주행하는 것은 아니라, 운전자의 운전습관 등에 따라 어느 정도의 횡방향 편차를 가지고 차로를 주행하게 된다. 그러므로 차량이 동일 차로를 주행하더라도 주행차로내의 횡방향 주행위치 편차에 따라 차량의 재하 위치가 변화하므로 평가대상의 부재 응답의 크기가 변화하게 된다. BWIM에 의한 중량추정은 응답이력곡선에서의 응답에 기초하여 계산되므로 차량 주행위치의 횡방향 편차가 하부플랜지의 응답에 어느 정도 영향을 미치는가에 대한 조사도 필요할 것으로 판단된다.

Table 10에 횡방향 이동에 따른 3축-B차량의 횡방향 편차별 Case, Fig. 15에 폭 1.8 m의 3축-B차량의 3.6 m 차선 내의 주행 위치의 횡방향 편차 표기방법을 나타내었다. 여기서 횡방향 편차별에 대한 횡방향 이동량은 기존 연구에서의 타당성을 고려하여 50 mm로 하였다<sup>10,26</sup>.

Fig. 16에 대상교량의 횡방향 편차별 Case에 대한 3축-B 차량이 60km/h의 주행속도로 교량을 통과하면서 발생하는 거더 G2에서의 응답이력곡선을 나타내었다. Fig. 16에 나타낸 것과 같이 주행차량의 횡방향 이동에 따라 최대응답 부근에서의 응답이력곡선의 형태 및 최대치가 변화하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 주행차량의 횡방향 이동에 따른 거더에서의 횡분배 영향에 의한 것으로 판단된다. 그러므로 BWIM에 의한 중량추정에서는 하중의 횡분배에 대한 영향을 적절하게 평가하는 방법이 필요하다.

Table 11에 3축-B차량의 횡방향 이동에 따른 응답이력곡선에서의 피크치 및 Case A에 대한 피크치의 차이 및 그 비율을 나타내었다. Table 11에 나타낸 것과 같이 3축-B 차량이 Case A를 기준으로 (-)방향으로 편측 주행할수록 응답이력곡선의 피크치 차이는 증가되고, (+)방향으로 편측 주행할수록 응답이력곡선의 피크치 차이는 감소된다. 피크치의 최대 차이는 200 mm 편측 주행한 경우의 -1.073  $\mu$ 이며, 최소 차이는 -50 mm 편측 주행한 경우의 0.245  $\mu$ 이다.

Table 10. Deviation for moving location of 3 axle-B vehicle in transverse direction

Case	Deviation of Moving Location	Case	Deviation of Moving Location
A	0	F	50mm
B	-50mm	G	100mm
C	-100mm	H	150mm
D	-150mm	I	200mm
E	-200mm	-	-

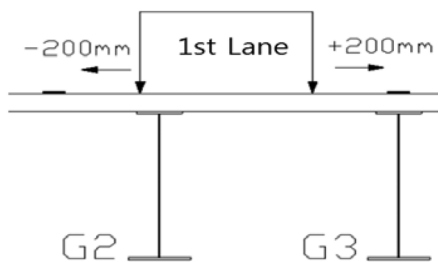


Fig. 15. Scheme of location deviation of 3 axle-B vehicle(1st Lane).

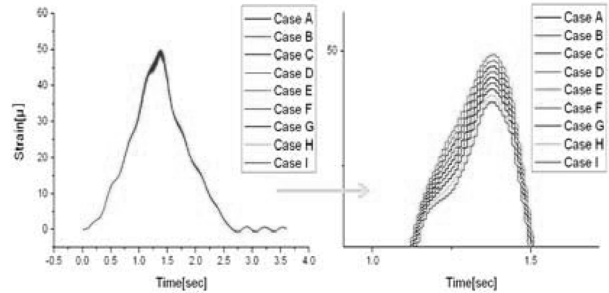


Fig. 16. Time history curves due to variation of transverse location for 3 axle -B vehicle.

