

# 주행중인 차량하중 측정을 위한 BWM 시스템 개발

## The Development of Bridge Weigh-in-Motion System for the Measurement of Traffic Load

박민석\*

조병완\*\*

Park, Min-Seok

Jo, Byung-Wan

### Abstract

In the design of bridges, exact evaluation of traffic loading is very important for the safety and maintenance of bridges. In general, traffic loading is represented by live load (including impact load) and fatigue load. For exact evaluation of traffic loading, it is important to get reliable and comprehensive truck data including the traffic and weight information. It requires the development of Bridge Weigh-In-Motion (BWIM), which measures the truck weights without stopping the traffic. Objectives of the study is (1) to develop the BWIM system, (2) to verified the system in bridges in Highways.

### 요 지

교량의 설계에 있어서 정확한 하중의 산정은 교량의 안전성 확보에 가장 핵심적인 사항이며 향후 유지관리 측면에서도 매우 중요하다. 교량구조물에서 차량에 의한 하중효과는 주로 활하중(충격하중 포함) 및 피로하중으로 나타난다. 이들 하중의 정형화를 위해서는 실제 교량상을 주행하는 중차량의 중량 및 통행특성을 정확히 파악하는 것이 중요하다. 이를 위해서 주행중인 차량을 정지시키지 않고 중량을 측정할 수 있는 시스템(Bridge Weigh-In-Motion, BWIM)의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 다양한 기능을 갖는 BWIM시스템을 국내실정에 맞게 개발하고 이를 고속도로상의 교량에서 검증하였다.

**Keywords :** BWIM System, Truck Weight, Axle Weight, Vehicle Classification

**핵심 용어 :** 주행중 차량하중 측정시스템, 트럭하중, 축중, 차중분류

\* 정회원, 한양대학교 토목공학과 박사수료, 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원

\*\* 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수

E-mail : BMS@freeway.co.kr 031-371-3328

• 본 논문에 대한 토의를 2006년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2006년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

고속도로 교량의 안전성 및 공용수명을 결정하는데는 통행하는 차량과 교량의 형식에 따른 상호 작용과 유지보수의 정도 등이 중요한 요인으로 작용하며, 이를 규명하기 위해서는 통행 차량의 총중량, 축수, 축중량, 축간격, 주행속도 및 동적특성 등의 차량 자체에 대한 정보와 차두간격, 중차량 혼입률 등의 차량 통행 특성을 파악하는 것이 요구된다. 주행차량의 정확한 제원 및 하중특성을 알 수 있다면 차량하중에 의한 교량의 정, 동적 거동 특성을 정확하게 예측하고 평가하는데 큰 도움이 될 것이다. 과거에는 주로 틀게이트 등에서 측정된 차량정보를 토대로 제한된 정보만을 가지고 차량하중에 대한 특성을 파악하였으나 실제 교량위를 주행하는 차량들의 특성 및 주행 특성을 정확하게 예측하기에는 한계가 있어 이를 해결하기 위한 노력이 WIM(Weigh-In-Motion)시스템에 관한 연구로 이어졌다. 이중 교량을 저울로 하여 차량의 하중정보 등을 측정하는 BWIM(Bridge Weigh-In-Motion)시스템은 WIM시스템에 비해 교량하부에 센서를 설치함으로써 운전자에게 보이지 않으므로 편중되지 않은 실제 하중에 대한 자료수집이 가능하고 교통의 흐름을 크게 방해하지 않아 연구에 대한 필요성이 제기되었다. 이러한 연구에 대한 가능성은 1971년 Case Western Reserve University에서 수행한 일련의 프로젝트에서 F. Moses등에 의해서 처음 시도되었다. 여기서 개발된 시스템은 미연방도로국(FHWA)과 오하이오주 교통국(Ohio Department of Transportation)의 후원으로 계속 연구 개발되어 오하이오주의 트럭 중량 하중 측정시스템의 데이터 수집 시스템으로 이용되었고 이외에도 호주의 Peters가 암거를 이용한 BWIM 시스템을 개발하였으며(Peters, 1986), 슬로베니아의 Znidaric(1991), 아일랜드의 Dempsey(1995) 등이 보다 향상된 시스템 개발에 대한 연구를 하였다. 이외에도 유럽의 18개국에서 공동수행한 COST 323 Project(1993년~1996년)와 WAVE Project(1996년~1999년) 중 일부과제로 포함되어 BWIM 시스템 개선에 관한 연구가 진행되었다.

본 연구에서는 교량거동의 계측을 통하여 주행중인

차량의 종류, 속도 및 중량 등을 측정할 수 있는 다양한 기능을 갖는 BWIM시스템을 국내실정에 맞게 개발한 후 이를 고속도로 교량에서 검증하고자 하였다. 향후 지속적인 차량정보데이터의 수집을 통해 국내의 교통량 특성을 반영한 활하중의 정형화 및 합리적인 피로하중산정에 이용하고자 한다.

## 2. BWIM 시스템 개발

### 2.1 개요

본 연구를 통해 개발한 BWIM시스템은 포장층에 설치된 축감지기를 통해 차축, 속도, 차종을 구분하고 교량 거더 하부 슬래브 상단에 설치한 변형률계로부터 총중량, 축하중 등을 산정하는 방법을 적용하였다.

### 2.2 축중 계산 이론

축중 계산은 교량 구간내에 두 지점을 선택하여 변형률계 설치지점의 이론적 모멘트값과 실측에 의한 모멘트값을 비교하여 축중을 계산하는 방법으로 차량의 각 축중 계산은 모든 차량을 2축으로 가정하여 총중량을 산정한 뒤 축중을 분배하는 형태로 축중을 계산한다.

