



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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

교량의 이론적 응답에 기초한 BWIM
활용방안에 관한 연구

A Study on the Utilization of BWIM Using Theoretical
Response of Bridge



2012 年 2 月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科

丁 愨 嬪

本 論文을 丁愨嬪의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長 工學博士 金 泰 亨 (印)

委 員 工學博士 慶 甲 秀 (印)

委 員 工學博士 朴 秀 鎔 (印)



2012 年 2 月

韓國海洋大學校 大學院

A Study on the Utilization of BWIM Using Theoretical Response of Bridge

by
Jung, Min-Sun

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

ABSTRACT

Due to increase of traffic and vehicle loading, increase in live load and fatigue load has a major impact on safety and maintenance in bridge. In order to determine the exact load, it is necessary to clearly understand of the load evaluation and traffic characteristics.

In this study, response of strain data theoretically acquired from bottom flange and longitudinal stiffener of plate girder bridge, utilization of Bridge Weigh-In-Motion(BWIM), which calculate the characteristic and weight of pass vehicle, are analysed.

Various real vehicle modeling was performed by using the DAP-1 that is a dynamical program to analysis the time history. From this performing, vehicle location, speed, wheelbase were analyzed by the time history analysis based on vehicle characteristics of main girders and vertical reinforcement. Also the influence line that reflects the dynamic behavior was drawn. As a result of the influence line, the weight of the vehicle was analyzed by reversely calculating.

As a result of this study, it is the most suitable that the response time history of the short members differentiate to detect position and velocity of the vehicle. In addition, to calculate the weight as a result of Influence

line based on the response of the relatively long material is the most suitable.



교량의 이론적 응답에 기초한 BWIM 활용방안에 관한 연구

정 민 선

한국해양대학교
토목환경공학부 토목공학과

요 약

교량에서 교통량증가 및 차량의 적재율의 증가로 인하여 활하중 및 피로하중의 증대는 교량 안전성 및 유지관리에서 중요한 영향을 미칠 수 있다. 이러한 하중을 정확히 파악하기 위해서는 통과차량의 하중평가 및 통행특성을 파악하는 것이 필요하다.

이 연구에서는 플레이트 거더교의 주거더 하부플랜지 및 수직보강재에서 발생하는 변형의 응답을 해석적으로 도출하여 임의 통과차량의 특성 및 중량을 산정하는 BWIM(Bridge Weight-In-Motion)활용방안에 대해 분석하고자 한다.

동적프로그램인 DAP-1을 사용하여 다양한 실제 차량을 모델링 하여 시간이력해석을 수행하였다. 이로부터 차량특성에 따른 시간이력해석을 주거더 및 수직보강재를 대상으로 산출하여 주행차량의 위치, 속도, 축간거리를 분석하였다. 또한 교량의 동적거동을 반영한 영향선을 도출하였고 이를 기초로 역계산을 통하여 차량중량을 분석하였다.

연구결과, 짧은 부재의 시간이력응답을 1계 미분하여 차량의 위치 및 속도를 검출 하는 것이 실시간 계측에 가장 적합한 것으로 나타났다. 또한 비교적 긴 부재의 응답으로 영향선을 구하여 중량을 산출하는 것이 실시간계측에 적합한 것으로 나타났다.

목 차

ABSTRACT	i
요약	iii
목차	iv
표목차	vi
그림목차	viii
1장. 서론	1
1.1 연구의 배경과 목적	1
1.2 BWIM 개요	3
1.2.1 영향선이 긴 교량부재의 응답을 이용하는 방법	4
1.2.2 영향선이 짧은 교량부재의 응답을 이용하는 방법	6
1.3 국내·외 연구동향	7
1.3.1 국내 연구동향	7
1.3.2 국외 연구동향	8
1.4 연구범위 및 구성	10
2장. Bridge Weigh-In-Motion(BWIM) System	12
2.1 BWIM System 산정	12
2.1.1 기본구성	12
2.1.2 산정흐름	14
2.1.3 차량 위치산정 방법	15
2.1.4 차량 속도산정 방법	17
2.1.5 영향선산정 방법	20
2.1.6 차량 중량산정 방법	22
3장. 수치해석에 따른 차량중량추정방법	24
3.1 대상교량의 제원 및 특성	24

3.2 이동하중에 따른 시간이력해석	25
3.2.1 시간이력 해석개요	25
3.2.2 해석변수 및 조건	27
3.2.3 시간이력해석에 따른 교량응답 결과	30
3.3 시험차량에 따른 BWIM 분석	32
3.3.1 차량의 위치분석	32
3.3.2 차량의 속도분석	35
3.4 시험차량 주행시의 중량분석	40
3.4.1 영향선 산출	40
3.4.2 중량 산출	42
4장. BWIM System의 한 중량산출	50
4.1 BWIM System을 활용한 중량산출	50
4.1.1 영향선함수를 이용한 중량산출	50
4.1.2 영향면적을 이용한 중량산출	54
4.2 차량의 주행조건에 따른 중량산정	56
4.2.1 속도에 따른 중량정밀도	56
4.2.2 축간거리에 따른 중량정밀도	60
4.2.3 횡방향 이동에 따른 중량정밀도	63
5장. 결론	75
5.1 결론	75
5.2 향후 과제	77
참고문헌	78
부록	82

표목차

표 1-1. BWIM 산정에 적합한 교량조건	3
표 3-1. 차량제원에 따른 분포표	27
표 3-2. 시험차량의 조건	29
표 3-3. 3축 시험차량 Girder별 최대변형률	31
표 3-4. 직접판독법을 이용한 peak 시간검지	32
표 3-5. 미분판독법을 이용한 peak 시간검지	33
표 3-6. 직접판독법을 이용한 속도와 축간거리의 오차	36
표 3-7. 자기상관함수를 이용한 속도와 축간거리의 오차	37
표 3-8. 미분판독법을 이용한 속도와 축간거리의 오차	38
표 3-9. 3축 시험차량 중량산출	44
표 3-10. 4축 시험차량 중량산출	45
표 4-1. 주행차량의 제원	50
표 4-2. 3축 주행차량중량 산출	51
표 4-3. 4축 주행차량중량 산출	51
표 4-4. 3축 주행차량중량 산출	52
표 4-5. 4축 주행차량중량 산출	53
표 4-6. 3축 주행차량중량 산출	54
표 4-7. 4축 주행차량중량 산출	55
표 4-8. Case A로 주행시 중량산출	58
표 4-9. Case B로 주행시 중량산출	58
표 4-10. Case C로 주행시 중량산출	59
표 4-11. Case A의 제원	60
표 4-12. Case B의 제원	60
표 4-13. Case A의 중량산출	61
표 4-14. Case B의 중량산출	62

표 4-15. 3축 시험차량이 횡방향 이동시 중량비교	64
표 4-16. 4축 시험차량이 횡방향 이동시 중량비교	68
표 4-17. Girder 1에서 3축 주행차량이 횡방향 이동시 중량비교	72
표 4-18. Girder 1에서 4축 주행차량이 횡방향 이동시 중량비교	73



그림목차

그림 1-1. 영향선이 긴 경우의 응답파형 구성	5
그림 1-2. 영향선이 짧은 경우의 응답파형 구성	6
그림 2-1. BWIM System 기본구성	13
그림 2-2. BWIM System 산정 흐름	14
그림 2-3. 직접판독법을 이용한 Peak 시간검지	15
그림 2-4. 미분판독법을 이용한 Peak 시간검지	16
그림 2-5. 직접판독법에 의한 시간차이	17
그림 2-6. 자기상관함수에 의한 시간차이	18
그림 2-7. 다항식계수의 정도에 따른 오차의 합(E)	21
그림 3-1. 교량 단면도	24
그림 3-2. 시간이력해석 프로그램의 흐름도	26
그림 3-3. 해석대상교량의 모델링	26
그림 3-4. 차량제원 분포도	28
그림 3-5. 차량 주행패턴	29
그림 3-6. 횡단면도와 수직보강재 위치	30
그림 3-7. 수직보강재의 시간이력해석	30
그림 3-8. 3축 시험차량의 시간이력해석	31
그림 3-9. 3축 시험차량의 peak 검지	32
그림 3-10. 4축 시험차량의 peak 검지	32
그림 3-11. 3축 시험차량의 peak 검지	34
그림 3-12. 4축 시험차량의 peak 검지	34
그림 3-13. 수직보강재 2개소 위치	35
그림 3-14. 3축 시험차량의 속도산출	36
그림 3-15. 4축 시험차량의 속도산출	36
그림 3-16. 3축 시험차량의 속도산출	37

그림 3-17. 4축 시험차량의 속도산출	37
그림 3-18. 3축 시험차량의 속도산출	38
그림 3-19. 4축 시험차량의 속도산출	38
그림 3-20. 3축 시험차량의 영향선	41
그림 3-21. 3축 시험차량이 단독주행시 영향선	41
그림 3-22. 3축 시험차량이 동시주행시 영향선	42
그림 3-23. 3축 시험차량 중량정밀도	44
그림 3-24. 4축 시험차량 중량정밀도	45
그림 3-25. 1차선에서의 변형률 검증	46
그림 3-26. 2차선에서의 변형률 검증	47
그림 3-27. 동시주행에서의 변형률 검증	48
그림 3-28. 시험차량의 영향면적	49
그림 4-1. 3축 주행차량의 영향면적	54
그림 4-2. 4축 주행차량의 영향면적	55
그림 4-3. Case A로 주행시 시간이력해석	57
그림 4-4. Case B로 주행시 시간이력해석	57
그림 4-5. Case C로 주행시 시간이력해석	57
그림 4-6. Case에 따른 주행위치	63
그림 4-7. 3축 시험차량이 횡방향 이동시 정밀도	67
그림 4-8. 4축 시험차량이 횡방향 이동시 정밀도	71
그림 4-9. Girder 1에서 3축 주행차량 정밀도	73
그림 4-10. Girder 1에서 4축 주행차량 정밀도	74

1장. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 교량구조물 및 기타 도로관련 사회간접자본 시설물에 대한 유지관리의 중요성이 부각되고 있다. 또한 도로를 이용하는 화물차량의 물류수송증가 및 대형화로 인하여 교량구조물과 도로포장의 내구성 및 파손 및 과적 시 오염물질 배출량의 증가로 인하여 환경오염측면에 미치는 영향이 크다. 교량구조물에서 차량에 의한 하중효과는 주로 활하중 및 피로하중으로 나타나는데 이들 하중의 정형화를 위해서 주행하는 중차량의 하중 실태를 파악하는 것이 중요하므로 과적 차량 단속에 대한 대책이 필요하다.

국내에서는 차량을 계측장소로 유도하고 정지 시킨 후 차량의 개별 축 하중을 측정하는 정적하중 계측방법을 이용하였다. 이는 매우 정밀한 측정이 가능한 장점이 있는 반면에 측정 인원 및 장소와 시간이 소요되며 위치가 노출되어 과적 단속을 피할 수 있는 단점이 있다. 이러한 정적하중계측에 의한 과적단속의 한계를 극복하기 위해 외국의 저속용(20km/hr이하) Weight-In-Motion(WIM, 이하 WIM)시스템을 도입하여 운영함으로써 고속국도 및 일부 일반 국도 상에서 과적 차량 단속효과를 거두고 있으나, 앞서 언급한 교량구조물 및 도로포장의 내구성 평가 및 유지관리계획 수립에 필요한 종합적이고 체계적인 정보를 도출하기에는 한계가 있다. 또한, 한국도로공사에 대한 국정감사결과자료에 따르면 시스템의 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. 물론 노면에 설치되는 방식의 고속용 WIM 시스템을 이용하여 교량구조물을 통행하는 차량의 중량 및 통행특성에 관한 정보를 얻을 수는 있지만 저속용에 비해 정확도가 떨어지며, 일반적으로 시스템 설치 후 센서의

내구연한인 5년 주기로 노면에 설치된 센서부분 전체를 교체해야 하므로 이에 따른 교통통제가 불가피하여 교량 상에 적용하기에는 어려움이 있다.

따라서 이 논문은 교량구조물의 내구성 평가 및 유지관리계획 수립에 필요한 정보를 효과적으로 얻기 위해 연구되고 있는 방법인 Bridge Weight-In-Motion (BWIM, 이하 BWIM)의 교량응답을 해석적으로 도출하여 주행하는 차량의 특성 및 하중을 파악하여 BWIM 시스템 활용방안을 제안하고자 한다.



1.2 BWIM의 개요

BWIM은 하중계에 의해 직접적으로 중량을 측정하는 것이 아니므로 기지의 중량을 갖는 차량을 통과시켜 단위하중에 의한 교량부재의 응답을 구한 후, calibration에 의해 임의의 통과 차량의 중량, 속도 및 차종 등을 추정하는 방법이다. 이는 교통흐름에 대한 방해가 거의 없으며 간편하게 설치 할 수 있으며 이 동식사용 및 교량의 거동과악이 가능하고 정확도가 높다. 그러나 측정에 적합한 교량을 선정하는데 어려움이 있으며 초기투자비용이 높다는 단점을 가지고 있다. 표 1-1에 일본에서 적용되고 있는 BWIM 산정에 적합한 일반적인 교량조건을 나타내었다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2004). 또한 BWIM은 통행차량에 의해 유발되는 교량의 응답특성에 의해 통행차량의 중량을 측정하는 방법으로서 기본적으로 교량부재의 영향선을 이용한다. 다음은 통행차량의 중량을 측정하는 방법인 영향선의 길이에 따라 영향선이 긴 교량부재의 응답특성과 영향선이 짧은 교량의 부재의 응답특성에 대해 나타내었다.

표 1-1. BWIM 산정에 적합한 교량조건

구분		추천조건
교량제원	지지형식	단순교
	바닥판형식	강바닥판
	상판형식	콘크리트 상판
	지간장	30~40m
	차선	최대 4차선
		계측구간에서차선 변경 없음
	경사각	직교(경사각 90°)
주거더	번단면 없음	
교통조건	교통량	임의, 동시재하 8대 이하
	교통류	정체나 차선변경이 빈번히 일어나지 않을 것
교량상태	주거더	현저한 녹 등이 없는 도장 Girder
	상판	균열, 누수가 적고 강판 접촉 등에 의한 보수 없음
노면상태	신축장치	불연속적이지 않을 것
차량조건	축수/중량	3축 차량, 20t 트럭
그 외	계측작업조건	주거더의 하면, 바닥하면에 게이지 부착가능
		기기류 배선 및 배치가능

1.2.1 영향선 긴 교량부재의 응답을 이용하는 방법

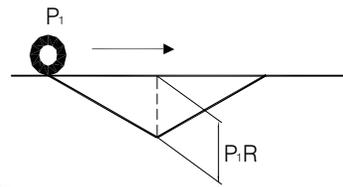
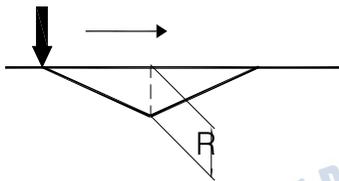
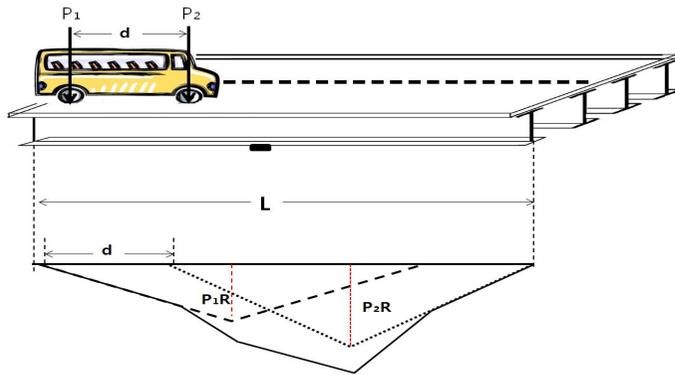
교량 주부재의 하부플랜지와 같이 비교적 긴 영향선을 갖는 부재의 응답을 이용하는 방법이다. 축 중량 및 축간거리가 기지인 차량이 교량 상을 통과하면 그림 1-1(d)과 같은 응답이 얻어진다. 교량이 탄성거동을 한다고 가정하면 이 응답은 전륜에 의한 응답(그림 1-1(b))과 후륜에 의한 응답(그림 1-1(c))이 중첩된 것이다. 전륜 및 후륜에 의한 응답은 양 축의 위치차이에 따른 시간적 편차가 발생하는데, 주행차량의 속도와 축간거리로부터 용이하게 계산된다. 이러한 차축의 위치에 따른 시간적 편차를 제외하면 전륜과 후륜의 응답은 유사한 형태를 갖고, 전륜과 후륜의 응답을 각각의 축 중량으로 나누면 단위하중에 의한 응답, 즉 그림 1-1(a)과 같은 영향선을 얻을 수 있다. 그림 1-1(a)의 영향선을 $\varepsilon_{in}(t)$ 라 하면 그림 1-1(d)에 나타난 전륜 및 후륜에 의한 응답은 다음과 같이 표현된다. 식 (1.1)에서 $\varepsilon(t)$, P_i , ϕ 가 기지의 값이므로 $\varepsilon_{in}(t)$ 을 구할 수 있다.

$$\varepsilon(t) = P_1 \varepsilon_{in}(t) + P_2 \varepsilon_{in}(t - \phi) \quad (1.1)$$

여기서, P_i : 제 i 축의 축중
 ϕ : 전륜과 후륜의 통과시각 차이

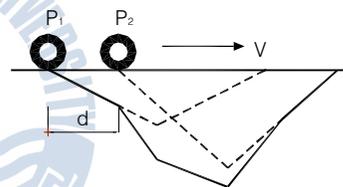
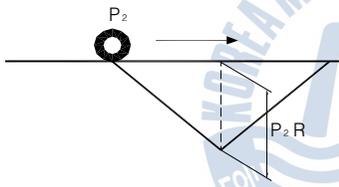
영향선($\varepsilon_{in}(t)$)이 구해지면 임의의 차량이 통과할 때 예측되는 응답에 의해 통과차량의 중량을 구하는 것이 가능하다. 임의의 차량이 통과할 때 변형률 응답 과형 $\varepsilon(t)$ 와 영향선 $\varepsilon_{in}(t)$ 의 관계는 식 (1.1)과 같다. 여기서 $\varepsilon(t)$ 와 $\varepsilon_{in}(t)$ 가 기지의 값이고 P_i 와 ϕ 는 미지의 값이 된다.

일반적으로 단위하중에 의한 영향선을 구하기 위해 사용한 차량과 예측된 차량의 주행속도는 다르므로 예측된 차량의 주행속도를 별도로 예측하여 그 영향을 보정할 필요가 있다. 차축의 통과시각 차이와 주행속도를 알면 축간거리 계산이 가능하고 이로부터 통과차량의 종류도 추정할 수 있다. 차축의 통과시각 차이인 ϕ 를 구하면 식(1.1)에서 미지수는 P_i 만이 남으므로 통과차량의 중량을 알 수 있다. 그러나 교량 상에 복수의 차량이 존재하는 경우에는 축 중량 산정의 정밀도는 낮다는 한계를 가진다.



(a) 단위하중에 의한 응답(영향선)

(b) 전륜(중량 P_1)에 의한 응답



(c) 후륜(중량 P_2)에 의한 응답

(d) 전륜 및 후륜에 의한 응답

그림 1-1. 영향선이 긴 경우의 응답파형 구성

1.2.2 영향선 짧은 교량부재의 응답을 이용하는 방법

차축의 영향범위가 좁아 차축에 대해서 독립성이 높게 반응하는 부재 응답을 이용해서도 통행차량 중량을 산정하는 것이 가능하다. 축 중량을 알고 있는 차량을 이용한 calibration에 의해 그림 1-2(a)에 나타난 것과 같이 하나의 하중에 대한 응답 크기를 구해 놓으면, 임의의 중량 크기는 그림 1-2(b) 및 그림 1-2(c)에 나타난 응답으로부터 비례계산에 의해 산정하는 것이 가능하다. 이 경우에 단순히 중량만을 구하고자 한다면 주행속도 및 차축의 통과시각을 별도로 측정하지 않아도 되는 이점이 있다. 그러나 차축통과에 수반하는 순간적인 응답변화를 조사하고자 하는 경우, 부재는 차축이 계측위치 부근을 통과할 때에만 응답하기 때문에 차량의 주행위치 변화 및 진동에 오차를 수반하고 있다.

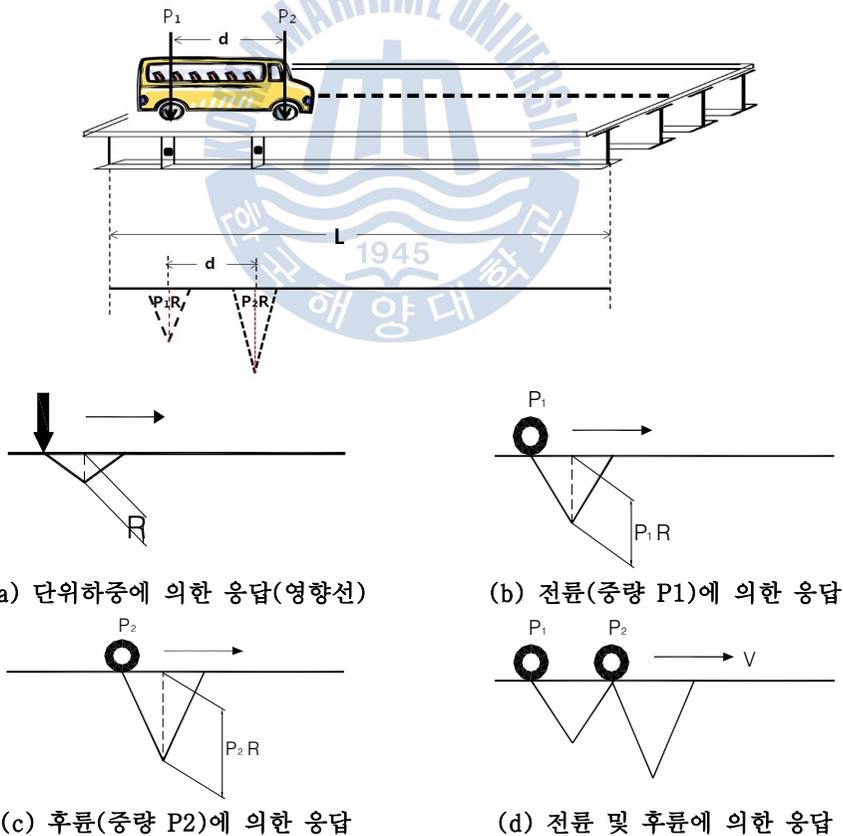


그림 1-2. 영향선이 짧은 경우의 응답파형 구성

1.3 국내·외의 연구동향

우리나라를 비롯한 세계 대부분의 국가들은 도로 인프라로 물동량의 대부분을 처리하고 있다. 국가가 선진화되어 갈수록 차량의 대형화가 이루어지고 있으며 이러한 대형차량은 도로, 사회간접자본, 도로안전 등의 다양한 측면에 영향을 미치고 있다. 장기적인 측면에서 사회간접자본의 유지관리 및 운영에 있어서 BWIM System을 이용하며, 이에 대한 국내 및 국외의 대표적인 연구결과는 다음과 같다.

1.3.1 국내 연구동향

국내의 경우 건설기술연구원(건설교통부, 2002)에서 도로교 차량 활하중 및 피로모형 개발의 연구가 수행되었다. 이 연구에서는 국도 및 고속도로에서 중차량의 통행특성 및 중량특성에 대한 자료를 다각도로 확보하여 그 특성을 분석하였으며, 차종별로 교량수명기간 동안의 최대충중량을 분포의 정규성으로 추정하고 대표차량을 이용하여 최대하중효과를 구하였다. 그 외에도 중차량의 통행특성 분석(황의승, 1999) 및 속도와 축간거리를 중심으로 한 연구가 진행되었으나(이현재, 2001), 동적 거동의 특성을 반영하지 못해 정확성이 낮다. 또한 한국도로공사(한국도로공사연구소, 2000)에서 고속도로상의 교량활하중 정형화를 위한 BWIM System연구 및 피로 하중 모형에 관한 연구를 수행하였는데 이는 실험을 통한 적용을 통해 환산계수를 산정하는 등의 이론적인 적용보다 실험에 의한 유용성을 확인하고 있다. 또한 최근에는 사장교인 서해대교와 PSC교인 금당교를 대상으로 인공지능 BWIM System적용을 위한 연구를 수행하고 있다.

박민석(2008)의 인공신경망 이론을 이용하는 BWIM System에 관한 연구에 따르면 가로보의 응답신호를 사용하여 차량하중을 분석한 결과, 인공신경망을 적용하는 방법이 기존의 영향선 분석보다 높은 정확도를 얻을 수 있는 것으로 조사되었다. 그러나 인공신경망 이론을 적용하는 경우에는 만족할만한 수준의 신경망이 구성되어야만 원하는 정확한 결과 값을 얻을 수 있다. 그러므로 상대적으로

많은 데이터의 차량주행 신호가 필요하며, 차량 축 중량산정시 가로보 변형률의 간섭 및 진동으로 오차가 발생하는 것으로 나타났다.

또한 교량 바닥판의 동적 변형률 응답을 이용한 민감도 기반 BWIM System 연구(김병화 등, 2010)에 따르면 바닥판 응답을 이용하여 축하중을 계산한 결과, 기존 Girder의 응답을 이용한 방법보다 정확한 결과를 얻을 수 있는 것으로 조사되었다.

이 연구 이외에도 최근 스마트 센서나 광센서를 이용한 BWIM System 연구(최종대 등, 2009) 및 국외의 BWIM System을 도입하여 차량하중 값의 정확성을 향상을 위한 연구가 활발히 진행 되고 있다.

1.3.2 국외 연구동향

1970년대와 1980년대 Case Western Reserve University에서 F. Moses 등(1979)은 교량주형의 변형률을 평가하기 위해 수행된 프로젝트에서 BWIM System 원리가 처음 시도되었다. 호주의 Peters(1986)는 암거를 이용한 BWIM을 고안하였고, 그 후 슬로베니아의 Znidaric(1991)와 아일랜드 Dempsey(1995)등에 의해 보다 향상된 BWIM System이 개발되었지만 시간이 긴 교량에서는 사용할 수 없고, 기본적으로 Moses 알고리즘에 기초하고 있다.

Moses 알고리즘에 기반을 둔 BWIM System은 축센서를 이용하여 차량의 속도, 축간거리 및 차량의 위치, 그리고 정적인 Girder의 휨모멘트영향선과 측정된 변형률을 최소제곱오차합수를 이용하여 축하중을 산정하였다. 그러나 교량 및 차량의 동적인 영향, 차량과 교량사이의 동적상호작용을 반영하지 못하므로 현장계측을 통한 영향선의 정확도는 낮다.

따라서 초기 BWIM System의 정확성을 증가시키기 위하여 개선방법이 연구되고 있다. 유럽에서는 알고리즘의 오차 조정 방법의 향상, FAD System 개발 및 BWIM System을 다른 교량형식에 적용하고자 Wave Project(2002) 및 COST 323(2002)을 추진하여 프로젝트를 수행해왔다. 그 결과 슬로베니아는 70개 이상의 교량에 BWIM System이 설치되어 단속하고 있으며, 국립건설연구기관인

ZAG의 연구팀은 2축~5축의 시험트럭을 사용한 편차조정절차를 연구결과로 제시하였다(Gagarine.N, 1991). 프랑스 LCPC 에서는 차량진행 방향으로 수직위치에 다량의 변형률계를 설치하여 정확성을 증가시키는 다중센서 BWIM 연구를 수행하였다. 또한 아일랜드의 TCD/UCD 연구소에는 교량과 트럭의 동적영향에 대해 동적모형알고리즘을 연구하였으며, 변형률 센서 대신 광센서를 사용하는 연구가 진행되고 있다(Dempsey.A.T, 1997)).

일본 토목연구소(2004)에서는 교량의 형태 및 주행 조건 및 계측조건에 따라 BWIM System의 적용성에 관한 연구를 수행하였다. Kobayashi(2004)는 Prototype monitoring system으로 교량의 상태를 자동적, 연속적, 실시간, 위치를 측정 하여 온도와 활하중 응답의 주파수 차이를 이용하여 분리하였고, 교통상황을 모니터링 하여 교통특성을 분석하였다. 또한 수직보강재의 변형률만으로 차량의 영향면적을 구하여 중량을 추정하는 BWIM-IT(山口榮輝 et, 2010)를 제안하였으나, 가로보 영향으로 병행에 대한 하중정밀도가 떨어지므로 가로보에 영향을 덜 받는 수직보강재의 위치를 신중히 선택해야 한다. 이외에도 세계 여러 나라에서 BWIM에 관한 활발한 연구 및 활용이 이루어지고 있다.

1.4 연구범위 및 구성

이 연구에서는 축감지 센서 대응으로, 주행차량에 의한 변형률을 이용하여 차량중량을 산정하기 위하여 주거더 같이 영향선의 길이가 긴 부재의 응답을 이용하였고, 차량의 주행차로, 주행속도 및 축간거리를 산정을 위하여 주거더의 수직 보강재 같이 영향선의 길이가 짧은 부재의 응답을 이용하였다.

중량 산출에서는 영향선의 길이가 긴 부재의 응답과 짧은 부재의 응답을 모두 이용하여 분석하였다. 영향선의 길이가 긴 부재의 응답하는 경우에는 Moses (1979)와 Kobayashi(2004)등과 같이 영향선을 기반으로 하여 중량을 산출하였다. 영향선의 길이가 짧은 부재의 응답을 이용하는 경우에는 山口榮輝 등(2010)과 같이 영향선의 영향면적을 이용하여 중량을 산출하여 비교하였다. 연구에서는 시험 차량을 각 차량별로 모형화 하여 연구를 수행하였으며, 검증을 위한 주행차량 역시 차량별로 모형화 하여 연구를 수행하였다. 그리고 이 연구에서 나오는 변형률 응답은 현장실험에 의해 얻어지는 방법이 아닌 시간이력과 같은 해석적 방법으로 도출된 응답을 이용하여 그 유용성을 확인하였다.

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 산정 흐름 및 적용이론에 대해 기술하였다.

제 3장에서는 교량응답을 해석적으로 도출하여 대상교량에서 시험차량의 특성 및 하중을 파악하였다.

제 4장에서는 3장에서 도출된 각 시험차량의 특성을 이용하여 주행차량의 중량산출을 분석하였다.

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



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

2.1 BWIM System 산정

2.1.1 기본구성

BWIM System의 구성은 크게 하드웨어 및 소프트웨어로 구성되어있다. 하드웨어는 차량의 차중과 속도데이터를 수집하는 축감지 센서, 교량의 변형률 값을 측정하여 차량의 중량 데이터를 측정하는 변형률 게이지, 차량속도, 축간거리 탐지 및 변형률 게이지를 판독할 수 있는 자료처리기 및 입출력장치로 구성되어있다. 소프트웨어는 PC와 연결을 위한 통신프로그램, 속도와 차축 및 변형률 게이지로부터 중량계산에 이용되는 WIM 소프트웨어 등으로 이루어진다. 그림 2-1에 BWIM System의 기본구성을 나타내었다.

