



## 저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

工學碩士 學位論文

현장계측을 통한 BWIM 활용방안과  
실교통류하에서의 적용성 연구

A Study on the Utilization of BWIM by Field Measurement  
and Applicability under the Real Traffic



2014 年 2 月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科

柳 東 均

本 論文을 柳東均의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長 工學博士 金 度 三 (印)

委 員 工學博士 慶 甲 秀 (印)

委 員 工學博士 李 宰 夏 (印)



2014 年 2 月

韓國海洋大學校 大學院

# A Study on the Utilization of BWIM by Field Measurement and Applicability under the Real Traffic

by  
*Yoo, DongGyun*

Department of Civil and Environment Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## ABSTRACT

Recently, due to increase of traffic and vehicle loading, increase in fatigue load and importance of maintenance for bridge and related facilities has come to the fore. In order to maintenance, accurate detection of bridge is needed. BWIM system is one of them.

In this study, response of strain data acquired from bottom flange and longitudinal stiffener of each bridge by field test, utilization of BWIM system, which calculate the characteristic and weight of pass vehicle, are analysed.

We performed field test three times. From this performing, vehicle speed, wheelbase and weight were calculated by the time history curve analysis based on vehicle characteristics of main girders and vertical reinforcement. And effects of those factors and means to increase accuracy of the estimated vehicle informations are discussed.

As a result of this study, it is the suitable that the response time history curve of the members differentiate to detect information of the vehicle. And plan shape of bridge structure affects the estimated vehicle informations greatly. Therefore, authors recommend to use straight bridge for estimation of informations of vehicles passing over bridge.

# 현장계측을 통한 BWIM 활용방안과 실교통류하에서의 적용성 연구

유 동 균

한국해양대학교  
토목환경공학부 토목공학과

## 요 약

최근 교통량 및 화물 적재율 증가 등으로 인해 교량의 피로손상이 증가하고 있고, 교량구조물 및 기타 도로관련 시설물에 대한 유지관리의 중요성이 부각되고 있다. 정확한 유지 관리를 위해서는 교량의 정확한 진단이 필요하며 이를 위한 방법으로는 BWIM시스템이 있다.

이 연구에서는 하부플랜지 및 수직보강재에서 발생하는 변형률 응답을 도출하여 임의 통과차량의 특성 및 중량을 산정하는 BWIM시스템 활용방안에 대해 분석하고자 한다.

3개의 구조와 형식이 다른 교량을 선택하여 현장계측을 실시하였다. 이로부터 수직보강재와 하부플랜지에서 도출된 변형률응답을 이용하여 차량의 속도 및 축간거리를 분석하고 이를 기초로 BWIM시스템을 통하여 중량을 산출하고 분석하였다. 그리고 차량조건, 교량조건 및 계측조건에 영향을 미치는 BWIM에 의한 차량정보추정에 미치는 영향을 평가하고, 이러한 평가를 통하여 BWIM에 의한 차량 정보 추정시 정밀도 향상을 위한 방안을 제시하고자 한다.

연구결과, 현장계측을 통해 얻어진 변형률응답을 이용하면 차량의 정보 및 중량을 산정할 수 있었다. 그리고 BWIM시스템에서 가장 큰 영향을 미치는 것은 교량의 사각으로 판단된다. 그러므로 향후 교량 선정시 직선교를 선택하는 것이 BWIM시스템의 정확성을 높이는데 유리할 것으로 판단된다.

# 목 차

ABSTRACT .....	i
요약 .....	ii
목차 .....	iii
표목차 .....	v
그림목차 .....	vi
1장. 서론 .....	1
1.1 연구의 배경과 목적 .....	1
1.2 국내·외 연구동향 .....	3
1.2.1 국내 연구동향 .....	3
1.2.2 국외 연구동향 .....	4
1.3 연구범위 및 구성 .....	6
2장. BWIM(Bridge Weigh-In-Motion) System .....	7
2.1 BWIM System의 기본구성 .....	7
2.2 주행차량의 제원 및 속도 산정방법 .....	10
2.3 주행차량의 중량 산정방법 .....	12
2.3.1 기준영향선 산정방법 .....	12
2.3.2 차량 중량 산정방법 .....	13
2.4 연병행 주행시 차량 중량산정 방법 .....	15
2.4.1 병행주행 .....	15
2.4.2 연행주행 .....	17
2.5 차량중량 산정시 오차 기준 .....	20
3장. BWIM 현장실험 .....	21
3.1 현장실험 개요 .....	21

3.1.1 대상교량 I .....	21
3.1.2 대상교량 II .....	24
3.1.3 대상교량 III .....	27
3.2 현장실험 결과 및 분석 .....	29
3.2.1 대상교량 I .....	29
3.2.2 대상교량 II .....	32
3.2.3 대상교량 III .....	34
3.3 BWIM시스템에 영향을 미치는 인자 .....	36
3.3.1 거더형식, 스펜의 유무, 교량평면에 따른 영향 .....	36
3.3.2 Sampling rate에 따른 영향 .....	37
3.3.3 주행속도에 따른 영향 .....	38
3.3.4 주행패턴에 따른 영향 .....	39
3.3.5 측정위치에 따른 영향 .....	42
4장. 주행차량의 차종 분류 .....	43
4.1 차종의 분류 목적 .....	43
4.2 차종의 분류 기준 .....	46
4.3 실교통류에서의 차량 정보 분석 .....	51
5장. 결론 .....	55
5.1 결론 .....	55
5.2 향후 과제 .....	57
참고문헌 .....	58
감사의글 .....	62

## 표목차

표 2-1. 연병행 주행시 추출된 차량의 중량산정결과 .....	19
표 2-2. 정확도 분류의 허용오차 .....	20
표 3-1. I 교량의 개요 .....	21
표 3-2. 시험차량의 제원 및 중량(I 교량) .....	23
표 3-3. 시험차량의 주행방법(I 교량) .....	23
표 3-4. II 교량의 개요 .....	24
표 3-5. 시험차량의 제원 및 중량(II 교량) .....	26
표 3-6. 시험차량의 주행방법(II 교량) .....	26
표 3-7. III 교량의 개요 .....	27
표 3-8. 시험차량의 제원 및 중량(III 교량) .....	27
표 3-9. 시험차량의 주행방법(III 교량) .....	27
표 3-10. 속도와 축간거리 추정결과(I 교량) .....	30
표 3-11. 중량 추정결과(I 교량) .....	31
표 3-12. 속도와 축간거리 추정결과(II 교량) .....	32
표 3-13. 중량 추정결과(II 교량) .....	33
표 3-14. 속도와 축간거리 추정결과(III 교량) .....	34
표 3-15. 중량 추정결과(III 교량) .....	35
표 3-16. BWIM 중량추정에 영향을 미치는 인자 .....	36
표 3-17. Sampling rate에 따른 속도추정 오차율 .....	38
표 3-18. L.C.5~7의 중량추정 결과 .....	41
표 4-1. 12종 차종분류표 .....	44
표 4-2. 국내에서 활동중인 차종 및 차축 구조 분류 .....	48
표 4-3. 공용하중에서 차량의 정부 분석결과 .....	57

## 그림목차

그림 2-1. BWIM System 기본구성 .....	8
그림 2-2. 중량산정 System 흐름 .....	9
그림 2-3. 수직보강재 응답 일례 .....	11
그림 2-4. 미분판독법을 이용한 prak 시간검지 .....	11
그림 2-3. 직접판독법을 이용한 Peak 시간검지 .....	15
그림 2-5. 병행주행시 변형률응답곡선 추출 일례 .....	16
그림 2-6. 연행주행시 변형률응답곡선 추출 일례 .....	18
그림 3-1. I 교량의 전체도 및 측정위치 개요 .....	22
그림 3-2. II 교량의 전체도 및 측정위치 개요 .....	25
그림 3-3. III 교량의 전체도 및 측정위치 개요 .....	28
그림 3-4. I 교량의 수직보강재 변형률응답곡선 일례 .....	29
그림 3-5. II 교량의 수직보강재 변형률응답곡선 일례 .....	32
그림 3-6. III 교량의 수직보강재 변형률응답곡선 일례 .....	34
그림 3-7. 중량추정 정밀도 .....	37
그림 3-8. 주행속도에 따른 BWIM 정밀도 .....	39
그림 3-9. 병행주행시 거더8번의 변형률응답곡선(L.C.5) .....	40
그림 3-10. 측정위치에 따른 BWIM 정밀도 .....	42
그림 4-1. 공용하중에서의 하부플랜지 변형률데이터 .....	51
그림 4-2. 공용하중에서의 수직보강재 변형률데이터 .....	52

---

# 1장. 서론

---

## 1.1 연구의 배경 및 목적

최근 교통량 및 화물 적재율 증가 등으로 인해 교량의 피로손상이 증가하고 있고 교량구조물 및 기타 도로관련 시설물에 대한 유지관리의 중요성이 부각되고 있다. 정확히 유지관리하기 위해서 교량구조물의 정확한 진단이 필요하며 이를 위해서는 외력으로 작용하는 주행차량의 하중을 정확히 파악하는 것이 중요하다.

이를 파악하는 방법으로는 크게 Weigh-In-Motion(WIM, 이하 WIM)방식과 Bridge Weigh-In-Motion(BWIM, 이하 BWIM)방식으로 구분 할 수 있다. WIM 방식은 정밀한 계측이 가능하나 차량을 특정장소로 유도하고 정차시킨 후 하중을 측정해야 하는 등 많은 인력과 시간, 장소 등이 필요하게 된다. 외국의 저속용(20km/h이하)WIM시스템을 도입하였으나 교량구조물 및 도로포장의 내구성 평가 및 유지관리 계획 수립에 필요한 종합적이고 체계적인 정보를 도출하기에는 한계가 있다. 그리고 가격이 고가일 뿐만 아니라 고장이 잦고 평균수명이 약 5~6년에 불과해 현재 운영 중인 WIM 시스템의 유지관리에도 적지 않은 비용이 소요되고 있는 점도 문제로 제기되고 있다.

BWIM방식은 고속에서도 계측이 가능하고 초기설치비용을 제외하고는 유지보수관리 비용이 적다는 장점이 있다. 그러나 중량추정판정에 미치는 영향 인자가 많아 정확도가 아직 WIM에 비해 떨어지는 단점이 있다.

BWIM의 이론적 연구는 이미 선행연구를 통해 알고리즘은 확립되었고 이 연구에서는 현장실험을 통해 얻어진 데이터를 이용하여 교량의 형식, 차량의 주행 방식 그리고 측정위치에 따른 영향인자 등에 따른 영향을 분석하고 정리하여 BWIM시스템 적용시 대상교량의 선택, 게이지의 부착위치 등에 있어 기본적인

자료로 활용하고자 한다. 또한 차량의 분류기준을 정립하여 BWIM시스템 프로그램 개발에 도움을 주고자 한다.



## 1.2 국내·외의 연구동향

### 1.2.1 국내 연구동향

국내 연구동향으로는 건설기술연구원(건설교통부, 2002)에서 수행한 연구가 있다. 이는 차량의 활하중 및 피로모형을 개발하여 일반국도 및 고속도로에서 중차량에 대한 통행 특성 및 중량특성을 다양한 각도로 확보하여 그 특성을 분석하였다. 또한 차종별로 교량수명에 대한 최대 총중량을 추정하고 대표차량을 이용하여 최대하중 효과를 구하였다.

그 외에도 황의승(1999)은 중차량의 통행특성을 분석하였으며 이현재(2001)는 속도와 축간거리를 중심으로 연구를 하였으나 동적 거동의 특성을 반영하지 못해 정확성이 낮은 문제점이 발견되었다. 또한 한국도로공사(한국도로공사연구소, 2000)에서 연구한 고속도로상의 교량활하중 정형화를 위한 BWIM 시스템 연구 및 피로 하중 모형에 관한 연구는 이론적인 적용보다는 실험에 의한 유용성을 입증하였다.

박민석(2008)은 인공지능망 이론을 BWIM 시스템에 적용시켰다. 이에 따르면 가로보의 응답신호를 사용하여 차량하중을 분석한 결과, 인공지능망을 적용하는 방법이 기존의 영향선 분석보다 높은 정확도를 얻을 수 있는 등 복잡한 구조형식을 갖는 교량에서도 BWIM 시스템을 적용할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 인공지능망 이론을 적용할 경우 높은 수준의 신경망이 구축되어야 하며 상대적으로 다량의 차량주행 신호가 있어야 정확도를 높일 수 있는 점이 보고되었다.

김병화 등(2010)의 연구에서는 축중량의 정확성 향상을 위하여 차량하중이 직접 작용하여 응답특성이 민감하게 나타나는 강바닥판을 대상으로 BWIM시스템에 적용하여 이의 적용성을 확인하였다. 또한 강바닥판교량 BWIM시스템에서의 전체중량 및 축중량 추정에 있어서 정확성을 향상시켰다.

또한 신수봉 등(2011)은 다축모멘트 영향선 및 밀도추정함수와 평균보정계수를 고려하여 BWIM시스템의 추정결과의 정확성을 향상시켰다. 밀도추정함수는 정지원(2006)등에 의해 다축하중의 식별에 신뢰도 향상이 적용될 수 있다는 것이 실

내실험을 통해 검토되었으며, 실험을 통하여 그 정확성을 검증하였다.

그 외에도 최종대 등(2009)은 BWIM시스템에 스마트 센서나 광센서를 이용하였고, 이정휘(2011)는 변형률응답의 외적영향인자의 변화가 BWIM에 미치는 영향을 연구하였다.

정민선 등(2012)은 동적해석 전용프로그램(DAP-1)을 이용하여 BWIM시스템에서의 차량형식, 주행위치, 온도 및 노이즈 등이 차량중량 추정의 정확도에 미치는 영향에 대해 이론적인 연구를 수행하였다.

## 1.2.2 국외 연구동향

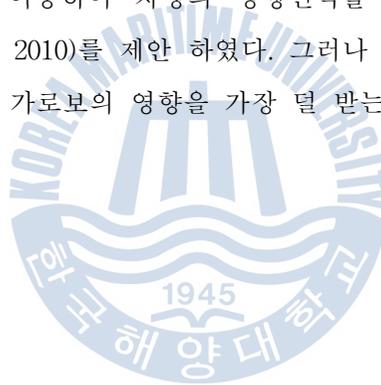
1970년대에 Case Western Reserve University에서 F. Moses 등에 의해 BWIM시스템의 기본 알고리즘이 처음 제안되었다. 이는 교량주형의 변형률을 평가하기 위해 수행된 프로젝트로 이를 시작으로 1980년대 호주의 Peters(1986)는 BWIM시스템에 압거를 적용하였고, 그 후 슬로베니아의 Znidaric(1991)와 아일랜드 Dempsey(1995)등이 BWIM시스템을 연구하였으나 긴 지간을 가지는 교량에서는 중량추정의 정확성이 저하되는 등의 문제가 있어 개선이 필요한 것으로 판단되었다.

현재 BWIM 시스템은 Moses의 알고리즘에 기반을 두고 있다. 교량 주형에 부착된 축센서를 이용하여 차량의 정보(속도, 축간거리 그리고 차량의 위치 등)를 산정하고 정적인 Girder의 휨모멘트영향선과 측정된 변형률을 최소자승법을 이용하여 축하중을 산정한다. 그러나 교량과 차량의 동적인 영향 및 동적 상호작용을 반영하지 못하여 현장계측을 통한 정확도는 낮은 편이다.