실제 교량에서 습득한 변형률 데이터를 가공하지 않고 이용하는 것은 동적인 영향으로 인하여 그 변화가 심하기 때문에 데이터를 정형화하여 사용하기 어렵다. 따라서 이동평균을 이용하여 데이터를 가공 후 실제 발생한 최대 모멘트가 이론적으로 계산한 최대 모멘트 지점과 일치한다고 가정하고 이 최대 모멘트에 Factor(이론최대모멘트/실제최대모멘트)를 곱하여 이를 꼭지점으로 하는 모멘트 선도를 직선으로 나타낸다. 이렇게 작성된 모멘트 선도와 이론 모멘트 선도가 교차하는 지점을 찾아 축중 계산에 필요한 두 개의 모멘트를 모멘트 선도에서 발취하고 식 (1)을 이용하여 2축으로 가정한 모든 차량의 총중량을 계산한다. 이렇게 계산한 총중량을 바탕으로 하여 차량의 축중 분배율을 통하여 차량의 각 축중을 산정한다. 일반적으로 고속도로상의 교량은 차선수가 3차선 이상이며 또한 차량이 두 대 이상 직렬 또는 병렬의 행태로 주행한다.

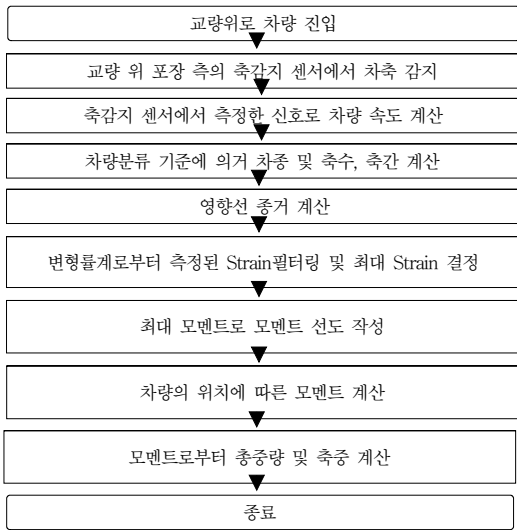


Fig. 1 차량하중 측정순서도

이러한 경우도 위에 설명한 이론을 바탕으로 하여 교량에 진입한 차량의 중량을 각각 계산할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} \\ I_{21} & I_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$M_1 = \frac{EI \varepsilon_1}{y_1} \times Factor$$

$$M_2 = \frac{EI \varepsilon_2}{y_2} \times Factor$$

여기서,  $I_{ij}$  :  $i$ 번째 위치에서 차량의  $j$ 번째 바퀴의 영향선 중거

$P_j$  :  $j$ 번째의 축중량

$M_i$  : 차량에 의해  $i$ 위치에서 발생하는 모멘트

Factor : 이론최대모멘트/실제최대모멘트

$\varepsilon_i$  :  $i$  번째 위치에서의 거더 변형률

$y_i$  :  $i$  번째 위치에서의 변형률 측정위치에서의 중립축까지의 거리

### 2.3 차량분류 기준

현재 국내에서 고속국도 및 지방도를 관리하는 기관에서는 총 11종의 차종과 이에 따른 축거를 규정하고

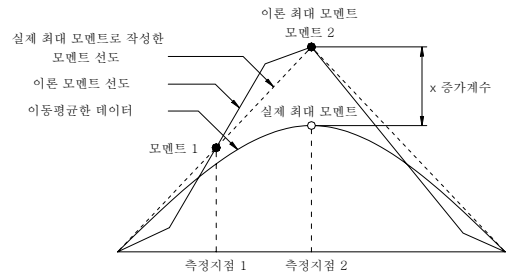


Fig. 2 축중계산 이론 배경

있고 일반국도를 관리하는 기관에서는 총 8종의 차종을 구분하고 있다. 차량 분류를 자동으로 하기 위하여 각 차종에 대한 명확한 차축구조와 축간거리에 따라 차량을 분류하여야한다. 국내에 운행되는 차량의 축수에 따라 크게 6종으로 분류하였으며 축간거리에 따라 세분화하여 총 20종으로 차종을 분류하였는데 미연방도로국(FHWA)의 차종분류 기준인 축수 6종, 차종 22종과 비교해 볼 때 국내에서 생산과 운행되지 않는 차종을 제외하면 분류기준이 거의 비슷한 것을 알 수 있다.<sup>(3)</sup>

### 2.4 축중 분배율

모든 차량의 축에 따른 그 축중의 크기는 차량의 형태에 따라 그 비율이 거의 일정한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 기존의 연구결과(김상효,1992 ; 양남석, 1999)의 축중분배율 모형을 이용하였으며 이를 다시 차종에 따라 재분배하였다. 앞에서 산정한 차량의 총중량과 축감지 센서에서 입력된 차종에 따라 축중을 계산하게 된다.

Table 1 대표차종의 축중 분배율

차종	축중 분배율 (%)					
	1축	2축	3축	4축	5축	6축
40	35~38	62~65				
50	22~28	36~39	36~39			
60	20~23	18~23	27~31	27~31		
70	20	17	21	21	21	
81	11~15	27~38	25~29	25~29		
91	8~14	17~21	17~21	24~26	24~26	
92	10.5	20	20	16.5	16.5	16.5
41	16~19	28~33	24~28	24~28		
51	16	19~22	19~22	20~23	20~23	

## 2.5 시스템 구성

개발된 BWIM시스템은 크게 하드웨어인 축 감지센서, 변형률계 및 데이터 획득시스템과 소프트웨어인 차량하중분석 프로그램등으로 이루어졌다.

### 2.5.1 차량하중 분석프로그램(BwimPro)

주행중인 차량의 주행특성 및 하중정보를 계산하는 프로그램으로 주요 처리내용은 다음과 같다.