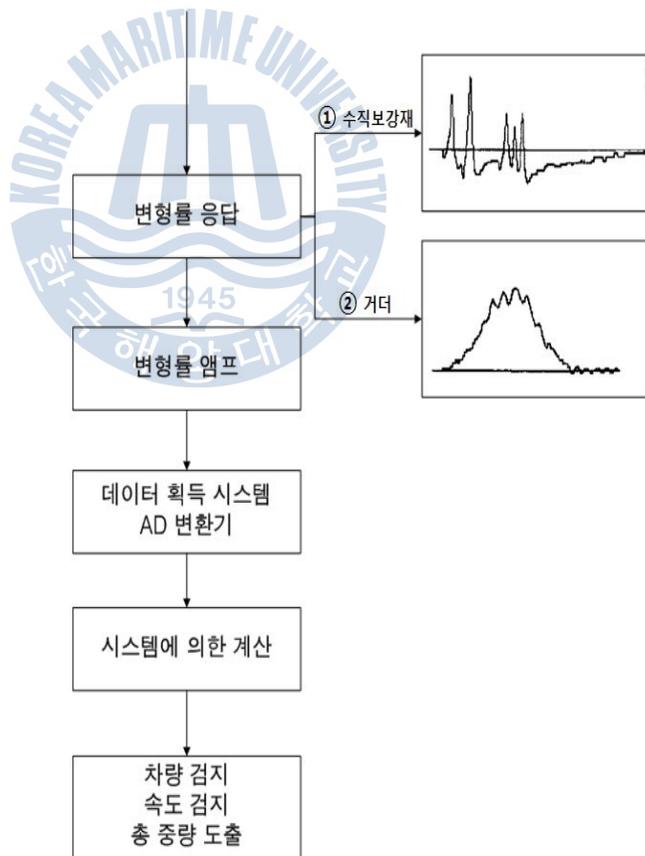
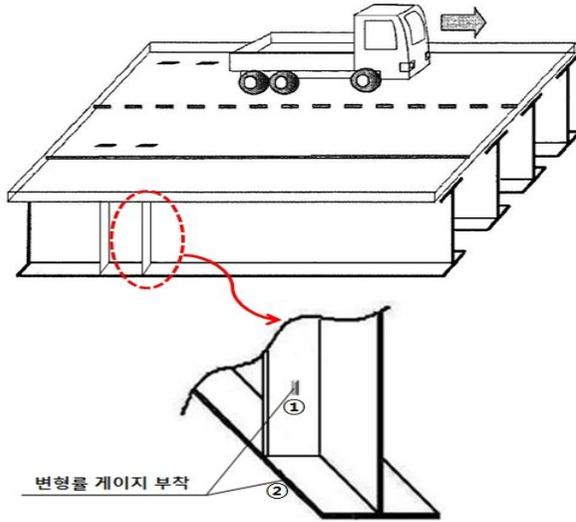


그림 2-1. BWIM System 기본구성

2.1.2 산정 흐름

그림 2-1에 나타낸 것과 같이 BWIM System의 한 개략적인 중량산출은 우선 축간거리 등의 차량제원 및 축 중량 정보를 알고 있는 차량을 이용하여 변형률 응답을 도출한다. 이 이후 변형률 앰프 및 데이터 획득 시스템 및 AD 변환기를 거쳐 중량산정 System의 한 계산을 실시하여 중량산출을 할 수 있다.

그림 2-2에 중량 산정 System 흐름을 나타내었는데 이 연구에서는 이를 이용하여 차량의 축간거리 및 차축의 중량을 산출하였다. 먼저, 수직보강재의 변형률을 이용하여 차량의 위치와 속도를 검지하여 차량을 분리한다. 또한 교량 주거더의 변형률 응답으로부터 시간에 따른 영향선을 도출한다. 이때의 영향선을 이용하여 각 차량의 축 중량, 총 중량을 산정할 수 있다. 산정계산에서는 Girder에서 측정된 실제 변형률과 계산된 변형률의 차이가 최소가 되도록 한다. 이 이후의 절에서 이 연구에서 적용된 보다 상세한 알고리즘에 대해 기술하였다.

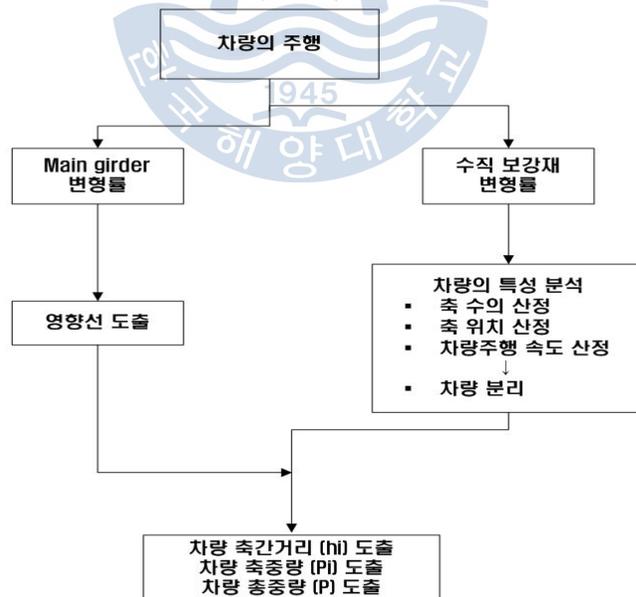


그림 2-2. 중량산정 System 흐름

2.1.3 차량 위치산정 방법

차량의 위치를 산정하기 위해 영향선의 길이가 짧은 부재인 주거터의 수직보강재의 응답특성을 이용하였다. 이러한 부재는 부재 바로 위를 차축이 통과할 때에만 변형이 발생하므로 차축 통과와 겹치기에 적합하다고 판단된다. 차량이 교량 위의 기준 측정위치를 통과했을 때의 시간과 차량의 주행속도로부터 차량위치는 식 (2.1)에 의해 산출 할 수 있다. 이하 이 연구에 적용된 차량위치를 산출하는 방법에 대해 기술하였다.

$$x = x_0 + v(t - t_0) \quad (2.1)$$

여기서, x : 차축의 위치
 t : 시간
 x_0 : 기준 측정위치
 t_0 : 기준 측정위치를 통과했을 때의 시간
 v : 차량 속도

(1) 직접관독법

교량 위를 차량이 통과했을 때 수직보강재에 부착된 변형률계이기로 측정된 변형률의 일례를 그림 2-3에 나타내었다(Kobayashi, 2004). 차량이 수직보강재 바로 위쪽을 통과했을 때에만 변형률의 peak 값이 발생되므로 시간이력곡선으로부터 변형률의 peak 시간을 직접 육안으로 관독하는 방법이다.

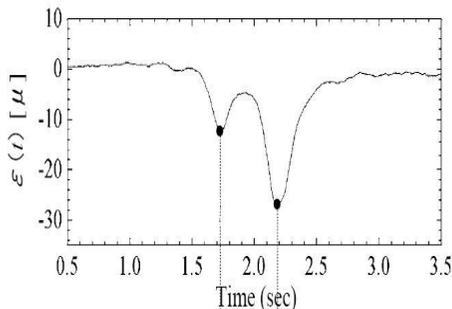


그림 2-3. 직접관독법을 이용한 peak 시간검지

(2) 미분판독법

실제 계측에서는 On-line 기반에서 전자동으로 수직보강재 변형률의 peak 시간을 판독하여 컴퓨터에 의해 자동검지가 되어야 한다. 수직보강재에서 측정된 변형률인 그림 2-3을 이용하여 자동으로 peak 검지하는 방법의 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.

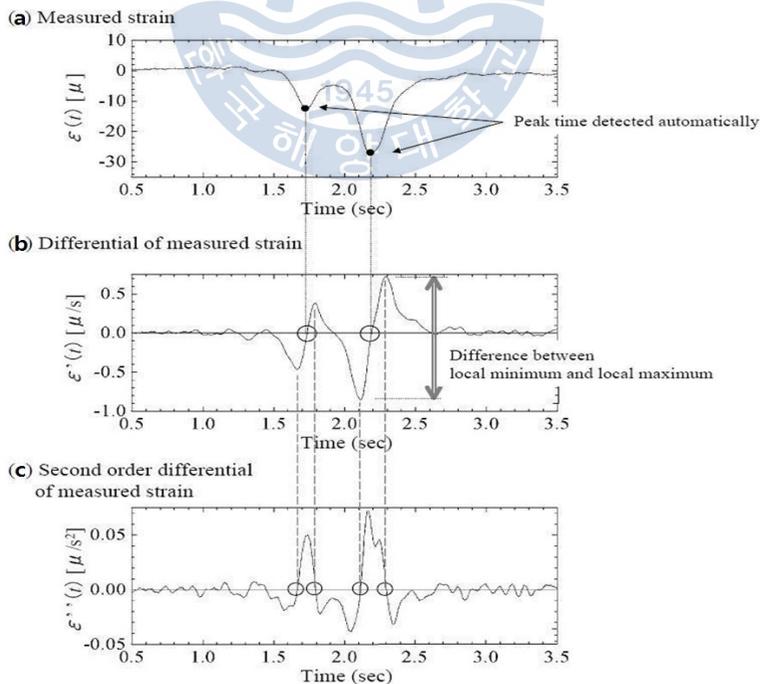


그림 2-4. 미분판독법을 이용한 peak 시간검지

2.1.4 차량 속도산정 방법

수직보강재에서 나오는 변형률 파형은 차축이 통과할 때에만 변형이 발생하므로 시간차에 의한 속도 검지로부터 2개소의 측정지점을 지나간 차량에 대한 차축의 통과시간을 알 수 있다. 2개소의 측정지점의 사이의 이격거리를 알고 있으므로 거리와 시간을 이용하여 차량 속도를 검출 할 수 있다. 이하 이 연구에 적용된 차량 속도산정방법에 대해 기술하였다.

(1) 직접관독법

교량 위를 차량이 통과했을 때 주거더의 수직보강재에서 측정된 변형률의 일례를 그림 2-5에 나타내었다(Kobayashi, 2004). 여기서 변형률게이지 [1]에서 측정된 변형률 파형을 $f(t)$, 변형률게이지 [2]에서 측정된 변형률 파형을 $g(t)$ 로 하면, $f(t)$ 와 $g(t)$ 의 각각의 피크 시간($f(t)$ 의 1~6과 $g(t)$ 의 1'~6')을 육안으로 관독하여 그 시간 차이를 산출한다. 또한 두 측정점 사이의 거리를 알고 있으므로 속도를 산출할 수 있다.

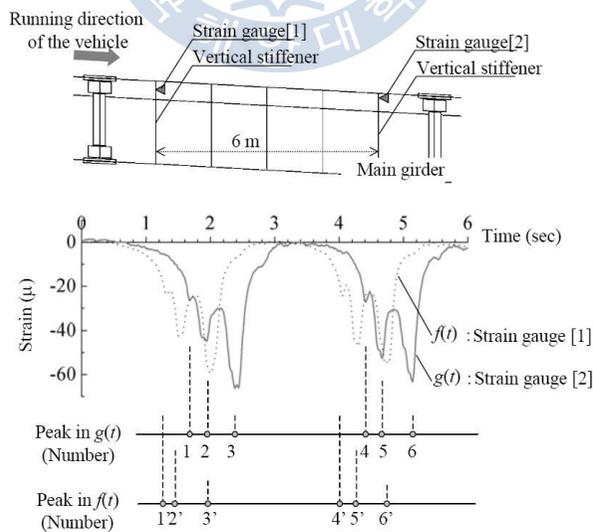


그림 2-5. 직접관독법에 의한 시간차이

(2) 자기상관함수를 이용한 관독법

실제 계측에서는 On-line 기반에서 전자동으로 수직보강재의 변형률의 peak 시간을 관독하여 컴퓨터에 의해 자동검지가 되어야 한다. 이러한 관독은 육안으로 파형 형상을 이용하여 쉽게 관독할 수 있으나, 컴퓨터에서 데이터 값만으로는 peak 점 관독 처리는 복잡하게 된다. 따라서 각 측정지점에서의 변형률 파형이 유사하고 속도가 일정하다고 가정하여 다음과 같은 식 (2.2)로 나타낼 수 있다. 식 (2.2)의 자기상관함수에서 $C(\tau)$ 가 최대가 되는 지점의 τ 는 두 파형의 시간적인 편차량이 된다.

그림 2-5의 2개의 변형률 파형을 이용하여 식 (2.2)를 계산하면 그림 2-6과 같이 자기상관함수에 의한 시간차이를 나타낼 수 있다(Kobayashi, 2004). 자기상관은 서로 다른 시차의 신호 값이 서로 상관되는 것으로, 시간 t 에서의 신호 값이 τ 만큼의 시간지연이 있을 때의 신호 값에 영향을 미치는 것을 말한다. $C(\tau)$ 의 최대값으로부터 두 측정점을 통과한 시간차이와 두 측정점 사이의 거리를 알고 있으므로 속도를 산출할 수 있다.

$$C(\tau) = \int f(t-\tau) \cdot g(t) dt \quad (2.2)$$

여기서, $f(t)$: 변형률게이지 [1]에서의 변형률
 $g(t)$: 변형률게이지 [2]에서의 변형률

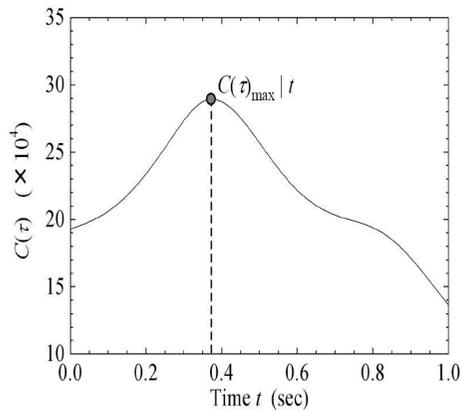


그림 2-6. 자기상관함수에 의한 시간차이

(3) 미분판독법

차량 속도를 구하기 위한 미분판독법은 2.1.3절에서 구한 수직보강재의 변형률을 1계 미분, 2계 미분하여 자동으로 Peak 감지하는 방법을 사용하였다. 1계 미분과형이 극소점과 극대점의 차이가 설정 값 이상이 되면 그 사이에 0이 되는 시간이 차량의 축이 수직보강재의 바로 위쪽을 통과하는 시간을 산출할 수 있다. 이와 같이 1계 미분이 0이 되는 시간을 컴퓨터로 자동으로 인식하여 그 차이를 계산하고 측정지점의 거리를 이용하여 속도를 산출할 수 있다.



2.1.5 영향선산정 방법

차량이 교량위의 임의의 점을 통과할 때의 영향선($f(t)$)은 직선적이지 않은 곡선을 근사하기 위해 다항식 회귀분석(polynomial regression)으로 나타낼 수 있다. 이는 둘 또는 그 이상의 변수들 간에 존재하는 관련성을 분석하기 위하여, 관측된 자료에서 이들 간의 함수적 관계식을 통계적 방법으로 추정하는 것이다. $a_0, a_1, a_2 \dots a_d$ 와 같은 미지의 계수로 구성되며 식 (2.3)과 같이 d 차 다항식으로 나타낼 수 있다. l 차선 차량의 n 축이 지날 때 측정지점 i 의 변형률($\varepsilon_{il}(t)$)은 식 (2.4)에 의해 계산된다. 다항식 회귀분석을 계산하기 위한 대표적인 이론은 최소자승법과 가우스 조던법이 있는데 이 논문에서는 계산변형률($\varepsilon_{il}(t)$)과 측정변형률($\varepsilon_{il}^*(t)$) 사이 오차의 합계(E)는 최소자승법을 사용하여 식 (2.5), 식 (2.6)으로 나타내었다.

$$f(x(t)) = a_0 + a_1x(t) + a_2x(t)^2 + \dots + a_dx(t)^d \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_{il}(t) = \sum_{n=1}^{N_{\max}} P_n \cdot f_{il}(x(t)_n) \quad (2.4)$$

$$x = x_0 + v(t - t_0)$$

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

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

$$t = j\Delta t \quad (2.6)$$

여기서, T_{\max} : 측정변형률의 전체 샘플링 수
 Δt : 샘플링 변형률 데이터의 시간간격

이 연구에서는 영향선의 다항식 계수(a_d)를 구하기 위해서 오차의 합(E)이 최소값을 가지도록 편미분하여 계산하면 식 (2.7)으로 나타낼 수 있다. 이 식을 정

리하면 식 (2.8), 식 (2.9)과 같이 미지 값인 F_{ed} , M_d , a_d 값을 산출할 수 있다. F_{ed} , M_d , a_e 값을 F, M, A로 표현한 식 (2.10)과 같은 행렬식을 얻을 수 있다. 이를 측정변형률($\varepsilon_{il}^*(t)$)과 주행차량의 위치를 이용하여 계산하면 영향선의 다항식 계수(a_d)를 산출할 수 있다.

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

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

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

$$\{F\}\{M\} = \{A\} \quad (2.10)$$

영향선 다항식 계수(a_d)의 정도에 따른 정확성은 다항식 계수 정도에 따른 오차의 합(E)을 나타낸 그림 2-7에 따라 10차 다항식 이후부터 오차의 합(E)이 일정하다는 것을 알 수 있었다(Kobayashi, 2004). 또한 국외연구로 Yusuke Kobayashi(2004) 및 Eiki Yamaguchi(2004) 등에서 13차 및 11차 다항식으로 계산하여 안정적인 결과가 나오는 것을 알 수 있었다. 따라서 이 연구에서는 11차 다항식을 사용하였다.

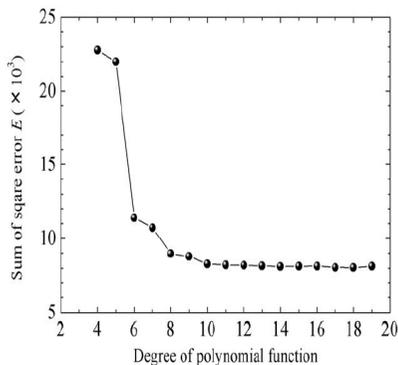


그림 2-7. 다항식계수의 정도에 따른 오차의 합(E)

2.1.6 차량 중량산정 방법

교량부재의 영향선은 부재특성에 따라 주거더와 같이 영향선이 긴 부재와 수직보강재와 같이 영향선이 짧은 부재로 구분된다. 이하 이 연구에 적용된 부재의 영향선 길이에 따른 차량중량산정방법에 대해 기술하였다.

(1) 영향선을 이용한 산정

교량상의 주행 차량에 의해 발생하는 영향선의 길이가 긴 부재의 변형률 응답으로부터 주행 차량의 중량을 추정하였다. 교량상의 지점 x_n 에 차축이 위치하고 있을 때의 영향선과 축의 중량을 이용하여 측정지점에 발생하는 변형률 $\varepsilon_{il}(t)$ 을 식 (2.11)과 같이 나타낼 수 있다. 계산변형률($\varepsilon_{il}(t)$)과 측정변형률($\varepsilon_{il}^*(t)$) 사이 오차의 합계(E)는 최소제곱 오차함수를 사용하여 식 (2.12), 식 (2.13)에 나타내었다.

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

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
 Δt : 샘플링 변형률 데이터의 시간간격
 I_{\max} : 변형률측정 위치 수

축 중량에 대해 최소값을 가지는 오차의 합계(E)를 산출하기 위해 m 번째 축 중으로 편미분하면 식 (2.14)으로 계산된다. 이를 정리하면 식 (2.15), 식 (2.16)과 같이 F_{mn} , M_m , A_m 값을 산출할 수 있다. F_{mn} , M_m , A_m 값을 F , M , A 로 표현한

식 (2.17)과 같은 행렬식을 얻을 수 있으며, 이를 계산하면 차량중량을 산정할 수 있다.

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

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

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

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

(2) 영향면적을 이용한 산정

수직보강재의 변형률을 적분법 BWIM에 적용하여 차량의 축 중량 및 총 중량을 산출한다. n축의 차량이 주행할 때, 수직보강재에 발생하는 변형률은 일반적으로 식 (2.18)으로 주어진다. 영향면적은 식 (2.19)와 같이 적분하면 계산된다. 이와 같이 영향면적이 계산되면 차량중량 W 와 영향면적의 비례에 따라 임의의 차량중량을 산출할 수 있다. 이에 대한 식을 식 (2.20)에 나타내었다.

$$g(x) = \sum_{n=1}^{n_{\max}} W_n \times f(x - l_n) \quad (2.18)$$

여기서, x : 차량의 위치
 W_n : 차량 n번째 차축의 축 중량
 $f(x)$: 영향선 함수
 l_n : 차량의 1축과 n축과의 차축거리

$$A = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) dx = \sum_{n=1}^{n_{\max}} W_n \cdot \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = W \cdot \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx \quad (2.19)$$

$$W = \frac{A}{A_c} W_c \quad (2.20)$$

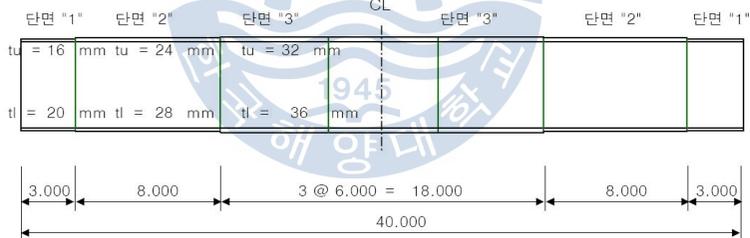
여기서, W : 미지의 차량중량
 A : 미지의 영향면적
 W_c : 기지의 차량중량
 A_c : 기지의 영향면적

3장. 수치해석에 따른 차량중량추정방법

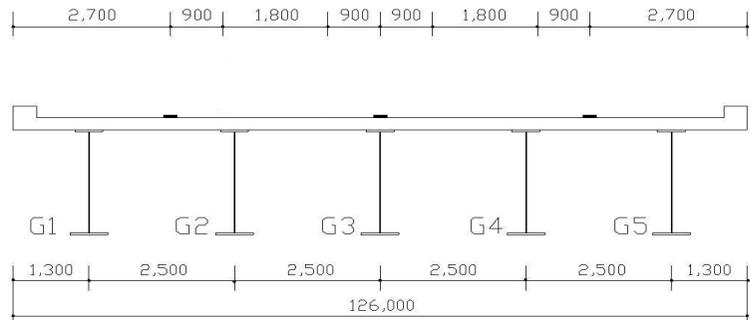
3.1 대상교량의 제원 및 특성

플레이트 거더교는 스틸박스 거더교와 함께 우리나라에 가장 많이 시공되었던 강교 형식으로 중량이 가볍고 제작이 용이하고 경제적이다. 응력의 상태가 명확하며 현장이음, 구조물 중량에 비해 제작이 합리적이지만 가설 중 횡진도를 일으키기 쉬우며 비틀림에 대한 저항력이 약한 특징을 가지고 있다.

이 연구에서는 도로설계편람(국토해양부, 2000, 2008)에 있는 평면상 직교, 지지 조건상 단순교로서 응력상태가 비교적 명확한 강합성 플레이트 거더교를 대상교량으로 선정하였다. 대상 교량제원은 경간 40m이며, 그림 3-1에 상세한 단면도를 나타내었다.



(a) 측면도



(b) 횡단면도

그림 3-1. 교량 단면도

3.2 이동하중에 따른 시간이력해석

3.2.1 시간이력해석 개요

이동하중에 따른 시간이력해석에 사용된 프로그램은 시간이력해석 전용 프로그램인 DAP-1(Dynamic Analysis Program)을 사용하였다(이희현, 1990). 이는 주행하중, 주행질량 및 SDOF 모델을 지원하며 Newmark- β 법에 의한 진동해석을 할 수 있는 특징을 가지고 있다. 개략적인 흐름도를 그림 3-2에 나타내었다. 이 연구에서는 그림 3-3의 해석모형에 대해 Girder, 가로보 및 수직보강재에 대해 Frame element로, 바닥판은 Plate element, 바닥판과 Girder와의 연결은 Rigid link element로 조합하였다. 모델링한 교량에 대해 주행질량을 차량모형으로 수행하여 실제교량의 동적응답을 구현하고자 한다.



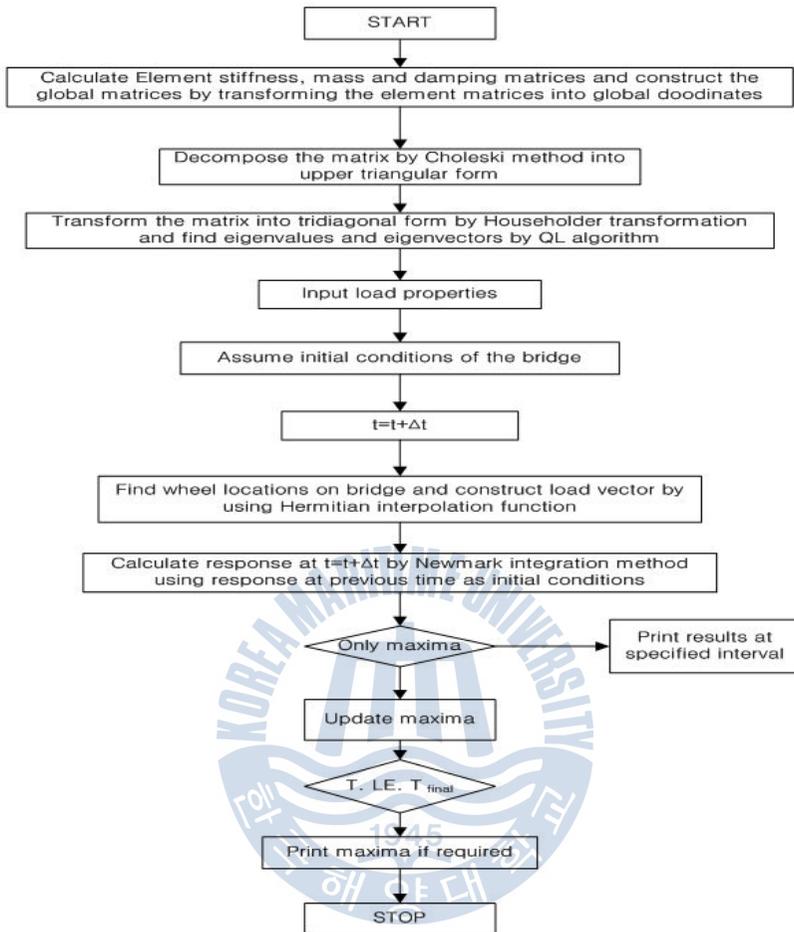


그림 3-2. 시간이력해석 프로그램의 흐름도

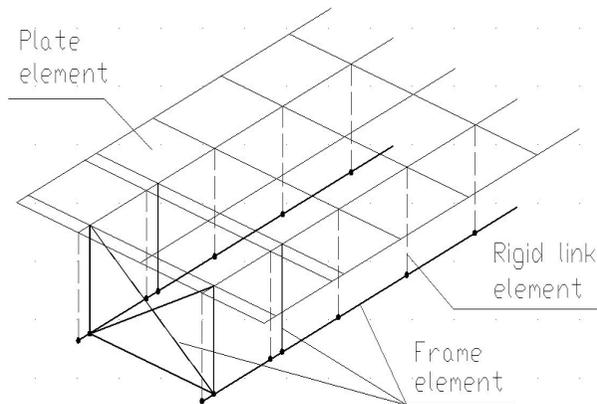


그림 3-3. 해석대상교량의 모델링

3.2.2 해석변수 및 조건

해석대상 교량에 실제 교통의 흐름의 다양성 및 변동성을 반영하기 위해 차량 길이에 따른 제원 분류를 실시하였고, 표 3-1에는 차량 제원에 따른 도수분포표, 그림 3-4에 차량 제원에 따른 분포도를 나타내었으며 수집한 차량의 제원은 한정적인 것을 알 수 있었다. 이 연구의 시험차량제원은 박민석(2008)의 차량자료를 이용하여 표 3-2에 나타내었다. 그림 3-5는 주행패턴 및 속도를 나타내었다.

표 3-1. 차량제원에 따른 분포표

거리	3축 수		4축 수			4축(2축+2축) 수		
	L1	L2	L1	L2	L3	L1	L2	L3
1000~1500	1	58		10	28			540
1501~2000	1		18					
2001~2500						12		
2501~3000	1			8				
3001~3500	25		4	6		12		
3501~4000			1			48		
4001~4500	1			3		60		
4501~5000	12			1		132		
5001~5500	6		4			48	540	
5501~6000	6		1			204		
6001~6500	5					24		
6501~7000								

거리	5축 수				5축(3축+2축) 수			
	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
1000~1500			2	2	12	516		600
1501~2000	2				12			
2001~2500								
2501~3000		2			12			
3001~3500					252			
3501~4000								
4001~4500								
4501~5000					108			
5001~5500					72	72	600	
5501~6000					72			
6001~6500					60			
6501~7000								

※ 여기서 L1, L2, L3, L4는 축간거리를 의미한다.