Table 11. Peak value and ratio of peak value due to variation of transverse location of 3 axle -B vehicle

Case	Peak Value of Strain( $\mu$ )	Difference of Peak Value (Compared with Case A)	Ratio of Peak Value (Compared with Case A)
A	48.864	0.000	1
B	49.109	0.245	1.0052
C	49.357	0.493	1.0101
D	49.596	0.732	1.0150
E	49.835	0.971	1.0200
F	48.604	-0.260	0.9947
G	48.339	-0.525	0.9893
H	48.065	-0.799	0.9838
I	47.791	-1.073	0.9780

그러므로 이 연구에서는 주행차량의 횡방향 이동에 따른 응답이력곡선에서의 응답특성을 횡분배에 따른 영향으로 고려하여 기준영향선의 영향선 함수에서의 보정계수로 사용한다.

4.5.2. 횡방향 주행위치의 영향에 따른 BWIM중량추정

Table 12에 주행차량의 횡방향 편차별 Case에 따른 3축-B차량의 중량추정결과를 보정전과 보정후로 분류하여 나타내었다. 여기서의 보정방법은 Table 11 나타낸 피크치의 비율을 기차량인 3축-B차량의 응답이력곡선으로 추정된 기준영향선에 곱하여 보정된 기준영향선을 사용하여 각 Case에 대한 중량을 추정하였다.

Table 12에서 알 수 있는 것과 같이 3축-B차량이 (-)방향으로 횡방향 편측하여 주행하는 Case B-E에서는 편측 정도가 커질수록 오차도 증가하는 것으로 나타났다. 마찬가지로 (+)방향으로 횡방향 편측하여 주행하는 Case F-I도 편측 정도가 커질수록 오차도 증가하는 것으로 나타났다. 총중량오차는 +200 mm로 편측하여 주행하였을 때 최대 -1.83%로 가장 크게 나타나 등급 A를 충족하는 것으로 나타났다. 또한 총중량 오차는 -200 mm로 편측하여 주행하였을 때 1축에서 -10.39%, 2축+3축에서 5.30%로 가장 크게 나타나 등급 B에 해당하는 것으로 나타났다.

그리고 보정전과 후를 비교하면 총중량의 오차는 (+)되거나 (-)되어 그 차이가 미소하였으나, 총중량 오차는 적어지는 것으로 나타났다.

이상으로부터 주행차량의 횡방향 편측 정도가 커질수록 BWIM에 의한 중량추정의 오차에 영향을 크게 미치는 것

으로 판명되었다. 또한 기지차량의 응답이력곡선으로 추정된 기준영향선에 피크치의 비율을 곱하는 보정방법은 총중량오차를 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 보정방법은 축중량 오차의 감소에는 효율적이지 않으므로 주행차량의 횡방향 이동이 반영되는 영향면 기법에 기초한 중량추정방법을 개발하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

Table 12. Result of weight calculation due to variation of transverse location for 3 axle-B vehicle

(unit : kN)