#### (1) 주행패턴 계산

루프센서, 피에조 센서 혹은 변형률센서로부터 주행 중인 차량의 주행차선, 속도, 축수, 축간거리, 차량길이, 차중, 주행방법을 계산

#### (2) 중량계산

거더에 부착된 변형률계의 응력신호로부터 총 중량 및 축 중량을 계산

#### (3) 충격계수 계산

중량계산 필요한 차량의 경우 변형률계 응답신호로부터 충격계수를 계산

#### (4) 최대 변형률 계산

거더에 부착된 각각의 변형률계로부터 차량이 교량의 중앙부 도달했을 때의 최대 변형률이 계산

#### (5) 레인플로 계수 계산

거더에 부착된 각각의 변형률계의 출력신호는 레인플로 계수 알고리즘이 수행되어 레인플로 계수의 히스토그램을 계산

#### (6) 피에조 센서 피크계산

주행차량의 축 감지에 사용되는 피에조 센서의 피크값이 계산. 이 피크값은 축 중량 분배계산에 참고로 사용



Fig. 3 BwimPro 프로그램 화면

### 2.5.2 축감지 센서 구성방법

#### (1) 2개의 피에조 센서 이용

2개의 피에조 센서를 이용하여 차량의 축수와 속도를 감지하고 차량하중은 거더 하부 플랜지 상부에 설치한 변형률계로부터 측정하는 시스템으로 본 논문에서는 이 시스템에서 획득한 결과를 위주로 발표하고자 한다.

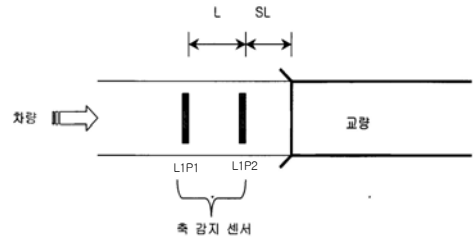


Fig. 4 2개의 피에조센서 구성도

여기서, L : 피에조센서간 거리(속도계산)

SL : 피에조센서와 교량시작점과 거리, 변형률계 획득시 사용

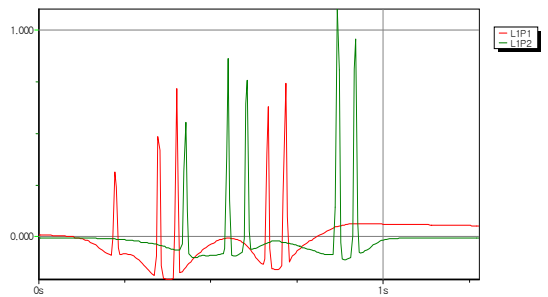


Fig. 5 피에조 센서 응답신호

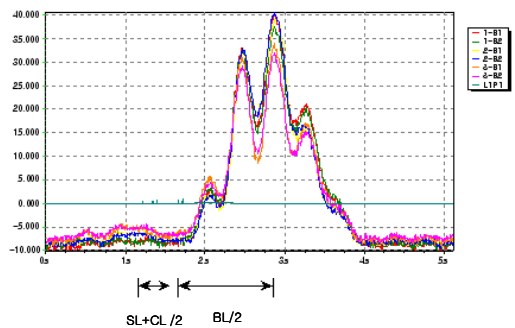


Fig. 6 피에조센서와 변형률계의 응답신호

Fig. 5는 5축 차량이 피에조센서 위를 통과한 경우의 신호파형으로 두개의 피에조센서 L11축, L1P2의 피크가 발생하는 시간차로 속도를 계산하며 Fig. 6은 차량이 교량을 통과할 때의 피에조센서와 변형률계 응답신호의 상관관계를 표시한다.

(2) 2개의 루프 센서와 1개의 피에조 센서 이용

2개의 루프 센서와 1개의 피에조 센서로 부터 차량의 축수와 속도를 감지하고 차량하중은 거더 하부 플랜지 상부에 설치한 변형률계로부터 측정하게 된다.

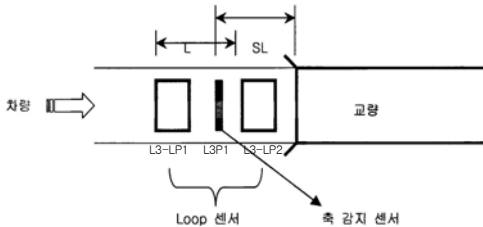


Fig. 7 2개의 루프센서, 1개의 피에조센서 구성도

여기서, L : 루프센서간 거리(속도계산사용)

SL : 피에조 센서와 교량시작점과 거리, 변형률계 획득시 사용

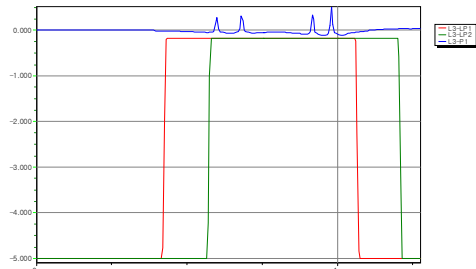


Fig. 8 루프센서와 피에조센서의 응답신호

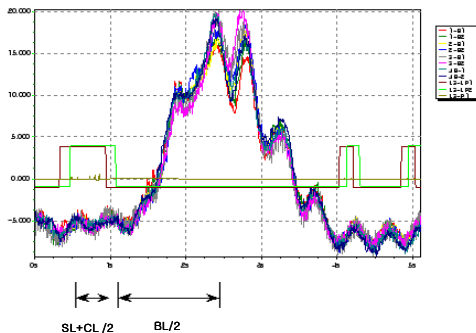


Fig. 9 차량감지센서와 변형률계의 응답신호관계

Fig. 8은 4축 차량이 차량감지 센서 위를 통과한 경우의 신호 파형으로 두개의 루프 센서 L3-L1축, L3-LP2의 신호가 발생하는 시간차로 속도 계산이 가능하다. Fig. 9는 차량이 교량을 통과한 경우의 차량감지센서와 변형률계 응답신호의 상관관계를 표시한다.

(3) 2그룹의 변형률계로 구성된 시스템

교량 바닥판 슬래브 하면에 차선당 2개의 변형률센서를 부착하여 축수, 속도 등을 감지하고, 거더 하부 플랜지 상부에 변형률센서를 설치하여 차량하중정보를 측정하게 된다.