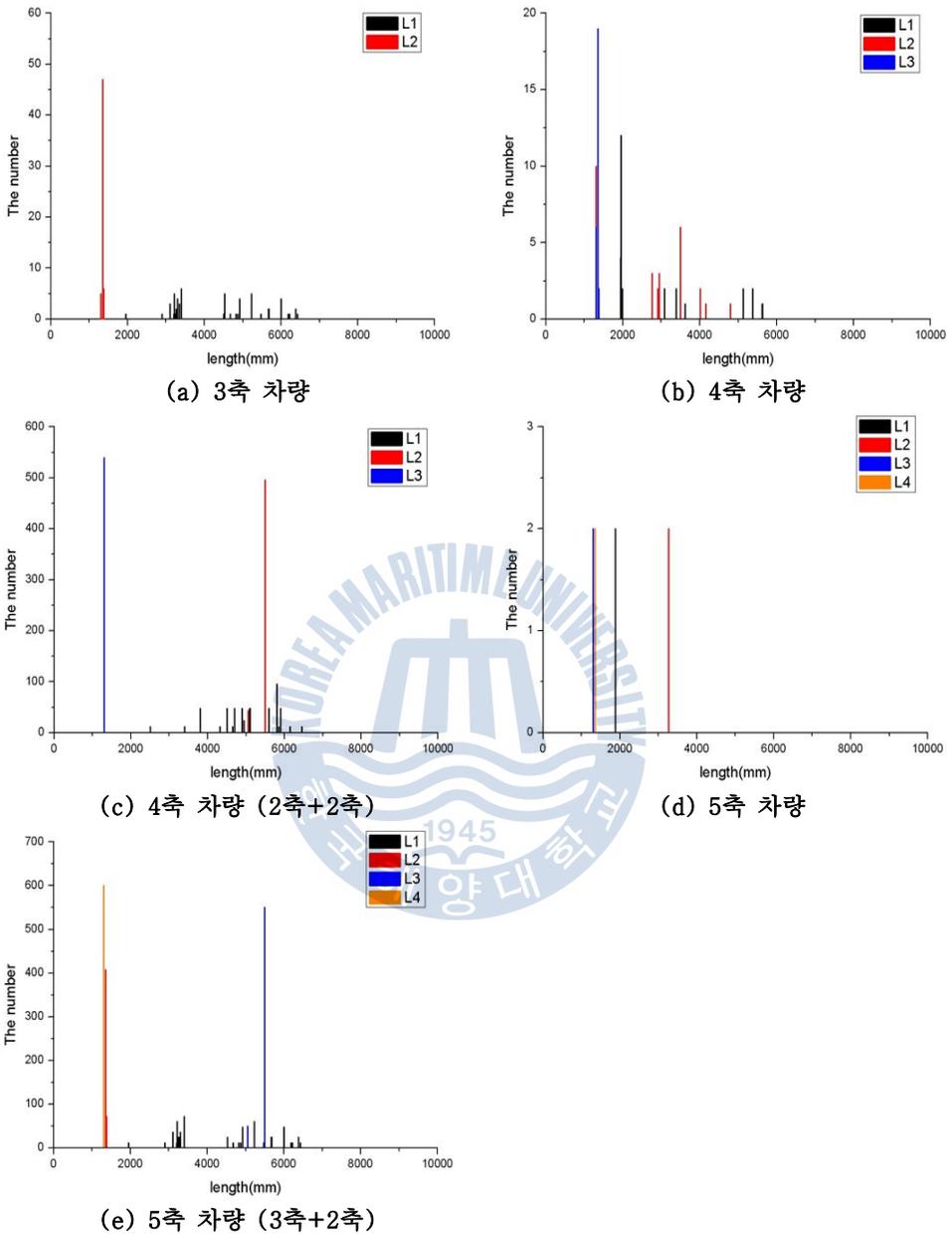
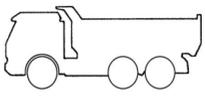
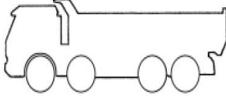
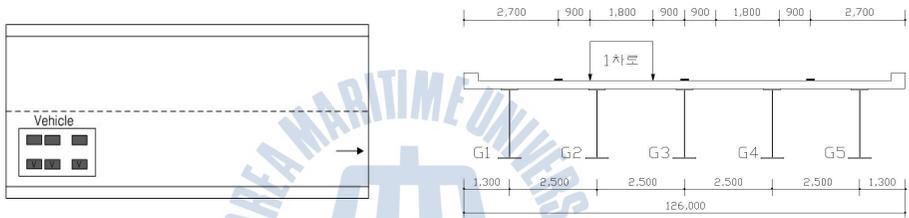


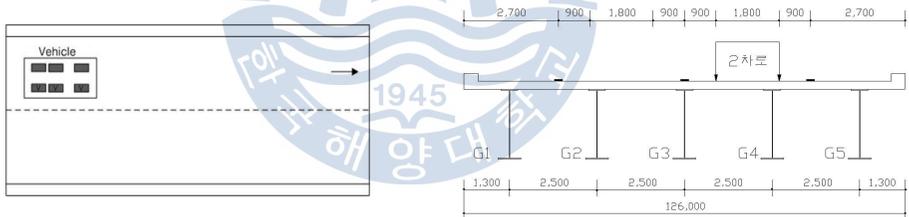
그림 3-4. 차량 제원 분포도

표 3-2. 시험차량의 조건

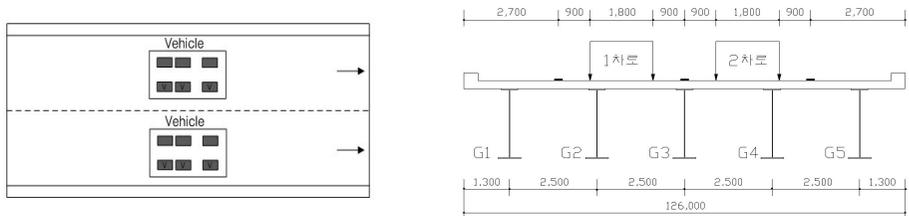
검토항목	시험차량 제원				
		P1	P2	P3	
 3축차량	중량	76	120	120	
	축간거리	L1 3.20	L2 1.30		
 4축차량	중량	73.7	74.0	80.8	80.8
	축간거리	L1 1.88	L2 3.02	L3 1.30	L4



(a) 1차선 단독주행 (60km/h)



(b) 2차선 단독주행 (60km/h)



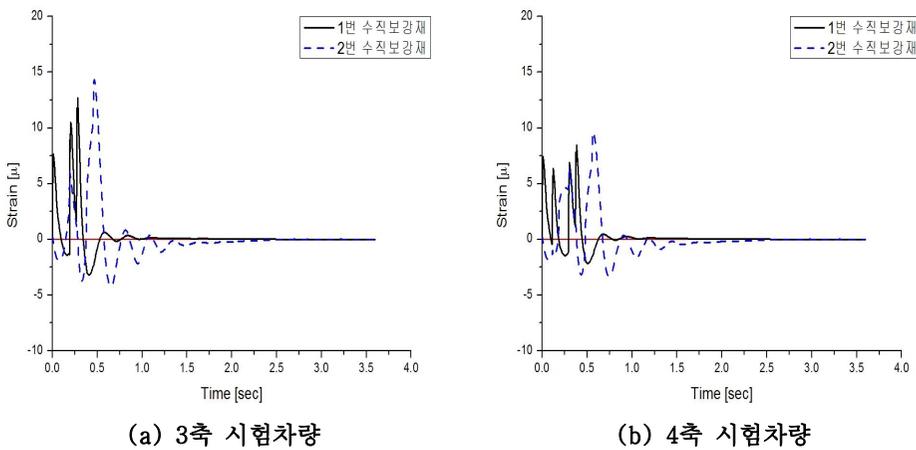
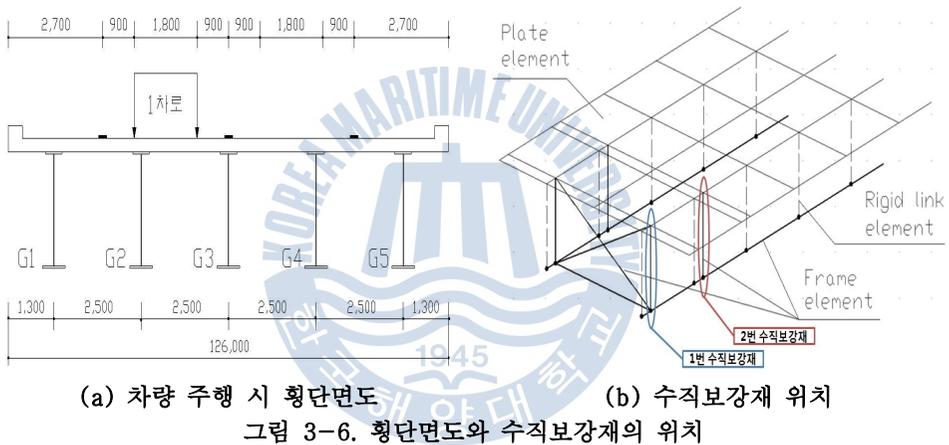
(c) 동시주행(60km/h)

그림 3-5. 차량 주행패턴

3.2.3 시간이력해석에 따른 교량 응답 결과

(1) 영향선 길이가 짧은 부재의 시간이력해석

BWIM 산정흐름에서 수직보강재와 같이 영향선이 짧은 부재를 이용하여 차량 위치, 속도 등의 차량특성을 분석하였다. 그림 3-6(a)는 1차로 주행시 횡단면도를 나타내었고 수직보강재의 1번과 2번의 위치를 3-6(b)에 나타내었다. 차량이 교량의 수직보강재를 통과할 때에만 변형이 발생하므로 3축 및 4축 시험차량에 대한 시간이력곡선의 결과는 그림 3-7과 같다.



(2) 영향선이 긴 부재에서의 시간이력해석

BWIM 산정흐름에서 Girder와 같이 영향선이 긴 부재를 이용하여 교량의 영향선, 차량의 중량을 분석하였다. 표 3-3에 3축 시험차량 Girder별 최대변형률을 그림 3-8에 3축 시험차량의 Girder별 시간이력곡선의 결과를 나타내었다. 이와 같이 1차선에는 Girder 2번과 Girder 3번, 2차선으로 주행할 때에는 Girder 3번과 Girder 4번 그리고 1, 2차선을 동시에 주행할 때에는 Girder 2번과 Girder 3번이 가장 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다. 4축 시험차량에 대한 각 Girder의 시간이력곡선은 부록에 나타나 있으며 3축 시험차량과 유사한 형태로 나타났다.

표 3-3. 3축 시험차량 Girder별 최대변형률

구분		Girder 1	Girder 2	Girder 3	Girder 4	Girder 5
3축시험차량	1차선주행	26.80	35.24	27.85	19.53	15.53
	2차선주행	15.72	19.59	27.83	33.95	27.79
	동시주행	42.44	54.46	55.67	53.07	43.07

단위 (μ)

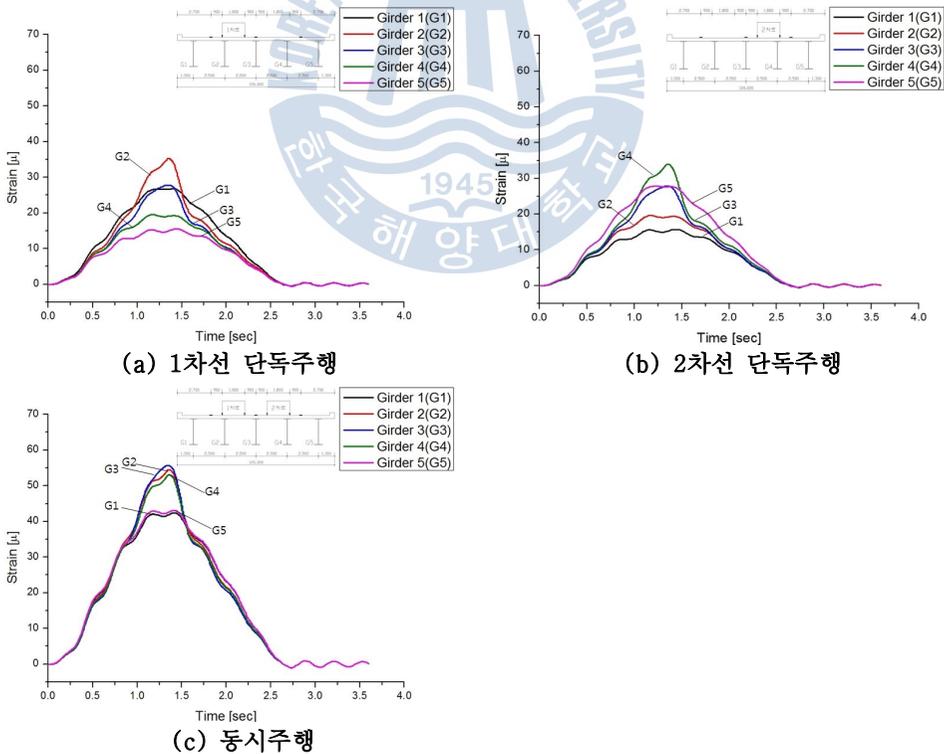


그림 3-8. 3축 시험차량의 시간이력해석

3.3 시험차량에 따른 BWIM 분석

3.3.1 차량의 위치분석

식 (2.1)로부터 차축 위치를 산출하기 위해서는 기준위치를 통과할 때의 시간과 속도를 검지할 필요가 있다. 이 장에서는 차축이 기준위치를 통과했을 때의 시간 판정에 대해 Girder의 수직보강재를 이용하여 판정하였다.

(1) 직접판독법

수직보강재의 바로 위쪽을 차량이 통과할 때에만 변형률이 발생하므로 변형률의 peak는 기준위치에서의 차량통과를 의미한다. 그림 3-9와 그림 3-10과 같이 각 시험차량에 대한 peak 시간을 직접판독법을 이용하여 산출하면 표 3-4와 같이 산출할 수 있다.

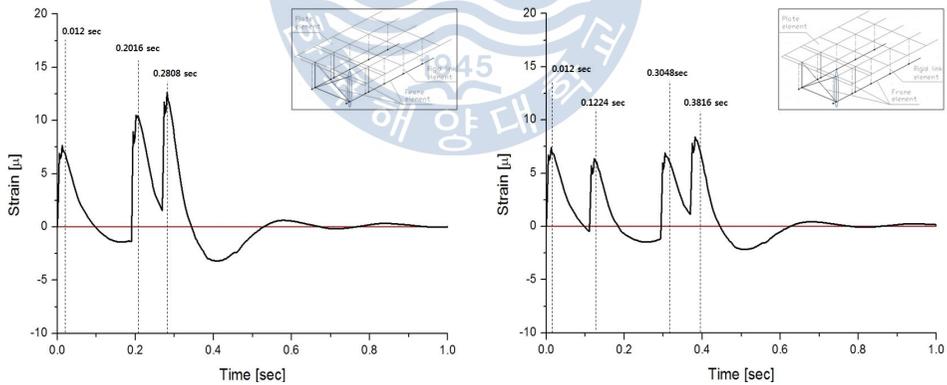


그림 3-9. 3축 시험차량의 Peak 시간검지 그림 3-10. 4축 시험차량 Peak 시간검지

표 3-4. 직접판독법을 이용한 Peak 시간검지

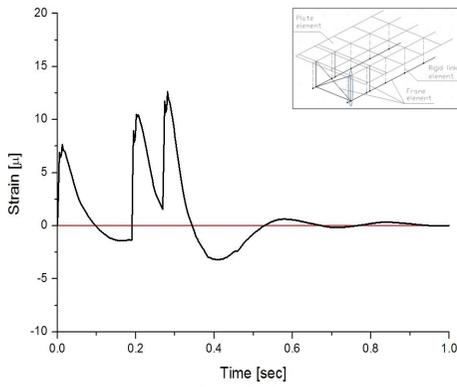
구분	단위 (sec)	
	3축 차량	4축 차량
1축	0.012	0.012
2축	0.2016	0.1224
3축	0.2808	0.3048
4축		0.3816

(2) 미분판독법

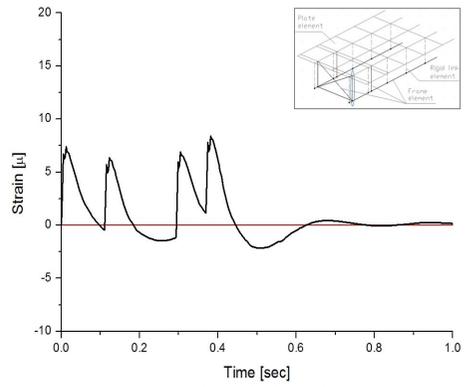
앞에서 기술한 미분판독법 개념을 적용하여 자동 peak 검지 방법에 의한 수직 보강재에서의 차량통과에 대한 시간의 산출결과를 나타내었다. 그림 3-11에 나타낸 것과 같이 이 연구에서는 자동 Peak 검지방법을 사용하였을 때 미분파형이 정확히 0이 되는 시간이 나타나지 않는다. 데이터의 시간이력곡선의 기울기가 급하고 시간에 대한 주기가 실측에서 나오는 주기보다 길기 때문이다. 그러나 실측에서의 실제 파형의 기울기는 해석에서의 시간이력곡선의 기울기보다 완만하게 나오므로 일반적으로 실제 현장에서는 미분파형이 0이 될 것으로 생각된다. 동일하게 그림 3-12에 4축 시험차량에 대해 실시하였다. 3축 및 4축 시험차량에 대한 분석결과를 표 3-5에 나타내었다.

표 3-5. 미분판독법을 이용한 peak 시간검지

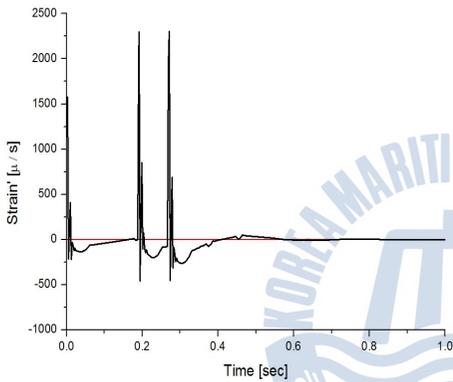
구분	단위 (sec)	
	3축 시험차량	4축 시험차량
1축	0.0096~0.0120	0.0096~0.0120
2축	0.1992~0.2016	0.1200~0.1224
3축	0.2784~0.2808	0.3024~0.3048
4축	-	0.3792~0.3816



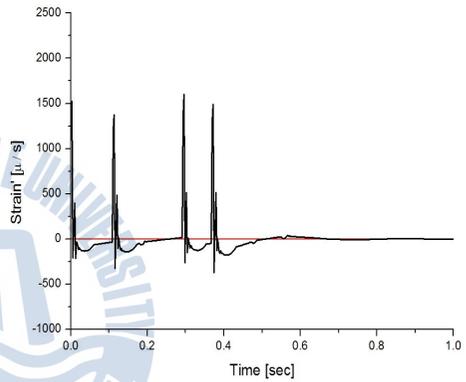
(a) 시간이력곡선



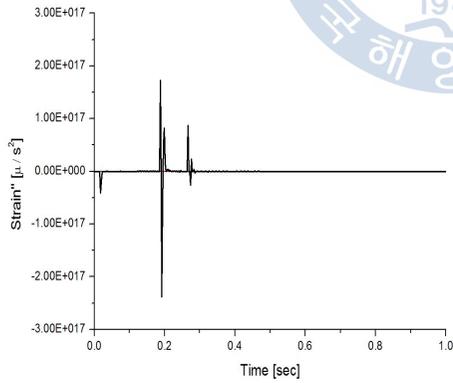
(a) 시간이력곡선



(b) 1계 미분

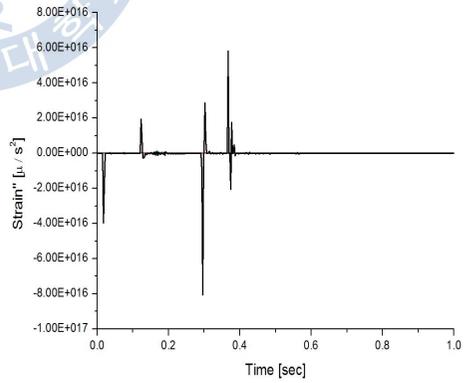


(b) 1계 미분



(c) 2계 미분

그림 3-11. 3축 시험차량의 peak 시간검지



(c) 4축 2계 미분

그림 3-12. 4축 시험차량의 peak 시간검지

3.3.2 차량의 속도분석

이 장에서는 교량 위에서 통과 차량의 축 위치를 산출하기 위해 필요한 차량의 속도산출을 하였다. 시험차량이 그림 3-13에 나타난 것과 같이 변형률 센서가 부착된 수직보강재 2개소를 통과 하는 경우, 1번 수직보강재 파형과 2번 수직보강재 파형의 peak시간차이를 산출하면 속도를 계산할 수 있다.

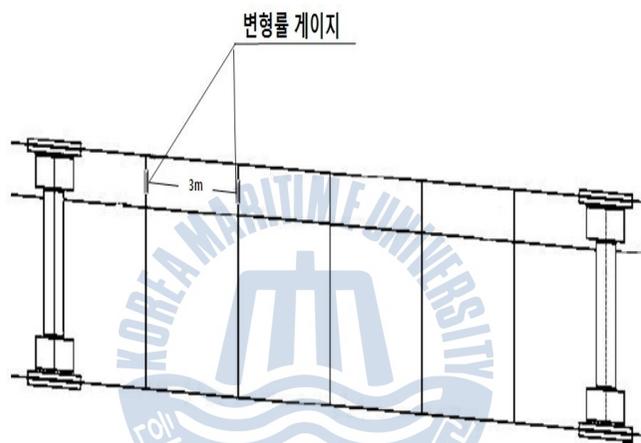


그림 3-13. 수직보강재 2개소 위치

(1) 직접관독법

직접관독법을 이용하여 3축 시험차량에 대한 속도 산출결과를 그림 3-14에 나타내었다. 1번 수직보강재의 peak점과 2번 수직보강재의 peak점과의 시간을 비교한 결과 0.1824초로 나타났다. 수직보강재 2개소 이격거리는 3m이므로 속도는 $59.22\text{km/h}(3\text{m}/0.1824\text{s}=16.45\text{m/s})$ 가 된다. 또한 1번 수직보강재에서 1축과 2축의 peak점 시간간격이 0.1896초, 2축과 3축의 peak점 시간간격이 0.0792초이므로 앞서 구한 속도를 이용하여 차량의 축간거리를 계산하면 $3.12\text{m}(0.1896\text{s}\times 16.45\text{m/s})$ 와 $1.30\text{m}(0.0792\text{s}\times 16.45\text{m/s})$ 가 되므로 이 연구에서 산출된 속도는 정확성이 높은 것으로 판단된다. 동일하게 그림 3-15에 4축 시험차량에 대해 실시하였다. 3축 및 4축 시험차량에 대한 분석결과를 표 3-6에 나타낸 결과 3축에 비해 4축 시험차량의 오차가 크게 나오는 것을 알 수 있었다. 왜냐하면 축간거리가 짧은 축의 수직보강재의 peak점이 중첩되어 나타나 정확히 판단하기 어렵기 때문이다.

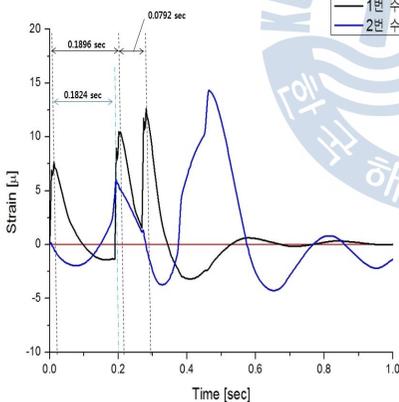


그림 3-14. 3축 시험차량의 속도산출

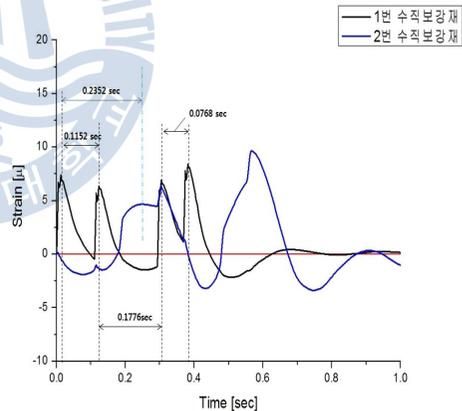


그림 3-15. 4축 시험차량의 속도산출

표 3-6. 직접관독법을 이용한 속도와 축간거리의 오차

단위 (속도(km/h), 축간거리(m))

구분	속도	축간거리		
		L1	L2	L3
3축 시험차량	59.22	3.21	1.30	
오차율	(-1.30)	(-2.50)	(0.00)	
4축 시험차량	45.94	1.41	2.33	0.98
오차율	(-23.43)	(-25.0)	(-22.85)	(-24.6)

(2) 자기상관함수를 이용한 관독법

수직보강재 2개소 지점에서 3축 시험차량이 통과할 때의 변형률을 계산하여 자기상관함수($C(\tau)$)가 최대가 되는 시간을 산출하면 0.2016초가 산출되며 이를 그림 3-14에 나타내었다. 여기서 자기상관함수($C(\tau)$)는 차량의 시간적 편차량을 의미하며, 2개소 측정 지점의 이격거리가 3m이므로 이때의 차량통과 속도는 $53.57\text{km/h}(3\text{m}/0.2016\text{s}=14.88\text{m/s})$ 로 계산된다. 또한 1번 수직보강재에서 1축과 2축의 peak점 시간간격이 0.1896초, 2축과 3축은 0.0792초이므로 앞서 구한 속도를 이용하여 축간거리를 계산하면 $2.82\text{m}(0.1896\text{s}\times 14.88\text{m/s})$ 와 $1.18\text{m}(0.0792\text{s}\times 14.88\text{m/s})$ 로 계산된다. 동일하게 그림 3-17에 4축 시험차량에 대해 실시하였다. 3축 및 4축 시험차량에 대한 분석결과를 표 3-7에 나타내었다.

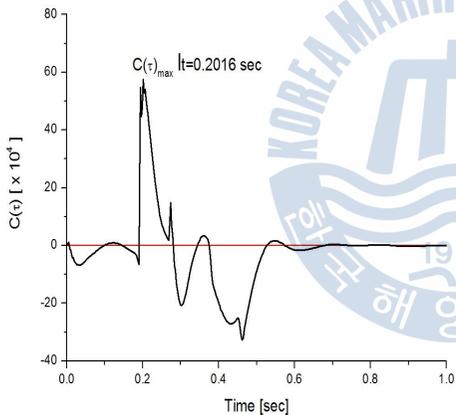


그림 3-16. 3축 시험차량의 속도산출

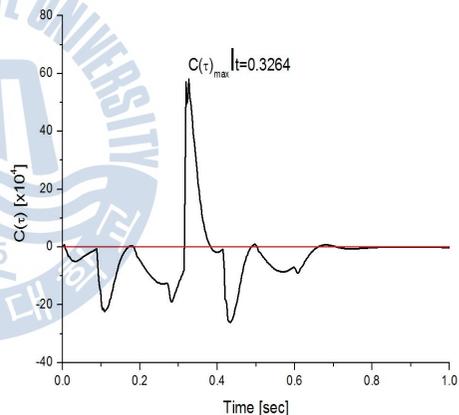


그림 3-17. 4축 시험차량의 속도산출

표 3-7. 자기상관함수를 이용한 속도와 축간거리의 오차

단위 (속도(km/h), 축간거리(m))

구분	속도	축간거리		
		L1	L2	L3
3축 시험차량	53.57	2.82	1.18	
오차율	(-10.72)	(-11.88)	(-9.23)	
4축 시험차량	35.42	1.09	1.79	0.66
오차율	(-40.97)	(-42.02)	(-40.73)	(-49.23)

(3) 미분판독법

변형률이 수직보강재가 설치되어 있는 위치(1계 미분과형의 값이 0인 지점)를 대상차량인 3축 시험차량이 통과할 때의 시간차이를 이용하여 차량속도를 계산한 값을 그림 3-18에 나타내었다. 그림으로 알 수 있듯이 1번 수직보강재의 peak점과 2번 수직보강재가 0인 시간을 비교한 결과 0.1824초로 나타났다. 두 수직보강재의 이격거리가 3m이므로 $59.22\text{km/h}(3\text{m}/0.1824\text{s}=16.45\text{m/s})$ 가 된다. 또한 1번 수직보강재에서 1축과 2축의 peak점 시간간격이 0.1968초, 2축과 3축의 peak점 시간간격이 0.072초이므로 앞에서 산출한 속도를 이용하여 축간거리를 계산하면 $3.24\text{m}(0.1968\text{s}\times 16.45\text{m/s})$ 와 $1.18\text{m}(0.072\text{s}\times 16.45\text{m/s})$ 로 계산된다. 동일하게 그림 3-19에 4축 시험차량에 대해 실시하였다. 3축 및 4축 시험차량에 대한 분석결과를 표 3-8에 나타내었다.

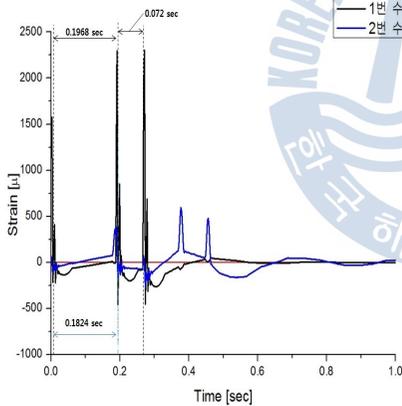


그림 3-18. 3축 시험차량의 속도산출

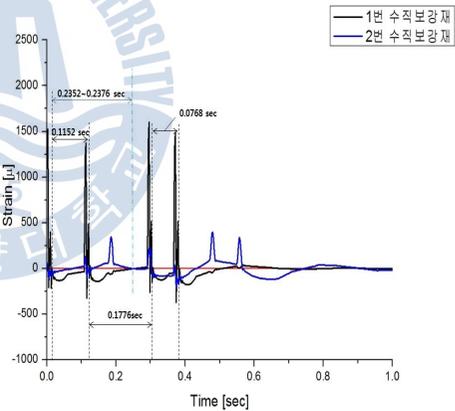


그림 3-19. 4축 시험차량의 속도산출

표 3-8. 미분판독법을 이용한 속도와 축간거리의 오차

단위 (속도(km/h), 축간거리(m))

구분	속도	축간거리		
		L1	L2	L3
3축차량	59.22	3.24	1.18	
오차율	(-1.32)	(1.25)	(-9.23)	
4축차량	45.67~45.94	1.39~1.41	2.30~2.33	0.97~0.98
오차율	(-23.43~-23.88)	(-25.00~-26.01)	(-22.85~-23.84)	(-24.6~-25.38)

이상의 방법에 의해 속도 산정 방법에 대한 오차를 비교해본 결과, Peak점을 이용하면 3축에서 오차가 최대 0.00~최소 -2.50이며 4축에서 오차가 최대 -22.85~최소 -25.00로 나타났다. 자기상관함수로는 3축에서 오차가 최대 -9.23~최소 -11.88이며 4축에서 오차가 최대 -40.73~최소 -49.23으로 나타났다. 수직보강재 지점으로는 3축에서 오차가 최대 1.25~최소 -9.23이며 4축에서 오차가 최대 -22.85~최소 -26.01로 나타났다. 따라서 Peak점의 시간을 이용한 속도가 가장 정확하게 나왔으나 실시간 계측을 위해서는 1계 미분을 이용한 속도검출이 가장 적절하다고 판단된다. 또한 실제 파형의 기울기는 시간이력곡선의 기울기보다 완만하게 나오고, 각 축에 대한 파형의 값이 얻어지므로 정확성이 높아질 것으로 판단된다. 향후 실제 계측을 통해 속도의 정확성을 비교하는 것이 필요하다고 판단된다.



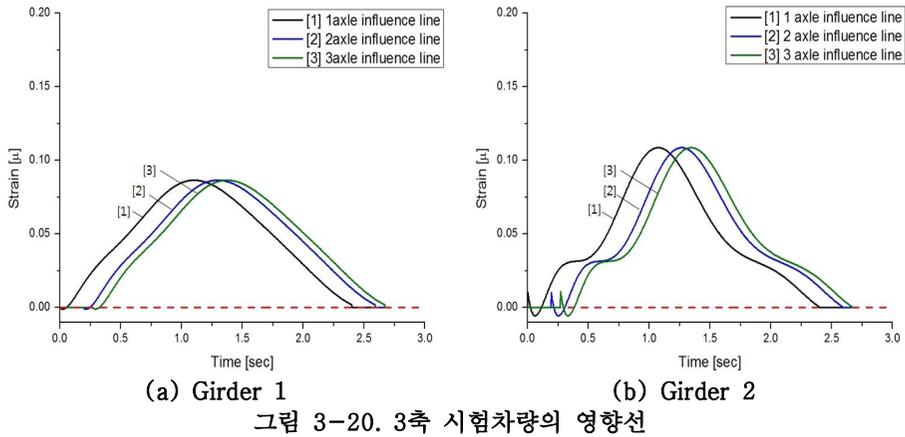
3.4 시험차량 주행시의 중량분석

이 장에서 시험차량이 주행할 때의 교량의 영향선을 구하기 위해 영향선의 길이가 긴 부재인 주거더를 이용하였다. 시험차량이 주행할 때 주거더의 시간이력 해석과 주행차량의 위치를 알면 영향선의 다항식 계수를 계산할 수 있으므로 영향선을 도출할 수 있다. 또한 시험차량에 대한 영향선의 다항식 계수를 이용하여 미지의 차량에 대해 영향선을 구할 수 있으며 이를 이용하여 중량을 산출할 수 있다.

3.4.1 영향선 산출

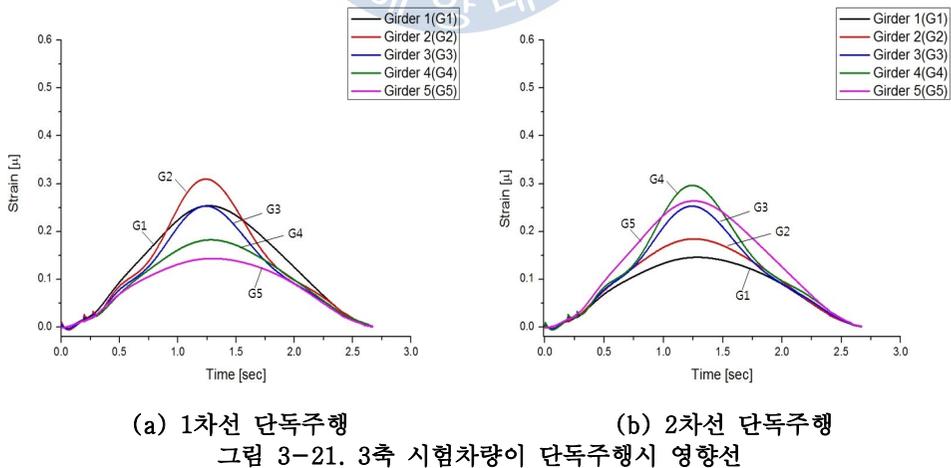
실제 변형률 계측을 통해 얻을 수 있는 것은 동적인 변형률이므로 정적상태의 영향선과 동적 영향선 사이에는 차이가 있다고 할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 교량의 자유진동을 포함한 동적인 변형률을 이용하였다. 3축 시험차량의 축중량과 축간거리 및 주거더의 변형률을 식 (2.8)과 식 (2.9)에 대입하여 영향선의 다항식 계수를 구하였다. 영향선의 다항식 계수에 각 축의 위치를 시간에 따른 거리를 대입하여 영향선을 도출할 수 있다.

3축 시험차량이 1차선으로 주행할 때에 Girder 1번과 Girder 2번에서 각 축에 대한 영향선의 일례를 나타내면 그림 3-20과 같다. Girder에 따라 변형률이 다르므로 영향선 또한 형태가 다르게 나오는 것을 알 수 있었다. 또한 차량이 1차선으로 주행시 Girder 2번 위를 통과하므로 Girder 1번보다 보다 큰 값을 가지는 것을 알 수 있었다. 동일하게 4축 시험차량에 대해 영향계수를 도출하여 영향선을 그릴 수 있었으며 3축 시험차량과 유사한 영향선이 나오는 것을 알 수 있었다.



(1) 단독주행 시 Girder 별 영향선 산출

3축 시험차량이 단독주행시 차선별 주행에 따른 Girder의 영향선을 그림 3-21에 나타내었다. 표 3-3과 같이 1차선 단독주행시 Girder 2번, 2차선 단독주행시 Girder 4번의 값이 가장 크게 나오는 것을 알 수 있었다. 따라서 시간이력곡선에 따라 영향선 값이 변화하며, 차량주행위치에 따라 Girder의 값이 변하는 것을 알 수 있었다.