유럽에서는 이러한 문제점을 개선하기 위해 알고리즘의 오차 조정 방법의 향상, FAD 시스템 개발 및 BWIM 시스템을 다른 형식의 교량에 적용하고자 Wave Project(2002) 및 COST 323(2002)을 추진하여 프로젝트를 수행해왔다. 그 결과 슬로베니아에서는 70개 이상의 교량에 BWIM 시스템이 설치되어 사용중에 있으며, 국립건설 연구기관인 ZAG의 연구팀은 2축~5축의 기지의 시험트럭을 이용한 편차조정 철차를 연구결과로 제시하였다(Gagarine.N, 1991). 프랑스의

LCPC에서는 차량의 진행방향으로 수직위치에 다량의 변형률센서를 설치하여 정확성을 증가시키는 다중센서 연구를 수행하였다. 또한 아일랜드의 TCD/UCD 연구소에서는 교량과 차량의 동적영향에 대한 동적모형알고리즘을 연구하였으며, 변형률센서 대신 광센서를 사용하는 연구가 진행되었다(Dempsey.A.T, 1997).

일본에서는 토목연구소(2004)에서 교량의 형태 및 주행 조건 및 계측조건에 따른 fms BWIM시스템의 적용성을 연구하였다. 이는 BWIM알고리즘을 적용하여 차량의 판독을 자동적으로 이루어질 수 있도록 차량판독 알고리즘을 제시하였다. Kobayashi(2004)는 프로토 모니터링 시스템으로 BWIM시스템을 자동적, 연속적 그리고 실시간으로 차량의 위치를 측정하고 온도와 활하중 응답의 주파수 차이를 분리하였고, 교통상황을 모니터링 할 수 있게 하였다. 또한 강바닥판이 아닌 수직보강재의 변형률을 이용하여 차량의 영향면적을 구하여 중량을 추정하는 BWIM-IT(山口榮輝 et, 2010)를 제안 하였다. 그러나 가로보로 인한 명확한 하중전달의 어려움이 있어 가로보의 영향을 가장 덜 받는 수직보강재의 위치 선택을 신중히 해야 한다.



### 1.3 연구범위 및 구성

이 연구에서는 정민선(2012)과 황효상(2013)의 연구를 기반으로 하여 현장실험에서 얻어진 데이터를 비교 분석하여 플레이트 거더교와 박스 거더교, 직교와 사교, 그리고 측정위치에 따른 결과를 비교하였다.

이 연구에서는 다음과 같이 구성하여 연구를 수행하였다.

제 1장에서는 이 연구의 배경 및 목적, BWIM의 정의, 연구동향 및 연구의 범위 및 구성에 대해 기술하였다.

제 2장에서는 BWIM의 기본 구성과 주행차량의 정보 및 중량 산정 방법, 그리고 연·병행 주행에 따른 중량산정방법에 대해 기술하였다.

제 3장에서는 3개의 대상교량에서 측정된 데이터를 이용하여 BWIM시스템이 미치는 영향인자를 고려하였다.

제 4장에서는 차량의 분류 방법 및 분류 기준에 대해 기술하였다.

제 5장에서는 이 연구로부터 도출된 결론 및 향후연구 과제에 대해 기술하였다.

---

## 2장. BWIM(Bridge Weigh-In-Motion) System

---

### 2.1 BWIM System의 기본구성

BWIM 시스템은 교량부재에 부착되어 변형응답을 측정하는 변형률게이지, 차량속도, 축간거리 등의 차량정보 및 변형률게이지를 관독할 수 있는 자료처리기, 그리고 입·출력장치 등으로 구성되는 하드웨어와 통신프로그램, 속도, 축간거리 중량 등의 알고리즘을 계산하는 소프트웨어 등으로 구성되어 있다. 그림 2-1에 BWIM시스템의 간략한 기본구성을 나타내었다. 한 개의 거더에는 속도, 축간거리 등을 계산하기 위해 수직보강재에 2개, 중량계산을 위해 하부플랜지에 1개, 이렇게 최소한3개의 변형률게이지를 부착하게 된다. 여기서 도출되는 변형률응답을 변형률 앰프 및 데이터 획득 시스템 및 AD변환기를 거쳐 디지털화 하게 되고 시스템 알고리즘에 의해 정보 및 중량을 계산하게 된다.

그림 2-2에 차량의 정보를 계산하는 시스템 흐름을 나타내었다. 수직보강재에서 도출되는 변형률응답으로부터 차량의 위치, 축간거리 그리고 속도를 검지하여 차량을 분리, 관독하게 되고 하부플랜지 변형률응답을 이용하여 차량의 중량을 계산하게 된다. 먼저 차량의 제원 및 중량을 아는 기지의 시험차량을 교량에 대한 대표기준영향선을 도출한다. 이를 이용하여 임의의 주행차량으로부터 얻어진 변형률과 앞에서 계산되어진 변형률의 차이를 이용해 미지차량의 정보를 추정할 수 있다.

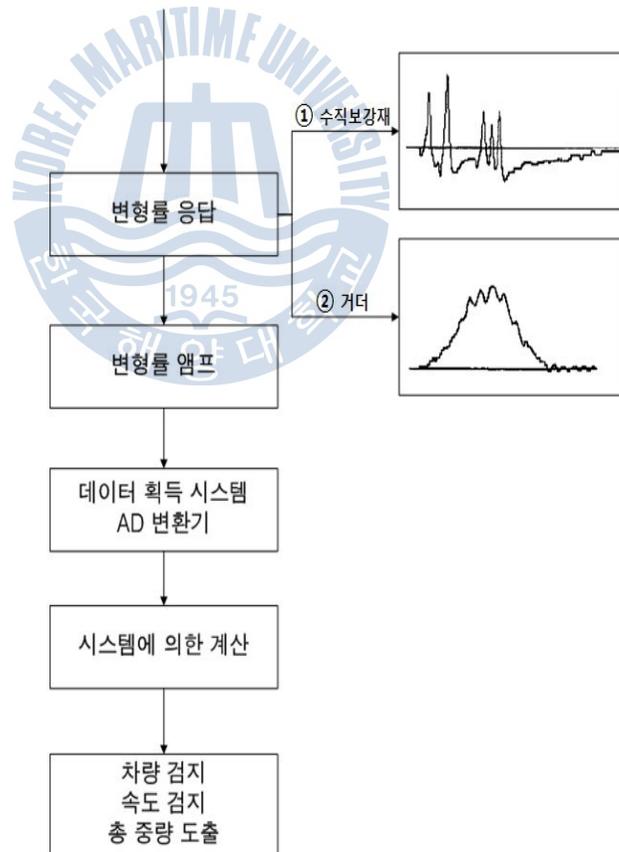
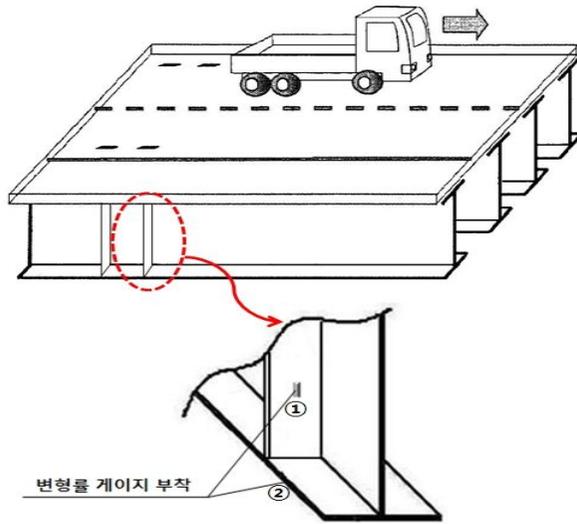


그림 2-1. BWIM System 기본구성

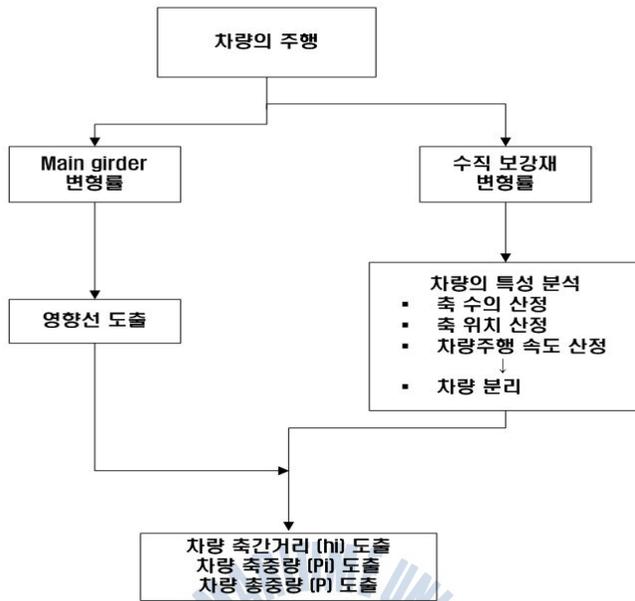


그림 2-2. 중량산정 System 흐름



## 2.2 주행차량의 제원 및 속도 산정 방법

주행차량의 제원 및 속도 산정은 영향선 길이가 짧은 수직보강재의 응답을 이용한다. 수직보강재는 주거더 응답과는 달리 차축이 수직보강재 바로 위를 통과할 때에만 변형이 발생하므로 주행차량의 정보를 파악하는데 용이하다.

교량을 차량이 통과할 때의 수직보강재 응답의 일례를 그림 2-3에 나타내었다(Kobayashi, 2004). 만약, 그림과 같이 3축 차량이 교량을 통과하였다면 3개의 피크를 가진 변형률응답을 얻을 수 있고, 이 피크치의 시간간격을 이용해서 차량의 속도와 축간거리를 계산할 수 있다. 피크치의 시간을 판독하는 방법으로는 직접 판독법과 미분판독법이 있다.

직접판독법은 차축이 통과할 때 발생하는 피크값을 직접 육안으로 판독하는 방법이고, 미분판독법은 변형률응답곡선의 기울기 차를 이용하는 방법이다. 실제 계측에서는 온라인 기반에서 전자동으로 응답 시간을 컴퓨터에 의해 자동 판독하여야 하므로 직접판독법을 적용하기는 어렵다. 본 연구에서는 최종적으로 프로그램을 완성해야 하므로 미분판독법을 적용하였으며, 그 일례를 그림 2-4에 나타내었다(Kobayashi, 2004).

- ① 수직보강재에서 측정된 변형률을 그림 2-4(b)와 그림 2-4(c)와 같이 1계 미분파형, 2계 미분파형을 산출한다.
- ② 2계 미분파형이 0이 되는 지점으로부터 1계 미분파형에서 극소점을 구한다.
- ③ 1계 미분파형에 대해 ②에서 구한 극소점 이후에 최초로 극대가 되는 점의 값을 구한다.
- ④ ②와 ③에서 구한 극소점과 극대점 차이가 설정 값 이상이 되면 그 사이에 0이 되는 시간이 차량의 축이 수직보강재의 바로 위쪽을 통과하는 시간이 된다.

피크값의 시간이 계산되어지면 두 수직보강재 응답의 시간간격과 이격거리를 이용하여 속도를 계산할 수 있다. 속도를 알면 각 축의 피크값 기간 간격을 판독하여 축간거리 또한 계산 할 수 있다.

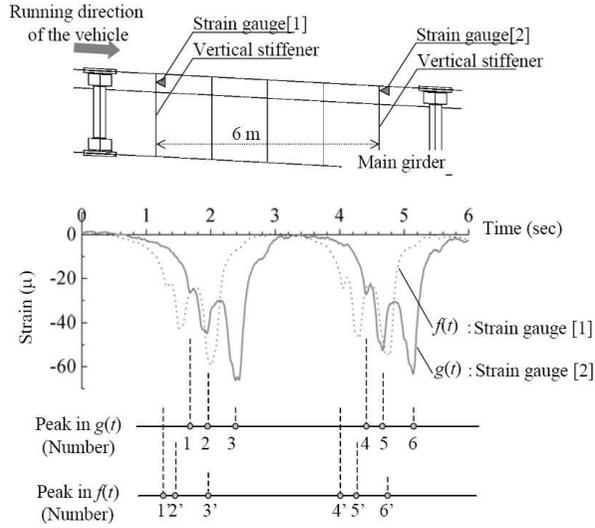


그림 2-3. 수직보강재 응답 일례

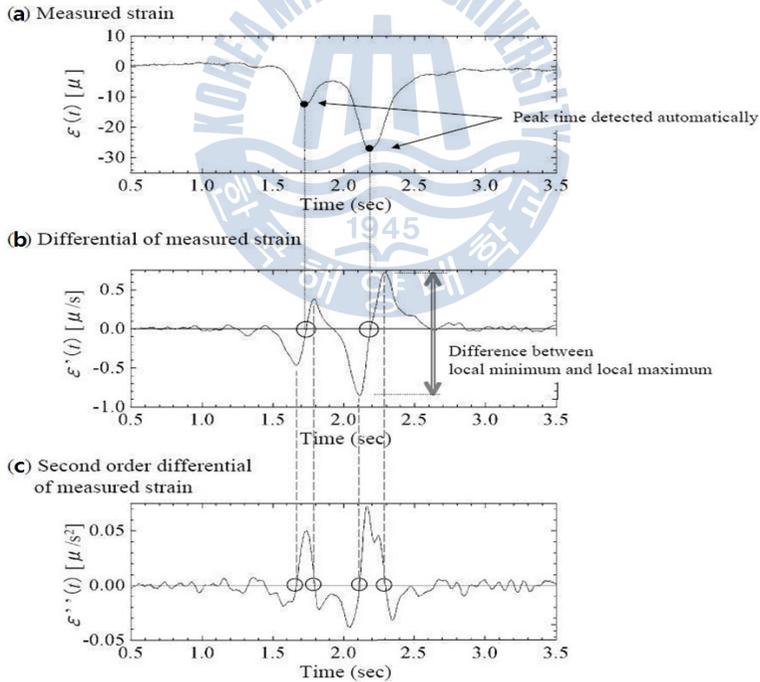


그림 2-4. 미분판독법을 이용한 peak 시간검지

## 2.3 주행차량의 중량산정 방법

### 2.3.1 기준영향선 산정 방법

주행차량의 중량을 산정하기 위해서는 기준영향선이 도출되어야 한다. 본 연구에서 기준영향선은  $a_0, a_1, a_2 \dots a_d$ 로 이루어진 영향선 함수  $f[x(t)]$ 를 식 (2.1)로 나타낼 수 있다.

$$f(x(t)) = a_0 + a_1x(t) + a_2x(t)^2 + \dots + a_dx(t)^d \quad (2.1)$$

여기서,  $a$  : 다항식 계수,  $d$  : 다항식 차수

이를 이용해  $l$ 차선 차량의  $n$ 축이 지날 때 측정지점  $i$ 의 계산변형률( $\varepsilon_{il}(t)$ )을 계산할 수 있다. 계산변형률 $\varepsilon_{il}(t)$ 은 식 (2.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_{il}(t) = \sum_{n=1}^{N_{\max}} P_n \cdot f_{il}(x(t)_n) \quad (2.2)$$

$$x = x_0 + v(t - t_0) \quad (2.3)$$

여기서,  $x$  : 교량의 연장  
 $P_n$  : 차량의  $n$ 축 하중  
 $x(t)$  :  $t$ 시간일 때  $n$ 축의 위치  
 $t$  : 시간  
 $x_0$  : 기준 측정위치  
 $t_0$  : 기준 측정위치를 통과하였을 때의 시간  
 $v$  : 차량 속도