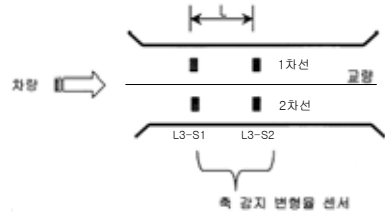


Fig. 10 2 Strain System 센서 구성도

여기서, L : 축감지 변형률 센서간 거리, 속도계산에 사용

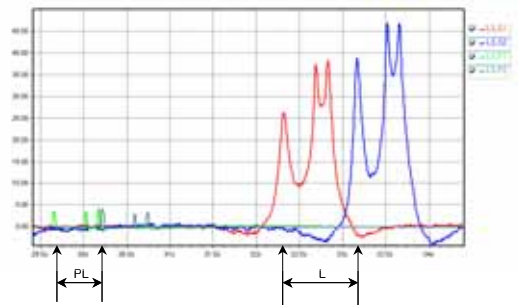


Fig. 11 차축감지 변형률센서의 응답신호

여기서, PL : 피에조센서의 출력신호 간격

L : 축감지 변형률계 센서의 출력신호 간격

Fig. 11은 3축 덤프트럭이 주행한 경우의 센서응답 파형으로 축 감지 피에조 센서와 축감지 변형률 센서의 상호 응답파형을 비교하였다. 변형률 센서도 피에조 센서와 같은 방법으로 피크 검출 알고리즘을 사용할 경우 차량속도 및 축간거리 계산을 할 수 있다.

### 3. 현장 시험

#### 3.1 개요

개발된 BWIM시스템의 적정 작동여부와 계측의 정확성을 시험하기 위하여 실교량에서의 현장시험을 수행하였다. 선정된 교량은 서해안선에 위치한 도곡교이다. 단순교이며 경간 50m의 강박스거더교로 사각은 15°이다.

시험은 우선 시스템을 설치한 후 미리 계측된 중차량을 이용하여 여러 가지 경우별로 주행시험을 실시하여 중량계산 소프트웨어를 검증하였다. 1차시험시는 축감지 센서로 테이프스위치(Tape-switch)를 사용하였으며, 2차 시험시는 피에조센서(Piezo-electric sensor)를 설치하여 이용하였다. 3차 시험은 축감지 센서 없이 변형률계만으로 차량정보를 얻고자 하였다. 아울러 시험 재하차량이 아닌 일반차량을 대상으로 현장시험도 실시하였다. 차중 및 축수를 확인하기 위해서 교량 위에 비디오카메라를 설치하여 녹화하였다.

#### 3.2 사전 구조해석

사전 구조해석에서는 개발한 BWIM장비를 통해 획득한 변형률 데이터 상에 나타난 교량의 거더별 응력 발생현황과 유한요소해석을 통한 이론적 계산응력을 산정하여 이들을 비교, 분석하였으며 또한 동적계측장비인 MEGADAC에서 획득한 변형률과도 비교하여 개발된 BWIM장비에서 획득한 데이터의 신뢰도를 확인하였다. 비교시 이용한 변형률 데이터는 재하차량이 10km/h 정도의 속력으로 운행하였기에 동적인 영향이 없다는 가정하에 해석값과 비교하였다.

Table 2 교량의 물성치

구분	탄성계수 (kgf/cm <sup>2</sup> )	Poisson비	단위질량 (ton/m <sup>3</sup> )
콘크리트	2.5E5	0.17	2.5E-6
강	2.1E6	0.3	7.85E-6

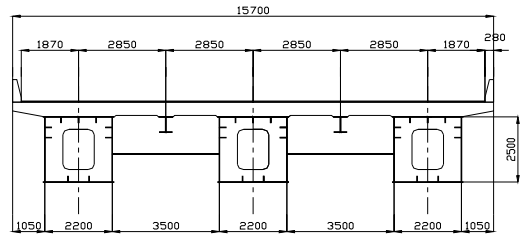


Fig. 12 시험대상 교량 도곡교의 단면

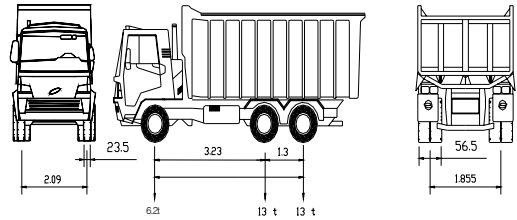


Fig. 13 시험 재하차량(3축)의 축간격 및 축하중

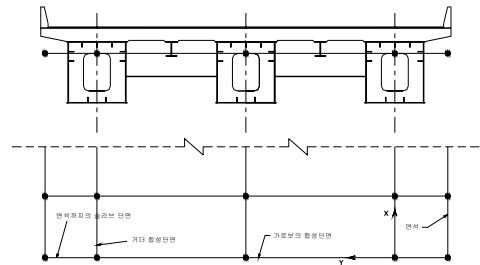


Fig. 14 격자해석 모델

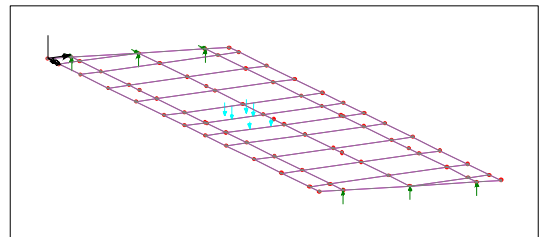


Fig. 15 재하차량을 3차선 1/2지점에 재하한 모습

구조해석에 사용한 유한요소 프로그램은 FEA Ltd.사에서 개발한 해석프로그램인 LUSAS Version 13.2를 사용하였다. 하중의 위치는 차량이 차선의 가운데 위치한다고 가정하였고 모델은 콘크리트 슬라브의 유효폭을 고려한 합성형 단면과 전단면에 의한 합성형 단면을 Thick Beam Element 요소인 BMS3를 사용하여 3차원 격자모델링을 하였다.