(2) 동시주행시(1,2차선) Girder별 영향선 산출

동시주행(병행)에 대한 영향선을 그림 3-22에 나타내었다. 동시주행(병행)은 1차선 단독주행과 2차선 단독주행시의 값이 중첩된 것으로 표 3-3의 결과와 같이 Girder 2번과 3번의 값이 가장 크게 나오는 것을 알 수 있었다. 따라서 시간이력 곡선에 따라 영향선 값이 변화함을 알 수 있었다.

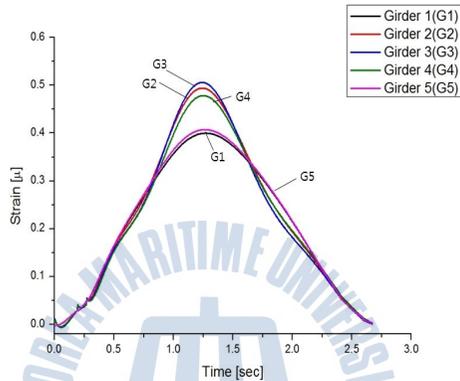


그림 3-22. 3축 시험차량이 동시주행시 영향선

3.4.2 중량산출

(1) 영향선을 이용한 중량산출

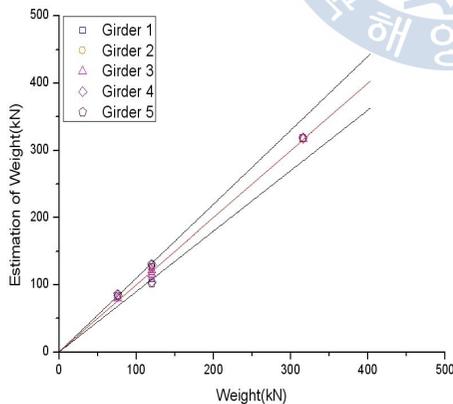
그림 2-2의 BWIM 산정흐름에 기술한 것과 같이 축중량 및 전체중량을 알고 있는 시험차량에 대해 구한 Girder의 축별 영향선의 다항식 계수를 이용하여 영향선을 도출하고 그 영향선을 사용하여 임의 주행차량에 대한 축 중량 및 전체 중량을 각 차선별 주행에 대해 산출할 수 있다. 이것으로 부터 표 3-9와 같은 3축 시험차량에 대해 중량을 계산하였다. 1차선에서는 Girder 2번, 2차선에서는 Girder 4번 일 때의 축 중량 및 총중량의 오차가 가장 작은 것을 알 수 있었다. 실제 변형률뿐만 아니라 영향선에 가장 크고 명확하게 응답이 나온 Girder에 정확도가 높은 것을 알 수 있었다. 이에 대한 Girder별 각 축 중량 및 총중량의 정밀도를 그림 3-23에 나타내었다.

이와 마찬가지로 4축의 추정중량 및 정밀도를 표 3-10 및 그림 3-24에 나타내었다. 4축일 경우 1차선에서는 Girder 3번, 2차선에서는 Girder 3번 일 때의 축중량 오차가 가장 작았으나 총중량 오차는 3축과 같이 1차선에서는 Girder 2번, 2차선에서는 Girder 4번 일 때 오차가 가장 작은 것을 알 수 있었다. 축 중량은 2축과 3축의 축간거리가 짧아 명확하게 나오지 않는 것으로 판단된다. 이들 결과로부터 계산한 변형률을 산출할 수 있었고 이를 시간이력곡선의 데이터와 비교하였다. 그 결과 3축 시험차량에 대해 1차선에서는 Girder 1번과 2번이 시간이력곡선 변형률과의 계산한 변형률의 값의 오차가 가장 작게 나타나는 것을 알 수 있었으며 그 중 Girder 2번이 가장 명확한 값을 지니고 있었다. 2차선에서는 Girder 3번과 4번이 시간이력곡선 변형률과의 계산한 변형률의 값의 오차가 가장 작게 나타나는 것을 알 수 있었으며 그 중 Girder 4번이 가장 명확한 값을 가지고 있었다.

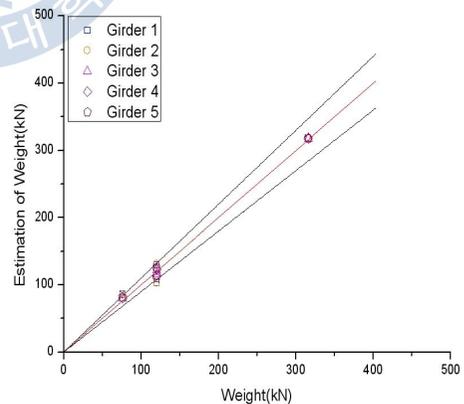
그림 3-25과 그림 3-26 및 그림 3-27에 3축 시험차량이 1차선, 2차선 단독주행 및 동시주행에 대해서 각 Girder별 변형률과 시간이력곡선 데이터를 비교하여 나타내었다. 1차선 단독주행시 표 3-9와 같이 Girder 2 번에서, 2차선 단독주행시에도 Girder 4에서 가장 명확한 값이 나왔다. 동시주행에서 1차선과 2차선의 변형률을 중첩한 값과 시간이력곡선의 데이터를 비교하였다. 그 결과 Girder 2, 3, 4번이 오차가 가장 작게 나오는 것을 알 수 있었다. 마찬가지로 4축 시험차량에 대해서도 이와 유사한 그래프가 도출되었으며 부록에 나타나있다.

표 3-9. 3층 시험차량 중량산출

		단위 (중량(kN), 오차(%))				
구분		1축	2축	3축	총중량	
시험차량		76	120	120	316	
1차선	Girder1	중량	82.40	109.42	126.29	318.10
		오차	(8.42)	(-8.82)	(5.24)	(0.67)
	Girder2	중량	80.24	114.54	112.95	317.73
		오차	(5.58)	(-4.45)	(2.46)	(0.55)
	Girder3	중량	80.20	115.95	121.67	317.82
		오차	(5.52)	(-3.37)	(1.39)	(0.57)
	Girder4	중량	84.43	104.09	129.80	318.32
		오차	(11.09)	(-13.26)	(8.16)	(0.73)
	Girder5	중량	85.78	102.15	130.80	318.72
		오차	(12.87)	(-14.88)	(9.00)	(0.86)
2차선	Girder1	중량	85.46	103.36	129.86	318.67
		오차	(12.45)	(-13.87)	(8.21)	(0.85)
	Girder2	중량	84.63	103.32	130.37	318.33
		오차	(11.36)	(-13.90)	(8.64)	(0.74)
	Girder3	중량	80.20	115.86	121.76	317.82
		오차	(5.53)	(-3.45)	(1.47)	(0.58)
	Girder4	중량	80.37	114.37	123.04	317.78
		오차	(5.76)	(-4.69)	(2.53)	(0.56)
	Girder5	중량	82.09	110.26	125.69	318.04
		오차	(8.01)	(-8.21)	(4.74)	(0.65)



(a) 1차선

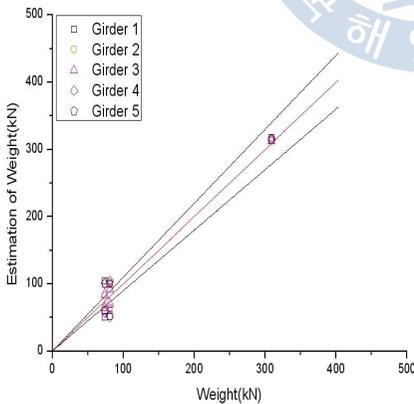


(b) 2차선

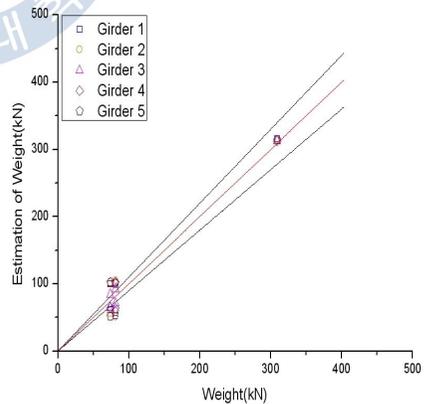
그림 3-23. 3층 시험차량 중량 정밀도

표 3-10. 4축 시험차량 중량산출

구분		단위 (중량(kN), 오차(%))					
시험차량		1축	2축	3축	4축	총중량	
1차선	Girder1	중량	103.88	50.58	60.22	100.11	314.78
		오차	(40.95)	(-31.65)	(-25.47)	(23.90)	(1.77)
	Girder2	중량	81.70	64.37	101.76	64.70	312.53
		오차	(10.86)	(-13.02)	(25.94)	(-19.92)	(1.04)
	Girder3	중량	84.38	64.66	92.62	71.35	313.00
		오차	(14.49)	(-12.63)	(14.63)	(-11.70)	(1.20)
	Girder4	중량	100.90	58.02	51.27	104.67	314.86
		오차	(36.91)	(-21.60)	(-36.54)	(29.55)	(1.80)
	Girder5	중량	100.59	60.71	53.32	100.94	315.56
		오차	(36.48)	(-17.95)	(-34.02)	(24.93)	(2.02)
2차선	Girder1	중량	100.05	61.51	52.48	101.45	315.49
		오차	(35.75)	(-16.88)	(-35.05)	(25.56)	(2.00)
	Girder2	중량	101.77	56.81	51.33	105.01	314.91
		오차	(38.08)	(-23.23)	(-36.48)	(29.97)	(1.81)
	Girder3	중량	84.35	64.65	92.58	71.41	313.00
		오차	(14.45)	(12.63)	(14.59)	(-11.62)	(1.20)
	Girder4	중량	81.70	64.42	102.64	63.84	312.60
		오차	(10.86)	(-12.95)	(27.03)	(-21.00)	(1.07)
	Girder5	중량	102.95	51.79	59.27	100.66	314.68
		오차	(39.69)	(-30.01)	(-26.65)	(24.58)	(1.74)

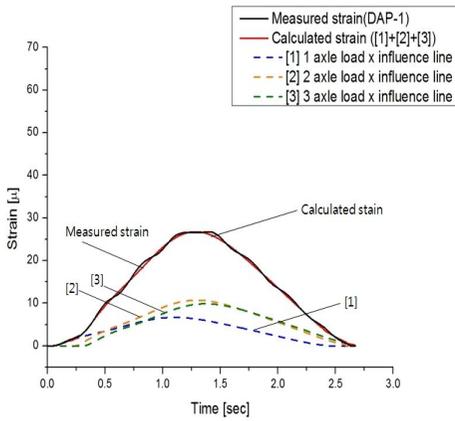


(a) 1차선

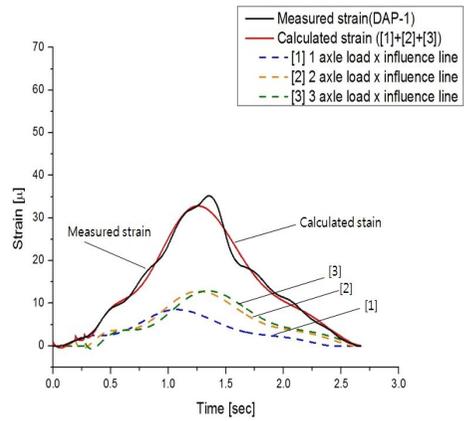


(b) 2차선

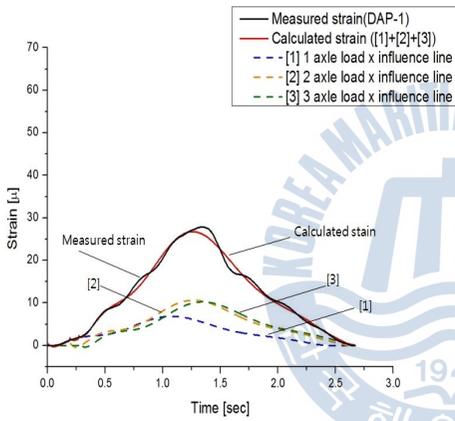
그림 3-24. 4축 시험차량 중량 정밀도



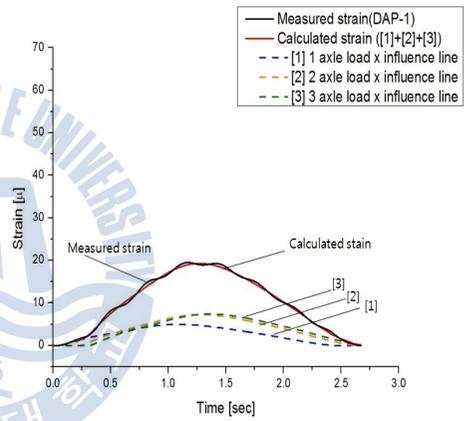
(a) Girder 1에서의 변형을 비교



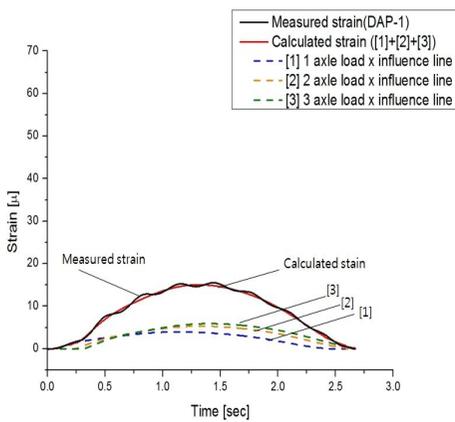
(b) Girder 2에서의 변형을 비교



(c) Girder 3에서의 변형을 비교

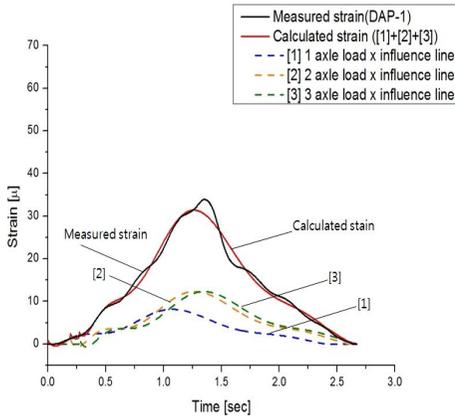


(d) Girder 4에서의 변형을 비교

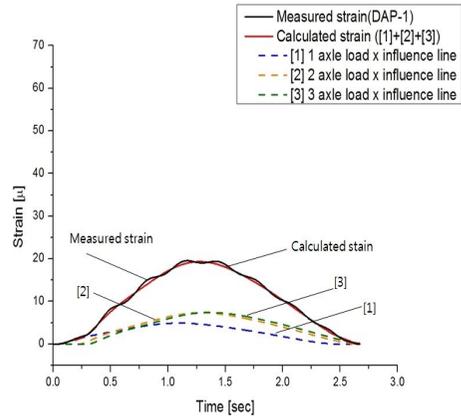


(e) Girder 5에서의 변형을 비교

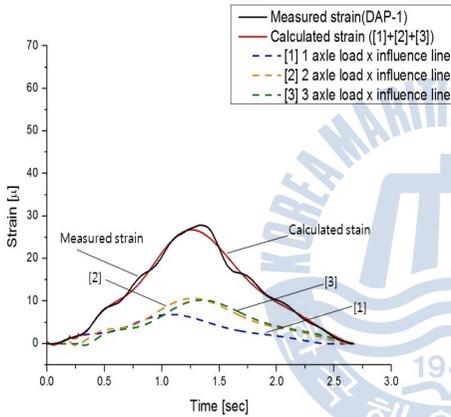
그림 3-25. 1차선에서의 변형을 검증



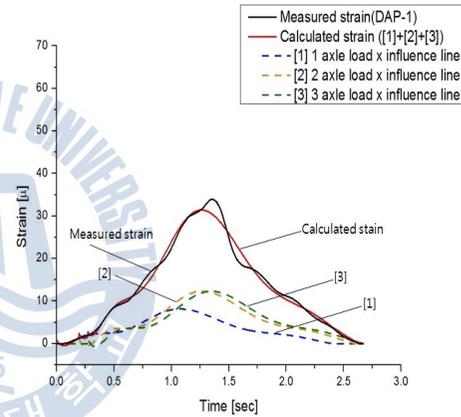
(a) Girder 1에서의 변형을 비교



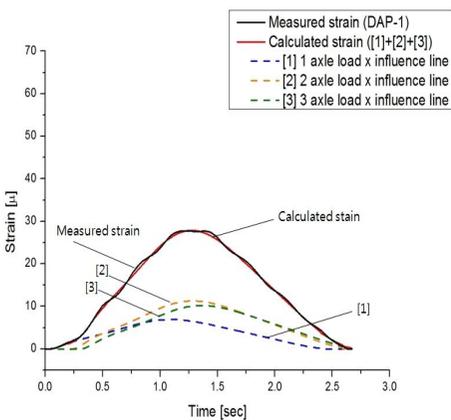
(b) Girder 2에서의 변형을 비교



(c) Girder 3에서의 변형을 비교

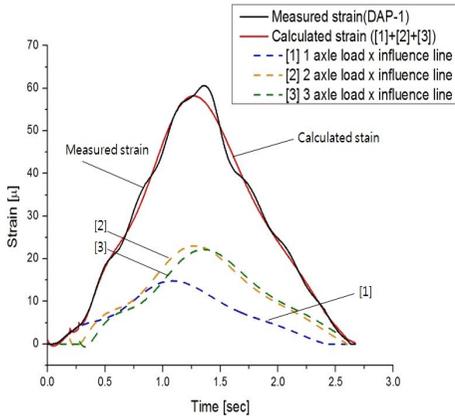


(d) Girder 4에서의 변형을 비교

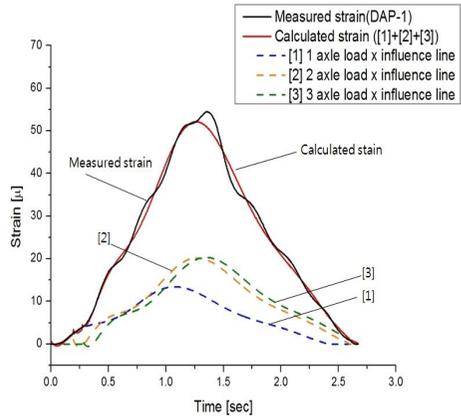


(e) Girder 5에서의 변형을 비교

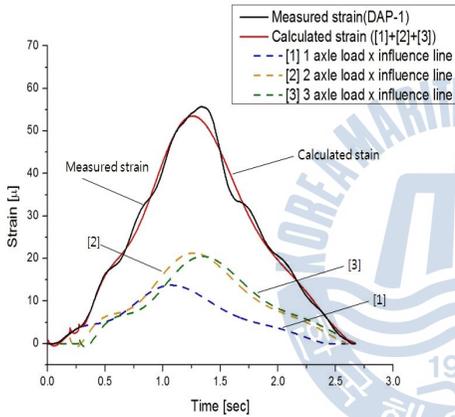
그림 3-26. 2차선에서의 변형을 검증



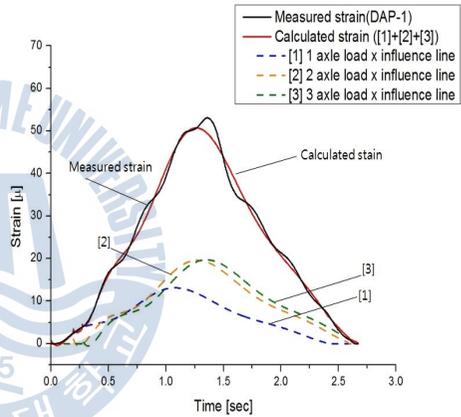
(a) Girder 1에서의 변형을 비교



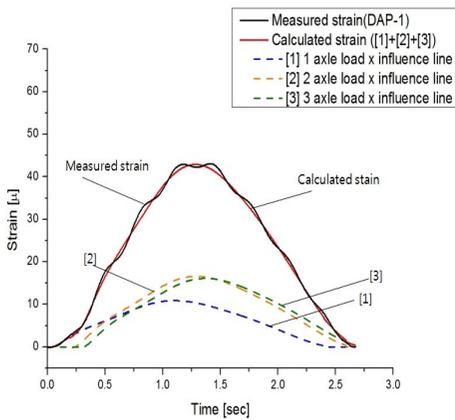
(b) Girder 2에서의 변형을 비교



(c) Girder 3에서의 변형을 비교



(d) Girder 4에서의 변형을 비교



(e) Girder 5에서의 변형을 비교

그림 3-27. 동시주행에서의 변형을 검증

(2) 시험차량에 대한 영향면적

각 시험차량에 대해 시간이력해석으로 구한 변형률을 적분하여 영향면적을 그림 3-28과 같이 나타내었다. 이렇게 영향면적이 구해지면 차량중량 W 과 영향면적의 비례에 따라 미지의 차량중량을 구할 수 있다. 미지의 차량이 주행 시 영향면적을 구하여 각 축에 대한 비율을 적용하여 각 축에 대한 중량과 총 중량을 다음 장에 검증하였다.

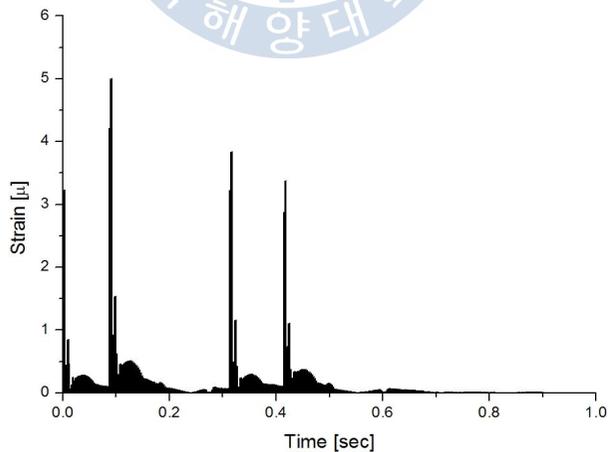
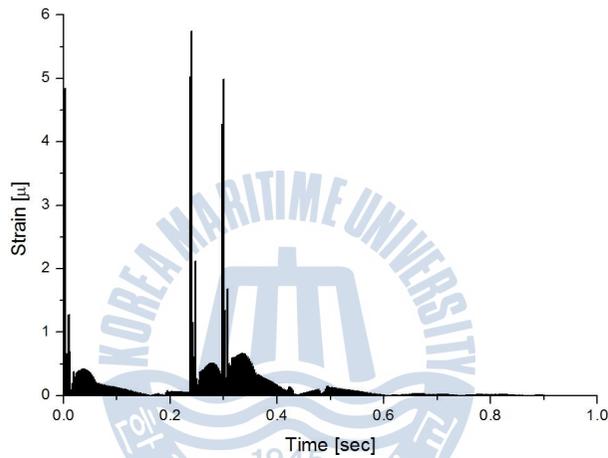


그림 3-28. 시험차량의 영향면적

4장. BWIM System의한 중량산출

4.1 BWIM System을 활용한 중량산출

중량이 미지인 차량이 지날 때, 영향선을 이용한 중량산출을 위해 실제 변형률 응답이 필요하다. 하지만 이 연구에서는 이론적 구조응답에 기초하므로 해석적 방법인 시간이력곡선응답을 이용하여 중량산출을 하였다. 응답을 얻기 위해 차량의 제원이 필요하므로 표 4-1에 나타내었다.

표 4-1. 주행차량의 제원

검토향목	축 중량				축간거리		
	P1	P2	P3	P4	L1	L2	L3
3축차량	97.1	124.6	114.8		4.00	1.00	
4축차량	64.7	106.9	77.5	74.6	1.50	3.75	1.70

4.1.1 영향선함수를 이용한 중량산출

(1) 3축 시험차량의 영향선을 이용한 차량산출

3축 시험차량의 영향선 함수를 이용하여 3축의 미지차량이 통과할 때의 중량을 산출하였다. 2.1.6절에 기술한 영향선을 이용한 중량산정방법에 의해 미지차량의 축 중량 및 총 중량을 산출한 값을 표 4-2에 나타내었다. 동일하게 4축의 미지차량에 대해서 표 4-3에 나타내었다. 미지의 3축 차량이 다른 4축차량 보다 정확도가 높게 나타나는 것으로 보아 각 축 중량에 대한 분석은 축수가 같을 때 정확도가 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 1차선에서는 Girder 1과 Girder 2가, 2차선에서는 Girder 4와 Girder 5가 축에 대한 오차가 다른 Girder보다 작게 나오는 것을 알 수 있었다. 총중량은 축 중량에 대해 최소제곱 오차함수를 사용하였기 때문에 Girder와 관계없이 정확도가 높은 것을 알 수 있었다.

표 4-2. 3축 주행차량중량 산출

구분			단위 (중량(kN), 오차(%))			
			1축	2축	3축	총중량
1 차 선	Girder1	중량	102.08	115.62	121.02	338.72
		오차	(5.13)	(-7.21)	(5.42)	(0.66)
	Girder2	중량	96.79	141.00	100.10	337.89
		오차	(-0.32)	(13.16)	(-12.80)	(0.41)
	Girder3	중량	96.59	142.96	98.51	338.06
		오차	(-0.52)	(14.73)	(-14.19)	(0.46)
	Girder4	중량	105.48	100.53	133.04	339.05
		오차	(8.64)	(-19.32)	(15.89)	(0.76)
	Girder5	중량	107.74	92.44	139.38	339.56
		오차	(100.96)	(-25.81)	(21.41)	(0.91)
2 차 선	Girder1	중량	107.39	94.46	137.66	339.50
		오차	(10.60)	(-24.19)	(19.91)	(0.89)
	Girder2	중량	105.66	99.51	133.90	339.07
		오차	(8.81)	(-20.14)	(16.64)	(0.76)
	Girder3	중량	96.57	142.93	98.57	338.06
		오차	(-0.55)	(14.71)	(-14.14)	(0.46)
	Girder4	중량	96.80	141.55	99.59	337.44
		오차	(-0.31)	(13.61)	(-13.25)	(0.43)
	Girder5	중량	101.95	116.00	120.70	338.65
		오차	(5.00)	(-6.90)	(5.14)	(0.64)
미지의 3축 차량중량			97.10	124.60	114.80	336.50

표 4-3. 4축 주행차량중량 산출

구분			단위 (중량(kN), 오차(%))				
			1축	2축	3축	4축	총중량
1 차 선	Girder1	중량	93.75	65.43	106.29	60.50	325.98
		오차	(44.91)	(-38.79)	(37.15)	(-18.90)	(0.71)
	Girder2	중량	80.13	75.65	131.47	36.99	324.24
		오차	(23.85)	(-29.23)	(69.64)	(-50.41)	(0.17)
	Girder3	중량	85.10	68.85	133.15	37.61	324.71
		오차	(31.53)	(-35.60)	(71.81)	(-49.59)	(0.31)
	Girder4	중량	76.72	89.53	91.66	64.37	322.27
		오차	(18.57)	(-16.25)	(18.27)	(-13.71)	(-0.44)
	Girder5	중량	84.59	87.31	76.34	78.52	326.76
		오차	(3.74)	(-18.33)	(-1.49)	(5.25)	(0.94)
2 차 선	Girder1	중량	84.51	87.08	77.49	77.61	326.70
		오차	(30.62)	(-18.54)	(-0.01)	(4.04)	(0.93)
	Girder2	중량	87.73	79.42	86.49	72.67	326.32
		오차	(35.60)	(-25.71)	(11.60)	(-2.59)	(0.81)
	Girder3	중량	85.12	68.80	133.19	37.61	324.71
		오차	(31.56)	(-35.64)	(71.86)	(-45.73)	(0.31)
	Girder4	중량	80.37	75.09	133.08	35.73	324.26
		오차	(24.22)	(-29.76)	(71.71)	(-52.11)	(0.17)
	Girder5	중량	91.69	68.57	104.28	61.37	325.90
		오차	(41.71)	(-35.86)	(34.55)	(-17.74)	(0.68)
미지의 4축 차량중량			64.70	106.90	77.50	74.60	323.70

(2) 4축 시험차량의 영향선을 이용한 차량산출

4축 시험차량의 영향선 함수를 이용하여 3축의 미지차량이 통과할 때의 중량을 산출하였다. 2.1.6절에 기술한 영향선을 이용한 중량산정방법에 의해 미지차량의 축 중량 및 총 중량을 산출한 값을 표 4-4에 나타내었다. 동일하게 4축의 미지차량에 대해서 표 4-5에 나타내었다. 미지의 4축 차량이 다른 3축차량 보다 정확도가 높게 나타나는 것으로 보아 각 축 중량에 대한 분석은 축수가 같을 때 정확도가 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 1차선에서는 Girder 2와 Girder 3이, 2차선에서는 Girder 3과 Girder 4가 축에 대한 오차가 다른 Girder보다 작게 나오는 것을 알 수 있었다. 앞서 기술한 3축 시험차량의 영향선을 이용한 차량산출과 달리 4축에서 축의 오차가 다르게 나타났다. 4축의 축간거리가 짧고 축 수가 증가됨에 따라 축의 응답이 중첩되기 때문이다. 총 중량은 축 중량에 대해 최소제곱 오차함수를 사용하였기 때문에 Girder와 상관없이 정확도가 높게 나오는 것을 알 수 있었다.

표 4-4. 3축 주행차량중량 산출

단위 (중량(kN), 오차(%))

구분		1축	2축	3축	총 중량	
1 차 선	Girder1	중량	119.99	67.80	154.35	342.14
		오차	(23.57)	(-45.58)	(34.45)	(1.68)
	Girder2	중량	106.68	107.02	126.95	340.65
		오차	(9.86)	(-14.11)	(10.58)	(1.23)
	Girder3	중량	109.41	100.63	114.80	336.50
		오차	(12.68)	(-19.24)	(14.04)	(1.33)
	Girder4	중량	121.74	61.61	158.99	342.34
		오차	(25.35)	(-50.55)	(38.52)	(1.74)
	Girder5	중량	123.29	66.11	153.79	343.19
		오차	(26.95)	(-46.93)	(33.99)	(1.99)
2 차 선	Girder1	중량	123.15	65.90	154.08	343.13
		오차	(26.80)	(-47.10)	(34.24)	(1.97)
	Girder2	중량	121.98	60.56	159.82	342.37
		오차	(25.60)	(-51.39)	(39.24)	(1.75)
	Girder3	중량	109.37	100.61	130.98	340.96
		오차	(12.64)	(-19.25)	(14.09)	(1.33)
	Girder4	중량	106.77	107.75	126.21	340.74
		오차	(9.94)	(-13.51)	(9.96)	(1.26)
	Girder5	중량	119.77	67.17	155.10	342.04
		오차	(23.32)	(-46.08)	(35.14)	(1.65)
미지의 3축 차량		97.10	124.60	114.80	336.50	

표 4-5. 4축 주행차량중량 산출

구분		1축	2축	3축	4축	총 중량	
1 차 선	Girder1	중량	106.12	69.80	66.44	87.26	329.61
		오차	(64.01)	(-34.70)	(-14.28)	(16.97)	(1.83)
	Girder2	중량	79.98	84.32	114.31	48.02	326.63
		오차	(23.62)	(-21.13)	(47.50)	(-35.64)	(0.91)
	Girder3	중량	84.38	64.66	92.62	71.35	313.00
		오차	(27.21)	(-19.96)	(33.47)	(-34.95)	(1.11)
	Girder4	중량	100.81	80.67	54.18	94.10	329.77
		오차	(55.82)	(-24.53)	(-30.09)	(26.14)	(1.88)
	Girder5	중량	100.48	83.26	55.04	91.71	330.49
		오차	(55.30)	(-22.12)	(-28.98)	(22.94)	(2.10)
2 차 선	Girder1	중량	99.69	84.48	53.70	92.54	330.43
		오차	(54.09)	(-20.97)	(-30.70)	(24.05)	(2.08)
	Girder2	중량	102.05	79.00	54.67	94.09	329.82
		오차	(57.73)	(-26.10)	(-29.45)	(26.13)	(1.89)
	Girder3	중량	82.27	85.57	103.44	56.02	327.29
		오차	(27.15)	(-1.95)	(33.47)	(-24.91)	(1.11)
	Girder4	중량	79.97	84.36	111.57	46.84	326.68
		오차	(23.51)	(-21.09)	(49.12)	(-34.21)	(0.92)
	Girder5	중량	104.47	72.01	68.98	88.05	329.51
		오차	(61.47)	(-32.64)	(-16.15)	(18.03)	(1.80)
미지의 4축 차량		64.70	106.90	77.50	74.60	323.70	

4.1.2 영향면적을 이용한 중량산출

(1) 3축 차량 산출

2.1.6절에 기술한 영향면적을 이용한 중량산정방법에 의해 미지차량의 축 중량 및 총 중량을 산출하였다. 그림 4-1은 3축 미지차량의 변형률을 적분하여 영향면적을 나타낸 것이다. 3.4.2절의 3축 시험차량의 영향면적 이용하여 3축의 미지차량이 통과할 때의 중량을 표 4-6과 같이 산출하였다.