그 다음 계산변형률 $\varepsilon_{il}(t)$ 과 측정변형률 $\varepsilon_{il}^*(t)$ 차 제곱의 합계 $E$ 를 식 (2.4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E = \sum_{j=0}^{T_{\max}} [\varepsilon_{il}(j\Delta t) - \varepsilon_{il}^*(j\Delta t)]^2 \quad (2.5)$$

$$t = j\Delta t \tag{2.6}$$

여기서,  $T_{\max}$  : 측정변형률의 전체 샘플링 수  
 $\Delta t$  : 샘플링 변형률 데이터의 시간간격

이는 제원과 측정량을 아는 기지의 시험차량의 변형률응답을 이용하므로 모두 기지의 값이 된다. 여기서 영향선계수  $a_e$ 를 구하기 위해 오차의 합  $E$ 이 최소값을 가지도록  $a_e$ 로 편미분을 하면 식 (2.7)로 나타낼 수 있고, 이는  $F_{ed}$ (식 (2.8))와  $M_d$ (식 (2.9))로 정리 할 수 있다. 그리고  $F_{ed}$ ,  $M_d$ ,  $a_e$  값을 행렬식 (2.10) F, M, A로 나타낼 수 있다. 이를 계산하면 식 (2.1)의 영향선함수  $f[x(t)]$ 를 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial E}{\partial a_e} = 2 \sum_{j=0}^{T_{\max}} \left[ \sum_{n=1}^{N_{\max}} P_n \left( \sum_{d=0}^{D_{\max}} a_{ild} \cdot x_n(j\Delta t)^d \right) \right] \left[ \sum_{n=1}^{N_{\max}} P_n \cdot x_n(j\Delta t)^e \right] - 2 \sum_{j=0}^{T_{\max}} \sum_{n=1}^{N_{\max}} P_n \cdot x_n(j\Delta t)^e \cdot \varepsilon_{il}^*(j\Delta t) = 0 \tag{2.7}$$

$$F_{ed} = \sum_{j=0}^{T_{\max}} \sum_{n=1}^{N_{\max}} P_n \cdot x_n(j\Delta t)^d \cdot P_n \cdot x_n(j\Delta t)^e \tag{2.8}$$

$$M_d = \sum_{j=0}^{T_{\max}} \sum_{n=1}^{N_{\max}} P_n \cdot x_n(j\Delta t)^e \cdot \varepsilon_{il}^*(j\Delta t) \tag{2.9}$$

$$\{F\}\{A\} = \{M\} \tag{2.10}$$

### 2.3.2 차량의 중량 산정 방법

미지의 차량이 교량 위를 주행시 n축의 위치가  $x_n$ 이고 이에 의한 영향선과 측정량을 이용해 발생하는 변형률을 식 (2.11)과 같이 계산 할 수 있다. 계산변형률  $\varepsilon_{il}(t)$  과 실제 측정변형률  $\varepsilon_{il}^*(t)$ 의 차 제곱의 합계  $E$ 를 식 (2.12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_{il}(t) = \sum_{n=1}^{N_{\max}} A_n \cdot I_{ni}(x_n(t)) \quad (2.11)$$

여기서,  $N_{\max}$  : 차축 수  
 $A_n$  :  $n$ 축 중량  
 $I_{ni}(x_n)$  : 측정지점  $i$ 에서  $n$ 축이  $x_n$  위치할 때 영향선 값  
 $x_n$  :  $t$  시간일 때  $n$ 축의 위치

$$E = \sum_{i=1}^{I_{\max}} \sum_{j=0}^{T_{\max}} [\varepsilon_i(j\Delta t) - \varepsilon_i^*(j\Delta t)]^2 \quad (2.12)$$

$$t = j\Delta t \quad (2.13)$$

여기서,  $T_{\max}$  : 측정변형률의 전체 샘플링 수  
 $\Delta t$  : 샘플링 변형률 데이터의 시간간격  
 $I_{\max}$  : 변형률측정 위치 수

차량의 축중량에 대해 최소값을 가지는 오차의 합계( $E$ )를 산출하기 위해  $m$ 번째 축중으로 편미분하면 식 (2.14)로 나타낼 수 있고, 이는 식 (2.15), 식 (2.16)과 같이  $F_{mn}$ ,  $M_m$ 로 정리할 수 있다. 그리고  $F_{mn}$ ,  $M_m$ ,  $A_n$  값을 행렬식 (2.17)  $F$ ,  $M$ ,  $A$ 로 나타낼 수 있다. 이를 계산하면 차량중량을 산정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial A_m} = 2 \sum_{i=1}^{I_{\max}} \sum_{j=0}^{T_{\max}} \left[ \sum_{n=1}^{N_{\max}} A_n \cdot I_{ni}(x_n(j\Delta t)) \right] I_{mi}(x_m(j\Delta t)) \\ - 2 \sum_{i=1}^{I_{\max}} \sum_{j=0}^{T_{\max}} \varepsilon_i^*(j\Delta t) \cdot I_{mi}(x_m(j\Delta t)) = 0 \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$F_{mn} = \sum_{i=1}^{I_{\max}} \sum_{j=0}^{T_{\max}} I_{ni}(x_n(j\Delta t)) \cdot I_{mi}(x_m(j\Delta t)) \quad (2.15)$$

$$M_m = \sum_{i=1}^{I_{\max}} \sum_{j=0}^{T_{\max}} \varepsilon_i^*(j\Delta t) \cdot I_{mi}(x_m(j\Delta t)) \quad (2.16)$$

$$\{F\}\{A\} = \{M\} \quad (2.17)$$

## 2.4 연병행 주행시 차량 중량산정 방법

일반적인 교량에서 차량은 단독으로 주행하는 경우도 많지만 2대 이상의 차량이 연행 또는 연·병행으로 주행하는 경우도 빈번하게 나타난다. 이는 수직보강재 같은 영향선 길이가 짧은 부재는 영향이 없지만 주거더 같이 영향선 길이가 긴 부재의 경우 변형률응답이 겹쳐져서 나타나게 된다. 그러므로 BWIM시스템에서 연행 또는 연·병행 등의 주행패턴이 차량의 중량 산정에 미치는 영향을 정확하게 평가하기 위해서는 각각의 주행차량에 대한 변형률응답곡선을 분리하는 것이 중요하다.

주행차량이 2차로 교량을 2차선으로 주행하는 경우, 측정지점  $i$ 에서의 변형률응답곡선을  $\varepsilon_{i2}(t)$ 라고 하면 이 변형률응답곡선으로부터 주행차량의 기준영향선  $f_{i2}(x(t))$ 을 도출할 수 있다. 또한 1차선으로 주행 할 때 측정지점  $i$ 의 변형률응답곡선을  $\varepsilon_{i1}(t)$ 라 할 수 있고, 기준영향선  $f_{i1}(x(t))$ 을 도출 할 수 있다.

### 2.4.1 병행주행

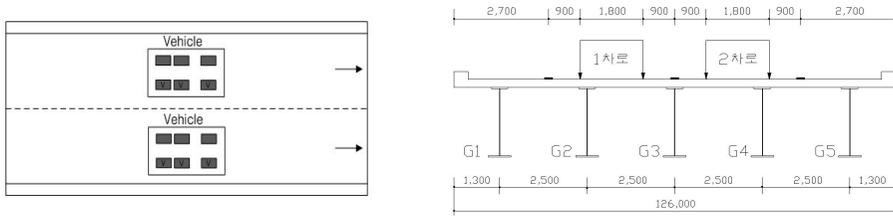
병행주행의 경우 BWIM에 의한 중량 추정에 사용되는 임의차량에 대한 특정 거더의 변형률응답곡선은 다음과 같이 산출한다.

① 만일 그림 2-5(a)와 같이 2차선의 교량을 동시에 주행하는 경우(병행주행, 차두간격 0m), 측정지점  $i$ (여기서는  $G_4$ )에서 얻어지는 변형률응답곡선을  $\varepsilon_{G_4\text{병행}}(x(t))$ 로 나타낼 수 있다.

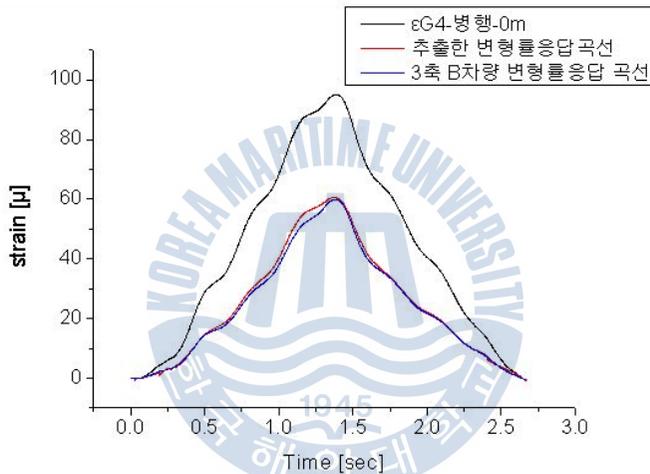
② 1차로를 주행하는 차량의 측정거더  $G_4$ 에 대한 기준영향선은  $f_{G_4,1}(x(t))$ 로 나타낼 수 있으며, 2차로를 주행하는 차량의 측정거더  $G_4$ 에 대한 기준영향선은  $f_{G_4,2}(x(t))$ 로 나타낼 수 있다.

③ 측정거더  $G_4$ 에서의 주행차량에 대한 기준영향선의 비율을 먼저 산출한다.

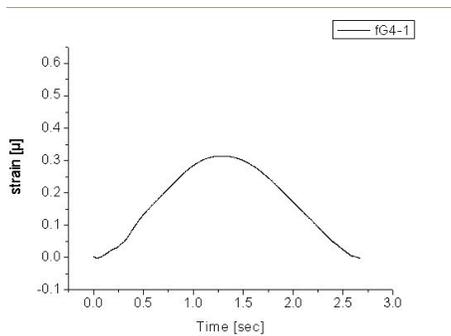
이를 병행주행에 따른 변형률응답곡선  $\varepsilon_{G_4\text{병행}}(x(t))$ 에 곱해주면 각각의 주행차량의 측정거더  $G_4$ 에 대한 변형률응답곡선을 추출할 수 있다.



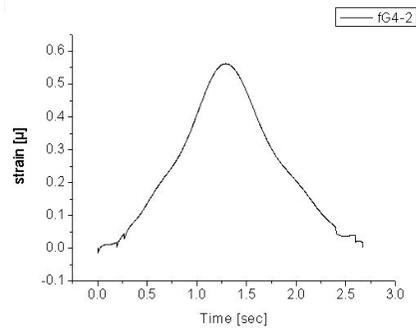
(a) 병행주행의 일례



(b) 변형률응답곡선



(c)  $f_{G_4 1}(x(t))$



(d)  $f_{G_4 2}(x(t))$

그림 2-5. 병행주행시 변형률응답곡선 추출 일례

## 2.4.2 연행주행

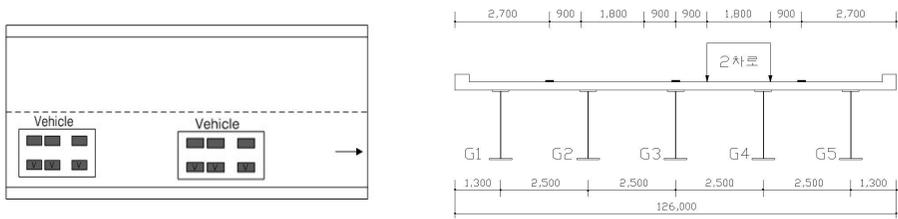
연행주행에서 각 주행차량에 대한 변형률응답곡선을 분리하는 방법은 병행주행시의 변형률응답곡선의 분리방법과 동일하나 차량의 연행주행으로 인해 발생되는 각 주행차량의 시간 차이에 의한 주행특성을 분리하는 것이 필요하다.

① 그림2-6(a)와 같이 2차로를 2대의 차량이 나란히 주행 할 경우 측정거더  $G_4$ 에서 얻어지는 변형률응답곡선을  $\varepsilon_{G_4\text{연행}-x_m}(t)$ 로 나타낼 수 있다.

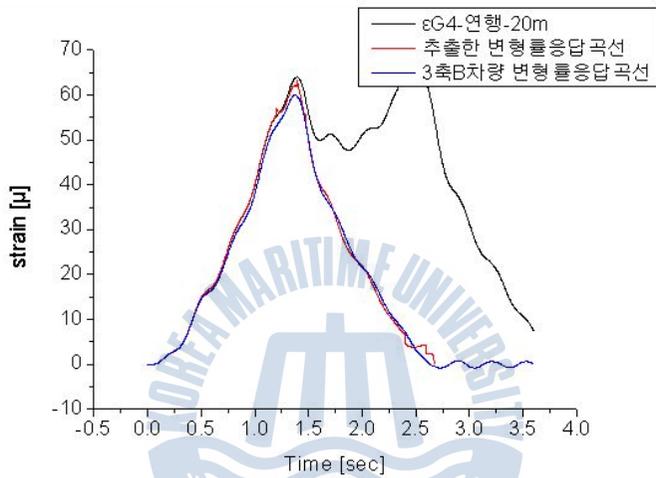
② 2차로를  $x_m$ 의 간격으로 연행주행하는 경우, 먼저 각 주행차량에 대한 수직보강재 변형률응답을 이용하여 통과차량의 주행간격을 산정한다.

③ 2차로에서 선행하는 차량을 B차량이라고 하면 B차량의 측정거더  $G_4$ 에 대한 기준영향선은  $f_{G_2}(x(t))$ 로, 2차로 후행하는 차량을 B차량이라고 하면 A차량의 측정거더  $G_4$ 에 대한 기준영향선은  $f_{G_2'}(x(t))$ 로 나타낼 수 있고 이들을  $x_m$ 만큼의 지연시간을 적용하여 기준영향선의 비율을 산출한다.

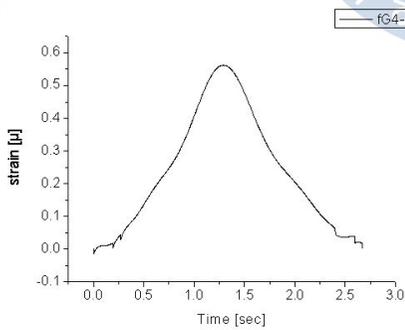
④ 측정거더  $G_4$ 에서 얻어진 비율을  $\varepsilon_{G_4\text{연행}-x_m}(t)$ 에 지연시간을 적용하여 곱하면 각각의 주행차량의 측정거더  $G_4$ 에 대한 변형률응답곡선을 추출할 수 있다.



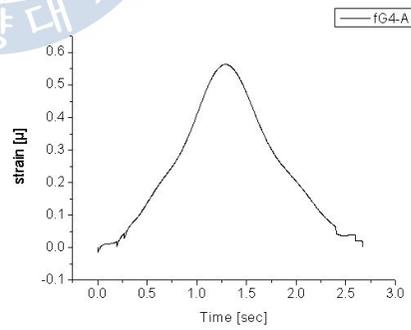
(a) 연행주행의 일례



(b) 변형률응답곡선



(c)  $f_{G_1-B}(x(t))$



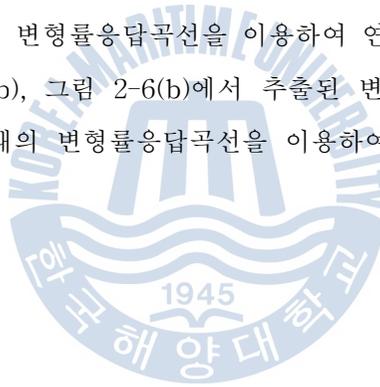
(d)  $f_{G_1-A}(x(t))$

그림 2-6. 연행주행시 변형률응답곡선 추출 일례

표 2-1. 연병행주행시 분리된 차량의 중량산정 결과

Item		Weight			
		1 Axle (kN)	2Axle+3Axle (kN)	Gross (kN)	
Exact Value		76	240	316	
B Vehicle	Original	Estimated	76.42	239.38	315.80
		Error Rate(%)	0.55	-0.26	-0.06
	Zigzag	Estimated	86.22	241.16	327.38
		Error Rate(%)	13.44	0.48	3.60
	Series	Estimated	85.23	238.22	323.45
		Error Rate(%)	12.14	-0.74	2.36

표 2-1은 동적해석프로그램인 DAP-1(Dynamic Analysis Program)(이희현, 1990)에서 도출된 이론적 변형률응답곡선을 이용하여 연병행 분리시 중량을 추정 한 결과이다. 그림 2-5(b), 그림 2-6(b)에서 추출된 변형률응답곡선을 이용하여 중량을 추정한 값과 원래의 변형률응답곡선을 이용하여 중량을 추정한 값을 비교하였다.