콘크리트는 종방향과 횡방향 강성이 상호영향을 주지 않는다는 가정하에 종방향에서의 콘크리트의 강성은 양분하여 상자형 거더와 합성화하였고, 횡방향에서는 가로보사이의 콘크리트의 횡강성을 같은 폭만큼 양분하여 각각에 해당하는 Beam 요소에 합성시켜 모델링을 실시하였다. 연석까지의 횡방향 Beam은 콘크리트의 횡강성을 적용하였으며 연석은 독자적인 강성을 갖는 빔으로 모델링 하였다. 그리고 세로보의 강성은 거더의 단면 강성에 비해 상당히 작기 때문에 해석에 큰 영향을 미치지 않으므로 제외하였다.

시험시 사용한 재하차량의 총중량은 32.2t이었으며 트럭이 교량 3차선으로 피에조센서에서 측정된 속력이 약 13.9km/h로 주행한다고 가정하고 교량의 1/4, 2/4, 3/4 지점을 통과할 때 중앙경간에 발생하는 변형률을 BWIM장비와 MEGADAC장비를 통하여 획득한 후 산정한 응력값과 구조해석을 통해 얻은 이론적인 값과 비교하였는데 비슷한 결과를 얻었으며, 또한 1/2 지점 운행시 거더별로 발생하는 응력에 있어서 해석치와 시험치가 다소 차이를 보이나 전체적으로 거더에 따라 횡방향 분배되는 경향이 해석치나 실험치가 거의 유사한 경향을 보이고 있어 거더별 보정계수를 통해 BWIM시스템의 변형률 측정부분을 신뢰할 수 있었다. 해석시 차량의 위치는 최대응력이 발생할 수 있도록 재하차량의 하중작용점을 교량의 중앙경간에 위치시켰다.

Table 3 교량 1/2지점 운행시 발생 응력

구분	BWIM	MEGADAC	해석결과
응력(kgf/cm <sup>2</sup> )	74.73	71.36	75.91
오차(%)	1.56	6.00	

Table 4 중앙경간 지점의 거더별 발생 응력

구분	BWIM	MEGADAC	해석결과	
거더 1	응력(kgf/cm <sup>2</sup> )	34.77	30.14	37.54
	오차(%)	7.40	19.71	
거더 2	응력(kgf/cm <sup>2</sup> )	62.39	58.79	68.69
	오차(%)	9.17	14.41	
거더3	응력(kgf/cm <sup>2</sup> )	74.72	71.28	75.91
	오차(%)	1.57	6.09	

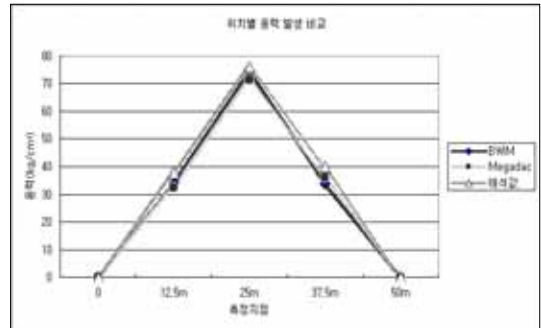


Fig. 16 차량의 위치에 따른 발생 응력

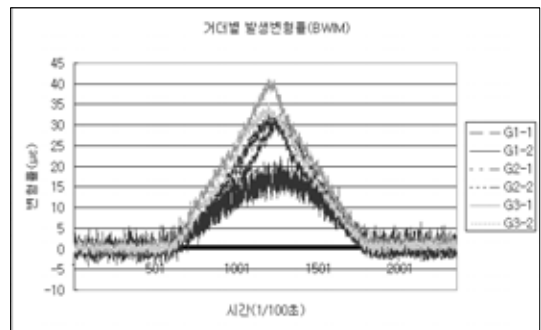


Fig. 17 3차선 주행시 각 거더의 발생 변형률

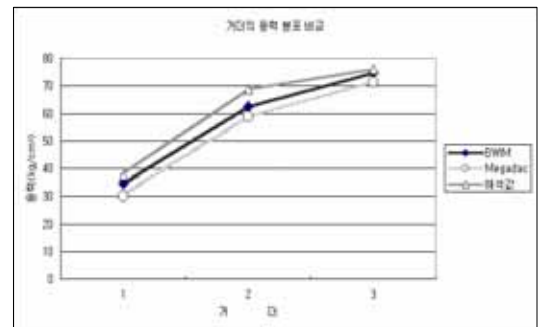


Fig. 18 거더의 응력분포 비교

그리고 응력 계산시 사용한 변형률은 위의 하중경우에서와 같이 내측 외측에서 발생한 최대 변형률의 주변 1초간의 평균값을 이용하여 응력을 산정하였다.

### 3.3 현장 시험

개발된 BWIM 시스템의 성능에 대한 검증은 위하

여 미리 계량된 3가지 다른 축을 가진 시험재하차량을 이용하여 다양한 경우의 주행시험을 실시하였다.