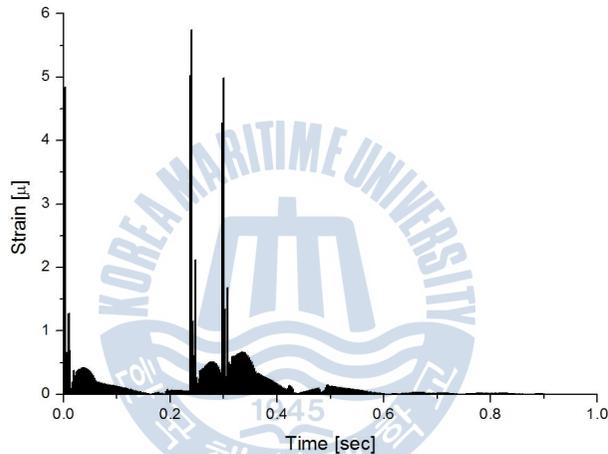


그림 4-1. 3축 주행차량의 영향면적

표 4-6. 3축 주행차량중량 산출

구분	단위 (중량(kN), 오차(%))			
	1축	2축	3축	총 중량
영향면을 이용한 차량중량	97.72	114.28	123.81	335.81
오차	(0.62)	(-8.27)	(7.87)	(6.27)
미지의 3축 차량중량	97.12	124.59	114.78	316.00

(2) 4축 차량 검증

2.1.6절에 기술한 영향면적을 이용한 중량산정방법에 의해 미지차량의 축 중량 및 총 중량을 산출하였다. 그림 4-2는 4축 미지차량의 변형률을 적분하여 영향면적을 나타낸 것이다. 3.4.2절의 3축 시험차량의 영향면적 이용하여 3축의 미지차량이 통과할 때의 중량을 표 4-7과 같이 산출하였다.

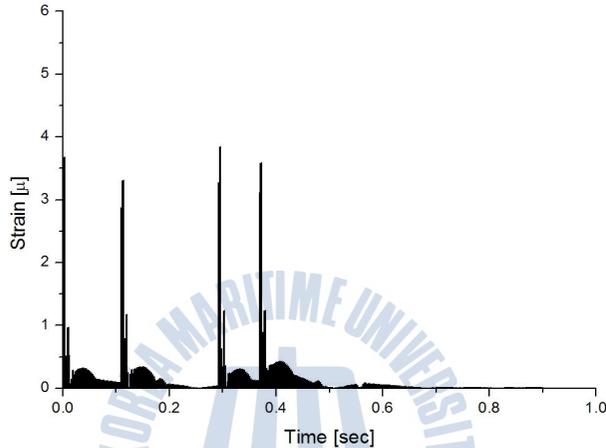


그림 4-2. 4축 주행차량의 영향면적

표 4-7. 4축 주행차량중량 산출

구분	단위 (중량(kN), 오차(%))				
	1축	2축	3축	4축	총 중량
계산한 차량중량	63.01	113.67	84.84	71.29	332.81
오차	(-2.69)	(6.50)	(9.47)	(-4.39)	(2.87)
미지의 4축 차량 중량	64.75	106.73	77.50	74.56	323.54

4.1.3 고찰

추정한 중량과 실제 중량의 검증을 실시한 결과 영향면적을 이용한 경우 영향선을 이용한 경우보다 정확한 축 중량이 나오는 것을 알 수 있었다. 하지만 실시간계측 뿐만 아니라 각 축의 영향면적을 컴퓨터가 자동으로 분리하는데 어려움이 있으므로 이 연구에서 제시한 영향선을 이용한 축 중량검출방법을 사용하는 것이 보다 효율적일 것으로 판단된다.

4.2 차량의 주행조건에 따른 중량산정

차량 주행시 교량의 동적거동에 관한 변수들이 존재하므로 이를 분석해야 한다고 판단된다. 이 연구에서는 주행변수로 주행속도, 차량의 축간거리, 횡방향 주행위치를 고려하였다. 주행조건이 변화함에 따라 중량에 대한 정밀도에 어떻게 영향을 미치는 지에 대해 분석하였다.

4.2.1 속도에 따른 중량정밀도

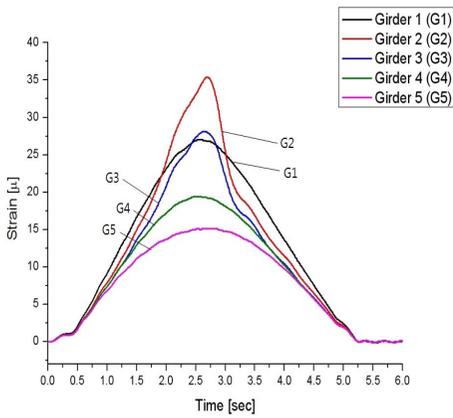
차량의 주행속도에 따라 시간이력해석응답이 달라지므로 정밀도에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 속도에 따른 중량을 산출하여 그 정밀도를 보고자 대표적으로 3축 차량에 대해 실시하였다.

저속주행시, 보통주행시, 고속주행시의 영향을 분석하기 위해 차량 속도를 Case A, Case B, Case C로 표기하여 아래와 같이 정리 하였다.

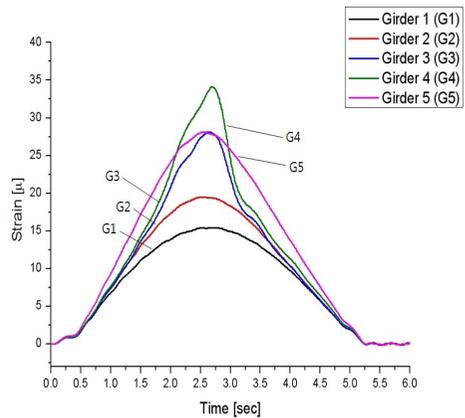
- 1) Case A : 저속주행시 (시속 30km/h)
- 2) Case B : 보통주행시 (시속 60km/h)
- 3) Case C : 고속주행시 (시속 90km/h)

그림 4-3, 그림 4-4, 그림 4-5는 3축 시험차량이 Case A, Case B, Case C의 경우로 주행시 시간이력해석을 나타내었다. 속도의 크기에 상관없이 변형률 응답의 크기는 같으나 속도가 빠를수록 교량을 통과하는 시간이 단축되는 것을 알 수 있었다.

2.1.6절에 기술한 영향선을 이용한 중량산정방법에 의해 Case A, Case B, Case C로 주행시 중량을 산출하였고 표 4-8, 표 4-9, 표 4-10에 나타내었다. 차량의 속도는 차량중량 산정결과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 총 중량은 축 중량에 대해 최소제곱 오차함수를 사용하였기 때문에 속도와 상관없이 정확도가 높게 나오는 것을 알 수 있었다.

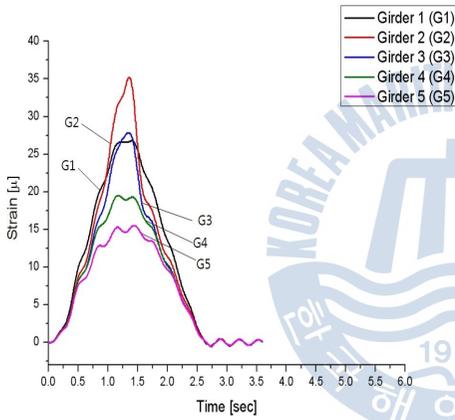


(a) 1차선 단독주행

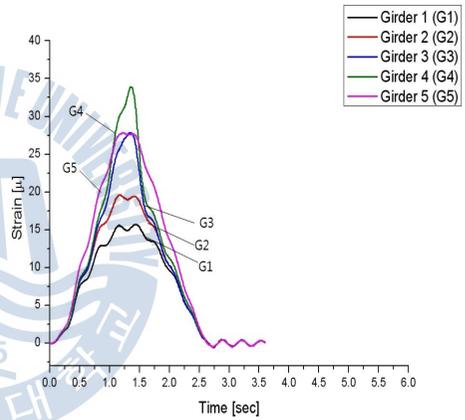


(b) 2차선 단독주행

그림 4-3. Case A로 주행시 시간이력해석

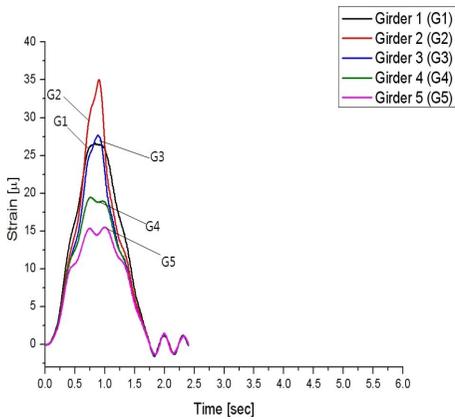


(a) 1차선 단독주행

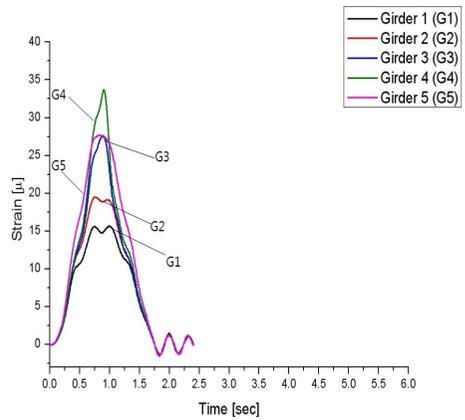


(b) 2차선 단독주행

그림 4-4. Case B로 주행시 시간이력해석



(a) 1차선 단독주행



(c) 2차선 단독주행

그림 4-5. Case C로 주행시 시간이력해석

표 4-8. Case A로 주행시 중량산출

구분		단위 (중량(kN), 오차(%))				
		1축	2축	3축	총 중량	
주행 차량중량		97.10	124.60	114.80	336.50	
1차선	Girder1	중량	105.24	113.59	120.73	339.56
		오차	(8.38)	(-8.83)	(5.17)	(0.91)
	Girder2	중량	98.75	136.73	103.18	338.66
		오차	(1.70)	(9.74)	(-10.12)	(0.64)
	Girder3	중량	99.00	138.00	101.82	338.81
		오차	(1.96)	(10.75)	(-11.31)	(0.69)
	Girder4	중량	104.13	120.00	115.45	339.58
		오차	(7.24)	(-3.69)	(0.56)	(0.92)
	Girder5	중량	103.11	130.50	106.30	339.91
		오차	(6.19)	(4.73)	(-7.40)	(1.01)
2차선	Girder1	중량	102.97	130.69	106.22	339.88
		오차	(6.05)	(4.88)	(-7.47)	(1.00)
	Girder2	중량	104.52	118.09	117.01	339.61
		오차	(7.64)	(-5.23)	(1.92)	(0.93)
	Girder3	중량	99.00	137.95	101.85	338.81
		오차	(1.96)	(10.72)	(-11.28)	(0.69)
	Girder4	중량	98.76	137.32	102.64	338.72
		오차	(1.71)	(10.21)	(-10.59)	(0.66)
	Girder5	중량	105.19	112.98	121.34	339.51
		오차	(8.33)	(-9.32)	(5.69)	(0.89)

표 4-9. Case B로 주행시 중량산출

구분		단위 (중량(kN), 오차(%))				
		1축	2축	3축	총 중량	
미지의 3축 차량중량		97.10	124.60	114.80	336.50	
1차선	Girder1	중량	102.08	115.62	121.02	338.72
		오차	(5.13)	(-7.21)	(5.42)	(0.66)
	Girder2	중량	96.79	141.00	100.10	337.89
		오차	(-0.32)	(13.16)	(-12.80)	(0.41)
	Girder3	중량	96.59	142.96	98.51	338.06
		오차	(-0.52)	(14.73)	(-14.19)	(0.46)
	Girder4	중량	105.48	100.53	133.04	339.05
		오차	(8.64)	(-19.32)	(15.89)	(0.76)
	Girder5	중량	107.74	92.44	139.38	339.56
		오차	(100.96)	(-25.81)	(21.41)	(0.91)
2차선	Girder1	중량	107.39	94.46	137.66	339.50
		오차	(10.60)	(-24.19)	(19.91)	(0.89)
	Girder2	중량	105.66	99.51	133.90	339.07
		오차	(8.81)	(-20.14)	(16.64)	(0.76)
	Girder3	중량	96.57	142.93	98.57	338.06
		오차	(-0.55)	(14.71)	(-14.14)	(0.46)
	Girder4	중량	96.80	141.55	99.59	337.44
		오차	(-0.31)	(13.61)	(-13.25)	(0.43)
	Girder5	중량	101.95	116.00	120.70	338.65
		오차	(5.00)	(-6.90)	(5.14)	(0.64)

표 4-10. Case C로 주행시 중량산출

구분		단위 (중량(kN), 오차(%))				
		1축	2축	3축	총 중량	
주행차량중량		97.10	124.60	114.80	336.50	
1 차 선	Girder1	중량	88.37	119.90	124.41	332.68
		오차	(-8.99)	(-3.77)	(8.37)	(-1.14)
	Girder2	중량	86.00	145.05	102.00	333.06
		오차	(-11.43)	(16.41)	(-11.15)	(-1.02)
	Girder3	중량	86.29	136.05	110.36	332.70
		오차	(-11.13)	(9.19)	(-3.87)	(-1.13)
	Girder4	중량	89.96	102.00	140.12	332.08
		오차	(-7.36)	(-18.14)	(22.06)	(-1.31)
	Girder5	중량	91.36	81.86	158.13	331.35
		오차	(-5.91)	(-34.30)	(37.74)	(-1.53)
2 차 선	Girder1	중량	91.21	82.87	157.33	331.41
		오차	(-6.06)	(-33.49)	(37.05)	(-1.51)
	Girder2	중량	89.96	102.24	139.89	332.10
		오차	(-7.35)	(-17.94)	(21.86)	(-1.31)
	Girder3	중량	86.30	136.05	110.33	332.69
		오차	(-11.12)	(9.19)	(-3.89)	(-1.13)
	Girder4	중량	85.94	143.56	103.48	332.99
		오차	(-11.49)	(15.22)	(-9.86)	(-1.04)
	Girder5	중량	87.94	123.83	120.95	332.72
		오차	(-9.44)	(-0.62)	(5.36)	(-1.12)

4.2.2 축간거리에 따른 중량산정

4.1.1절에 따르면 시험차량의 영향선에 따라 중량산출의 결과 값이 좌우되는 것을 알 수 있었다. 표 4-11과 표 4-12에 영향선은 차축거리에 따라 변화하므로 대표적으로 4축 차량의 제원을 바꾸기 전·후의 것을 나타내었다(시험차량→주행차량, 주행차량→시험차량). 이를 Case A, Case B로 표기하여 아래와 같이 정리하였다.

- 1) Case A : 차량 제원 바꾸기 전 (표 4-11) 고려
- 2) Case B : 차량 제원 바꾼 후 (표 4-12) 고려

표 4-13은 Case A 표 4-14는 Case B를 고려한 것으로, 2.1.6절에 기술한 영향선을 이용한 중량산정방법에 의해 차량의 축 중량 및 총 중량을 산출한 값을 나타내었다. 바뀐 시험차량의 1축과 2축의 축간거리가 바뀐 주행차량의 축간거리보다 짧으므로 중량산출에 있어서 오차가 발생하였고 영향선에 따라 차량중량에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 시험차량의 축간거리에 따라 영향선함수가 만들어지고 이에 따라 주행차량의 영향선이 만들어지므로 대표적인 시험차량을 선정하는 것이 중요하다고 판단된다.

표 4-11. Case A의 제원

단위 (중량(kN), 축간거리(m))

검토항목	축 중량				축간거리		
	P1	P2	P3	P4	L1	L2	L3
시험차량	73.7	74.0	80.8	80.8	1.88	3.02	1.30
주행차량	64.7	106.9	77.5	74.6	1.50	3.75	1.70

표 4-12. Case B의 제원

단위 (중량(kN), 축간거리(m))

검토항목	축 중량				축간거리		
	P1	P2	P3	P4	L1	L2	L3
시험차량	64.7	106.9	77.5	74.6	1.50	3.75	1.70
주행차량	73.7	74.0	80.8	80.8	1.88	3.02	1.30

표 4-13. Case A의 중량산출

			단위 (중량(kN), 오차(%))				
구분			1축	2축	3축	4축	총 중량
시험차량중량			73.7	74	80.8	80.8	309.3
1차선	Girder1	중량	103.88	50.58	60.22	100.11	314.78
		오차	(40.95)	(-31.65)	(-25.47)	(23.90)	(1.77)
	Girder2	중량	81.70	64.37	101.76	64.70	312.53
		오차	(10.86)	(-13.02)	(25.94)	(-19.92)	(1.04)
	Girder3	중량	84.38	64.66	92.62	71.35	313.00
		오차	(14.49)	(-12.63)	(14.63)	(-11.70)	(1.20)
	Girder4	중량	100.90	58.02	51.27	104.67	314.86
		오차	(36.91)	(-21.60)	(-36.54)	(29.55)	(1.80)
	Girder5	중량	100.59	60.71	53.32	100.94	315.56
		오차	(36.48)	(-17.95)	(-34.02)	(24.93)	(2.02)
2차선	Girder1	중량	100.05	61.51	52.48	101.45	315.49
		오차	(35.75)	(-16.88)	(-35.05)	(25.56)	(2.00)
	Girder2	중량	101.77	56.81	51.33	105.01	314.91
		오차	(38.08)	(-23.23)	(-36.48)	(29.97)	(1.81)
	Girder3	중량	84.35	64.65	92.58	71.41	313.00
		오차	(14.45)	(12.63)	(14.59)	(-11.62)	(1.20)
	Girder4	중량	81.70	64.42	102.64	63.84	312.60
		오차	(10.86)	(-12.95)	(27.03)	(-21.00)	(1.07)
	Girder5	중량	102.95	51.79	59.27	100.66	314.68
		오차	(39.69)	(-30.01)	(-26.65)	(24.58)	(1.74)
구분			1축	2축	3축	4축	총 중량
주행차량중량			64.70	106.90	77.50	74.60	323.70
1차선	Girder1	중량	106.12	69.80	66.44	87.26	329.61
		오차	(64.01)	(-34.70)	(-14.28)	(16.97)	(1.83)
	Girder2	중량	79.98	84.32	114.31	48.02	326.63
		오차	(23.62)	(-21.13)	(47.50)	(-35.64)	(0.91)
	Girder3	중량	84.38	64.66	92.62	71.35	313.00
		오차	(27.21)	(-19.96)	(33.47)	(-34.95)	(1.11)
	Girder4	중량	100.81	80.67	54.18	94.10	329.77
		오차	(55.82)	(-24.53)	(-30.09)	(26.14)	(1.88)
	Girder5	중량	100.48	83.26	55.04	91.71	330.49
		오차	(55.30)	(-22.12)	(-28.98)	(22.94)	(2.10)
2차선	Girder1	중량	99.69	84.48	53.70	92.54	330.43
		오차	(54.09)	(-20.97)	(-30.70)	(24.05)	(2.08)
	Girder2	중량	102.05	79.00	54.67	94.09	329.82
		오차	(57.73)	(-26.10)	(-29.45)	(26.13)	(1.89)
	Girder3	중량	82.27	85.57	103.44	56.02	327.29
		오차	(27.15)	(-1.95)	(33.47)	(-24.91)	(1.11)
	Girder4	중량	79.97	84.36	111.57	46.84	326.68
		오차	(23.51)	(-21.09)	(49.12)	(-34.21)	(0.92)
	Girder5	중량	104.47	72.01	68.98	88.05	329.51
		오차	(61.47)	(-32.64)	(-16.15)	(18.03)	(1.80)

표 4-14. Case B의 중량산출

단위 (중량(kN), 오차(%))

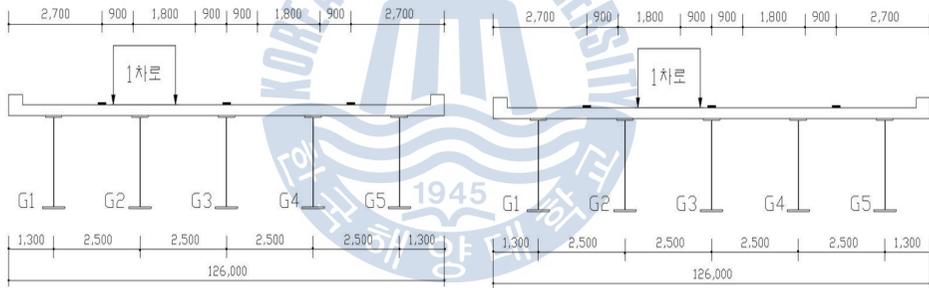
구분		1축	2축	3축	4축	총 중량	
시험차량중량		64.70	106.90	77.50	74.60	323.70	
1차선	Girder1	중량	81.26	90.08	82.04	73.98	327.37
		오차	(25.60)	(-15.73)	(5.86)	(-0.83)	(1.13)
	Girder2	중량	80.19	79.91	119.35	46.13	325.58
		오차	(23.94)	(-25.25)	(54.00)	(-38.16)	(0.58)
	Girder3	중량	78.65	83.96	111.95	51.41	325.96
		오차	(21.56)	(-21.46)	(44.45)	(-31.09)	(0.70)
	Girder4	중량	76.63	100.70	65.84	84.30	327.46
		오차	(18.44)	(-5.80)	(-15.05)	(13.00)	(1.16)
	Girder5	중량	76.53	103.06	60.65	87.67	327.91
		오차	(18.28)	(-3.59)	(-21.74)	(17.52)	(1.30)
2차선	Girder1	중량	75.89	103.87	60.33	87.80	327.90
		오차	(17.29)	(-2.84)	(-22.15)	(17.70)	(1.30)
	Girder2	중량	77.35	99.73	66.02	84.39	327.49
		오차	(19.56)	(-6.71)	(-14.81)	(13.12)	(1.17)
	Girder3	중량	78.68	83.88	112.05	51.34	325.95
		오차	(21.61)	(-21.53)	(44.58)	(-31.19)	(0.70)
	Girder4	중량	80.34	79.54	120.51	45.22	325.61
		오차	(24.17)	(-25.59)	(55.49)	(-39.38)	(0.59)
	Girder5	중량	79.84	92.18	80.64	74.64	327.30
		오차	(23.31)	(-13.79)	(4.05)	(0.11)	(1.10)

구분		1축	2축	3축	4축	총 중량	
주행차량중량		73.7	74	80.8	80.8	309.3	
1차선	Girder1	중량	85.11	65.42	97.37	64.93	312.83
		오차	(15.48)	(-11.59)	(20.51)	(-19.64)	(1.14)
	Girder2	중량	81.48	61.99	124.46	43.64	311.57
		오차	(10.55)	(-16.23)	(54.04)	(-45.99)	(0.73)
	Girder3	중량	81.54	63.41	119.82	47.06	311.82
		오차	(10.63)	(-14.31)	(48.29)	(-41.76)	(0.81)
	Girder4	중량	82.51	73.26	81.88	75.21	312.86
		오차	(11.95)	(-0.99)	(1.34)	(-6.92)	(1.15)
	Girder5	중량	82.50	75.26	77.25	78.25	313.25
		오차	(11.94)	(1.70)	(-4.39)	(-3.16)	(1.28)
2차선	Girder1	중량	82.16	75.64	77.18	78.25	313.24
		오차	(11.49)	(2.21)	(-4.48)	(-3.15)	(1.27)
	Girder2	중량	82.98	72.58	81.85	75.47	312.88
		오차	(12.60)	(-1.91)	(1.30)	(-6.60)	(1.16)
	Girder3	중량	81.55	63.36	119.87	47.02	311.81
		오차	(10.65)	(-14.38)	(48.36)	(-41.80)	(0.81)
	Girder4	중량	81.68	61.65	125.09	43.20	311.62
		오차	(10.83)	(-16.69)	(54.82)	(-46.54)	(0.75)
	Girder5	중량	84.22	66.73	96.70	65.11	312.76
		오차	(14.27)	(-9.83)	(19.68)	(-19.41)	(1.12)

4.2.3 횡방향 위치에 따른 중량정밀도

차량의 횡방향 위치에 따라 시간이력해석응답이 달라지므로 정밀도에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 차량이 주행 시 -150 ~ 150mm의 움직임이 있다는 것에 근거하여(이희현, 2007) 1차로로 시험차량이 -200mm ~ 200mm 횡방향 위치하여 주행 시의 영향선을 산출하였다. 이를 횡방향 위치를 Case A~I로 표기하여 아래와 같이 정리 하였고 Case A와 Case I의 위치를 그림 4-6에 나타내었다.

- | | |
|--------------------|-------------------|
| 1) Case A : -200mm | 6) Case F : 50mm |
| 2) Case B : -150mm | 7) Case G : 100mm |
| 3) Case C : -100mm | 8) Case H : 150mm |
| 4) Case D : -50mm | 9) Case I : 200mm |
| 5) Case E : 기본위치 | |



(a) Case A

(b) Case I

그림 4-6. Case에 따른 주행위치

2.1.6절에 기술한 영향선을 이용한 중량산정방법에 의해 차량의 축 중량 및 총 중량을 산출한 값을 나타내었다. 표 4-15와 표 4-16은 3축 및 4축 시험차량이 Case A~I로 주행시 중량을 비교하였고 이를 그림 4-7과 그림 4-8에 나타내었다. 그 결과 시험차량의 중량은 위치에 따른 변형률을 이용하여 최소자승법을 실시하였으므로 중량에 대한 값은 유사하게 나오는 것을 알 수 있었다.

표 4-17과 그림 4-9에 3축 시험차량 Case A~I로 주행 후 미지의 3축 차량이 Case A~I로 주행 시 각 축 중량 및 총 중량을 비교하였다. 그 결과 시험차

량의 주행위치와 임의의 주행차량의 위치가 멀어질수록 증량오차가 크게 나오는 것을 알 수 있었다. 이와 동일하게 4축에 대해 적용하였고 표 4-18과 그림 4-10에 나타내었다. 이 장에서는 Girder 1에서 시험차량이 Case A와 Case I의 주행을 나타내었고 나머지는 부록에 수록하였다.

표 4-15. 3축 시험차량이 횡방향 이동시 증량비교
(a) Girder 1에서의 증량비교

		단위 (증량(kN), 오차(%))				
구분		1축	2축	3축	총 증량	
시험차량		76	120	120	316	
Girder 1번	Case A	증량	81.93	110.87	125.24	318.04
		오차	(7.80)	(-7.61)	(4.37)	(0.65)
	Case B	증량	82.02	110.62	125.42	318.06
		오차	(7.93)	(-7.82)	(4.51)	(0.65)
	Case C	증량	82.18	110.09	125.81	318.07
		오차	(8.13)	(-8.26)	(4.84)	(0.66)
	Case D	증량	82.25	109.90	125.93	318.08
		오차	(8.23)	(-8.42)	(4.94)	(0.66)
	Case E	증량	82.40	109.42	126.29	318.10
		오차	(8.42)	(-8.82)	(5.24)	(0.67)
	Case F	증량	82.40	109.60	126.11	318.10
		오차	(8.42)	(-8.67)	(5.09)	(0.66)
	Case G	증량	82.51	109.26	126.34	318.11
		오차	(8.56)	(-8.95)	(5.29)	(0.67)
	Case H	증량	82.59	109.01	126.52	318.13
		오차	(8.67)	(-9.15)	(5.44)	(0.67)
	Case I	증량	81.93	110.87	125.24	318.04
		오차	(7.80)	(-7.61)	(4.37)	(0.65)

(b) Girder 2에서의 중량비교

단위 (중량(kN), 오차(%))

구분		1축	2축	3축	총 중량	
시험차량		76	120	120	316	
Girder 2번	Case A	중량	80.23	114.64	122.85	317.72
		오차	(5.57)	(-4.47)	(2.37)	(0.54)
	Case B	중량	80.23	114.57	122.93	317.73
		오차	(5.57)	(-4.53)	(2.44)	(0.55)
	Case C	중량	80.23	114.60	122.89	317.73
		오차	(5.57)	(-4.50)	(2.41)	(0.55)
	Case D	중량	80.24	114.54	122.96	317.73
		오차	(5.58)	(-4.55)	(2.47)	(0.55)
	Case E	중량	80.24	114.54	122.95	317.73
		오차	(5.58)	(-4.55)	(2.46)	(0.55)
	Case F	중량	80.25	114.46	123.04	317.74
		오차	(5.59)	(-4.62)	(2.53)	(0.55)
	Case G	중량	80.25	114.48	123.00	317.73
		오차	(5.59)	(-4.60)	(2.50)	(0.55)
	Case H	중량	80.26	114.45	123.03	317.74
		오차	(5.60)	(-4.63)	(2.53)	(0.55)
	Case I	중량	80.27	114.32	123.16	317.75
		오차	(5.61)	(-4.73)	(2.63)	(0.55)

(c) Girder 3에서의 중량비교

단위 (중량(kN), 오차(%))

구분		1축	2축	3축	총 중량	
시험차량		76	120	120	316	
Girder 3번	Case A	중량	80.19	116.34	121.30	317.83
		오차	(5.52)	(-3.05)	(1.09)	(0.58)
	Case B	중량	80.20	116.16	121.48	317.84
		오차	(5.52)	(-3.20)	(1.24)	(0.58)
	Case C	중량	80.19	116.15	121.48	317.83
		오차	(5.51)	(-3.21)	(1.24)	(0.58)
	Case D	중량	80.19	116.10	121.53	317.82
		오차	(5.51)	(-3.25)	(1.27)	(0.58)
	Case E	중량	80.20	115.95	121.67	317.82
		오차	(5.52)	(-3.37)	(1.39)	(0.57)
	Case F	중량	80.21	115.79	121.82	317.82
		오차	(5.53)	(-3.51)	(1.52)	(0.57)
	Case G	중량	80.21	115.79	121.81	317.81
		오차	(5.53)	(-3.51)	(1.51)	(0.57)
	Case H	중량	80.22	115.58	122.01	317.81
		오차	(5.55)	(-3.68)	(1.68)	(0.57)
	Case I	중량	80.23	115.44	122.15	317.81
		오차	(5.56)	(-3.80)	(1.79)	(0.57)

(d) Girder 4에서의 중량비교

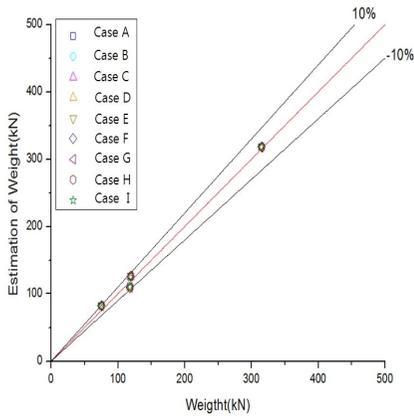
단위 (중량(kN), 오차(%))

구분		1축	2축	3축	총 중량	
시험차량		76	120	120	316	
Girder 4번	Case A	중량	84.65	103.51	130.20	318.35
		오차	(11.38)	(-13.74)	(8.50)	(0.75)
	Case B	중량	84.73	102.98	130.66	318.36
		오차	(11.48)	(-14.19)	(8.89)	(0.75)
	Case C	중량	84.65	103.21	130.49	318.35
		오차	(11.38)	(-13.99)	(8.74)	(0.74)
	Case D	중량	84.59	103.40	130.34	318.34
		오차	(11.31)	(-13.83)	(8.62)	(0.74)
	Case E	중량	84.43	104.09	129.80	318.32
		오차	(11.09)	(-13.26)	(8.16)	(0.73)
	Case F	중량	84.52	103.45	130.36	318.33
		오차	(11.22)	(-13.79)	(8.63)	(0.74)
	Case G	중량	84.39	103.96	129.96	318.31
		오차	(11.05)	(-13.36)	(8.30)	(0.73)
	Case H	중량	84.23	104.63	129.42	318.29
		오차	(10.83)	(-12.81)	(7.85)	(0.72)
	Case I	중량	84.30	104.15	129.86	318.30
		오차	(10.92)	(-13.21)	(8.21)	(0.73)