## 2.5 차량 중량산정시 오차 기준

표 2-2에 BWIM시스템에 의한 중량 추정시의 발생오차에 대한 등급분류표를 나타내었다. 이는 유럽에서 사용되는 분류법으로 오차등급에 따라 총 6등급으로 분류하였다.

표 2-2. 정확도 분류의 허용오차

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



---

## 3장. BWIM 현장실험

---

### 3.1 현장실험 개요

BWIM시스템의 중량추정에 미치는 영향인자의 영향정도를 평가하기 위해 교량의 상부구조형식이 다른 3개의 대상교량을 선정하여 현장시험을 실시하였다.

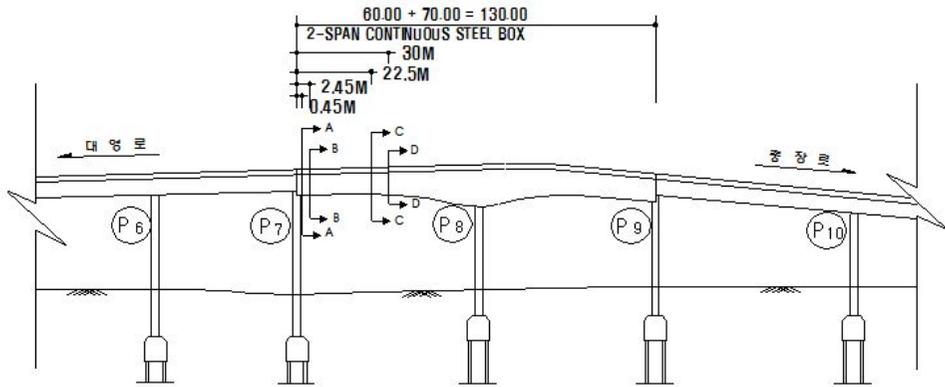
현장실험에서 변형률데이터는 대상교량의 각 구조상세에 전기저항식 변형률센서를 사용하였고, 이로부터 얻어진 동적응답특성은 동적계측기기(EDX-100A)를 사용하여 취득하였다. 또한 BWIM시스템으로부터 추정되는 차량속도와 실제 차량의 주행속도를 비교하기 위하여 주행차량의 속도를 신뢰성이 인증된 스피드건(Bushell Speed Gun 101911)을 사용하여 측정하였다.

#### 3.1.1 대상교량 I

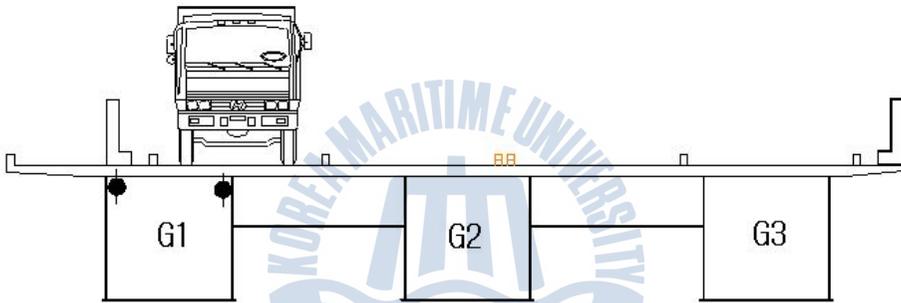
부산광역시 소재의 I 교량은 PSC Box 거더와 Steel Box 거더가 혼재된 과선 교량이며, 본 연구에서는 Steel Box 거더만을 대상으로 하였다. 이 구간은 3개의 Box거더로 이루어진 2경간 연속교이다. 표 3-1 및 그림 3-1에 대상교량 I의 개요와 교량의 일반도 및 측정 위치를 나타내었다.

표 3-1. I 교량의 개요

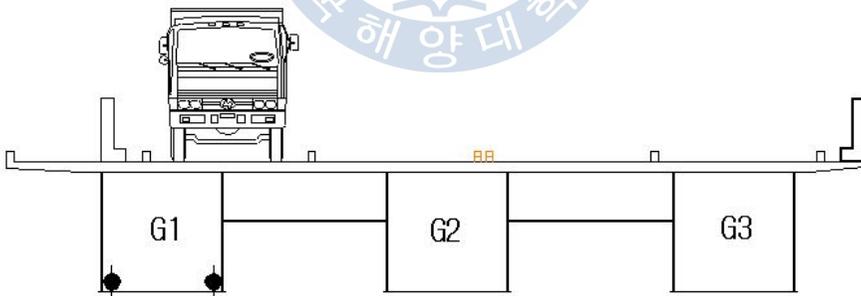
Superstructure Type	Length	Width	Plan	Design Load
Steel Box Girder	60m+70m = 130m	16m	90°(Right)	DB-24



(a) 측면도



(b) A-A단면, B-B단면



(c) C-C단면, D-D단면

그림 3-1. I 교량의 전체도 및 측정위치 개요

BWIM시스템에 의한 주행차량의 속도와 축간거리를 추정하기 위하여 그림 3-1과 같이 대상교량의 P7에서 P8방향으로 지점으로부터 0.45m(A-A단면) 및 2.45m(B-B단면) 이격된 Box거더 내부의 수직보강재를 대상으로 상부플랜지 상

단으로부터 20mm지점에 변형률센서를 수직방향으로 부착하였다. 수직보강재의 간격은 2m이다.

그리고 주행차량이 중량을 추정하기 위하여 거더에서의 최대모멘트 발생위치인 3L/8(C-C단면) 및 거더 중앙 위치인 L/2(D-D단면)의 거더 하부플랜지에 변형률센서를 교축방향으로 부착하였다. 변형률데이터의 sampling rate는 200Hz로 측정하였다.

I 교량의 현장실험에 사용된 주행차량은 토사를 만재한 3축 덤프트럭 2대이며, 차량주행은 실제 주행차선을 고려하여 P9에서 P7방향으로 실시하였다. 주행차량의 제원, 중량 그리고 주행방법을 표 3-2와 표 3-3에 나타내었다.

표 3-2. 시험차량의 제원 및 중량( I 교량)

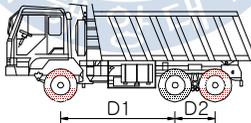
Vehicle Type	Information		1st Axle	2nd Axle	3rd Axle
3 Axle - A Vehicle	Weight (kN)	314.45	81.05	117.2	117.2
3 Axle - B Vehicle	Weight (kN)	300.10	73.48	110.46	110.46
Axle Distance	1st Axle-2nd Axle ( $D_1$ )		3.225		
	2nd Axle-3rd Axle ( $D_2$ )		1.3		
Axle Position of Vehicle					

표 3-3. 시험차량의 주행방법( I 교량)

Item	Vehicle Type	Speed	Running Lane	Remark
Load Case1	B	21km/h	2	for Reference
Load Case2	A	36km/h	2	
Load Case3	B	37km/h	2	
Load Case4	A	43km/h	2	

### 3.1.2 대상교량 II

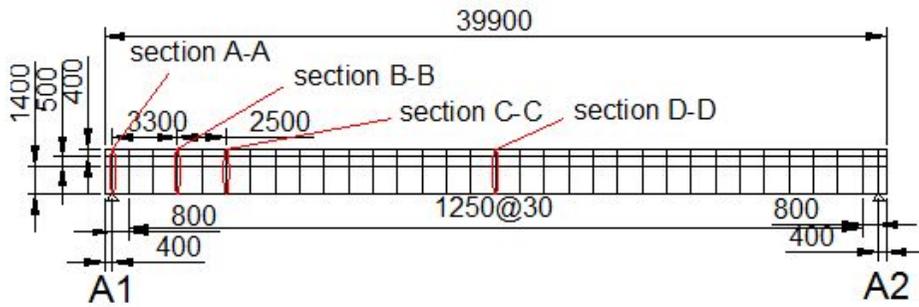
플레이트 거더교 형식의 II교량은 일반국도 39호선에 위치한 교장 40m의 단경간 플레이트거더교이며, 120°의 사각을 갖는 사교이다. 표 3-4 와 그림 3-2에 대상교량의 개요와 일반도 및 측정위치의 개요를 나타내었다.

BWIM에 의한 주행차량의 정보를 추정하기 위하여 그림 3-2에 나타난 것과 같이 대상교량의 지점으로부터 3.3m(B-B단면) 및 5.80m(C-C단면) 이격된 수직보강재를 대상으로 상부플랜지 상단으로부터 200mm 이격된 위치에 변형률센서를 수직방향으로 부착하였다. 측정대상 수직보강재간격은 2.5m이다.

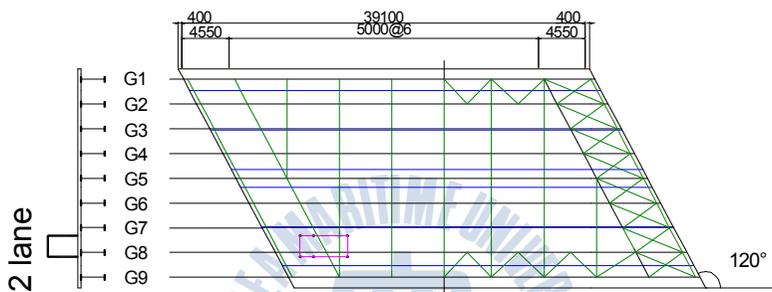
그리고 주행차량의 중량을 추정하기 위하여 거더에서의 최대모멘트 발생위치인 거더 중앙 위치인  $L/2$ (D-D단면)의 거더의 하부플랜지에 변형률센서를 교축방향으로 부착하였다. 변형률데이터의 sampling rate는 모두 100Hz로 실시하였다.

표 3-4. II교량의 개요

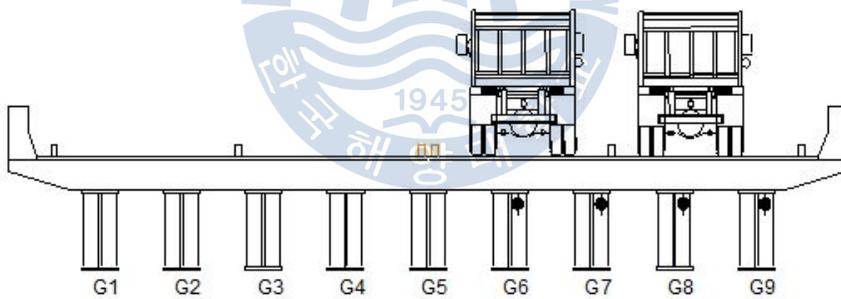
Superstructure Type	Length	Width	Plan	Design Load
Plate Girder	40m	19.5m	120°(Skew)	DB-24



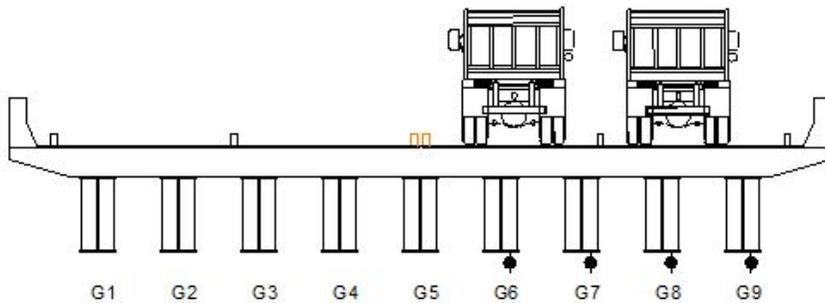
(a) 단면도



(b) 평면도



(c) A-A단면, B-B단면, C-C단면



(d) D-D단면

그림 3-2. II교량의 전체도 및 측정위치 개요

II 교량의 현장실험에서도 3축의 덤프트럭 2대를 사용하였다. 한 대는 토사를 만재한 차량이고, 다른 한 대는 공차로 실험을 실시하였다. 차량의 제원 및 중량을 표 3-5에, 재하실험 주행방법을 표 3-6에 나타내었다. II 교량의 현장실험에서는 실제 교통흐름의 다양성 및 변동성을 반영하기 위하여 다양한 주행방법에 의한 현장실험을 실시하였다. 차량의 주행은 모두 각 차로의 중량을 통과하였으며, 주행은 A1에서 A2방향으로 실시하였다.

표 3-5. 시험차량의 제원 및 중량(II교량)

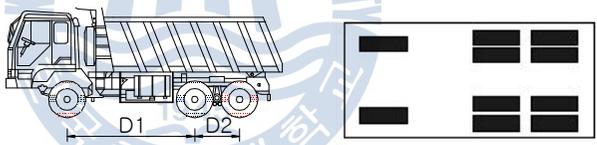
Vehicle	Information		1st Axle	2nd Axle	3rd Axle
3 Axle - C Vehicle	Weight (kN)	248.62	53.90	97.36	97.36
3 Axle - D Vehicle	Weight (kN)	129.06	49.58	39.74	39.74
Axle Distance	1st Axle-2nd Axle ( $D_1$ )		3.3m		
	2nd Axle-3rd Axle ( $D_2$ )		1.3m		
Axle spacing of the test vehicle					

표 3-6. 시험차량의 주행방법(II교량)

Item	Vehicle Type	Speed	Running Lane	Remark
Load Case1	C	62km/h	2	for Reference
Load Case2	D	41km/h	2	
Load Case3	D	62km/h	2	
Load Case4	D	82km/h	2	
Load Case5 (Zigzag)	C	60km/h	1	Headway 0m
	D		2	
Load Case6 (Zigzag)	C	60km/h	1	Headway 20m
	D		2	
Load Case7 (Series)	C, D	60km/h	2	Headway 30m

### 3.1.3 대상교량 III

부산광역시 소재의 III교량은 Steel Box 거더로 5경간 연속교이다. 대상교량III의 개요와 교량의 측면도 및 게이지 부착위치를 표 3-7와 그림 3-3에 나타내었다. 교량의 대상구간은 제일 왼쪽경간을 대상으로 하였다.

표 3-7. III교량의 개요

Superstructure Type	Length	Width	Plan	Design Load
Steel Box Girder	50 + 50 + 60 + 50 + 50 = 260m	19.5m	90°(right)	DB-24/ DL-24

III교량에서 사용된 트럭은 3축 덤프트럭 1대를 사용하였다. 역시 토사를 만재한 차량으로 속도를 달리하여 총 6번 실시하였다. 차량의 제원 및 중량을 표 3-8에, 재하실험 주행방법을 표 3-9에 나타내었다. 차량의 주행은 모두 각 차로의 중앙을 통과하였으며, 주행방향은 A2에서 P22방향으로 주행하였다. sampling rate는 200Hz로 측정하였다.