Division		1st Axle	2nd Axle + 3rd Axle	Gross	
Real		66	93	93	
Case A	Before	Cal.	62.49	188.80	251.29
		Err.	(-5.32%)	(1.51%)	(-0.28%)
Case B	Before	Cal.	61.61	190.62	252.24
		Err.	(-6.65%)	(2.49%)	(0.09%)
	after	Cal.	61.31	189.67	250.98
		Err.	(-7.11%)	(1.97%)	(-0.41%)
Case C	Before	Cal.	60.78	192.39	253.17
		Err.	(-7.91%)	(3.44%)	(0.46%)
	after	Cal.	60.17	190.47	250.64
		Err.	(-8.83%)	(2.40%)	(-0.54%)
Case D	Before	Cal.	59.95	194.14	254.09
		Err.	(-9.17%)	(4.38%)	(0.83%)
	after	Cal.	59.06	191.27	250.34
		Err.	(-10.51%)	(2.83%)	(-0.66%)
Case E	Before	Cal.	59.14	195.86	255.00
		Err.	(-10.39%)	(5.30%)	(1.19%)
	after	Cal.	57.99	192.04	250.03
		Err.	(-12.14%)	(3.25%)	(-0.78%)
Case F	Before	Cal.	63.37	186.97	250.33
		Err.	(-3.99%)	(0.52%)	(-0.66%)
	after	Cal.	63.71	187.97	251.67
		Err.	(-3.48%)	(1.06%)	(-0.13%)
Case G	Before	Cal.	64.28	185.09	249.37
		Err.	(-2.61%)	(-0.49%)	(-1.04%)
	after	Cal.	64.98	187.10	252.08
		Err.	(-1.55%)	(0.59%)	(0.03%)
Case H	Before	Cal.	65.20	183.19	248.39
		Err.	(-1.22%)	(-1.51%)	(-1.43%)
	after	Cal.	66.28	186.24	252.52
		Err.	(0.42%)	(0.13%)	(0.21%)
Case I	Before	Cal.	66.13	181.26	247.40
		Err.	(0.20%)	(-2.55%)	(-1.83%)
	after	Cal.	67.62	185.33	252.95
		Err.	(2.45%)	(-0.36%)	(0.38%)

### 5. 결론

이 연구에서는 교량부재의 동적변형률 이력곡선과 Moses가 제안한 BWIM방법을 사용하여 주행차량의 중량을 추정하고, 추정결과의 정확도에 미치는 인자들의 영향을 정량

적으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 차량의 축배치, 주행속도, 온도변화, 노이즈, 차량의 주행위치 등이 BWIM에 의한 차량중량추정시 오차에 적지 않은 영향을 주지만, 그 중 장기계측시 포함되는 온도의 영향이 중량추정 결과에 가장 큰 영향을 주고, 최빈치를 사용하면 이를 제거할 수 있음을 확인하였다.
- 2) 오차의 원인(온도, 노이즈)을 제거하고 차량의 특성(속도, 축간격 및 주행위치편차)을 적절히 고려하면 유럽의 분류기준에 의한 A등급(오차 5%이내)을 만족하는 총중량 추정이 가능한 것을 알 수 있었다.
- 3) 차량의 축간격 및 주행속도는 2개의 수직보강재 변형률이력곡선을 사용하면 비교적 정확히 추정할 수 있음을 확인하였다.

**감사의 글:** 이 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과입니다.

### References

- 1) F. Moses, "Weigh-In-Motion System Using Instrumented Bridges", Transportation Engineering Journal, ASCE, Vol. 105, pp. 223~249, 1979.
- 2) Yusuke KOBAYASHI, "Development of an Automatic Continuous Real-time Remote Monitoring System for Bridge Maintenance", Tokyo Institute of Technology, pp. 28~32, 2004.
- 3) R.J. Peters, "CULWAY-an Unmanned and Undetectable Highway Speed Vehicle Weighing System", Proceedings of the 13th ARRB Conference, Australian Road Research Board, pp. 70~83, 1986.
- 4) A. Znidaric and F. Moses, "Bridge Weigh-In-Motion Testing of Vehicle Gross Weights in Slovenia", the First European WIM Conference, Zurich, March, pp. 55~62, 1995.
- 5) A. T. Dempsey, E. J. O'Brien and J. M. O'Connor, "A Bridge Weigh-In-Motion System for the Determination of Gross Vehicle Weights", In Post-Proceedings of the 1st European Conference on Weigh-In-Motion of Road Vehicles, Zurich, pp. 239~249, 1995.
- 6) E. S. Hwang, D. B. Bae, K. S. Jung and J. B. Jo, "Analysis of Truck Traffic Characteristic using BWIM System", J. of Korean Society of Steel Construction, Vol. 11, No. 2, pp. 223~232, 1999.
- 7) M. S. Park, B. W. Jo and D. B. Bae, "Development of Statistical Truck Load Model for Highway Bridge using BWIM System", J. of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 26, No. 1, pp. 143~146, 2006.
- 8) M. S. Park and B. W. Jo, "The Development of Bridge Weigh-in-Motion System for the Measurement of Traffic Load", J. of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, Vol. 10, No. 2, pp. 111~122, 2006.
- 9) M. S. Park, "Development of Bridge Weigh-in-Motion Systems without Axle Detector Using Artificial Neural Network", Hanyang University, pp. 120~130, 2008.