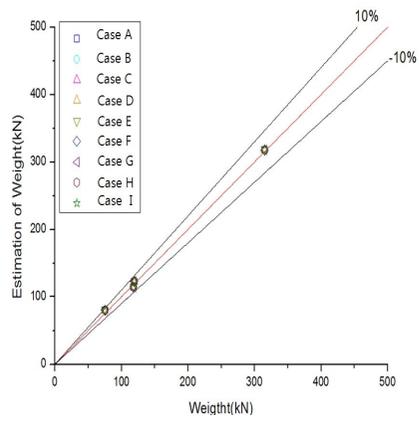
(e) Girder 5에서의 중량비교

단위 (중량(kN), 오차(%))

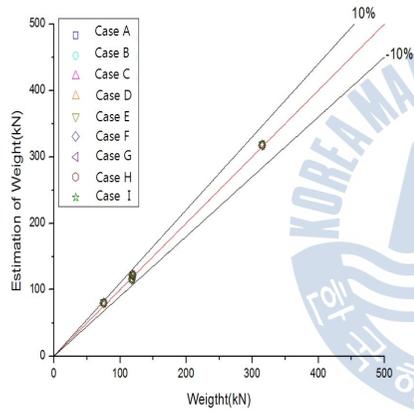
구분		1축	2축	3축	총 중량	
시험차량		76	120	120	316	
Girder 5번	Case A	중량	85.89	102.19	130.67	318.75
		오차	(13.02)	(-14.85)	(8.89)	(0.87)
	Case B	중량	85.86	102.27	130.61	318.74
		오차	(12.97)	(-14.78)	(8.84)	(0.87)
	Case C	중량	85.80	102.45	130.48	318.72
		오차	(12.89)	(-14.63)	(8.73)	(0.86)
	Case D	중량	85.76	102.50	130.46	318.72
		오차	(12.84)	(-14.58)	(8.72)	(0.86)
	Case E	중량	85.78	102.15	130.80	318.72
		오차	(12.87)	(-14.88)	(9.00)	(0.86)
	Case F	중량	85.62	102.88	130.19	318.69
		오차	(12.66)	(-14.26)	(8.49)	(0.85)
	Case G	중량	85.57	103.01	130.11	318.68
		오차	(12.59)	(-14.16)	(8.42)	(0.85)
	Case H	중량	85.51	103.10	130.07	318.68
		오차	(12.51)	(-14.08)	(8.39)	(0.85)
	Case I	중량	85.45	103.20	130.02	318.67
		오차	(12.44)	(-14.00)	(8.35)	(0.84)



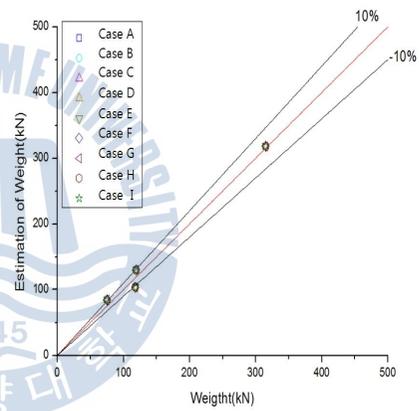
(a) Girder 1



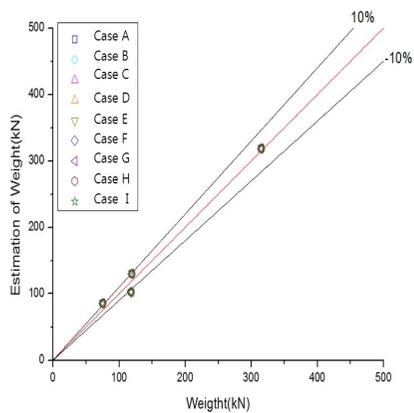
(b) Girder 2



(c) Girder 3



(d) Girder 3



(e) Girder 5

그림 4-7. 3축 시험차량이 횡방향 이동시 정밀도

표 4-16. 4축 시험차량이 횡방향 이동시 중량비교
(a) Girder 1 에서의 중량비교

단위 (중량(kN), 오차(%))

구분		1축	2축	3축	4축	총 중량	
시험차량		73.7	74	80.8	80.8	309.3	
Girder 1번	Case A	중량	102.55	51.17	63.36	97.56	314.64
		오차	(39.14)	(-30.85)	(-21.58)	(20.74)	(1.73)
	Case B	중량	102.97	50.94	62.43	98.35	314.68
		오차	(39.71)	(-31.17)	(-22.73)	(21.72)	(1.74)
	Case C	중량	103.28	50.80	61.72	98.91	314.71
		오차	(40.14)	(-31.34)	(-23.62)	(22.41)	(1.75)
	Case D	중량	103.58	50.70	60.95	99.51	314.75
		오차	(40.55)	(-31.48)	(-24.57)	(23.16)	(1.76)
	Case E	중량	103.88	50.58	60.22	100.11	314.78
		오차	(40.95)	(-31.65)	(-25.47)	(23.90)	(1.77)
	Case F	중량	104.08	50.56	59.65	100.52	314.81
		오차	(41.23)	(-31.68)	(-26.18)	(24.40)	(1.78)
	Case G	중량	104.34	50.45	58.90	101.15	314.85
		오차	(41.58)	(-31.82)	(-27.10)	(25.18)	(1.79)
	Case H	중량	104.48	50.50	58.38	101.51	314.87
		오차	(41.76)	(-31.75)	(-27.75)	(25.63)	(1.80)
	Case I	중량	104.54	50.62	58.02	101.70	314.88
		오차	(41.85)	(-31.60)	(-28.19)	(25.86)	(1.80)

(b) Girder 2에서의 중량비교

단위 (중량(kN), 오차(%))

구분		1축	2축	3축	4축	총 중량	
시험차량		73.7	74	80.8	80.8	309.3	
Girder 2번	Case A	중량	81.20	64.67	102.67	63.92	312.45
		오차	(10.17)	(-12.61)	(27.07)	(-20.89)	(1.02)
	Case B	중량	81.31	64.60	102.45	64.11	312.47
		오차	(10.33)	(-12.71)	(26.80)	(-20.66)	(1.03)
	Case C	중량	81.43	64.54	102.21	64.32	312.49
		오차	(10.49)	(-12.79)	(26.50)	(-20.40)	(1.03)
	Case D	중량	81.57	64.44	102.04	64.45	312.51
		오차	(10.68)	(-12.92)	(26.29)	(-20.23)	(1.04)
	Case E	중량	81.70	64.37	101.76	64.70	312.53
		오차	(10.86)	(-13.02)	(25.94)	(-19.92)	(1.04)
	Case F	중량	81.86	64.25	101.59	64.84	312.54
		오차	(11.07)	(-13.17)	(25.73)	(-19.75)	(1.05)
	Case G	중량	82.02	64.14	101.42	64.97	312.56
		오차	(11.29)	(-13.32)	(25.52)	(-19.59)	(1.05)
	Case H	중량	82.17	64.04	101.10	65.28	312.59
		오차	(11.50)	(-13.46)	(25.12)	(-19.21)	(1.06)
	Case I	중량	82.35	63.90	100.87	65.48	312.61
		오차	(11.74)	(-13.64)	(24.84)	(-18.96)	(1.07)

(c) Girder 3에서의 중량비교

단위 (중량(kN), 오차(%))

구분		1축	2축	3축	4축	총 중량	
시험차량		73.7	74	80.8	80.8	309.3	
Girder 3번	Case A	중량	85.64	64.43	89.06	74.04	313.17
		오차	(16.20)	(-12.93)	(10.22)	(-8.37)	(1.25)
	Case B	중량	85.29	64.49	89.93	73.43	313.14
		오차	(15.73)	(-12.85)	(11.30)	(-9.13)	(1.24)
	Case C	중량	84.95	64.57	90.88	72.69	313.09
		오차	(15.27)	(-12.75)	(12.48)	(-10.04)	(1.23)
	Case D	중량	84.66	64.61	91.76	72.03	313.05
		오차	(14.86)	(-12.69)	(13.56)	(-10.86)	(1.21)
	Case E	중량	84.38	64.66	92.62	71.35	313.00
		오차	(14.49)	(-12.63)	(14.63)	(-11.70)	(1.20)
	Case F	중량	84.12	64.70	93.41	70.74	312.96
		오차	(14.14)	(-12.57)	(15.61)	(-12.45)	(1.18)
	Case G	중량	83.89	64.71	94.09	70.24	312.93
		오차	(13.83)	(-12.55)	(16.45)	(-13.07)	(1.17)
	Case H	중량	83.68	64.74	94.71	69.77	312.89
		오차	(13.54)	(-12.52)	(17.22)	(-13.65)	(1.16)
	Case I	중량	83.48	64.75	95.24	69.39	312.87
		오차	(13.27)	(-12.50)	(17.88)	(-14.12)	(1.15)

(d) Girder 4에서의 중량비교

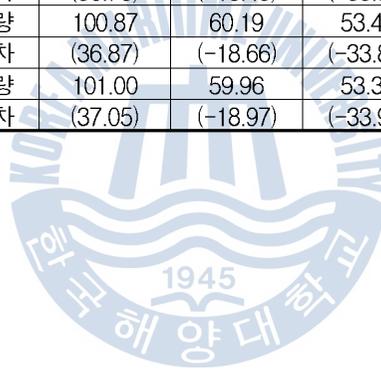
단위 (중량(kN), 오차(%))

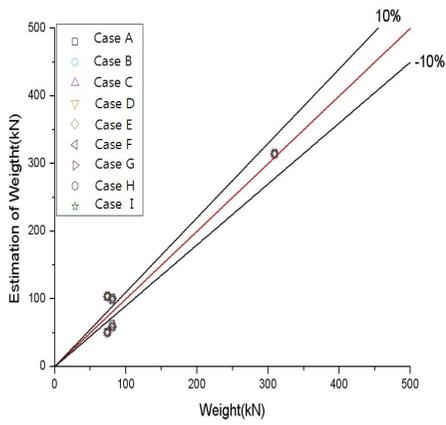
구분		1축	2축	3축	4축	총 중량	
시험차량		73.7	74	80.8	80.8	309.3	
Girder 4번	Case A	중량	100.98	58.19	51.23	104.52	314.91
		오차	(37.01)	(-21.37)	(-36.60)	(29.36)	(1.81)
	Case B	중량	101.06	58.01	50.96	104.89	314.92
		오차	(37.13)	(-21.60)	(-36.93)	(29.81)	(1.82)
	Case C	중량	101.00	58.02	51.12	104.76	314.90
		오차	(37.04)	(-21.59)	(-36.73)	(29.65)	(1.81)
	Case D	중량	101.00	57.96	51.08	104.85	314.89
		오차	(37.05)	(-21.68)	(-36.78)	(29.76)	(1.81)
	Case E	중량	100.90	58.02	51.27	104.67	314.86
		오차	(36.91)	(-21.60)	(-36.54)	(29.55)	(1.80)
	Case F	중량	100.95	57.87	51.16	104.89	314.87
		오차	(36.98)	(-21.80)	(-36.68)	(29.81)	(1.80)
	Case G	중량	100.77	58.04	51.54	104.48	314.83
		오차	(36.73)	(-21.57)	(-36.21)	(29.30)	(1.79)
	Case H	중량	100.75	57.99	51.54	104.54	314.82
		오차	(36.70)	(-21.63)	(-36.22)	(29.39)	(1.78)
	Case I	중량	100.73	57.94	51.58	104.56	314.81
		오차	(36.67)	(-21.70)	(-36.16)	(29.41)	(1.78)

(e) Girder 5에서의 중량비교

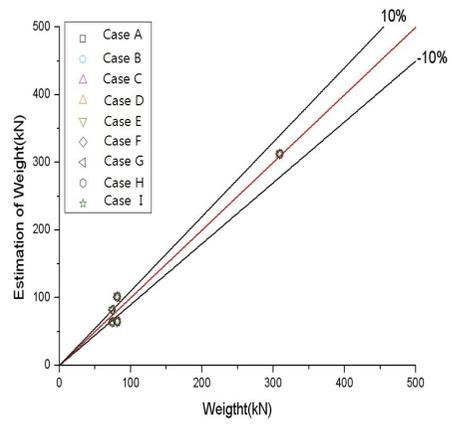
단위 (중량(kN), 오차(%))

구분		1축	2축	3축	4축	총 중량	
시험차량		73.7	74	80.8	80.8	309.3	
Girder 5번	Case A	중량	100.20	61.38	53.00	101.02	315.61
		오차	(35.96)	(-17.05)	(-34.41)	(25.03)	(2.04)
	Case B	중량	100.31	61.19	53.03	101.06	315.60
		오차	(36.11)	(-17.31)	(-34.37)	(25.08)	(2.04)
	Case C	중량	100.38	61.07	53.21	100.92	315.58
		오차	(36.21)	(-17.48)	(-34.15)	(24.90)	(2.03)
	Case D	중량	100.52	60.84	53.17	101.04	315.58
		오차	(36.39)	(-17.78)	(-34.19)	(25.06)	(2.03)
	Case E	중량	100.59	60.71	53.32	100.94	315.56
		오차	(36.48)	(-17.95)	(-34.02)	(24.93)	(2.02)
	Case F	중량	100.71	60.49	53.21	101.15	315.56
		오차	(36.65)	(-18.25)	(-34.14)	(25.18)	(2.03)
	Case G	중량	100.78	60.36	53.38	101.02	315.54
		오차	(36.75)	(-18.43)	(-33.93)	(25.02)	(2.02)
	Case H	중량	100.87	60.19	53.45	101.03	315.54
		오차	(36.87)	(-18.66)	(-33.85)	(25.03)	(2.02)
	Case I	중량	101.00	59.96	53.35	101.22	315.54
		오차	(37.05)	(-18.97)	(-33.97)	(25.27)	(2.02)

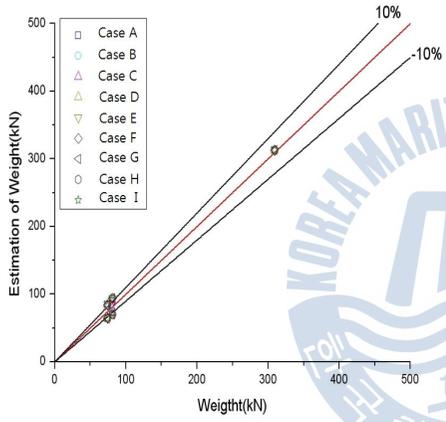




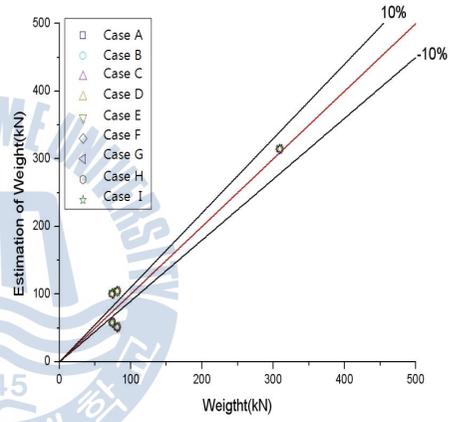
(a) Girder 1



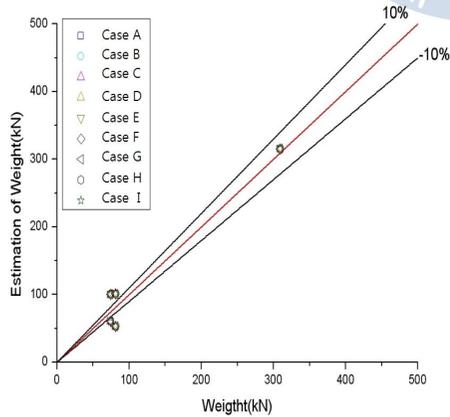
(b) Girder 2



(c) Girder 3



(d) Girder 3



(e) Girder 5

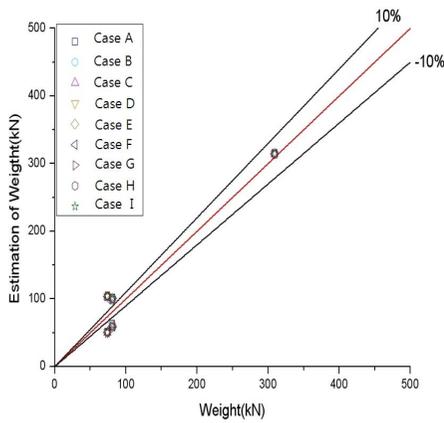
그림 4-8. 4축 시험차량이 횡방향 이동시 정밀도

표 4-17. Girder 1에서 3축 주행차량이 횡방향 이동시 중량비교
(a) 시험차량 Case A 주행 시

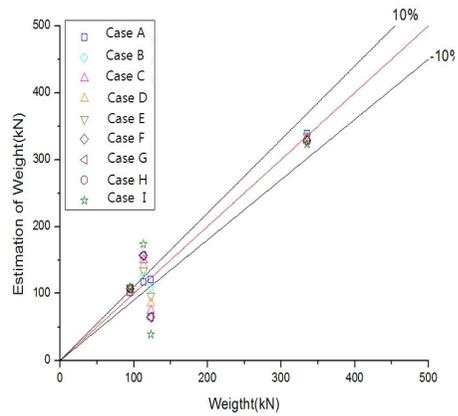
			단위 (중량(kN), 오차(%))			
구분			1축	2축	3축	총 중량
주행차량			97.10	124.60	114.80	336.50
시험차량 Case A 주행	Case A	중량	101.03	120.72	116.86	338.61
		오차	(4.05)	(-3.11)	(1.79)	(0.63)
	Case B	중량	102.52	108.29	125.82	336.62
		오차	(5.58)	(-13.09)	(9.60)	(0.04)
	Case C	중량	106.38	74.74	149.66	330.78
		오차	(9.55)	(-40.01)	(30.37)	(-1.70)
	Case D	중량	105.21	85.22	142.29	332.71
		오차	(8.35)	(-31.61)	(23.94)	(-1.13)
	Case E	중량	103.91	96.44	134.31	334.65
		오차	(7.01)	(-22.60)	(16.99)	(-0.55)
	Case F	중량	107.46	64.83	156.60	328.88
		오차	(10.67)	(-47.97)	(36.41)	(-2.26)
	Case G	중량	107.46	64.83	156.60	328.88
		오차	(10.67)	(-47.97)	(36.41)	(-2.26)
	Case H	중량	107.46	64.83	156.60	328.88
		오차	(10.67)	(-47.97)	(36.41)	(-2.26)
	Case I	중량	110.08	38.96	174.26	323.30
		오차	(13.36)	(-68.73)	(51.80)	(-3.92)

(b) 시험차량 Case I 주행 시

			단위 (중량(kN), 오차(%))			
구분			1축	2축	3축	총 중량
주행차량			97.10	124.60	114.80	336.50
시험차량 Case I 주행	Case A	중량	101.03	120.72	116.86	338.61
		오차	(4.05)	(-3.11)	(1.79)	(0.63)
	Case B	중량	102.52	108.29	125.82	336.62
		오차	(5.58)	(-13.09)	(9.60)	(0.04)
	Case C	중량	106.38	74.74	149.66	330.78
		오차	(9.55)	(-40.01)	(30.37)	(-1.70)
	Case D	중량	105.21	85.22	142.29	332.71
		오차	(8.35)	(-31.61)	(23.94)	(-1.13)
	Case E	중량	103.91	96.44	134.31	334.65
		오차	(7.01)	(-22.60)	(16.99)	(-0.55)
	Case F	중량	107.46	64.83	156.60	328.88
		오차	(10.67)	(-47.97)	(36.41)	(-2.26)
	Case G	중량	107.46	64.83	156.60	328.88
		오차	(10.67)	(-47.97)	(36.41)	(-2.26)
	Case H	중량	107.46	64.83	156.60	328.88
		오차	(10.67)	(-47.97)	(36.41)	(-2.26)
	Case I	중량	110.08	38.96	174.26	323.30
		오차	(13.36)	(-68.73)	(51.80)	(-3.92)



(a) 시험차량 Case A 주행



(b) 시험차량 Case I 주행

그림 4-9. Girder 1 에서 미지의 3축 차량 정밀도

표 4-18. Girder 1에서 4축 주행차량이 횡방향 이동시 중량비교

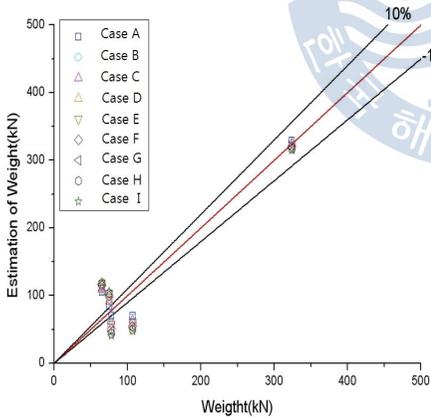
(a) 시험차량 Case A 주행 시

단위 (중량(kN), 오차(%))

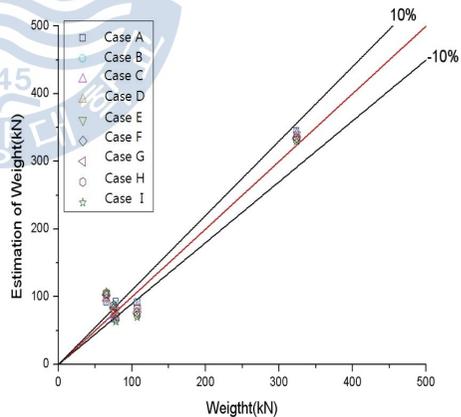
구분		1축	2축	3축	4축	총 중량	
주행 차량		64.7	106.9	77.5	74.6	323.7	
시험차량 Case A 주행	Case A	중량	104.81	69.99	70.23	84.40	329.43
		오차	(61.99)	(-34.53)	(-9.38)	(13.14)	(1.77)
	Case B	중량	107.14	66.74	65.94	87.73	327.55
		오차	(65.59)	(-37.56)	(-14.91)	(17.60)	(1.19)
	Case C	중량	109.33	63.63	61.86	90.87	325.70
		오차	(68.99)	(-40.48)	(-20.18)	(21.81)	(0.62)
	Case D	중량	111.43	60.63	57.97	93.83	323.86
		오차	(72.22)	(-43.29)	(-25.20)	(25.78)	(0.05)
	Case E	중량	111.43	60.63	57.97	93.83	323.86
		오차	(72.22)	(-43.29)	(-25.20)	(25.78)	(0.05)
	Case F	중량	115.19	55.09	50.67	99.28	320.23
		오차	(78.03)	(-48.47)	(-34.61)	(33.08)	(-1.07)
	Case G	중량	116.91	52.48	47.32	101.74	318.45
		오차	(80.70)	(-50.91)	(-38.95)	(36.38)	(-1.62)
	Case H	중량	118.49	50.03	44.16	104.00	316.68
		오차	(83.14)	(-53.20)	(-43.02)	(39.41)	(-2.17)
	Case I	중량	119.93	47.74	41.17	106.10	314.93
		오차	(85.36)	(-55.35)	(-46.87)	(42.22)	(-2.71)

(b) 시험차량 Case I 주행 시

			단위 (중량(kN), 오차(%))				
구분			1축	2축	3축	4축	총 중량
주행차량			64.7	106.9	77.5	74.6	323.7
시험차량 Case I 주행	Case A	중량	92.46	92.01	93.10	67.44	345.00
		오차	(42.90)	(-13.93)	(20.13)	(-9.60)	(6.58)
	Case B	중량	94.61	88.88	88.81	70.72	343.02
		오차	(46.22)	(-16.86)	(14.59)	(-5.19)	(5.97)
	Case C	중량	96.65	85.86	84.71	73.84	341.06
		오차	(49.38)	(-19.68)	(9.30)	(-1.02)	(5.36)
	Case D	중량	98.60	82.94	80.79	76.79	339.12
		오차	(52.40)	(-22.41)	(4.24)	(2.93)	(4.76)
	Case E	중량	98.60	82.94	80.79	76.79	339.12
		오차	(52.40)	(-22.41)	(4.24)	(2.93)	(4.76)
	Case F	중량	102.14	77.52	73.41	82.23	335.30
		오차	(57.86)	(-27.48)	(-5.28)	(10.23)	(3.58)
	Case G	중량	103.77	74.94	70.00	84.71	333.43
		오차	(60.39)	(-29.89)	(-9.68)	(13.56)	(3.00)
	Case H	중량	105.28	72.51	66.77	87.00	331.57
		오차	(62.73)	(-32.17)	(-13.85)	(16.63)	(2.43)
	Case I	중량	106.67	70.21	63.70	89.14	329.73
		오차	(64.87)	(-34.32)	(-17.80)	(19.49)	(1.86)



(a) 시험차량 Case A 주행



(b) 시험차량 Case I 주행

그림 4-10. Girder 1 에서 미지의 4축 차량 정밀도

5장. 결 론

5.1 결 론

이 연구에서는 영향선이 긴 부재와 짧은 부재의 응답을 해석적으로 도출하여 차량의 위치 및 속도를 실시간으로 구하는 방법을 제시하였고 시험차량의 영향선을 이용하여 임의로 통과한 차량의 중량을 역으로 추정하는 방법을 제시하고 검증하였다.

이상의 연구과정에 의하여 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 비교적 짧은 부재의 응답을 해석적으로 도출하여 차량의 위치 및 속도를 검출하였다. 미분관독법을 이용하여 차량의 위치 및 속도를 검출 하는 것이 실시간 계측에 가장 적합한 것으로 나타났다.

(2) 비교적 긴 부재의 응답을 해석적으로 도출하여 시험차량의 영향선을 구하였고 이를 분석하여 임의로 통과한 차량의 중량을 추정하였다. 시험차량에 대한 영향선을 같은 축의 차량을 분석하는 것이 중량산출에 있어서 타당하다.

(3) 추정한 중량과 실제 중량의 검증을 실시한 결과 영향면을 이용한 경우 영향선을 이용한 경우보다 정확한 축 중량이 나오는 것을 알 수 있었다. 하지만 실시간계측 뿐만 아니라 각 축의 영향면을 컴퓨터가 자동으로 분리하는데 어려움이 있으므로 이 연구에서 제시한 영향선을 이용한 축 중량검출방법을 사용하는 것이 보다 효율적일 것으로 판단된다.

(4) 차축수가 많아질수록 차량의 축 중량 및 총 중량의 정밀도가 저하되는 영향을 확인 할 수 있었다. 또한 속도에 따른 축 중량 및 총 중량의 정밀도를 비교한 결과 주거터와 같은 긴 부재에서의 응답과 계산응답을 최소화 하는 시스템이므로 차량중량 산정결과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

(5) 시험차량의 영향선에 따라 중량산출의 결과 값이 크게 좌우되는 것을 알 수 있었다. 이러한 영향선은 차축거리에 따라 달라지는 것을 알 수 있었다. 따라서 축에 대한 응답이 잘 드러나는 시험차량을 선정하는 것이 중요하다.

(6) 차량의 횡방향 이동에 따른 영향선을 산정하여 중량 및 각 Girder별 정밀도를 산정하였다. 그 결과 시험차량의 중량은 위치에 따른 변형률을 이용하여 최소자승법을 실시하였으므로 중량에 대한 값은 유사하게 나오는 것을 알 수 있었다. 또한 미지의 차량이 횡방향으로 주행 시 그 위치에 따른 중량을 비교하였다. 그 결과 시험차량의 주행위치와 임의의 주행차량의 위치가 멀어질수록 중량오차가 크게 나오는 것을 알 수 있었다.

5.2 향후 과제

(1) 현장계측을 통해 실 교통조건하에서의 차량중량을 분석하여 현장적용을 위한 보정계수 도입 및 교통량 분석을 해야 할 것으로 판단된다.

(2) 차량중량 추정에 있어서의 정밀도 향상을 위해 온도변화에 따른 응답 및 교량과 노면의 상태, 차량고유 진동수 등에 의해 생기는 응답을 분석하여 교량부재에서 계측되는 응답과 분리해야 할 것으로 판단된다.

(3) 플레이트 거더교에 발생하는 변형뿐만 아니라 교량 형식별로 분석하여 향후 도로포장의 내구성 평가 및 유지관리에 필요한 기초자료로 제공할 수 있을 것으로 판단된다.