표 3-8. 시험차량의 제원 및 중량(III교량)

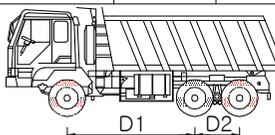
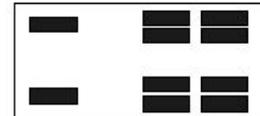
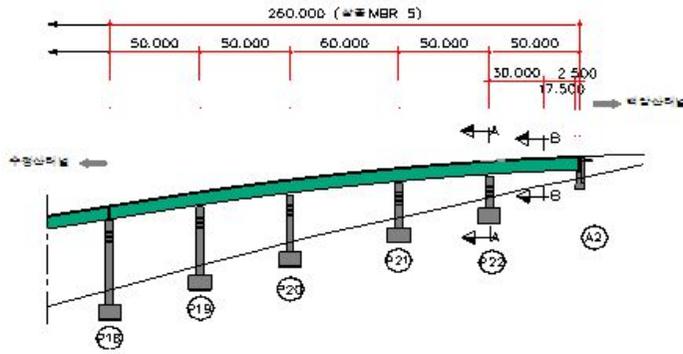
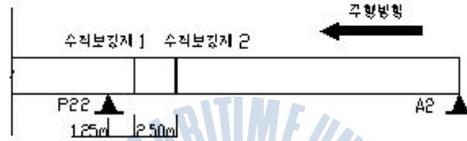
Vehicle	Information	1st Axle	2nd Axle	3rd Axle
3 Axle - E Vehicle	Weight (kN)	296.70	58.60	119.05
Axle Distance	Length (m)	4.68	D1: 3.40	D2: 1.28
Axle spacing of the test vehicle				

표 3-9. 시험차량의 주행방법(III교량)

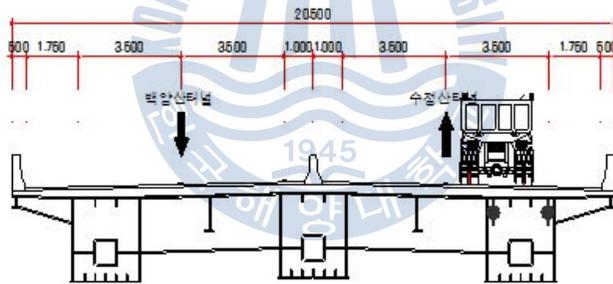
Item	Vehicle Type	Speed	Running Lane	Remark
Load Case1	E	20km/hr	2	for Reference
Load Case2	E	30km/hr	2	
Load Case3	E	40km/hr	2	
Load Case4	E	50km/hr	2	
Load Case5	E	60km/hr	2	
Load Case6	E	70km/hr	2	



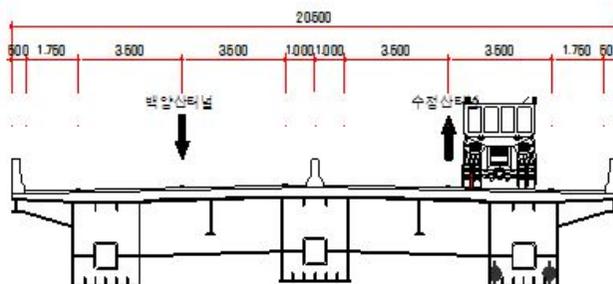
(a) 측면도



(b) A-A단면 상세도



(c) A-A단면



(d) B-B단면

그림 3-3. Ⅲ교량의 전체도 및 측정위치 개요

## 3.2 현장실험 결과 및 분석

### 3.2.1 대상교량 I

#### (1) 주행차량의 속도 및 축간거리 추정

수직보강재에서 얻어진 변형률응답곡선을 이용하여 주행차량의 속도 및 축간 거리를 계산하였다.

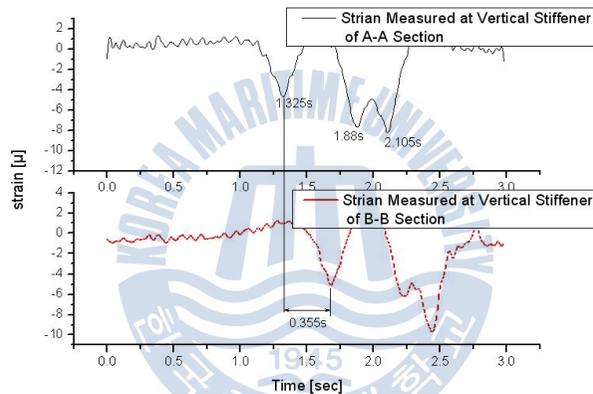


그림 3-4. I 교량의 수직보강재 변형률응답곡선의 일례

수직보강재에서 얻어진 변형률응답곡선의 일례를 그림 3-4에 나타내었다. 두 수직보강재의 이격거리는 알고 있는 기지의 값이므로 1축의 피크값의 시간차를 구하면 속도  $V$ 는 수직보강재의 이격거리  $l$ /1축의 시간차  $t$ 로 쉽게 구할 수 있다. 표 3-10에 I 교량의 속도와 축간거리의 추정결과를 나타내었다.

수직보강재의 변형률응답곡선을 이용할 경우 실제의 속도 및 1축과 2축 사이의 축간거리는 비교적 정확하게 추정할 수 있지만, 2축과 3축 사이의 축간거리 추정오차는 속도가 증가할수록 커진다는 것을 알 수 있다. 2축과 3축 사이의 거리가 짧아 속도가 증가할수록 측정된 변형률응답에 각축의 영향이 뚜렷이 나타나지 않고 인접축의 축중의 영향이 중첩되어 나타기기 때문으로 판단된다.

표 3-10. 속도와 축간거리 추정결과 ( I 교량)

Item	Vehicle Speed (km/h)	Axle Distance (m)		
		1 <sup>st</sup> Axle - 2 <sup>nd</sup> Axle	2 <sup>nd</sup> Axle - 3 <sup>rd</sup> Axle	
Load Case 1	Estimated	20.28	3.127	1.268
	Exact	21	3.225	1.300
	Error Rate	(3.43%)	(-3.04%)	(-2.46%)
Load Case 2	Estimated	35.99	3.150	1.200
	Exact	36	3.225	1.300
	Error Rate	(-0.03%)	(-2.33%)	(-7.69%)
Load Case 3	Estimated	37.49	3.158	1.105
	Exact	37	3.225	1.300
	Error Rate	(1.32%)	(-2.08%)	(-15%)
Load Case 4	Estimated	42.69	3.394	0.970
	Exact	43	3.225	1.300
	Error Rate	(-0.72%)	(5.24%)	(-25%)

## (2) 주행차량의 중량추정

주행차량의 속도가 BWIM 중량추정에 미치는 영향을 파악하기 위하여 주행차량B가 사용된 Load Case1을 기지의 차량으로 하여 속도와 중량이 다른 주행차량A를 사용한 Load Case2,4에 대한 중량을 추정하였다. 그리고 측정위치에 따른 영향을 판단하기 위하여 그림 3-1(a)의 C-C단면과 D-D단면에서 계측된 변형률 응답을 이용한 추정값을 표 3-11에 각각 나타내었다.

두 경우 모두 표 2-2에 나타난 유럽에서 사용되는 오차분류 등급의 A를 만족하는 것을 알 수 있다. 이로부터 동일차량의 형식의 경우에는 주행차량의 속도 및 중량의 차이, 계측위치의 차이가 차량의 중량추정에 영향을 거의 미치지 않는 것으로 판단된다. 향후 연구에서는 다양한 차량 종류 및 차중특성에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

표 3-11. 중량 추정결과 (I교량)  
(a) at Section of 3L/8 (C-C Section)

Item		Weight					
		1 Axle (kN)	2 Axle (kN)	3 Axle (kN)	2Axle+3Axle (kN)	Gross (kN)	
Exact Value		81.05	117.21	117.21	234.42	315.47	
A Vehicle	36 km/hr	Estimated	81.30	39.60	169.52	236.13	317.42
		Error Rate(%)	0.31	-66.21	67.67	0.73	0.62
	43 km/hr	Estimated	81.65	243.66	-5.32	238.34	320.00
		Error Rate(%)	0.74	107.89	-104.54	1.67	1.44

(b) at Section of L/2 (D-D Section)

Item		Weight					
		1 Axle (kN)	2 Axle (kN)	3 Axle (kN)	2Axle+3Axle (kN)	Gross (kN)	
Exact Value		81.05	117.21	117.21	234.42	315.47	
A Vehicle	36 km/hr	Estimated	81.15	49.37	190.03	239.40	320.56
		Error Rate(%)	0.13	-57.88	62.13	2.13	1.61
	43 km/hr	Estimated	81.21	-47.39	289.29	241.90	323.11
		Error Rate(%)	-0.53	-140.43	149.81	3.19	2.42



### 3.2.2 대상교량 II

#### (1) 주행차량의 속도 및 축간거리 추정

II 교량의 수직보강재에서 얻어진 변형률응답곡선의 일례 및 주행차량의 특성인 차량의 속도와 축간거리 추정 결과를 그림 3-5 및 표 3-12에 나타내었다.

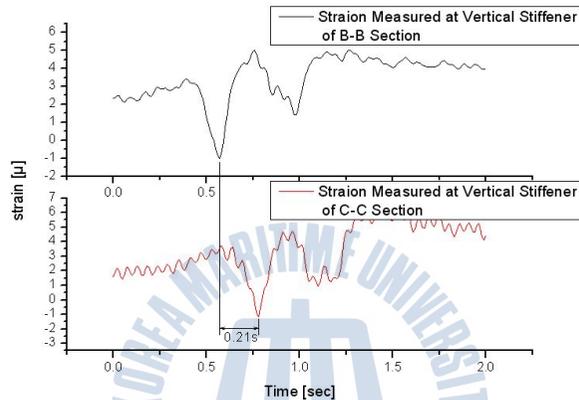


그림 3-5. II 교량의 수직보강재 변형률응답곡선의 일례

표 3-12. 속도 및 축간거리 추정결과 (II 교량)

Item	Vehicle Speed (km/h)	Axle distance (m)		
		1st Axle - 2nd Axle	2nd Axle - 3rd Axle	
Case 1	Estimated	69.23	4.03	1.53
	Exact	62	3.30	1.30
	Error Rate	(11.66%)	(22.12%)	(17.69%)
Case 2	Estimated	42.85	3.45	1.43
	Exact	41	3.30	1.30
	Error Rate	(4.53%)	(4.54%)	(10.00%)
Case 3	Estimated	69.23	3.46	1.73
	Exact	62	3.30	1.30
	Error Rate	(11.66%)	(4.85%)	(33.08%)
Case 4	Estimated	81.81	3.41	1.36
	Exact	82	3.30	1.30
	Error Rate	(-1.01%)	(3.33%)	(4.62%)

이상의 결과로부터 속도에 대한 추정오차는 10%내외이나 축간거리 추정오차는

최대 33%정도로 나타내고 있다.

## (2) 주행차량의 중량추정

II교량에서는 그림 3-2(b)에 나타낸 바와 같이 8번거더에서 주행차량의 영향이 가장 크게 나타나므로 8번 거더에서의 변형률응답을 이용하여 주행차량의 중량을 추정하였다. 표 3-13에 B교량에서의 속도 및 중량차이에 따른 중량을 추정하였다. C차량을 이용한 Load Case1을 기지의 차량으로 하여 D차량을 이용한 Load Case2, 3, 4의 중량을 추정하였다.

표 3-13. 중량 추정결과 (II교량)

Item		1st Axle (kN)	2nd Axle +3rd Axle (kN)	Gross (kN)	
Exact		49.59	79.48	129.07	
D Vehicle	40 km/hr	Estimated	11.02	96.41	
		Error Rate	(-77.78%)	(21.31%)	(-16.76%)
	60 km/hr	Estimated	50.43	76.23	126.66
		Error Rate	(1.70%)	(-4.09%)	(-1.86%)
	80 km/hr	Estimated	48.57	60.54	109.10
		Error Rate	(-2.06%)	(-23.83%)	(-15.47%)

I 교량에 비해 II교량에서는 속도에 따른 중량 추정에 있어서 오차가 크게 발생하였다. 이것은 차량의 속도 및 축간거리 추정에 있어서 사교인 II교량의 구조적인 특성에 의한 것으로 판단된다. 즉, 그림 3-2(b)에 나타낸 것과 같이 차량의 주행속도 및 중량 차이에 관계없이 사교의 구조적 특성에 의해 주행차량의 축중분포 및 하중 전달이 간섭하는 특성을 나타내기 때문인 것으로 판단된다.

이러한 것은 외국의 연구에서 지적한 것과 같이 사교인 교량에는 BWIM시스템 적용에 어려움이 있다는 보고와도 일치하고 있다. 따라서 사교의 경우는 가능한 축하중 전달이 명확한 거더를 선정하여 차량하중을 추정하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

### 3.2.3 대상교량 III

#### (1) 주행차량의 속도 및 축간거리 추정

III교량의 수직보강재에서 얻어진 변형률응답곡선의 일례 및 주행차량의 특성인 차량의 속도와 축간거리 추정 결과를 그림 3-6 및 표 3-14에 나타내었다. III교량에서의 차량속도는 주행실험 중 운전자가 직접 속도계기판을 읽어 통보한 값이다. 따라서 그 값이 정확한 값이라 판단하기에는 어렵다.

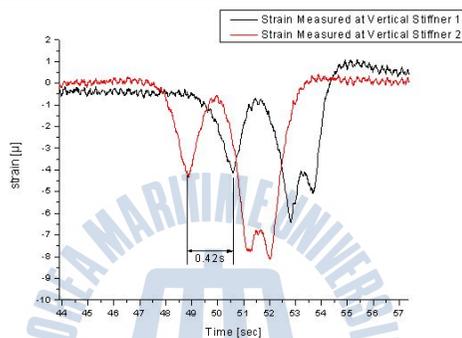


그림 3-6. III교량의 수직보강재 변형률응답곡선의 일례

표 3-14. 속도 및 축간거리 추정결과 (III교량)

Item	Vehicle Speed (km/h)	Axile distance (m)		
		1st Axle - 2nd Axle	2nd Axle - 3rd Axle	
Load Case 1	Estimated	21.43	3.30	1.13
	Exact	20	3.40	1.28
	Error Rate	7.10%	2.94%	11.72%
Load Case 2	Estimated	29.03	3.43	1.13
	Exact	30	3.40	1.28
	Error Rate	3.23%	0.88%	11.72%
Load Case 3	Estimated	43.90	3.35	1.22
	Exact	40	3.40	1.28
	Error Rate	9.75%	1.47%	4.69%
Load Case 4	Estimated	54.55	3.64	1.06
	Exact	50	3.40	1.28
	Error Rate	9.10%	7.05%	17.19%
Load Case 5	Estimated	62.07	3.45	1.03
	Exact	60	3.40	1.28
	Error Rate	3.45%	1.47%	19.53%
Load Case 6	Estimated	75	3.65	0.83
	Exact	70	3.40	1.28
	Error Rate	7.14%	7.35%	35.15%

## (2) 주행차량의 중량추정

Ⅲ교량의 하부플랜지에서 얻어진 변형률응답곡선을 이용하여 차량의 중량을 산정하였다. 60km/h로 주행한 Load Case5번의 차량을 기준차량으로 하여 나머지 Case 차량의 중량을 산정하였다. 그 결과를 표 3-15에 나타내었다.

표 3-15. 중량 추정결과 (Ⅲ교량)

Item		1st Axle (kN)	2nd Axle +3rd Axle (kN)	Gross (kN)	
Exact		58.60	238.10	296.70	
E Vehicle	20 km/hr	Estimated	123.97	170.70	294.67
		Error Rate	111.55%	-28.31%	0.69%
	30 km/hr	Estimated	-22.65	297.76	275.10
		Error Rate	-138.66%	25.06%	-7.28%
	40 km/hr	Estimated	25.23	255.67	280.89
		Error Rate	-56.95%	7.38%	-5.33%
	50 km/hr	Estimated	154.72	134.43	289.15
		Error Rate	164.03%	-43.54%	-2.54%
	70 km/hr	Estimated	118.22	173.10	291.33
		Error Rate	101.75%	-27.30%	-1.81%

### 3.3 BWIM시스템에 영향을 미치는 인자

BWIM시스템 중량추정에 영향을 주는 인자들을 분류하여 표 3-16에 나타내었다.

표 3-16. BWIM 중량추정에 영향을 미치는 인자

Br.	Girder Type	Bridge Type	Plan View	Sampling Rate	Running Speed (km/hr)	Running Pattern	Measured Position	
							Girder	Vertical Stiffener
I	Box	2 Span Continuous	Right	200Hz	20~43	Single	L/2, 3L/8	20mm
II	Plate	Simple	Skew	100Hz	41~62	Single Serial Zigzag	L/2	200mm
III	Plate	5 Span Continuous	Right	200Hz	20~70	Single	L/2	10mm

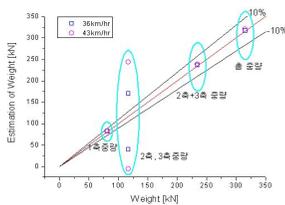
#### 3.3.1 거더형식, 스펜의 연속유무, 교량평면에 따른 영향

이 절에서는 교량평면선형(직교, 사교)에 따른 차량정보추정의 정확도를 조사하였다. 그림 3-7에 I 교량과 II 교량의 중량추정의 정밀도를 그림으로 나타내었다.