- 10) B. H. Kim, M. S. Park, K. S. Yeo and S. J. Kim, "Sensitivity-based BWIM System Using Dynamic Strain Responses of Bridge Deck Plate", Proceedings of Annual Conference the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 2010, No. 7, pp. 620~623, 2010.
- 11) A. R. Han and S. B. Shin, "Application for a BWIM Algorithm Using Density Estimation Function and Average Modification Factor in The Field Test", J. of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, Vol. 15, No. 2, pp. 70~71, 2011.
- 12) J. W. Jeong and S. B. Shin, "Development of Moving Force Identification Algorithm Using Moment Influence Lines at Multiple - Axes and Density Estimation Function", J. of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, Vol. 10, No. 6, pp. 87~90, 2006.
- 13) J. W. Lee, "Analysis of BWIM Signal Variation Due to Different Vehicle Travelling Conditions Using Field Measurement and Numerical Analysis", J. of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 24, No. 1, pp. 79~85, 2011.
- 14) Michael Quilligan, "Bridge Weigh-in-Motion", Royal Institute of Technology, pp. 85~89, 2003.
- 15) Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, "Revision of Highway Bridge Design Manual Chapter 5 Bridge", pp. 506-68~506-147, 2000.
- 16) H. H. Lee, "Impact Factor of Moving Load due to Surface Roughness of Girder Bridge of Variable Span", M. Thesis, Asian Institute of Technology, pp. 12~16, 1985.
- 17) H. H. Lee, "A Study on Dynamic Behavior of Highway Girder Bridges", Hanyang University, pp. 624~635, 1990.
- 18) D. I. Chang and H. H. Lee, "Impact Factor for Simple Span Highway Girder Bridges", J. of Structural Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 3, pp. 704~715, 1994.
- 19) H. H. Lee, J. C. Jeon and K. S. Kyung, "Determination of a Reasonable Impact Factor for Fatigue Investigation of Simple Steel Plate Girder Railway Bridges", Engineering Structures, 36, pp. 316~324, 2012.
- 20) H. H. Lee, "Investigation of Fatigue Life Evaluation Method and Impact Factor for Fatigue Design of Steel Highway Girder Bridges", Hosei University, pp. 1~6, 2007.
- 21) J. C. Jeon, K. S. Kyung, S. W. Kang and H. H. Lee, "Applicability of Vertical Stiffener Response of Plate Girder Bridge to BWIM System", J. of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. A, pp. 40, 2011.
- 22) H. H. Lee, J. C. Jeon, M. S. Jung and K. S. Kyung, "Identification of Running Vehicle Properties by Vertical Stiffener Response of Steel Girder Bridge", J. of the Korean Society of Safety, Vol. 27, No. 1, pp. 86~90, 2012.
- 23) K. I. Cho, J. H. Won, S. H. Kim and Y. C. Lu, "A Temperature Predicting Method for Thermal Behaviour Analysis of Curved Steel Box Girder Bridges", J. of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 28, No. 1, pp. 106~108, 2008.
- 24) S. H. Kim, K. I. Cho, Y. C. Lu and J. H. Hong, "Behavior of Steel Box Girder Curved Bridge Considering Solar Radiation and Solar Altitude", J. of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 2004, No. 10, pp. 54~58, 2004.
- 25) Committee of Bridge Vibration, "Field Test and Analysis of Bridge Vibration", JSCE, pp. 103~126, 1993.
- 26) M. S. Jung, "A Study on the Utilization of BWIM Using Theoretical Response of Bridge", Korea Maritime University, pp. 63~74, 2012.