참고문헌

저 서

국토해양부(2000), 도로설계편람 제 5편 교량

국토해양부(2008), 도로설계편람 제 5편 교량

학술지 및 학술회의 게재논문

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

정지원, 신수봉(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

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

학위 논문

권동근(2007), 동적특성을 고려한 BWIM 시스템 알고리즘 연구, 석사학위논문, 상지대학교

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

이복규(2008), BWIM 시스템의 축중 예측도 향상을 위한 동적해석, 석사학위논문, 상지대학교

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 KOBAYASHI(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勞壽命評價法と疲勞設計用衝擊係數の検討, 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



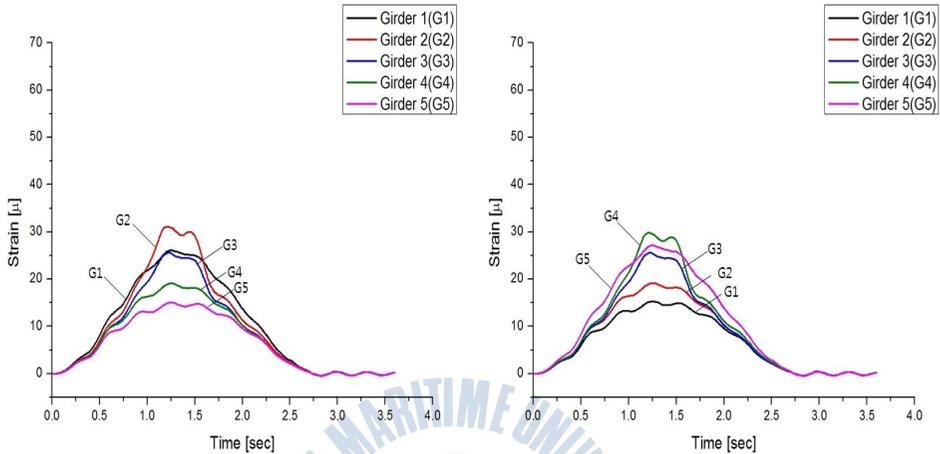
[부 록]

목 차

1. 시간이력해석	83
1.1 4축 시험차량	83
1.2 3축 주행차량	84
1.3 4축 주행차량	85
2. 추정변형률과 계산변형률 비교	86
2.1 3축 시험차량	86
2.2 4축 시험차량	88
2.3 4축 주행차량	90
3. 시험차량 위치에 따른 주행차량 정밀도	92
3.1 3축 시험차량이 Case에 따라 주행시 주행차량 정밀도	92
3.2 4축 시험차량이 Case에 따라 주행시 주행차량 정밀도	101