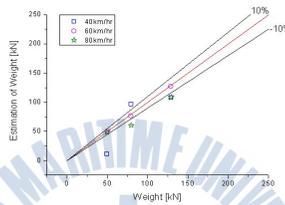
표 3-10 및 표 3-11에 나타난 것과 같이 BWIM시스템의 방법을 이용하면 직선교의 경우 매우 만족할 만한 차량정보를 추정할 수 있음을 알 수 있었으며, 중량 추정 오차도 유럽에서 사용하는 오차등급 A를 만족하는 것을 알 수 있다. 그러나 표 3-12 및 표 3-13에 나타난 것과 같이 사교인 II교량에서는 차량정보 추정 오차가 매우 클 가능성이 있음을 알 수 있다. 이러한 원인으로 사각으로 인한 하중 횡분배 차이 때문에 발생한 것으로 판단된다. 이로부터 향후 차량정보 추정을 위한 대상교량 선정시 가능한 직선교를 선정하는 것이 좋을 것으로 판단되고,

사교를 선정해야만 하는 부득이 한 경우에는 충분한 이론적 검토 후에 하중전달이 명확한 위치를 선정하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

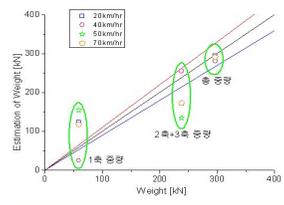
그리고 스패의 유무에 대해서도 같이 비교하였다. 2경간 연속교인 I 교량까지는 어느정도 축중량의 정확도가 높게 나타났지만 5경간 연속교인 III 교량의 축중량은 1축, 2축+3축 중량 모두 오차가 20%이상의 높은 오차율을 보였다. 이를 바탕으로 BWIM교량 선정시 단경간 단순보나 최대 2경간까지의 연속교를 선택하는 것이 정확도에 유리할 것으로 판단된다.



(a) 대상교량 I



(b) 대상교량 II



(c) 대상교량 III

그림 3-7. 중량추정 정밀도

### 3.3.2 Sampling rate에 따른 영향

변형률테이더의 Sampling rate가 차량정보의 관독 및 중량추정에 미치는 영향을 조사하였다.

이를 조사하기 위해 프로그램 DAP-1(Dynamic Analysis Program)을 사용하였다(이희현, 1990). 이 프로그램은 주행하중, 주행질량 및 SDOF 모델을 지원하며 Newmark- $\beta$  법에 의한 진동해석을 할 수 있는 특징을 가지고 있다. 해석에서는 차량속도를 60km/h로 일정하게 하고 측정주파수(Hz)를 변화시켜가면서 그 영향을 평가하였다.

표 3-17에 Sampling rate가 주행차량에 대한 속도추정에 미치는 오차율을 나타내었다. 주파수 100Hz까지는 실제속도에 비하여 추정속도가 2%미만의 정확도를 나타내었으나, 50Hz에서는 속도추정 오차가 4%이상으로 커지는 것을 알 수

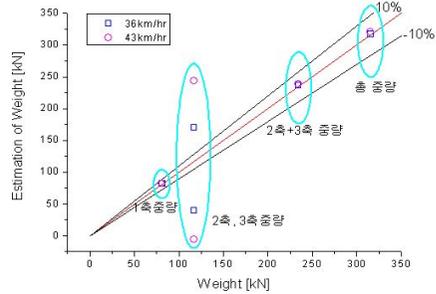
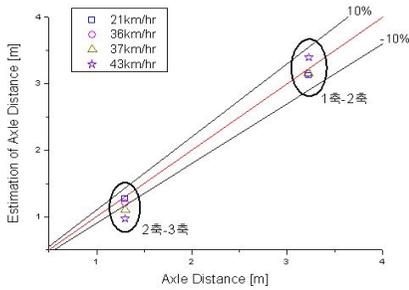
있다. 현장측정에서는 Sampling rate를 100Hz 및 200Hz로 실시하였으며, 이 연구에서는 속도추정에서는 Sampling rate의 영향은 없는 것으로 나타났다. 국내에서 진행 중인 다른 연구에서의 현장실험에서는 500Hz이상으로 실시하는 등 향후 추가 실험시에는 높은 Hz로 측정하는 것이 유리 할 것으로 판단된다.

표 3-17. Sampling rate에 따른 속도추정 오차율

Sampling Rate	Estimated Speed	Error Rate
800Hz	59.67km/h	0.55%
400Hz	59.21km/h	1.32%
200Hz	59.21km/h	1.32%
100Hz	60.81km/h	1.35%
50Hz	62.50km/h	4.17%

### 3.3.3 주행속도에 따른 영향

주행속도에 대한 영향을 알아보기 위하여 I 교량의 BWIM정밀도를 그림 3-8에 나타내었다. I 교량 및 II 교량의 경우 표 3-10 및 표 3-12에 나타낸 것과 같이 차량의 주행 속도가 빨라져도 차량의 축간거리 산정에는 유의한 차이가 없으나, 축간거리가 짧은 2축-3축의 축간거리 산정에는 오차가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 축중량에 대한 오차도 속도가 증가하면 약간 증가하는 경향을 나타내었으나, 2축과 3축을 하나의 축으로 가정하고 중량을 산정하면 축중량 및 전체중량의 산정에 주행속도의 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.



(a) I 교량의 속도에 따른 축간거리 정밀도 (b) I 교량의 속도에 따른 중량 정밀도

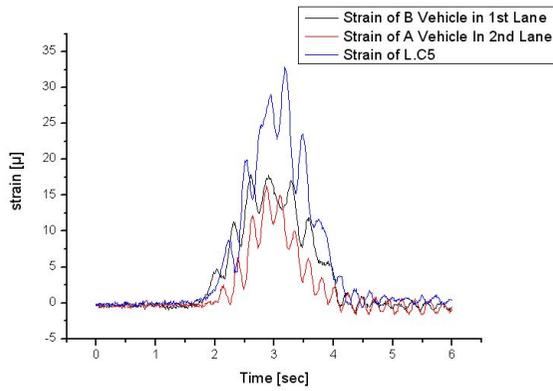
그림 3-8. 주행 속도에 BWIM 정밀도

### 3.3.4 주행패턴에 따른 영향

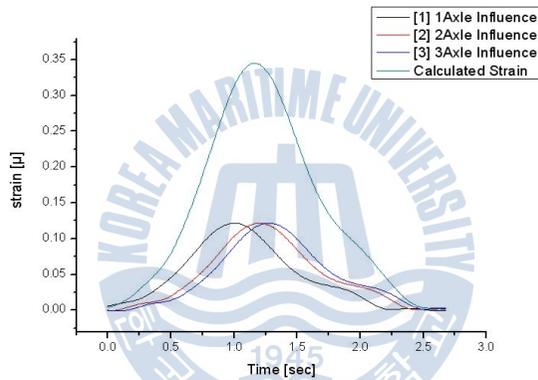
BWIM에서 차량의 주행패턴이 중량추정에 미치는 영향을 분석하기 위하여 대 상교량Ⅱ에서 실시한 Load Case5에 대한 변형률응답곡선을 사용하여 검토하였다.

그림 3-9(a)에 Ⅱ교량의 Load Case5에 대한 변형률응답곡선 및 각각의 차선에 단독주행한 C, D차량의 변형률응답곡선을 나타내었다. 그리고 그림 3-9(b) 및 (c)에 C 및 D차량이 각각 1차로 및 2차로를 단독주행을 했을 경우에 얻어지는 각 차축 및 전체에 대한 기준영향선을 나타내었다.

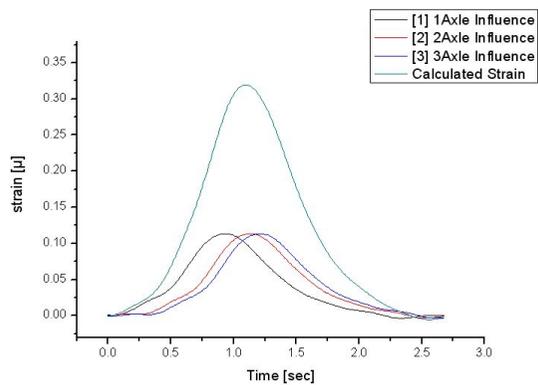
Ⅱ교량에서의 Load Case5~7에 대한 차량주행패턴으로부터 얻어진 변형률응답 곡선에 대하여 2.4절에서 기술한 차량주행패턴에 따른 각각의 변형률응답곡선을 분리하고 2차선을 주행한 D차량에 대한 중량추정을 실시하였다. 표 3-18에 D차 량에 대한 중량추정결과를 나타내었다(Before 항목). 표 3-18에 나타낸 것과 같 이 총중량 추정에 대한 오차는 ±10%내외로 표 2-2에 나타낸 유럽에서의 오차등 급 분류 B급을 만족한다. 그러나 축중의 정확도는 A교량에 비하여 떨어지는 것 을 알 수 있다. 이것은 앞에서 기술한 것과 같이 교량형식 등의 영향으로 판단된 다.



(a) Comparison between Measured strain



(b) Calculated Strain Curve of A Vehicle at 1st Lane



(c) Calculated Strain Curve of B Vehicle at 2nd Lane

그림 3-9. 병행주행시 거더8번의 변형률응답곡선(L.C5)

표 3-18. L.C5~7의 중량추정 결과

Division			1 Axle (kN)	2Axle+3Axle (kN)	Gross (kN)
Real			49.59	79.48	129.07
Load Case5	Before	Cal.	56.25	61.85	118.10
		Err.	(13.45%)	(-22.18%)	(-8.49%)
	After	Cal.	35.50	82.60	118.10
		Err.	(-28.41%)	(3.93%)	(-8.49%)
Load Case6	Before	Cal.	93.89	17.18	111.77
		Err.	(89.38%)	(-77.51%)	(-13.40%)
	After	Cal.	30.58	81.19	111.77
		Err.	(-38.33)	(2.15%)	(-13.40%)
Load Case7	Before	Cal.	98.93	46.84	145.77
		Err.	(99.54%)	(-41.07%)	(12.94%)
	After	Cal.	45.41	100.35	145.77
		Err.	(-8.43%)	(26.25%)	(12.94%)

축중에 대한 추정정확도를 향상시키기 위하여 연구에서의 주행차량 통과에 따른 수직보강재의 응답을 사용하여 추정중량의 오차를 감소시키고자 하였다. 그림 3-4 및 그림 3-5에 나타낸 것과 같이 수직보강재의 응답은 하중이 부재의 바로 위를 통과할 때만 응답하므로 차량의 주행패턴과는 관계없이 통과차량의 차축에만 반응한다. 특히 지점부에 위치한 수직보강재는 교량의 고유진동 등의 영향이 적으므로 지점부인 A-A단면에 설치한 수직보강재의 응답을 분석하여 축중분배율을 검토하고, 이를 활용하여 주행차량의 중량을 추정하였다. 축중분배율의 평가결과 3가지 Load Case에서의 1축의 분배율은 30%~31%, 2축+3축의 분배율이 68%~69%로 유사한 결과를 나타내었다. 이것에 기초하여 추정된 추정축중을 Table 14(After 항목)에 나타내었다. 이 방법을 적용하여 추정된 추정축중은 앞에서 사용된 기본방법에 비하여 추정축중의 정확도를 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 II교량의 사고 등의 영향으로 추정 오차를 감소 시키는데에는 한계가 있는 것으로 판단된다. 향후 사고에서의 추정오차의 정밀도 향상을 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 3.3.5 측정위치에 대한 영향

연속교인 I 교량에 대하여 1경간 거더의 최대응답 발생위치인 3L/8 및 스패 중앙지점인 L/2인 위치에서 변형률응답을 측정하고, 측정위치에 따른 중량추정의 정확도를 검토하였다. 그림 3-10에 측정위치에 따른 중량정밀도를 나타내었다. 표 3-11에 나타낸 것과 같이 거더에 대한 응답측정 위치에 따른 중량추정결과는 큰 차이가 나타나지 않았다. 그러므로 최대응답이 나타나는 곳의 변형률 값을 사용하여 중량을 추정하는 것이 계측 오차를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

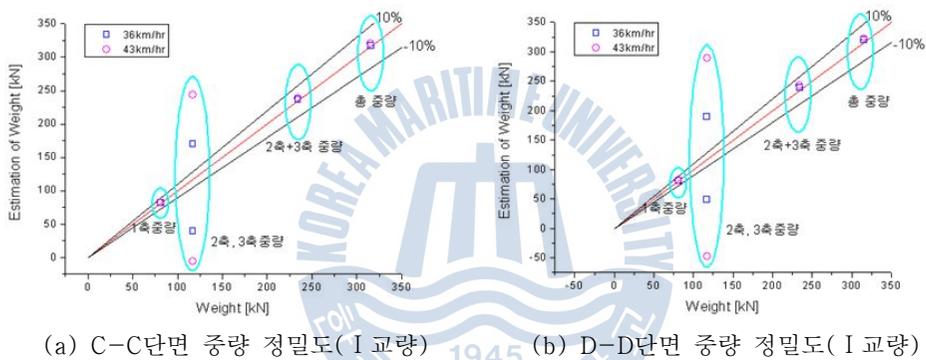


그림 3-10. 측정위치에 따른 중량정밀도

한편 교량의 거더형식은 상이하나 I 교량, II 교량 및 III 교량에서 각각 상부플랜지로부터 20mm, 200mm 및 10mm 이격한 곳의 수직보강재에 변형률 센서를 부착하여 차량의 정보추정 결과의 차이를 조사하였다. 그 결과 수직보강재에서의 게이지 부착 위치차이로 인한 추정결과의 차이는 없는 것을 알 수 있다.

---

## 4장. 주행차량의 차종 분류

---

### 4.1 차종의 분류 목적

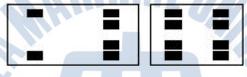
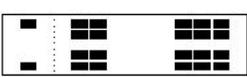
도로에 주행하는 차량의 형식은 각 나라마다 그 나라의 교통량 및 현황을 파악하기 위하여 차량의 종류를 정하는 기준이 다르다. BWIM 시스템으로 차량의 정확한 중량을 계산하기 위해서는 각각의 차량의 정확한 분류가 자동적으로 이루어져야한다. 그러므로 차량에 대한 정확한 축간거리 규정이 있어야 측정된 자료에 대한 효율적인 분류와 분석이 이루어 질 수 있다.

이 연구에서는 국토해양부에서 2006년에 개정한 12종 분류표를 따라 축간거리를 분류하였다. 표 4-1에 12종 차종 분류표를 나타내었다. 이는 고속국도 일반국도 및 지방도의 차종별 교통량 자료를 따르며 도로의 계획과 건설, 유지관리, 교통류 분석 및 도로행정에 필요한 기본 자료이며 각종 연구에 필요한 기초자료로 활용된다.

표 4-1. 12종 차종분류표

종별	분류기준		대표적 차체 및 차축배열	차종 정의
1종	축수	2		16인승 미만의 여객 수송용 차량, 미니트럭 등 2축 1단위 차량
	단위	1		
2종	축수	2		16인승 이상의 여객 수송용 버스 형식으로 2축 1단위 차량
	단위	1		
3종	축수	2		화물 수송용 트럭으로 2축의 최대 적재량 1~2.5톤 미만의 1단위 차량
	단위	1		
4종	축수	2		화물 수송용 트럭으로 2축의 최대 적재량 2.5톤 이상의 1단위 차량
	단위	1		
5종	축수	3		화물 수송용 트럭으로 3축 1단위 차량
	단위	1		
6종	축수	4		화물 수송용 트럭으로 4축 1단위 차량
	단위	1		

표 4-1. 12종 차종분류표 (계속)

종별	분류기준		대표적 차체 및 차축배열	차종 정의
7종	축수	5		화물 수송용 트럭으로 5축 1단위 차량
	단위	1		
8종	축수	4		화물 수송용 세미 트레일러 형식으로 4축 2단위(견인차, 피견인차) 차량
	단위	2		
9종	축수	4		화물 수송용 풀 트레일러 형식으로 4축 2단위(견인차, 피견인차) 차량
	단위	2		
10종	축수	5		화물 수송용 세미 트레일러 형식으로 5축 2단위(견인차, 피견인차) 차량
	단위	2		
11종	축수	5		화물 수송용 풀 트레일러 형식으로 4축 2단위(견인차, 피견인차) 차량
	단위	2		
12종	축수	6		화물 수송용 세미 트레일러 형식으로 6축 2단위(견인차, 피견인차) 차량
	단위	2		

## 4.2 차종의 분류 기준

차량의 분류를 BWIM시스템에 의해 자동으로 이루어지기 위해서는 정확한 축간거리 분류 기준이 있어야 한다. 본 연구에서는 인공지능망을 이용한 교량의 주행중 차량하중분석시스템 개발(박민석, 2008)에서 사용한 국내에서 활동중인 전차종 분류 기준을 적용하였다. 이는 축수에 따라 7가지로 분류하고 축간거리에 따라 세부적으로 총 20차종으로 분류하였다.