1차 시험에서는 테이프스위치의 사용가능여부, 작동 및 정확성 여부를 알아보기 위하여 2, 3차로에 각각 2개씩 총 4개의 테이프스위치를 설치하였다. 본 시험교량이 사교임을 고려하여 교량 지점의 차로중앙에서 2m 지점에 첫 번째 테이프스위치를, 7m 지점에 두 번째 테이프스위치를 설치하였다. 두 센서간격은 5m이다 (Fig. 19). 테이프스witch는 내구성이 떨어지는 단점이 있어서 2차 시험시에는 장기적으로 사용이 가능한 피에조 센서를 테이프스위치 설치위치와 동일한 위치의 포장층에 매설하여 시험하였다. 변형률계이지는 전기 저항식계이지를 사용하였으며, 총 6개의 계이지를 설치하였다. 3차 시험시에는 시험재하차량뿐만 아니라 일반통행차량을 대상으로 현장시험을 실시하였다. 차중

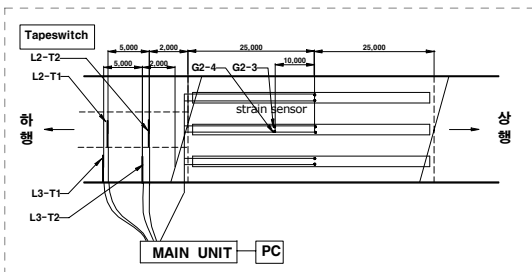


Fig. 19 테이프스위치(TapeSwitch) 설치위치

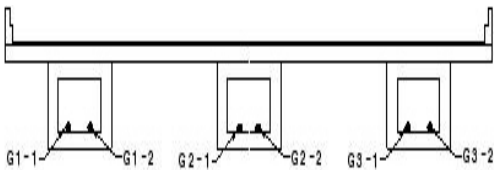


Fig. 20 변형률계이지 설치위치(경간중앙-25m)

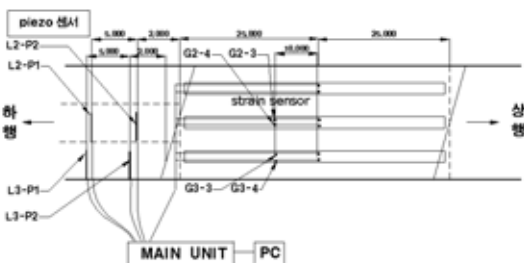


Fig. 21 피에조(PiezoElectric)센서 설치위치

및 축수등을 확인하기 위하여 교량위에 디지털비디오 카메라를 설치하여 녹화하였다. 또한 지간 중앙부외에 지간 중앙부에서 10m 떨어진 지점의 상부플랜지에도 4개의 센서를 설치하여 축감지센서가 없는 FAD BWIM 시스템도 고려해 보았다. 1차 시험시에는 제원 및 중량이 유사한 두 대의 3축 차량을 이용하여 속도별로 여러 가지 경우에 대해 주행시험을 실시하고,



Fig. 22 비디오 카메라로 촬영한 통행차량

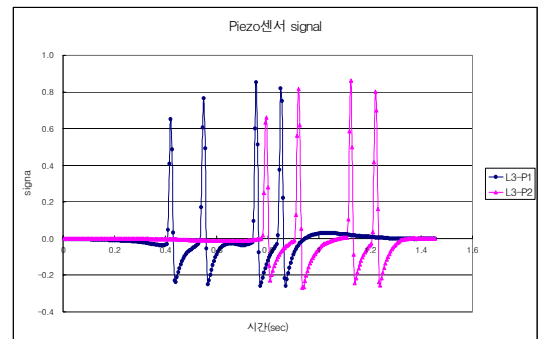


Fig. 23 피에조센서 신호 - 재하차량

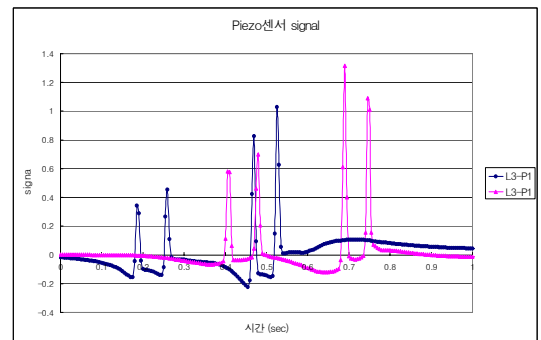


Fig. 24 피에조센서 신호 - 통행차량



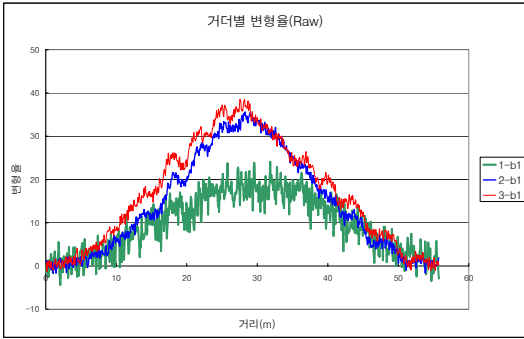


Fig. 25 거더별 변형률(Raw) - 재하차량

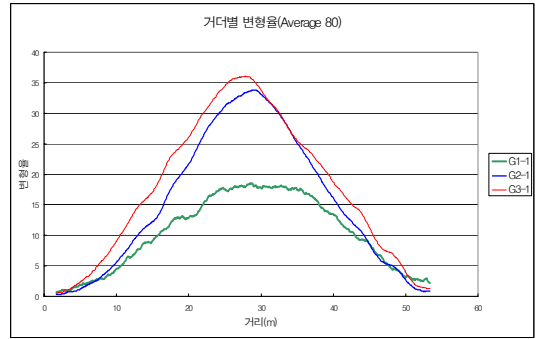


Fig. 27 거더별 변형률(Average 80) - 재하차량

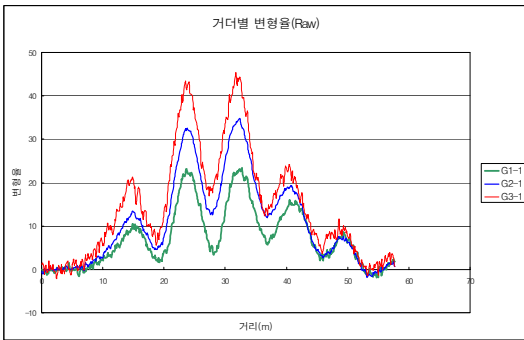


Fig. 26 거더별 변형률(Raw) - 통행차량

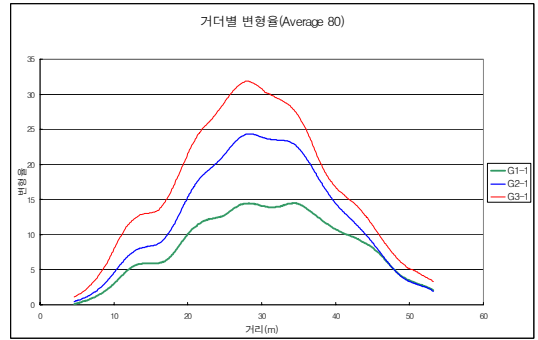


Fig. 28 거더별 변형률(Average 80) - 통행차량

변형률을 측정하였다. 시험은 크게 차로별 단독주행의 경우, 직렬주행(앞뒤로 같은 속도로 주행)의 경우, 병렬주행(옆 차로로 주행), 추월하는 경우로 주행시험을 실시하였다.