먼저 2축 차량은 이륜차, 승용차, 승합차, 트럭으로 분류하였다. 축간거리  $l_1 \leq 1810mm$ 이면 이륜차로 분류하고  $1810mm \leq l_1 \leq 3200mm$ 이면 승용차, 소형승합 또는 소형트럭으로 분류하였다. 그리고  $6400mm \leq l_1 \leq 6550mm$ 은 대형승합(버스),  $3200mm \leq l_1 \leq 6400mm$ 은 대형트럭(A)로 분류하였다.

3축 차량은  $2950mm \leq l_1 \leq 5800mm$ ,  $1200mm \leq l_2 \leq 1630mm$ 이면 대형트럭(B)로 분류하였다. 그 외 차량은 빈도가 적어 그 외차량으로 분류하였다.

4축 차량은  $l_1$ 이  $1500mm \sim 1750mm$ ,  $l_2$ 이  $2780mm \sim 4870mm$  그리고  $l_3$ 이  $1300mm \sim 1400mm$ 이면 대형 트럭(C)로 분류하였고,  $l_1$ 이  $3200mm \sim 6400mm$ ,  $l_2$ 이  $4390mm \sim 5170mm$  그리고  $l_3$ 이  $4110mm \sim 4770mm$ 이면 대형 트럭(A)+2축 트레일러로 분류하였다. 그리고  $l_1$ 이  $3200mm \sim 3450mm$ ,  $l_2$ 이  $4550mm \sim 9770mm$  그리고  $l_3$ 이  $1250mm \sim 1300mm$ 이면 트랙터(A)+2축 트레일러로 분류하였으며,  $l_1$ 이  $3050mm \sim 4100mm$ ,  $l_2$ 이  $1300mm \sim 1365mm$  그리고  $l_3$ 이  $4550mm \sim 9770mm$ 이면 트랙터(B)+1축 트레일러로 분류하였다. 나머지는 그 외 차량으로 분류하였다.

5축 차량은  $l_1$ 이  $3200mm \sim 3450mm$ ,  $l_2$ 이  $7750mm \sim 8150mm$ ,  $l_3$ 이  $1250mm \sim 1300mm$  그리고  $l_4$ 이  $1250mm \sim 1300mm$ 이면 트랙터(A)+3축 트레일러로 분류하였고,  $l_1$ 이  $3050mm \sim 4100mm$ ,  $l_2$ 이  $1300mm \sim 1365mm$ ,  $l_3$ 이  $4550mm \sim 9770mm$  그리고  $l_4$ 이  $1250mm \sim 1300mm$ 이면 트랙터(B)+2축 트레일러로 분류하였고,  $l_1$ 이  $2950mm \sim 5630mm$ ,  $l_2$ 이  $1300mm \sim 1300mm$ ,  $l_3$ 이  $4390mm \sim 5170mm$  그리고  $l_4$ 이  $4110mm \sim 4770mm$ 이면 대형트럭(B)+2축 트레일러로 분류하였고,  $l_1$ 이  $3050mm \sim$

4100mm,  $l_2$ 이 1300mm~1365mm,  $l_3$ 이 1300mm~1365mm 그리고  $l_4$ 이 4550mm~9770mm이면 트랙터(C)+1축 트레일러로 분류하였다. 그리고  $l_1$ 이 1630mm~1700mm,  $l_2$ 이 3470mm~3710mm,  $l_3$ 이 1300mm~1300mm 그리고  $l_4$ 이 1300mm~1300mm이면 대형트럭(D)분류하였고 나머지는 그 외 차량으로 분류하였다.

6축 차량은  $l_1$ 이 3050m~4100mm,  $l_2$ 이 1300mm~1365mm,  $l_3$ 이 7750mm~8150mm,  $l_4$ 이 1250mm~1350mm 그리고  $l_5$ 이 1250mm~1350mm이면 트랙터(B)+3축 트레일러로 분류하였고,  $l_1$ 이 3050m~4100mm,  $l_2$ 이 1300mm~1365mm,  $l_3$ 이 1300mm~1365mm,  $l_4$ 이 4550mm~9770mm 그리고  $l_5$ 이 1250mm~1300mm이면 트랙터(C)+2축 트레일러로 분류하였다.

마지막으로 7축 차량은  $l_1$ 이 3050m~4100mm,  $l_2$ 이 1300mm~1365mm,  $l_3$ 이 1300mm~1365mm,  $l_4$ 이 7750mm~8150mm,  $l_5$ 이 1300mm~1300mm 그리고  $l_6$ 이 1300mm~1300mm이면 트랙터(C)+3축 트레일러로 분류하였다.

표 4-2에 국내에서 활동중인 차종 및 차축 구조분류를 정리하여 나타내었다.

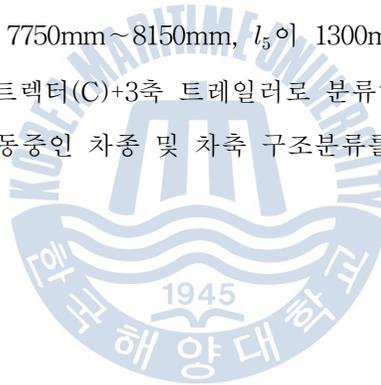


표 4-2. 국내에서 활동중인 차종 및 차축 구조 분류

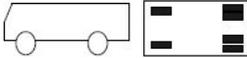
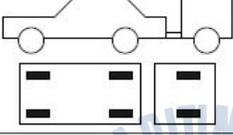
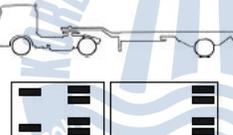
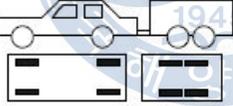
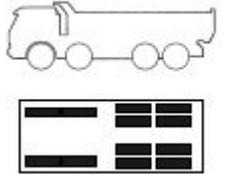
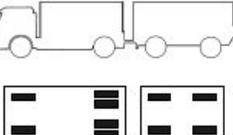
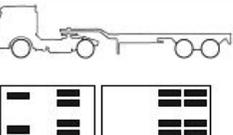
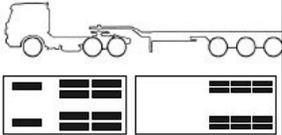
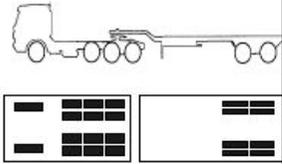
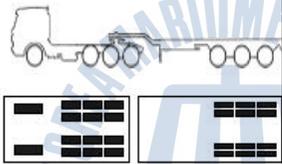
축 수	차종	차축 구조	분류	간격(mm)	총 축거 (mm)	비고
2	이륜차		10	0-1810	1810	-
	승용차 소형승합차 소형트럭		20	1810-3200	3200	1종
	대형 승합차		30	6400-6550	6550	2종
	대형 트럭(A)		40	3200-6400	6050	3종 4종
3	승용차 +1축 트레일러		21	1810-3200 2042-5090	8360	-
	대형 트럭(B)		50	2950-5800 1200-1630	9630	5종
	트렉터(A) + 1축 트레일러		80	3200-3450 4390-9770	13220	-
4	승용차 + 2축 트레일러		22	1810-3200 2018-5090 0-914	9204	-
	대형 트럭(C)		60	1500-1750 2780-4870 1300-1400	8020	6종
	대형 트럭(A) + 2축 트레일러		41	3200-6400 4390-5170 4110-4770	15190	9종
	트렉터(A) + 2축 트레일러		81	3200-3450 4550-9770 1250-1300	14520	8종

표 4-2. 국내에서 활동중인 차종 및 차축 구조 분류 (계속)

축 수	차종	차축 구조	분 류	간격(mm)	총 축거 (mm)	
4	트렉터(B) + 1축 트레일러		90	3050-4100 1300-1365 4550-9770	15235	8종
	트렉터(A) + 3축트레일러		82	3200-3450 7750-8150 1250-1300 1250-1300	14200	10종
5	트렉터(B) + 2축 트레일러		91	3050-4100 1300-1365 4550-9770 1250-1300	16535	10종
	트렉터(C) + 1축 트레일러		100	3050-4100 1300-1365 1300-1365 4550-9770	16600	10종
	대형 트럭(B) + 2축 트레일러		51	2950-5630 1300 4390-5170 4110-4770	16870	11종
	대형 트럭(D)		70	1630-1700 3470-3710 1300 1300	8010	10종

표 4-2. 국내에서 활동중인 차종 및 차축 구조 분류 (계속)

축 수	차종	차축 구조	분류	간격(mm)	총 축거 (mm)	
6	트렉터(B) + 3축 트레일러		92	3050-4100 1300-1365 7750-8150 1250-1350 1250-1350	16215	12종
	트렉터(C) + 2축 트레일러			101		
7	트렉터(C) + 3축 트레일러		102	3050-4100 1300-1365 1300-1365 7750-8150 1300 1300	16600	-
그 외 차량				110		

\*대형 트럭(A) : 2축      트렉터(A) : 2축  
 대형 트럭(B) : 3축      트렉터(B) : 3축  
 대형 트럭(C) : 4축      트렉터(C) : 4축  
 대형 트럭(D) : 5축

### 4.3 실교통류에서의 차량 정보 분석

앞에서 설명한 차량의 분류기준을 적용하여 실교통류에서 임의로 통과하는 차량의 정보를 분석하기 위해 대상교량 II에서 측정된 데이터를 사용하여 차량의 정보를 추정하였다. 그림 4-1에 대상교량 B에서 계측된 데이터를 나타내었다. 새벽 4시경부터 약 10분간의 데이터이다. 이 중 몇 가지를 선별하여 차량의 정보를 추정하고 중량을 산정하였다.

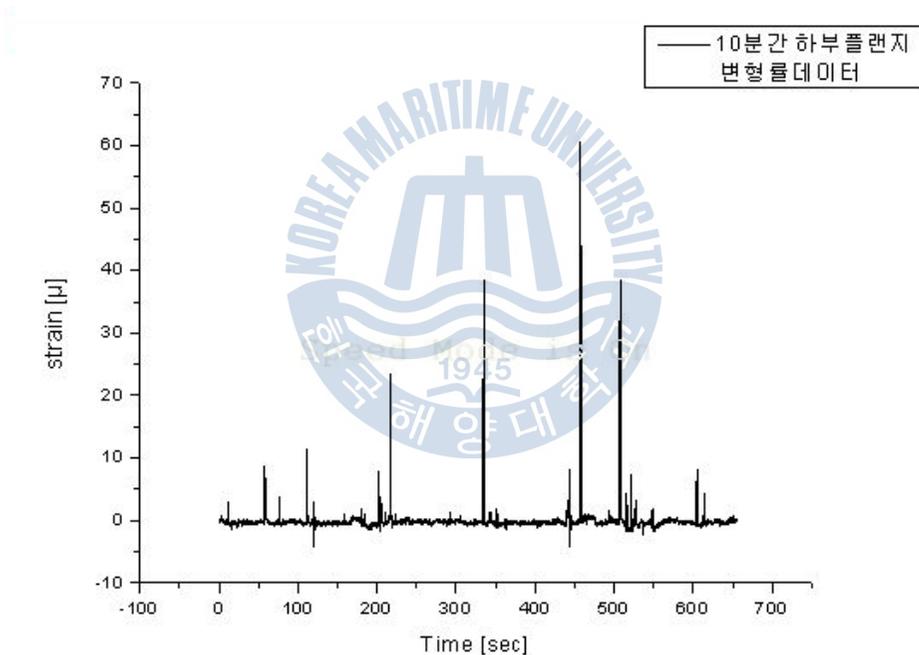
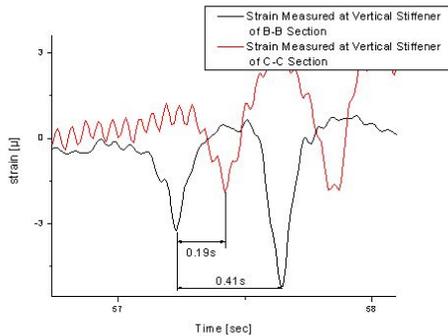
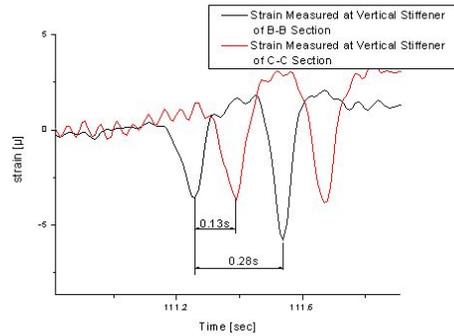


그림 4-1. 공용하중에서의 하부플랜지 변형률데이터



(a) 57초대



(b) 111초대

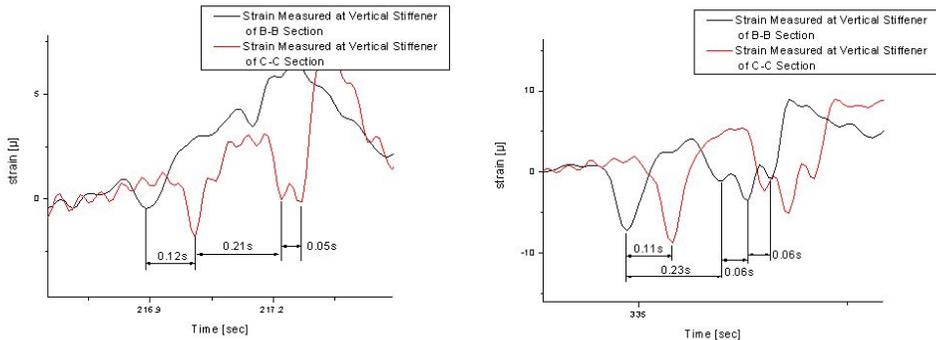
그림 4-2. 공용하중에서의 수직보강재 변형률데이터

그림 4-2(a)는 50초대 계측된 수직보강재 변형률응답곡선이다. 수직보강재에서 계측된 파형에서 볼 수 있듯이 임의의 주행차량은 2축 차량임을 알 수 있다. 그리고 2.2절에서 설명한 방법으로 속도를 산정하면 47.37km/h이고, 이를 이용해 축간거리를 산정하면 5.39m로 계산되어진다. 이를 표 4-2의 분류표에 적용하면 축간거리  $3200mm \leq l_1 \leq 6400mm$ 에 속하는 대형 트럭(A)로 판별할 수 있다. 그리고 중량을 산정하면  $P_1 : 26.28kN$ ,  $P_2 : 48.47kN$ 으로 계산된다.

그림 4-2(b)은 111초대에 측정된 수직보강재 변형률응답곡선이다. 그림에서 알 수 있듯이 2축 차량이고 속도는 69.23km/h로 계산되며, 축간거리는 4.92m로 계산된다. 이는  $3200mm \leq l_1 \leq 6400mm$ 로 대형트럭(A)로 판별할 수 있으며 중량은 39.99kN, 63.61kN으로 각각 추정 할 수 있다.

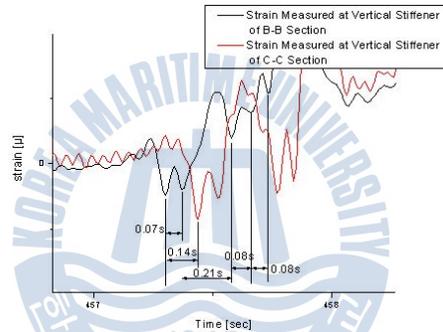
그림 4-2(c)은 217초대에 측정된 수직보강재 변형률응답곡선이다. 그림에서 알 수 있듯이 3축 차량이고 속도는 75km/h로 계산되며, 축간거리는  $l_1=4.37m$ ,  $l_2=1.04m$ 로 계산된다. 이는  $2950mm \leq l_1 \leq 5800mm$ 이고  $1200mm \leq l_2 \leq 1630mm$ 로 대형트럭(B)로 판별할 수 있다.  $l_2$ 의 경우 최소 길이인 1.2m가 안되지만 이는 차축의 거리가 짧은 대다가 사고의 영향으로 인해 정확한 축하중 전달이 제대로 이루어지지 않은 것 때문으로 판단되며 직교를 대상 교량으로 한다면 정확도를 높일 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 중량은 1축은

106.94kN, 2축+3축은 60.08kN로 대형트럭(B) 공차로 판별 할 수 있다.



(c) 217초대

(d) 335초대



(e) 457초대

그림 4-2. 공용하중에서의 수직보강재 변형률데이터(계속)

그림 4-2(d)는 335초대의 수직보강재 파형이다. 4축 차량임을 알 수 있으며, 속도는 81.82km/h이고 축간거리  $l_1$ 은 5.23m,  $l_2, l_3$ 은 2.72m로 계산된다. 이는 표 4-2에 나타낸 차량 분류기준의 4축 차량에 부합되는 것이 없으므로 그 외 차량으로 분류 할 수 있다. 중량은 총중량이 374.5kN으로 산정된다.

그림 4-2(e)은 457초대의 파형으로 5축 차량임을 알 수 있고, 속도가 64.28km/h, 축간거리가  $l_1$ 은 1.25m,  $l_2$ 은 3.75m,  $l_3$ 은 1.43m 그리고  $l_4$ 은 1.25m로 계산된다. 이는 5축 차량의 대형트럭(D)로 판별 할 수 있다. 중량은 총중량이 393.87kN으로 계산되었다.

이상의 결과를 표 4-3에 정리하였다. 1.3m같은 짧은 축간거리의 경우 3장에서 설명된 바와 같이 축영향이 명확히 나타나지 않기 때문에 하나의 축으로 가정하여 계산하였다. 57초대 차량과 111초대 차량은 표 4-1의 12종 분류표에 적용하면 4종 트럭으로 판별할 수 있다. 그리고 217초대 차량은 5종 트럭, 457초대 차량은 10종 트럭으로 판별할 수 있다. 그러나 335초대 차량은 12종 분류표에는 포함되지 않은 특수차량으로 판별할 수 있다.

표 4-3. 공용하중에서 차량의 정보 분석결과  
(a) 차량의 속도 및 축간거리 산정결과

시간	속도 (km/h)	축간거리(m)				차량판독
		$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	
57초대	47.37	5.39	-	-	-	 대형트럭(A)-4종
111초대	69.23	4.92	-	-	-	 대형트럭(A)-4종
217초대	75.00	4.37	1.04	-	-	 대형트럭(B)-5종
335초대	81.82	5.23	2.72	2.72	-	그 외 차량
457초대	64.28	1.25	3.75	1.43	1.25	 대형트럭(D)-10종

(b) 차량의 중량 산정 결과

시간	$P_1$ (kN)	$P_2$ (kN)	$P_2 + P_3$ (kN)	$P_2 + P_3 + P_4$ (kN)	$P_3 + P_4 + P_5$ (kN)	총중량 (kN)
57초대	26.28	48.47	-	-	-	74.75
111초대	39.99	63.61	-	-	-	103.60
217초대	106.94	-	60.08	-	-	167.02
335초대	148.51	-	-	225.92	-	374.50
457초대	116.82	202.25	-	-	73.37	392.43

---

## 5장. 결 론

---

### 5.1 결 론

이 연구에서는 이론적인 BWIM 알고리즘을 현장 실험값에 적용하고 차량조건, 교량조건 및 계측조건에 의한 영향인자가 BWIM에 의한 중량추정에 미치는 정도를 분석하여 다음과 같은 결론을 정리하였다.

(1) 차량정보 추정시 오차에 가장 큰 영향을 주는 것은 교량의 평면선형이다. 이는 평면선형의 차이로 인한 하중 횡분배 때문으로 판단된다. 향후 차량정보 추정을 위한 대상교량 선정시 직선교를 선정하면 좋지만 사교를 대상으로 주행차량의 정보를 추정하고자 하는 경우 충분한 이론적 검토 후 하중 전달이 명확한 위치를 선정하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

(2) 수직보강재 변형률을 이용할 경우 실제 속도 및 1축과 2축 사이의 축간거리는 비교적 정확하게 추정할 수 있지만, 2축과 3축 사이의 축간거리는 각 축의 영향이 뚜렷이 나타나지 않아 속도가 증가할수록 추정오차는 커진다. 그러나 2축과 3축을 하나의 축으로 가정하여 중량을 추정하면 축중량의 오차를 줄일 수 있다.

(3) 차량의 주행패턴에 따른 영향은 주행차선에 대한 영향선의 비를 이용하면 각 차량의 변형률응답곡선을 추출할 수 있다. 축중량은 수직보강재에서 나오는 축중분배율을 이용하면 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

(4) 주거더의 응답측정 위치, 수직보강재의 게이지 부착위치 차이에 따른 차량 정보 추정결과는 유사하다.

(5) 차량정보 추정을 위한 Sampling rate는 100Hz 이상이어야 한다.

(6) 수직보강재의 변형률응답곡선에 의해 차량을 차량분류기준에 따라 분류할 수 있다.



## 5.2 향후 과제

(1) 대상교량의 구조해석을 통하여 이론치의 추가적인 해석이 필요할 것으로 판단된다. 향후 실험데이터와 비교분석하여 보다 정확한 분석이 필요 할 것이다.

(2) 보다 정확한 비교를 위해 다양한 교량형식에 대한 추가의 현장계측이 필요 할 것으로 판단된다. 그리고 Load Case별로 반복횟수를 높여 표준편차를 줄이는 것이 유리할 것으로 판단된다.

(3) 실험 숙련도를 높여 실험데이터의 신뢰도를 높이면 보다 정확한 중량산정이 가능 할 것으로 판단된다.



## 참고문헌

### 저 서

국토해양부(2000), 도로설계편람 제 5편 교량

국토해양부(2008), 도로설계편람 제 5편 교량

Committee of Bridge Vibration(1993) Field Test and Analysis of Bridge Vibration, JSCE, pp. 103-126

### 학술지 및 학술회의 게재논문

김병화, 박민석, 여금수, 김수진(2010) 교량바닥판의 동적 변형률응답을 이용한 민감도 기반 BWIM 시스템, 한국소음진동공학회 논문집 제20권 제 7 호, pp. 620-628

박민석, 배두병, 황의승(2002), 고속도로 교량 활하중정형화를 위한 BWIM SYSTEM 개발, 한국도로공사 제 19회 도로기술연구성과발표회논문집(구조분야) 제 22권 제 1호, pp. 27-46

박민석, 조병완(2006) 주행중인 차량하중 측정을 위한 BWIM 시스템 개발, 한국구조물진단학회 논문집 제 10권 제 2호, pp. 111-122

박민석, 조병완, 배두병(2006) BWIM 시스템을 이용한 고속도로 교량 차량하중 모형 개발, 대한토목학회 논문집 제 26권 제1-A호, pp. 143-153

박민석, 조병완, 이정휘, 김성곤(2008) 인공신경망을 이용한 강합성 사장교 차량 하중분석 시스템 개발, 대한토목학회 제 28권 제 6A호, pp. 799-808

이정휘(2011) 수치해석 및 현장계측을 통한 차량주행조건에 따른 BWIM 신호 변화 분석, 한국전산구조공학회 논문집 제 24권 제 1호, pp. 79-85

- 이현재, 이승환, 최기주(2001), 고속도로 교량유지를 위한 FAD BWIM의 현장 시험연구, 대한토목학회 논문집 제 21권 제 5D호, pp. 597-609
- 전준창, 경갑수, 강신화, 이희현(2011) 플레이트 거더교 수직보강재 응답의 BWIM시스템 적용성 연구, 대한토목학회발표논문 초록집, Vol. A, pp. 40
- 이희현, 전준창, 정민선, 경갑수(2012) 강 거더교의 수직보강재 응답을 이용한 주행차량의 특성 추정, 한국안전학회논문집, Vol.27 No.1, pp. 86-90
- 정지원, 심수봉(2006) 다축모멘트 영향선과 밀도추정함수를 사용한 이동하중 식별 알고리즘의 개발, 한국구조물진단학회 제 10권 제 6호, pp. 87-94
- 최종대, 엄준식, 이우용, 임기환(2009) Microbending 센서를 이용한 BWIM 측정시스템에 대한 연구, 대한토목학회 학술대회, Vol.2009 No.10, pp. 2438-2441
- 황의승, 배두병, 정경섭, 조재병(1999) BWIM시스템을 이용한 중차량의 통행 특성 분석, 한국강구조학회논문집 제 11권 제 2호, pp. 223-232
- 한아름샘, 심수봉(2011) 밀도추정함수와 평균보정계수를 이용한 BWIM 알고리즘의 현장실험적용, 한국구조물진단학회지, Vol.15 No.2, pp. 70-71
- 정지원, 심수봉(2006) 다축모멘트 영향선과 밀도추정함수를 사용한 이동하중 식별 알고리즘의 개발, 한국구조물진단학회지, Vol.10 No.6, pp. 87-90
- 조광일, 원정훈, 김상효, 여영건(2008) 곡선강박스거더교의 온도거동 분석을 위한 온도분포 예측기법에 관한 연구, 대한토목학회논문집, Vol. 28 No.1, pp. 106-108
- 김상효, 조광일, 여영건, 홍주영(2004) 일사 및 태양고도에 의한 곡선강박스거더교의 온도분포예측기법 및 온도거동에 관한 연구, 대한토목학회논문집, Vol.2004 No.10, pp.54-58

황효상, 경갑수, 이희현, 전준창(2013) BWIM방법을 이용한 차량정보추정시 정밀도 향상 방안에 관한 연구, 한국안전학회지, VoL.28, No.1, pp63-73.

Dempsey, A. T., O'Brien, E. J., O'Connor, J. M.(1995) 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

Moses, F.(1979) Weigh-In-Motion System Using Instrumented Bridges, Transportation Engineering Journal, ASCE, 105, TE3, pp. 223-249

Peters, R.J.(1986) CULWAY-an Unmanned and Undetectable highway speed vehicle weighing system, in Proceedings of the 13th ARRB Conference, Australian Road Research Board, pp. 70-83

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

山口榮輝, 松尾一志, 河村進一, 小林裕介, 森昌文, 百田國廣, 西之原達志(2004) 徑間連續鋼桁橋を用いたBWIMの精度, 応用力學論文集, Vol. 7, pp. 1135-1140

山口榮輝, 内藤靖, 松尾一志, 松木勇太, 高木良久, 河村進一(2010) 鋼桁橋の垂直補剛材ひずみを用いたBWIM, 土木學會論文集, Vol. 66, No. 2, pp. 251-260

## 학위논문

박민석(2008), 인공신경망을 이용한 교량의 주행 중 차량하중분석시스템 개발, 박사학위논문, 한양대학교

이희현(1990), 도로형교의 동적 거동에 관한 연구, 박사학위논문, 한양대학교

Dempsey, A. T.(1997) The Accuracy of Bridge Weigh-In-Motion Systems,

P.H.D. thesis, Trinity College Dublin, Ireland

Gagarine, N.(1991) advance in Weigh-In-Motion with Pattern Recognition and Prediction of Fatigue Life of Highway Bridges, P.H.D. thesis, The University of Marland at college Park

Yusuke KOYAUASHI(2004), Development of an Automatic Continuous Real-time Remote Monitoring System for Bridge Maintenance, Tokyo Institute of Technology

이희현(2007), 桁形式鋼道路橋の疲労壽命評価法と疲労設計用衝撃係數の検討, 博士學位論文, 法政大學審査

## 보고서

건설교통부(2002), 도로교 차량활하중 및 피로하중모형 개발에 관한 연구(최종)

한국도로공사연구소(2000), 고속도로교량 활하중 정형화에 관한연구

한국해양대학교, 씨티엘주식회사(2009), BWIM 시스템 구축을 위한 기반연구

COST 323(2002), WIM-LOAD - Final Report of the Cost 323 Action

Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Japan(2004), 道路橋の交通特性評価手法に関する研究

WAVE(2002), Weigh-in-motion of Axles and Vehicles for Europe, ed. B. Jacob, LCPC, Paris

Michael Quilligan(2003) Bridge Weigh-in-Motion, Royal Institute of Technology, pp. 85-89

## 감사의 글

2012년 학부생활을 마치고 대학원생활을 시작하면서 많은 것을 느끼게 되었습니다.

지난 2년여의 시간은 여러 가지로 정말 유익한 시간이었습니다. 무엇보다 만만한 것이 없었지만 빨리 인정하고 수용했기 때문에 겸손하고 치열한 자세로 공부할 수 있었고, 지금의 결실도 볼 수 있었습니다. 그리고 힘든 과정을 통해 석사학위라는 학문적 성과뿐만 아니라 인생을 살아가는 중요한 가르침도 얻었습니다. 앞으로의 인생에서 많은 사람에게 도움을 주는 사람이 되어야겠다는 다짐을 확고히 하였으며, 그 동안 도움을 준 많은 사람께 진심으로 감사해야 함을 배웠습니다. 그리고 그 첫 실천으로 이번 석사학위 속 감사의 글을 통해 제게 은혜를 주신 분들께 감사의 마음을 전하고자 합니다.

먼저 경갑수 교수님께 마음 깊이 감사의 말씀을 드립니다. 부족한 저에게 많은 가르침과 인생의 길잡이를 가르쳐 주셔서 감사합니다. 덕분에 제 눈에 보이지 않은 많은 부족함을 수정할 수 있었습니다. 그리고 교수님께서 보여주신 온화한 마음과 학생을 존중하는 태도는 정말 큰 감동이었습니다.

그리고 바쁘신 와중에도 제 논문이 발전할 수 있게 함께 고민해주시고 지도해주신 김도삼 교수님과 이재하 교수님께 감사의 인사를 드립니다.

더불어 대학원 생활을 잘할 수 있게 도와주신 많은 분들께도 감사의 말씀을 드립니다. 같은 연구실에서 2년간 같이 지내면서 고생한 (이)성진이형, 부족하지만 잘 따라준 (류)성진이, 그리고 민영이 그리고 다른 연구실 동기, 동생들 모두 감사합니다.

무엇보다도 제가 이 자리에 있을 수 있도록 보살펴 주시고 걱정해 주신 부모님 사랑하고 고맙습니다. 남들보다 늦을 길은 걸어가는 아들을 위해 진심어린 조언을 해주신 아버지와 늘 제 걱정을 해주시며 지켜봐주신 어머니가 계셨기에 제가 이 자리에 있을 수 있었습니다.

그리고 언제나 저를 이해해 주는 사랑하는 친구들과 언급은 못하였지만 그동안 저에게 많은 도움을 주신 모든 분들께도 감사의 마음을 전합니다.

이제 졸업을 앞두고 사회를 나가는 문턱에 서니 설레임과 두려움이 앞섭니다.  
하지만 지금까지 해왔던 것처럼 주위에 모든 분들께 실망시키지 않고 후회 없는  
삶을 살도록 하루하루 노력하는 사람이 되겠습니다. 감사합니다.

2014년 2월

유동균