2차 시험은 여러 형식의 차량에 대하여 주행시험을 실시하였다. 사용된 차량은 3축차량(만차, 반차, 공차), 4축차량 및 5축차량이며 각 차량별로 주행시험은 차로별, 속도별로 실시하였다.

3차 시험은 변형률게이지를 중간에 추가로 설치한 후 축감지기와 변형률게이지의 작동 및 정확성 여부를 알아보기 위하여 1, 2차 시험 재하차량과 유사한 실제 통행차량을 임의로 선정하여 Signal을 확인했다. Fig. 23, 24는 3차시험시 재하차량과 통행차량이 주행시 피에조센서에서 측정된 신호를 보여주고 있다. 이 신호로부터 차량 축수와 축간거리, 속도 등을 명확히 알 수 있다.

거더별 변형률(Raw)은 Fig. 25, 26에서 보인바와

같이 재하차량에 비해 통행차량의 속도가 커서 동적인 효과에 의해 진폭이 증가하는 것을 알 수 있었다. 이들 신호를 Average 80 알고리즘을 이용하여 재처리한 결과를 Fig. 27, 28에 나타내었다.

Average 80 처리 후에도 약간의 동적인 효과가 남아있으나, 프로그램에서는 Average 후 최대 변형률을 사용하므로 동적인 효과를 전부 제거할 필요는 없다고 판단되었다.

Table 5 1차 시험 재하차량 제원

차종	총중량 (tonf)	축하중(tonf)		
		1축	2축	3축
3축 덤프	32.2	6.2	13.0	13.0
	32.4	6.0	13.2	13.2

Table 6 2차 시험 3축 차량 제원

차종	총중량 (tonf)	축하중(tonf)			비고
		1축	2축	3축	
3축 덤프	37.4	7.7	14.7	15.0	만차
	22.8	7.4	7.8	7.6	반차
	12.6	5.3	3.7	3.6	공차
1차시험 재하차량과 동일제원					

Table 7 2차 시험 4축 차량 제원

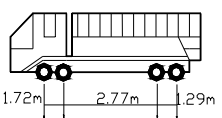
차종	총중량 (tonf)	축하중(tonf)			
		1축	2축	3축	4축
4축 덤프	37.38	7.68	10.2	9.6	10.2
					

Table 8 2차 시험 5축 차량 제원

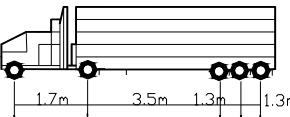
차종	총중량 (tonf)	축하중(tonf)				
		1축	2축	3축	4축	5축
5축 카고	33.6	6.0	7.8	4.4	7.3	8.1
						

Table 9 3차 시험 재하차량 및 통행차량 제원

대상	차종	총중량 (tonf)	속도 (km/h)	주행 차로	축간거리(m)		
					1	2	3
재하 차량	4축 트럭	37.38 (계량차)	48.49	3	1.72	2.77	1.29
통행 차량	4축 트럭	31.04 (측정차)	101.17	3	1.64	4.8	1.24

### 3.4 시험 결과

차량주행시험을 중량과 차종이 다른 5종류의 차량에 대해 차로별, 속도별로 여러 가지경우에 대해 실시하였으며, 단독주행, 직렬주행, 병렬주행의 경우에 대

해 총 83회의 주행시험을 실시하였다.

Table 10~14는 본 연구에서 제안된 알고리즘에 의해 계산된 축중 계산 결과중 일부를 보여준다. 차축 중량 및 총중량 계산 결과 단독 주행시는 5%, 직렬 및 병렬 주행시는 10%이내의 상대오차평균과 5% 정도의 오차에 대한 표준편차를 보였다.

이러한 오차를 줄이기 위하여 보정계수의 도입이 필요하며 보정시험이 수행된다. 축중량과 축간거리를 알고 있는 재하차량을 이용하여 해당 교량에 대해 동일

Table 10 3축 차량 1대 주행시 축중계산 결과(1차시험)

하중 경우	차량하중 (tonf)		상대오차(%)
3차선 50 km/h	1축	6.13	1.09
	2축	12.91	0.70
	3축	12.91	
	총중량	31.95	0.77
3차선 70 km/h	1축	6.42	3.50
	2축	13.51	3.91
	3축	13.51	
	총중량	33.43	3.83
3차선 90 km/h	1축	6.05	2.39
	2축	12.74	2.00
	3축	12.74	
	총중량	31.53	2.08

Table 11 3축 차량 2대의 직렬주행시 축중계산 결과 (1차시험)

하중 경우	차량하중 (tonf)		상대오차(%)	
3차선 직렬주행 70 km/h 차간 15 m	선행	1축	5.73	7.51
		2축	12.07	7.14
		3축	12.07	
		총중량	29.88	7.21
	후행	1축	6.25	4.18
		2축	13.16	0.31
		3축	13.16	
		총중량	32.57	0.52
3차선 직렬주행 90 km/h 차간 50 m	선행	1축	5.43	12.34
		2축	11.44	11.99
		3축	11.44	
		총중량	28.23	12.06
	후행	1축	5.84	2.68
		2축	12.29	6.88
		3축	12.29	
		총중량	30.42	6.10

Table 12 3축 차량 2대의 병렬주행시 축중계산 결과 (1차시험)

하중 경우	차량하중 (tonf)		상대오차(%)	
	축	중량		
2,3차선 병렬주행 (3차선 선행) 60 km/h 차간 25 m	선행	1축	5.99	3.38
		2축	12.61	
		3축	12.61	3.00
		총중량	32.21	
	후행	1축	6.04	0.60
		2축	12.71	
		3축	12.71	3.74
총중량	31.45	2.94		
2,3차선 병렬주행 (2차선 선행) 80 km/h 차간 25 m	선행	1축	6.31	1.76
		2축	13.28	
		3축	13.28	2.17
		총중량	32.87	
	후행	1축	6.40	6.64
		2축	13.47	
		3축	13.47	2.04
총중량	33.34	2.89		

Table 13 단독주행시 축중계산 결과(종합)

차종	축	오차평균 (%)	오차 표준편차 (%)
3축 덤프 (1차시험)	1축	2.60	1.99
	2축	2.45	2.54
	3축	2.45	2.54
	총중량	2.45	2.46
4축 덤프 (2차시험)	1축	2.64	1.52
	2축	2.72	3.16
	3축	2.64	5.69
	4축	2.72	3.16
	총중량	3.45	3.61
5축 덤프 (2차시험)	1축	3.94	3.56
	2축	3.36	2.15
	3축	3.36	2.55
	4축	3.36	4.72
	5축	1.73	4.44
	총중량	3.58	3.06

차선, 동일 속도로 반복 주행한 후 총중량 및 축중량이 거의 같은 값이 나올 때까지 보정계수를 수정 적용함으로써 오차를 제거하게 된다. 보정계수는 실제 중량을 측정된 중량의 평균값으로 나눈 비로 매년 시

Table 14 3축 차량의 직렬 및 병렬 주행시 축중계산 결과 (1차시험)

주행형태	주행 위치	축	오차평균 (%)	오차 표준편차(%)
직렬주행	선행	1축	9.93	2.41
		2축	9.57	2.42
		3축		
		총중량	9.64	2.42
	후행	1축	3.43	0.75
		2축	3.60	3.28
		3축		
총중량		3.31	2.79	
병렬주행	선행	1축	3.30	1.45
		2축	3.45	1.72
		3축		
		총중량	3.41	1.68
	후행	1축	6.25	5.26
		2축	4.15	2.52
		3축		
총중량	4.47	3.12		

험시 사용된 보정계수에 곱하여 새로운 보정계수를 선택하는 방법으로 매년 측정시 거의 같은 값이 나올 때까지 반복 수행한다.

BWIM 시스템은 현장적용시 교량별, 차량별 특성에 따른 차이를 보정할 필요가 있다. 이러한 보정은 교량의 특성을 미리 파악하여 중량 계산 시 정확한 값을 계산하기 위한 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 교량상을 주행중인 차량의 하중정보를 실시간으로 측정할 수 있는 BWIM 시스템을 국내 실정에 맞게 자체 개발한 후 현장에 적용하여 성능을 검증하고자 하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 교량의 활하중효과에 영향을 주는 교통하중의 특성을 분석하기 위해서는 중차량의 총중량, 축하중분포 뿐만 아니라 축간거리도 주요 변수이므로 이에 대한 기준설정이 필요하다. 이에 국내 운행중인 전 차량에 대해서 축수뿐만 아니라 축간거리도 합

게 고려하여 총 20종으로 차량 분류 기준을 정하였다.

- 2) 현장시험시 재하차량에 대한 축중량 및 총중량 계산 결과 단독 주행시는 5%, 직렬 및 병렬 주행시는 10%이내의 상대오차 평균과 5% 정도의 오차에 대한 표준편차를 보였는데 이러한 오차를 제거하기 위해서 현장보정시험이 필요하다. BWIM시스템은 현장 적용시 교량별, 차량별 특성에 따른 오차가 항시 존재하므로 이를 보정하기 위한 현장보정시험이 필수적으로 요구된다.
- 3) 기존 BWIM 시스템은 단시간교량에 차선당 1대차량 주행시에만 하중계산이 가능하였는데 비해 본 연구에서 개발된 시스템은 차선당 3대까지의 연행차량 주행시도 하중계산이 가능하다. 모든 차량을 2축으로 가정하여 총중량을 구한 후 축 하중을 축중 분배율에 따라 축중량을 계산하는 알고리즘을 사용하였는데 축중 분배율 결정시 정확도를 높이기 위해서는 축감지센서의 신호크기도 함께 고려하여야 한다.

본 연구를 통해 개발된 BWIM 시스템에서 수집된

차량정보를 이용하여 교량 설계 활하중 및 피로하중 모형개발에 이용하고자 데이터 수집 중에 있으며 추후 그 결과를 발표하고자 한다.

#### 참고문헌

1. 김상진, 박문호, “트럭하중 측정을 위한 교량시험”, 대한토목학회 논문집, 제16권 제 I-5호, p621~631, 1996.9.
2. 김상효, 박홍석, “도로교 차량하중 및 통행특성에 관한 연구”, 대한토목학회 논문집, 제12권 제4호, p107~116, 1992.12.
3. 박민석, “고속도로 교량활하중 정형화에 관한 연구”, 한국도로공사 도로연구소, 도로연 01-26, 2001.
4. 배두병, 황의승, 정경섭, 조재병, “BWIM시스템을 이용한 중차량의 통행특성분석”, 한국강구조학회 논문집, 제11권 2호, p323~232, 1999. 4.
5. Fred moses, 'M., “Weigh-In-motion System Using Instrumented Bridge”, TRANSPORTING ENGINEERING JOURNAL, ASCE, Vol. 105, TE3, May. 1979.

(접수일자 : 2005년 7월 6일)