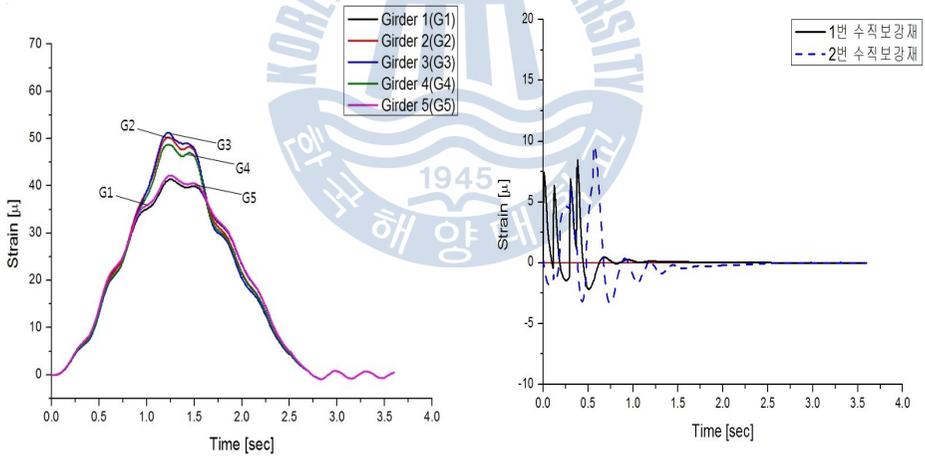
1. 시간이력해석

1.1 4축 시험차량



(a) 1차선 단독주행

(b) 2차선 단독주행

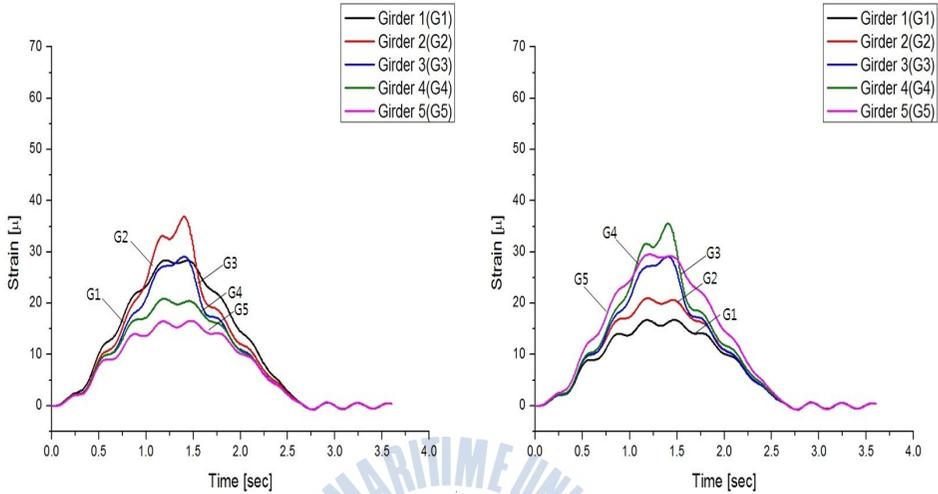


(c) 동시주행

(d) 수직보강재

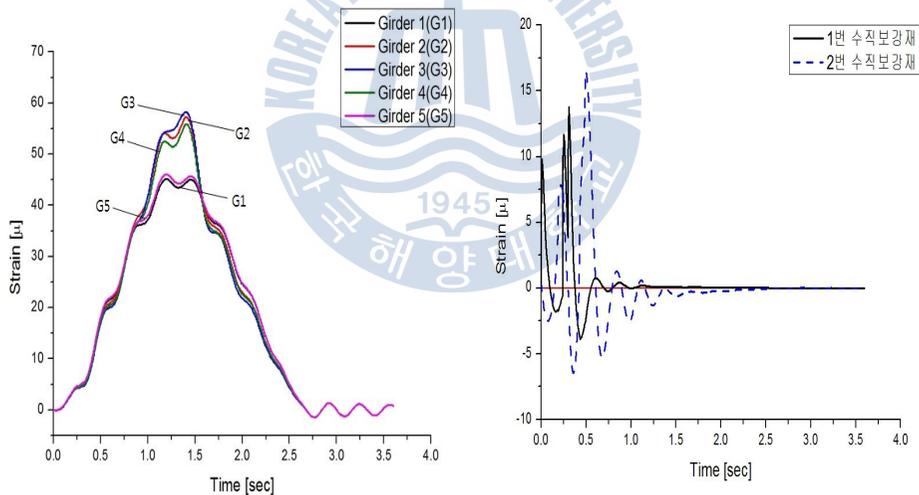
부록 1.1 부재에 따른 변형률

1.2 3축 주행차량



(a) 1차선 단독주행

(b) 2차선 단독주행

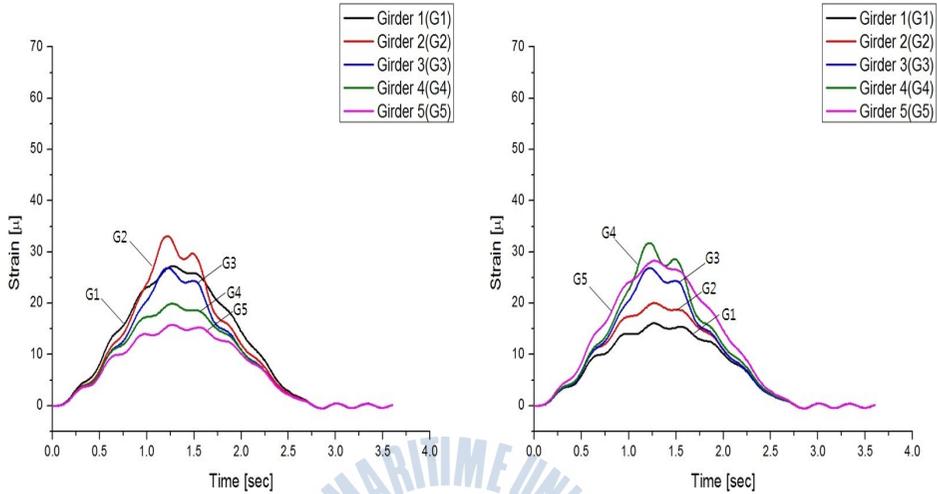


(c) 동시주행

(d) 수직보강재

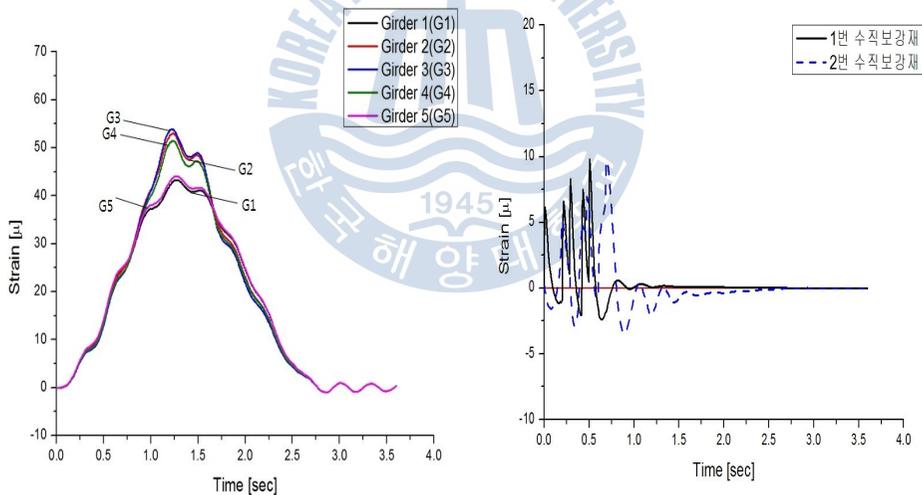
부록 1.2 부제에 따른 변형률

1.3 4축 주행차량



(a) 1차선 단독주행

(b) 2차선 단독주행



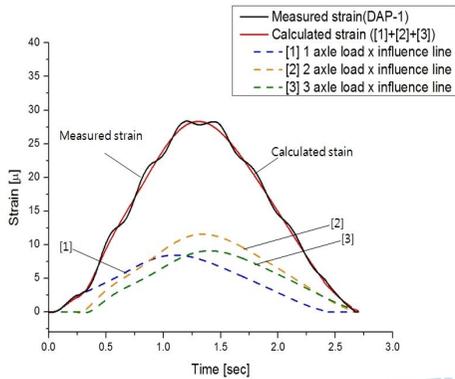
(c) 동시주행

(d) 수직보강재

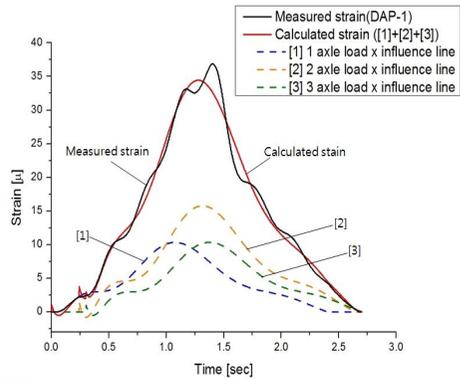
부록 1.3 부제에 따른 변형률

2. 추정변형률과 계산변형률 비교

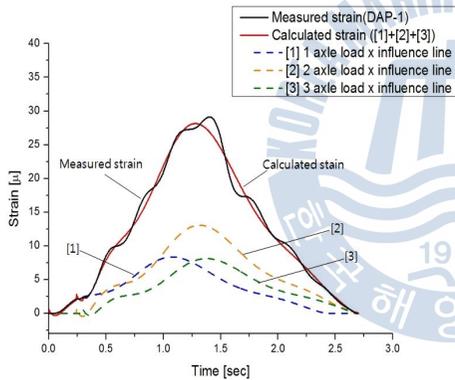
2.1 3축 주행차량



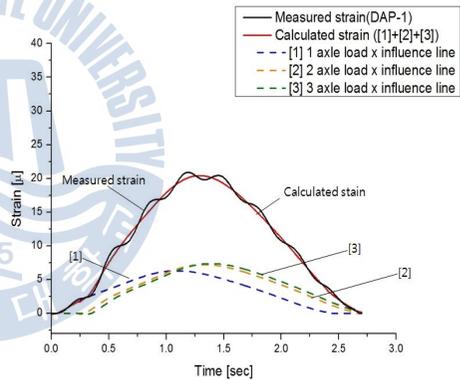
(a) Girder 1에서의 변형률 비교



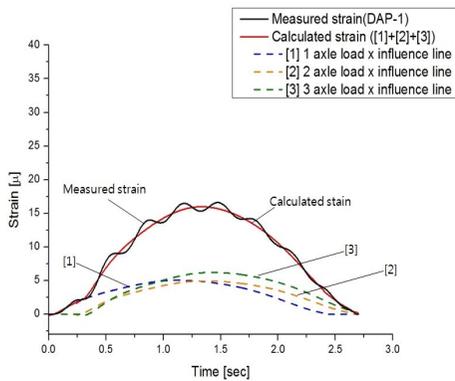
(b) Girder 2에서의 변형률 비교



(c) Girder 3에서의 변형률 비교

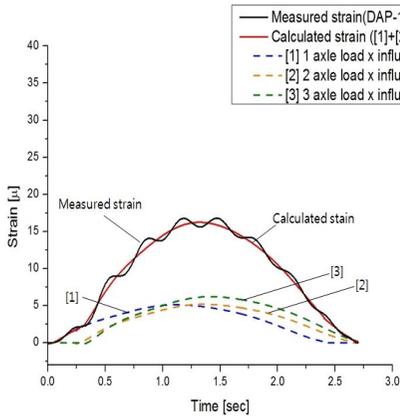


(d) Girder 4에서의 변형률 비교

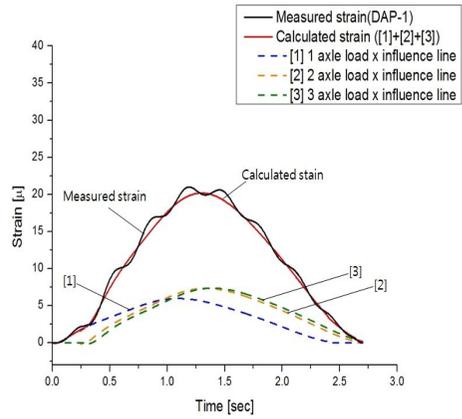


(e) Girder 5에서의 변형률 비교

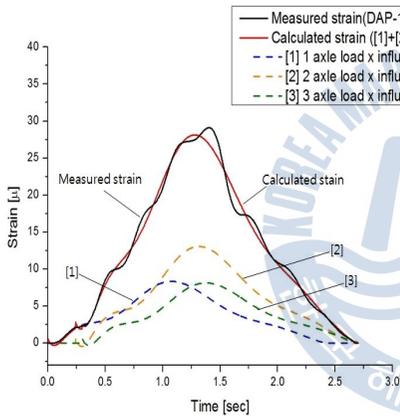
부록 2.1 1차선에서의 변형률 검증



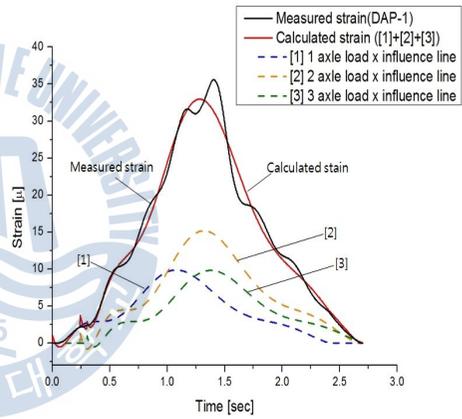
(a) Girder 1에서의 변형을 비교



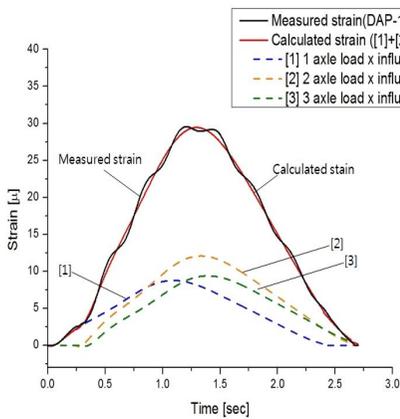
(b) Girder 2에서의 변형을 비교



(c) Girder 3에서의 변형을 비교



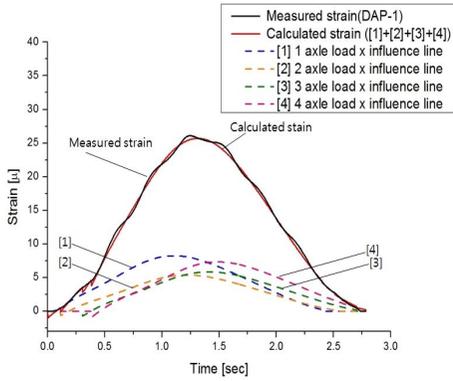
(d) Girder 4에서의 변형을 비교



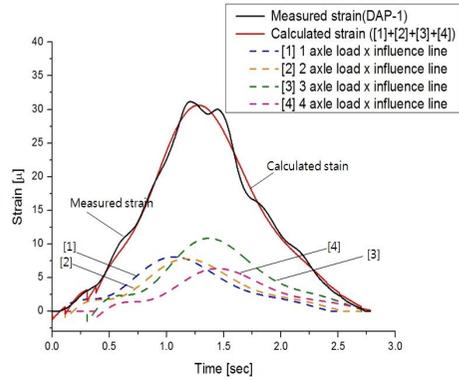
(e) Girder 5에서의 변형을 비교

부록 2.2 2차선에서의 변형을 검증

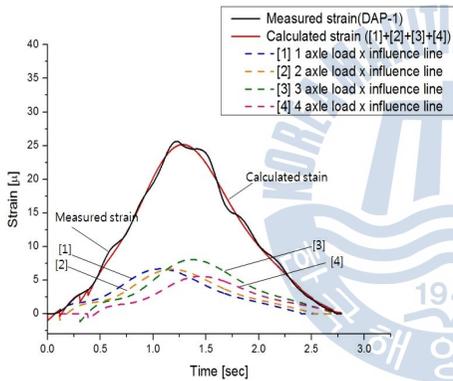
2.2 4축 시험차량



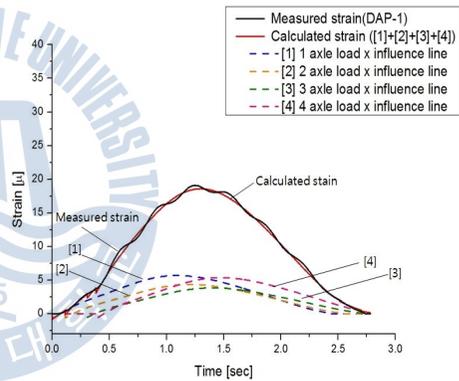
(a) Girder 1에서의 변형을 비교



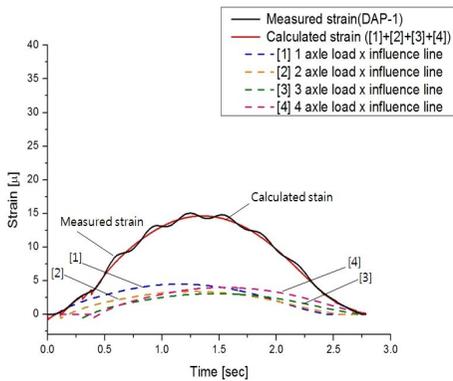
(b) Girder 2에서의 변형을 비교



(c) Girder 3에서의 변형을 비교

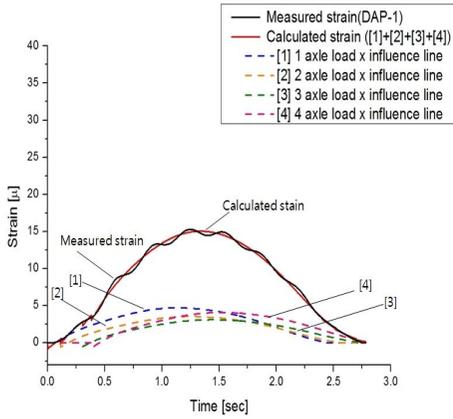


(d) Girder 4에서의 변형을 비교

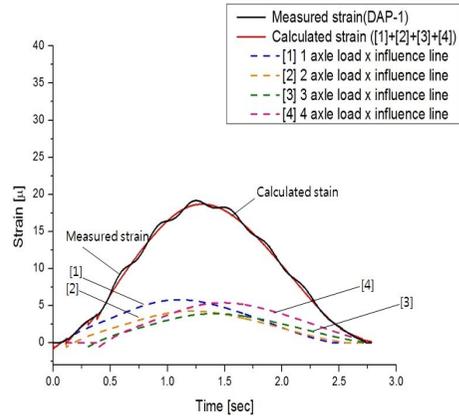


(e) Girder 5에서의 변형을 비교

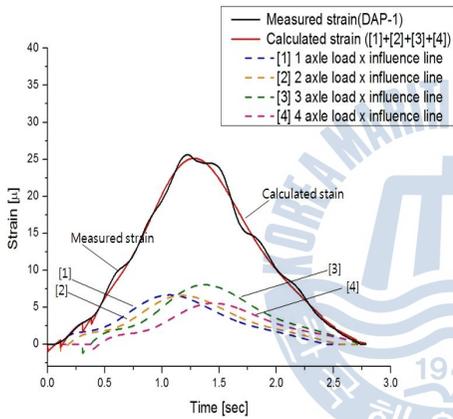
부록 2.3 1차선에서의 변형을 검증



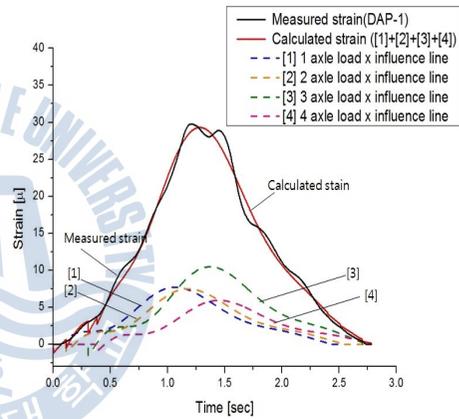
(a) Girder 1에서의 변형을 비교



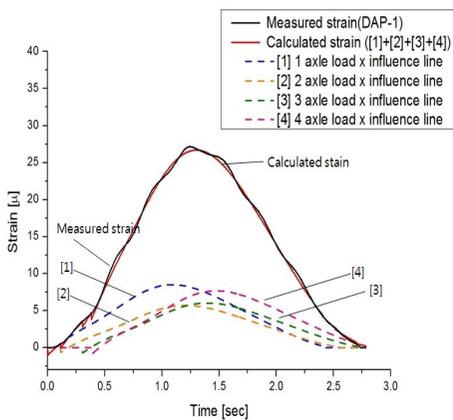
(b) Girder 2에서의 변형을 비교



(c) Girder 3에서의 변형을 비교



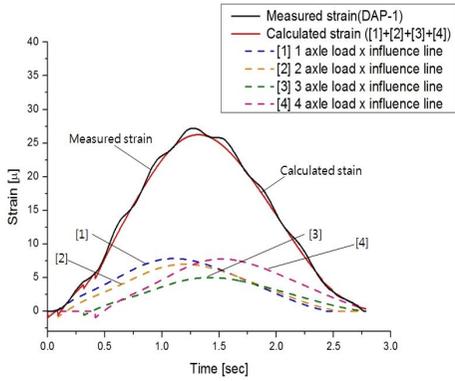
(d) Girder 4에서의 변형을 비교



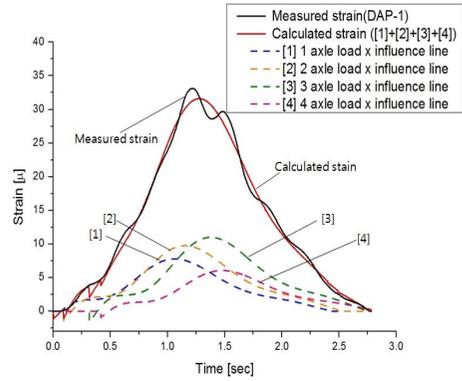
(e) Girder 5에서의 변형을 비교

부록 2.4 2차선에서의 변형을 검증

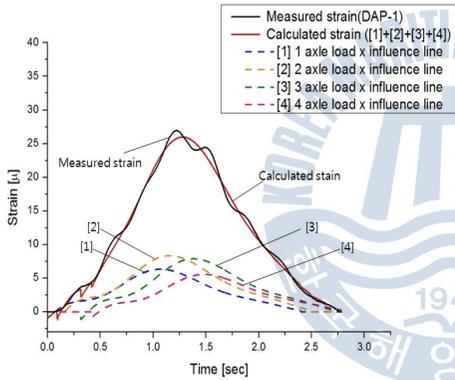
2.3 4축 주행차량



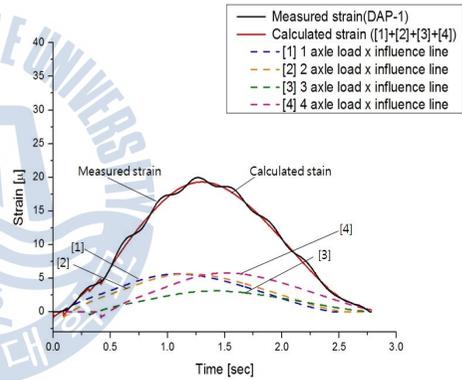
(a) Girder 1에서의 변형을 비교



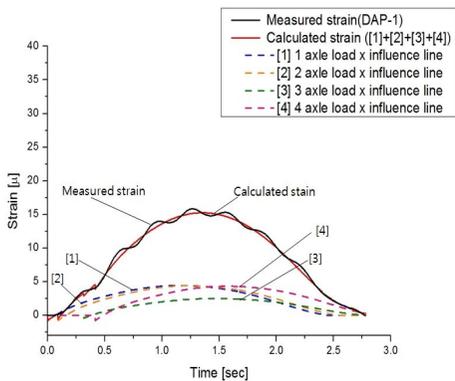
(b) Girder 2에서의 변형을 비교



(c) Girder 3에서의 변형을 비교

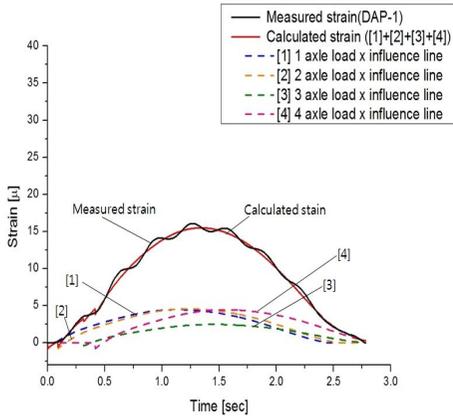


(d) Girder 4에서의 변형을 비교

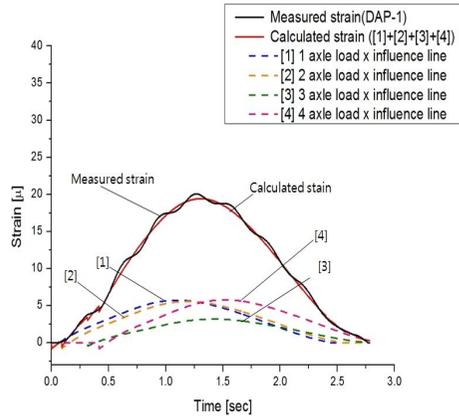


(e) Girder 5에서의 변형을 비교

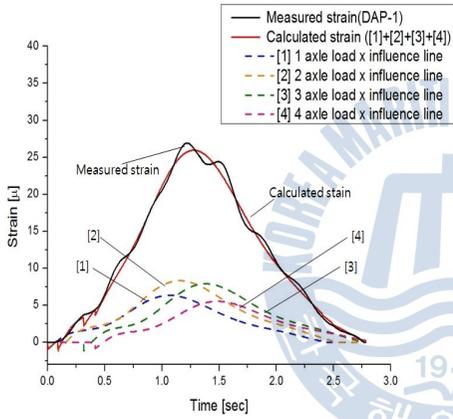
부록 2.5 1차선에서의 변형을 검증



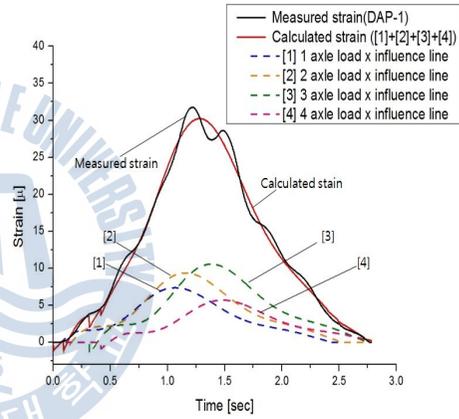
(a) Girder 1에서의 변형을 비교



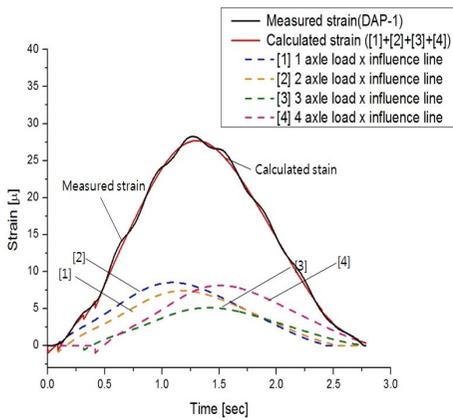
(b) Girder 2에서의 변형을 비교



(c) Girder 3에서의 변형을 비교



(d) Girder 4에서의 변형을 비교



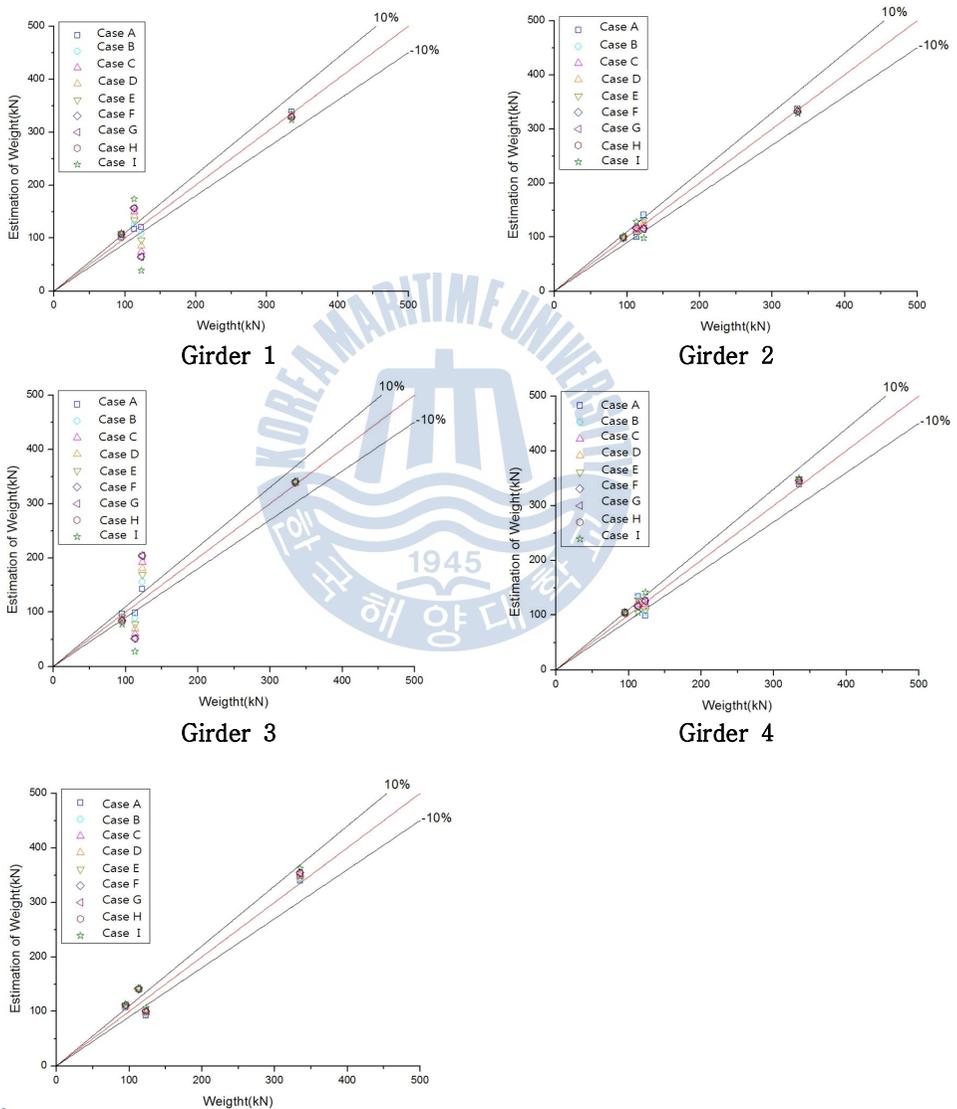
(e) Girder 5에서의 변형을 비교

부록 2.6 2차선에서의 변형을 검증

3. 시험차량 위치에 따른 주행차량 정밀도

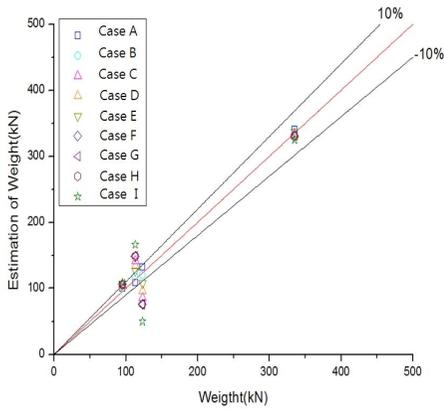
3.1 3축 시험차량이 Case에 따라 주행시 주행차량의 정밀도

1) Case A 주행 시 미지의 차량의 정밀도

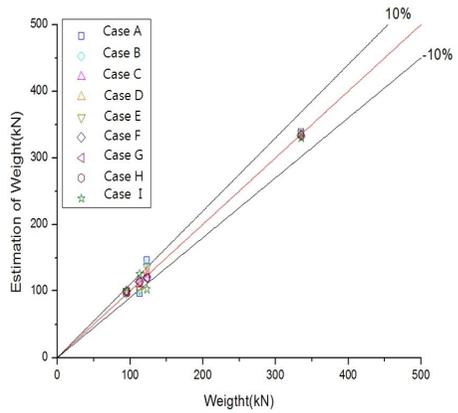


Girder 5
부록 3.1 3축 시험차량이 Case A 주행시 주행차량 중량정밀도

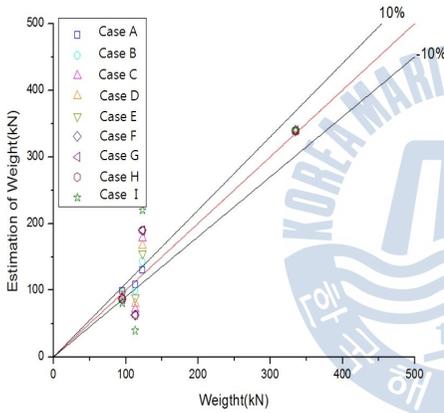
2) Case B 주행 시 미지의 차량의 정밀도



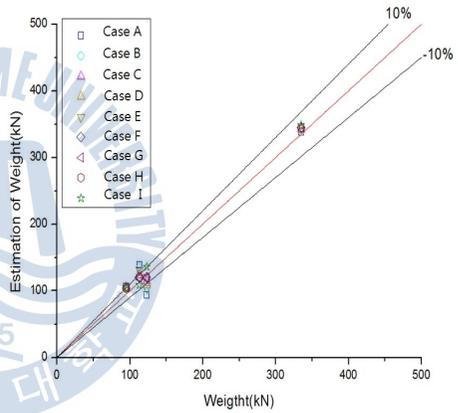
Girder 1



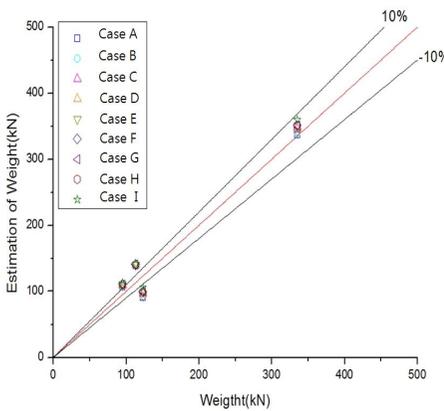
Girder 2



Girder 3



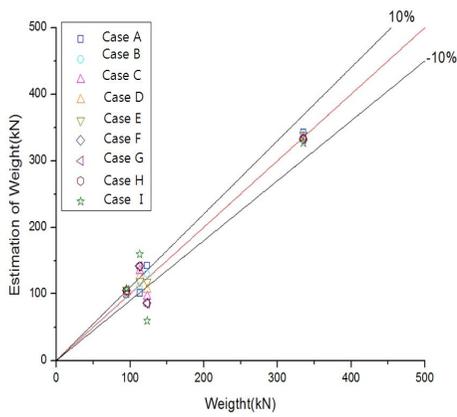
Girder 4



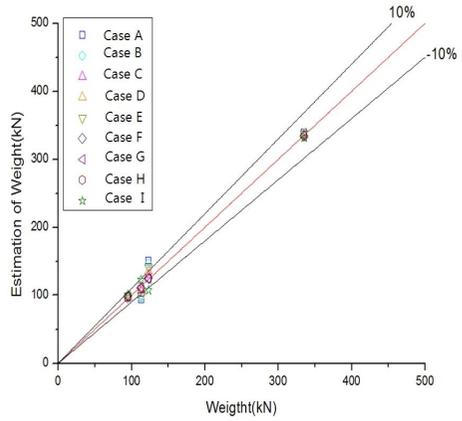
Girder 5

부록 3.2 3축 시험차량이 Case B 주행시 주행차량 중량정밀도

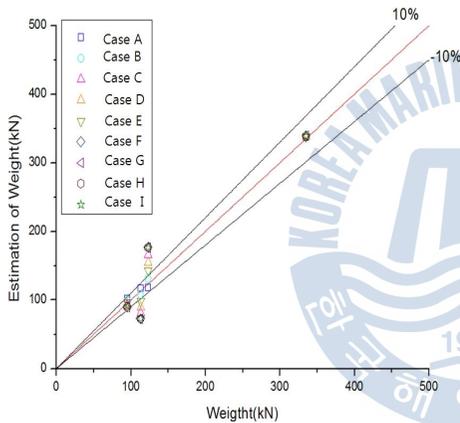
3) Case C 주행 시 미지의 차량의 정밀도



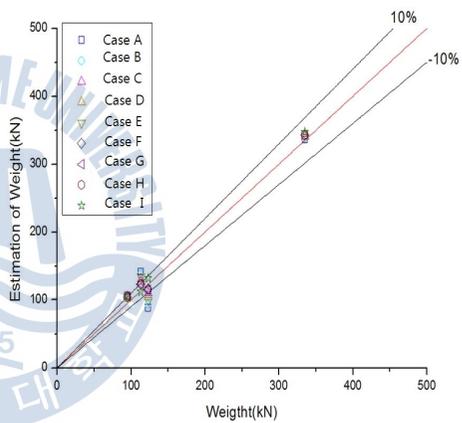
Girder 1



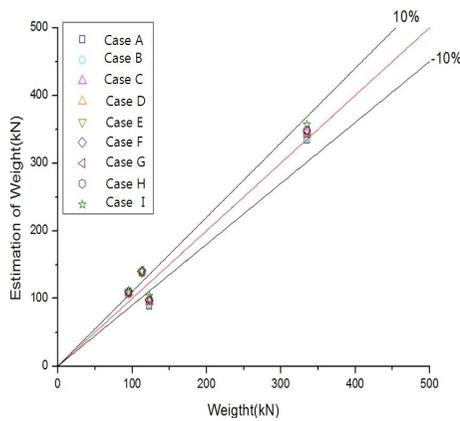
Girder 2



Girder 3



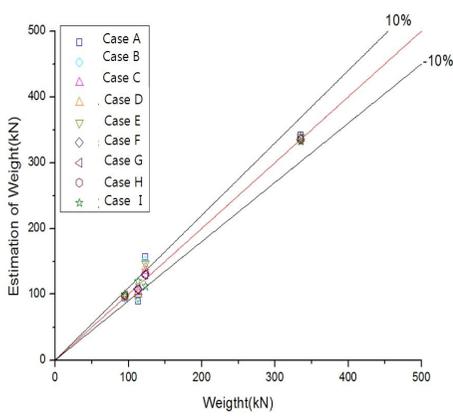
Girder 4



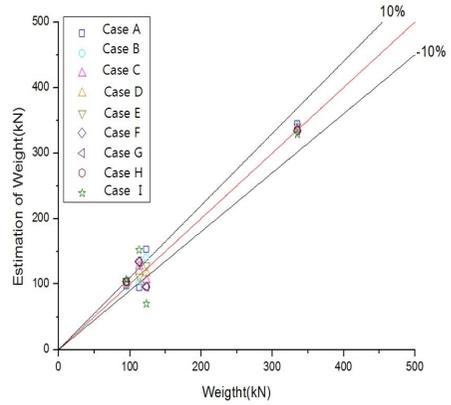
Girder 5

부록 3.3 3축 시험차량이 Case C 주행시 주행차량 중량정밀도

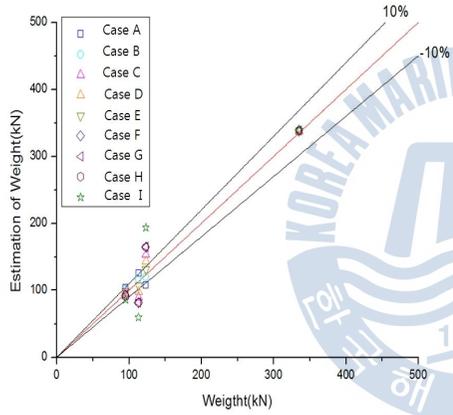
4) Case D 주행 시 미지의 차량의 정밀도



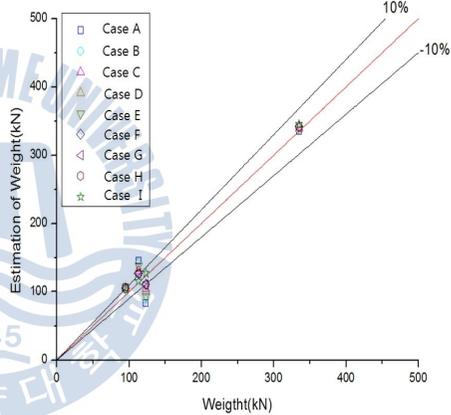
Girder 1



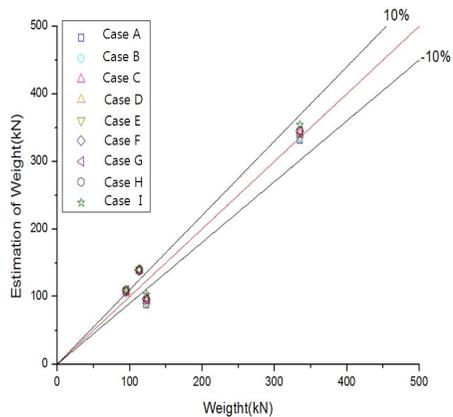
Girder 2



Girder 3



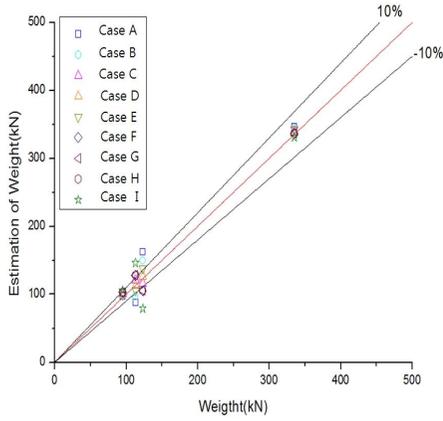
Girder 4



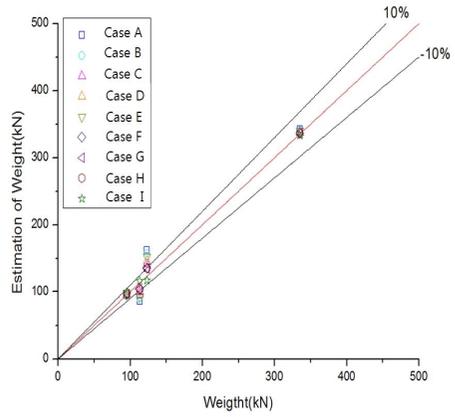
Girder 5

부록 3.4 3축 시험차량이 Case D 주행시 주행차량 중량정밀도

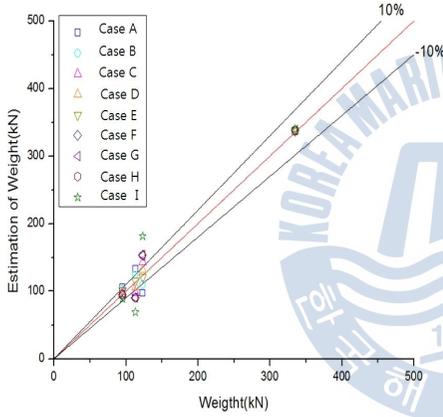
5) Case E 주행 시 미지의 차량의 정밀도



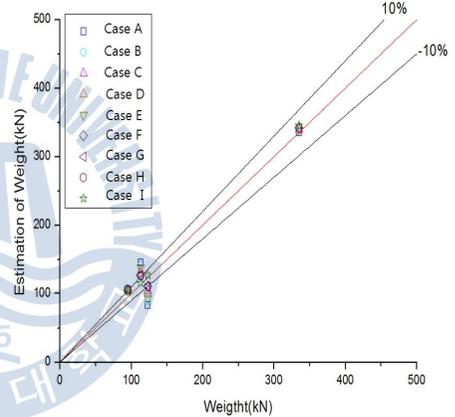
Girder 1



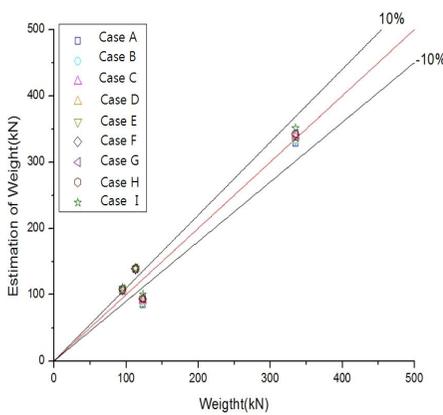
Girder 2



Girder 3



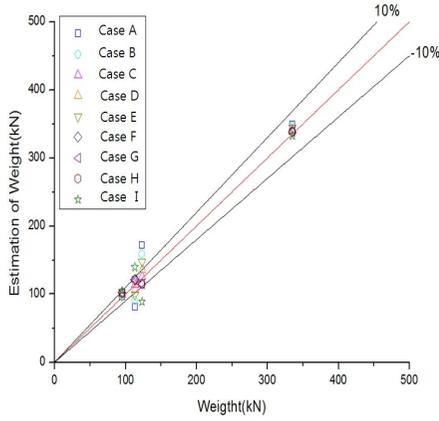
Girder 4



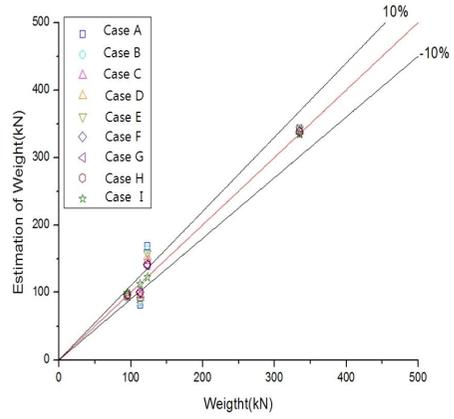
Girder 5

부록 3.5 3축 시험차량이 Case E 주행시 주행차량 중량정밀도

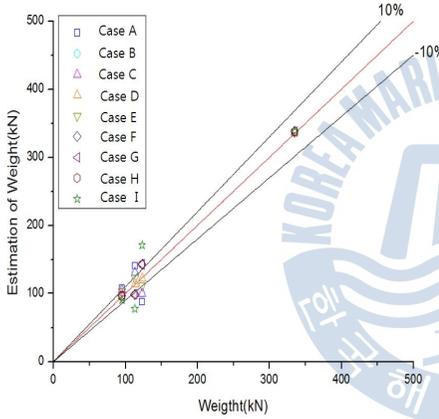
6) Case F 주행 시 미지의 차량의 정밀도



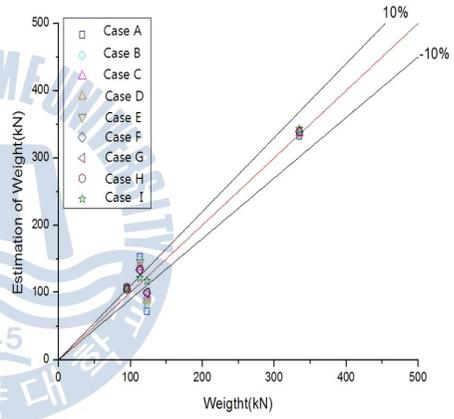
Girder 1



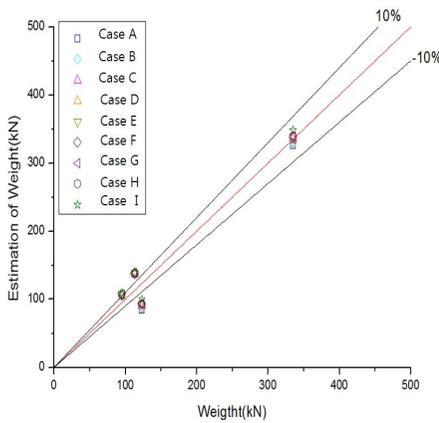
Girder 2



Girder 3



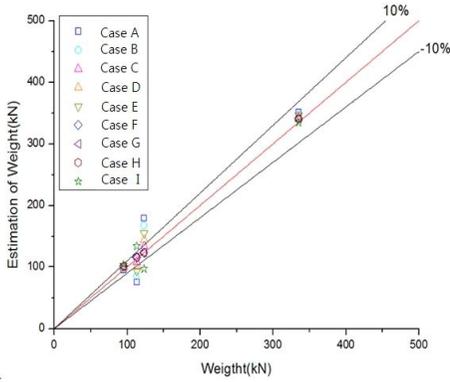
Girder 4



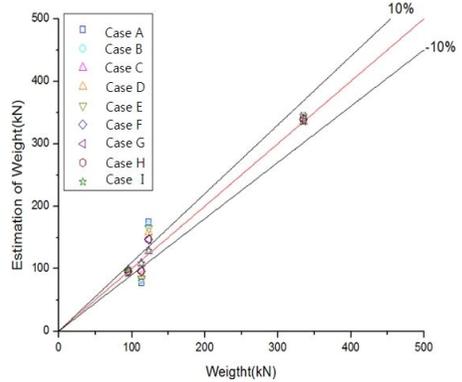
Girder 5

부록 3.6 3축 시험차량이 Case F 주행시 주행차량 중량정밀도

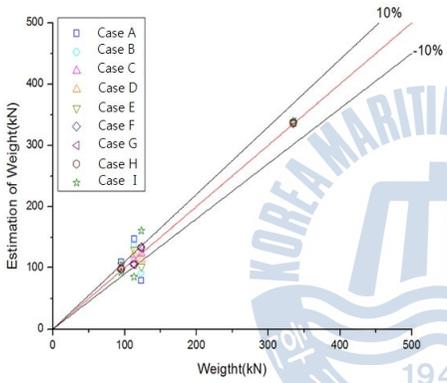
기 Case G 주행 시 미지의 차량의 정밀도



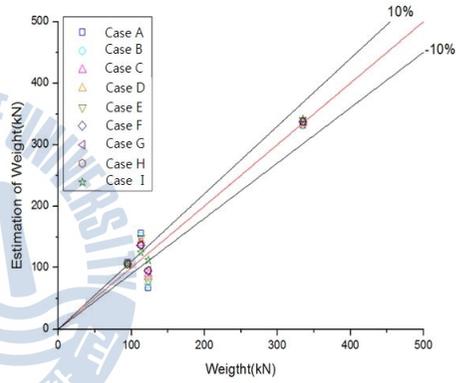
Girder 1



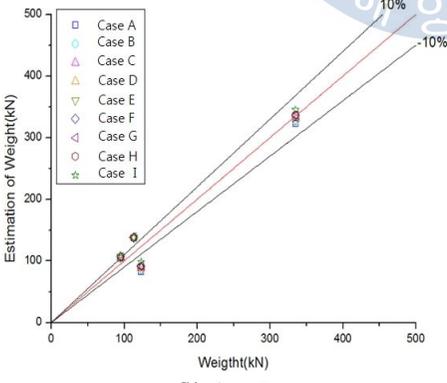
Girder 2



Girder 3



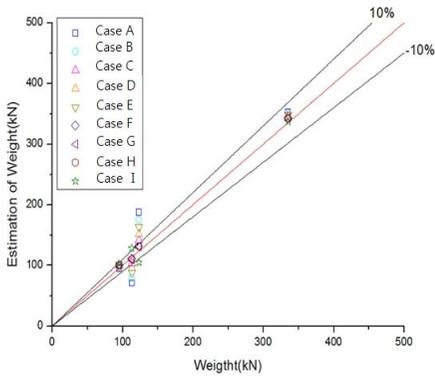
Girder 4



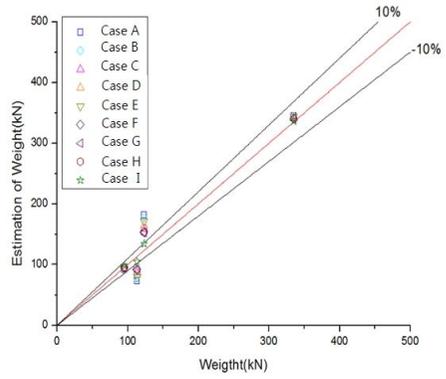
Girder 5

부록 3.7 3축 시험차량이 Case G 주행시 주행차량 중량정밀도

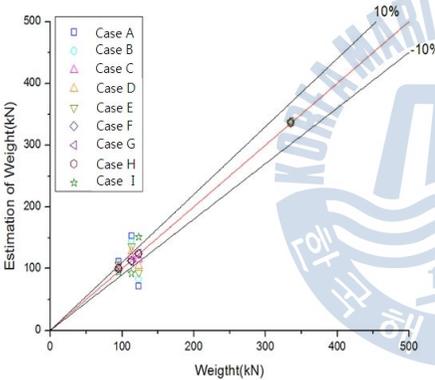
8) Case H 주행 시 미지의 차량의 정밀도



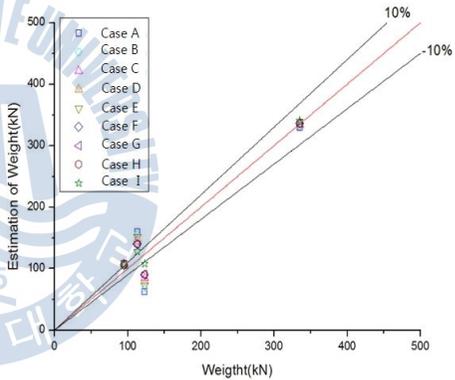
Girder 1



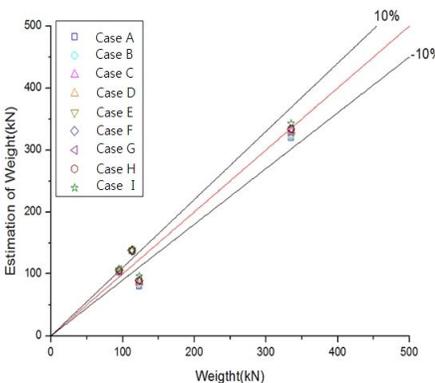
Girder 2



Girder 3



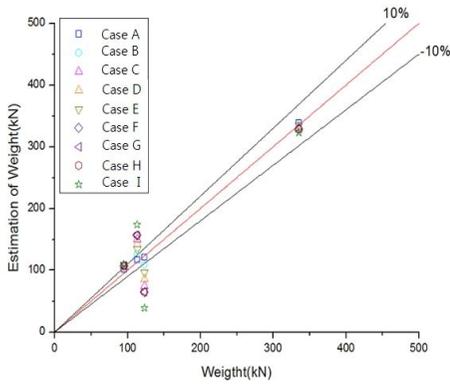
Girder 4



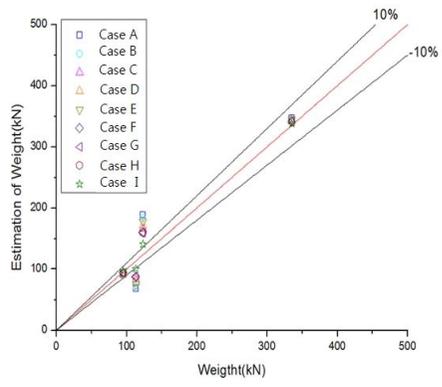
Girder 5

부록 3.8 3층 시험차량이 Case H 주행시 주행차량 증량정밀도

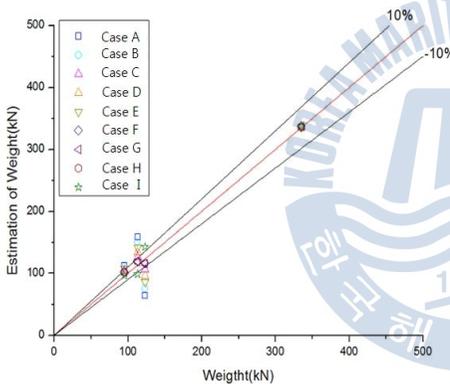
9) Case I 주행 시 미지의 차량의 정밀도



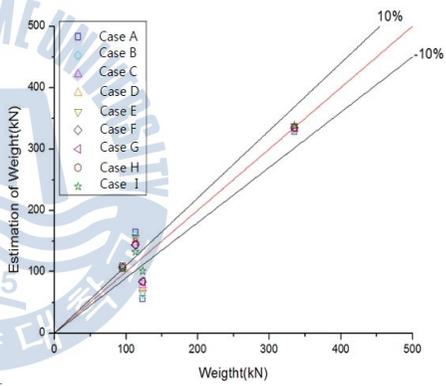
Girder 1



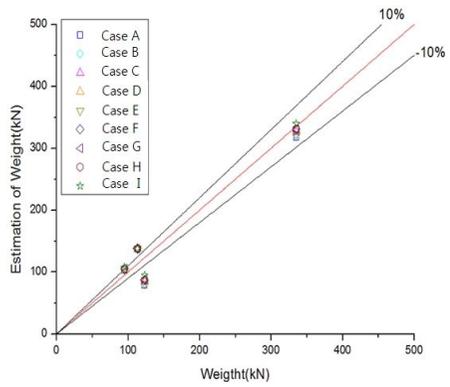
Girder 2



Girder 3



Girder 4

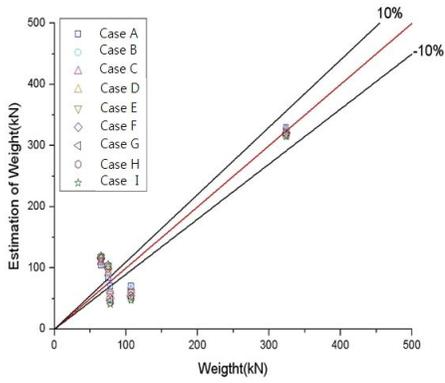


Girder 5

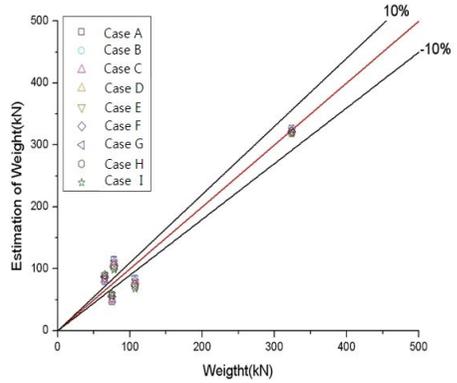
부록 3.9 3축 시험차량이 Case I 주행시 주행차량 중량정밀도

3.2 4축 시험차량이 Case에 따라 주행시 주행차량의 정밀도

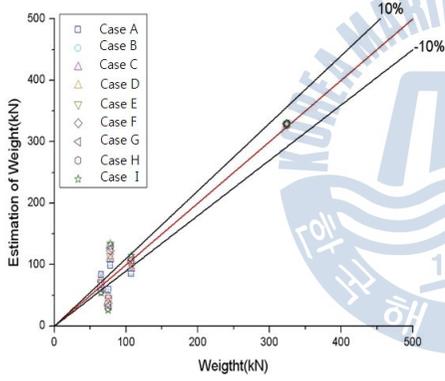
1) Case A 주행 시 미지의 차량의 정밀도



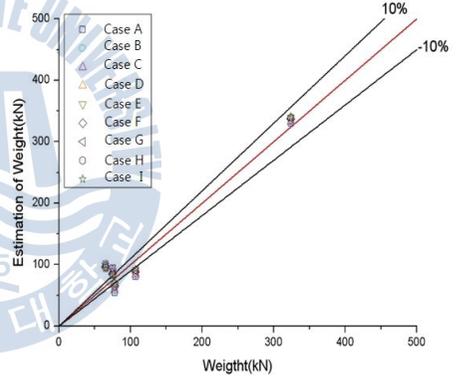
Girder 1



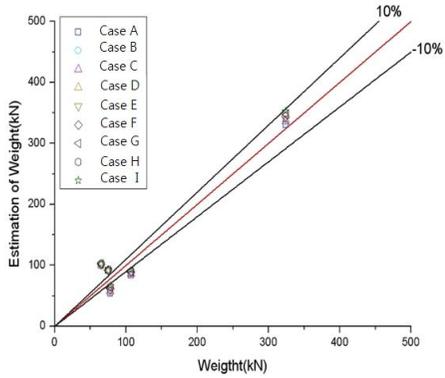
Girder 2



Girder 3



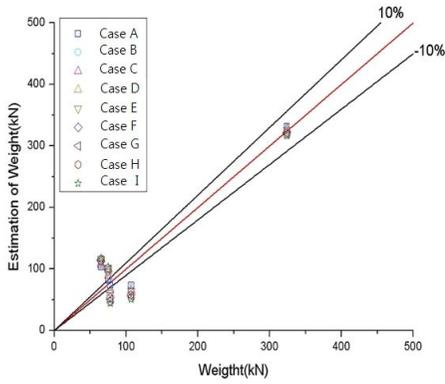
Girder 4



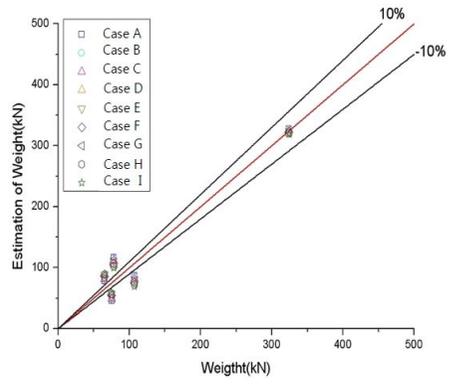
Girder 5

부록 3.10 4축 시험차량이 Case A 주행시 주행차량 중량정밀도

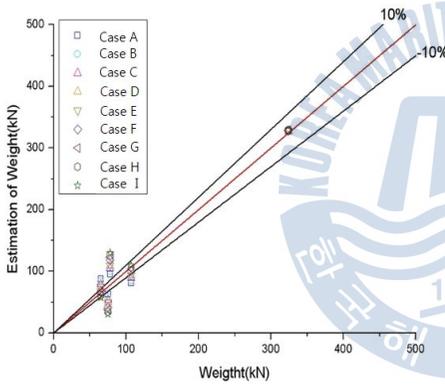
2) Case B 주행 시 미지의 차량의 정밀도



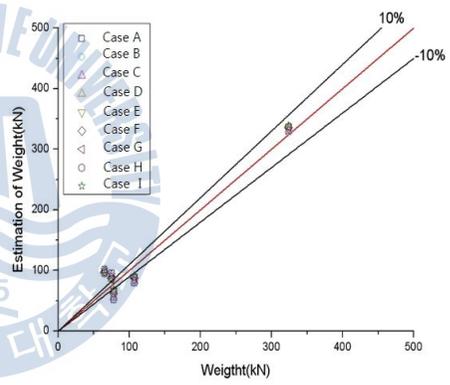
Girder 1



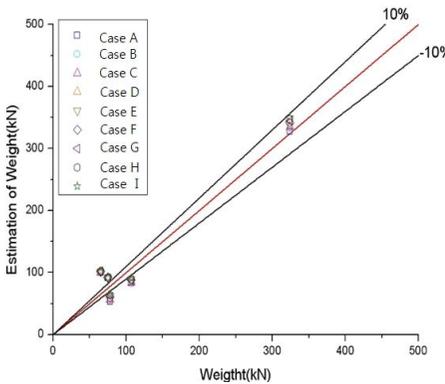
Girder 2



Girder 3



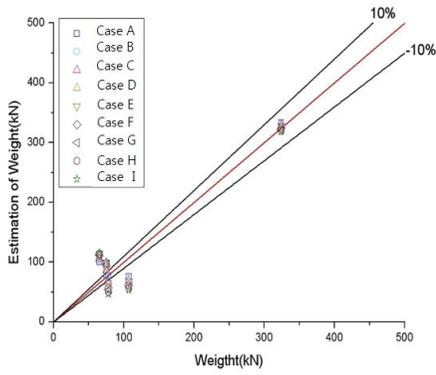
Girder 4



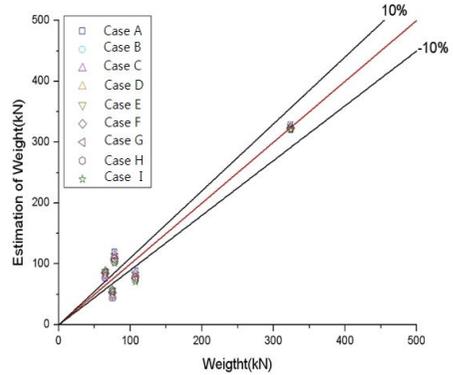
Girder 5

부록 3.11 4축 시험차량이 Case B 주행시 주행차량 중량정밀도

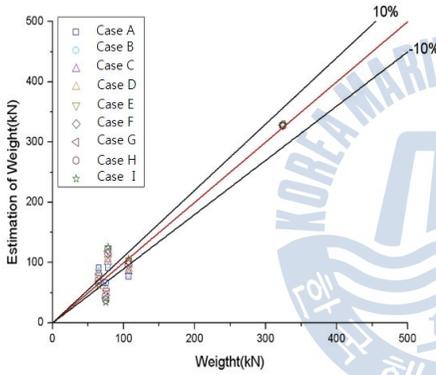
3) Case C 주행 시 미지의 차량의 정밀도



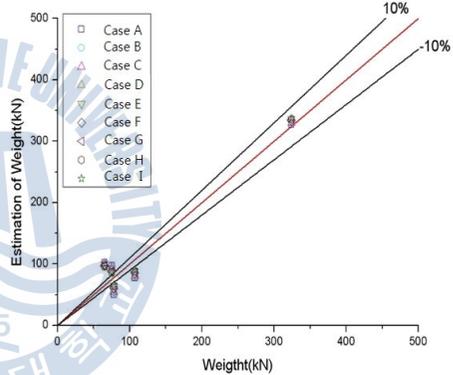
Girder 1



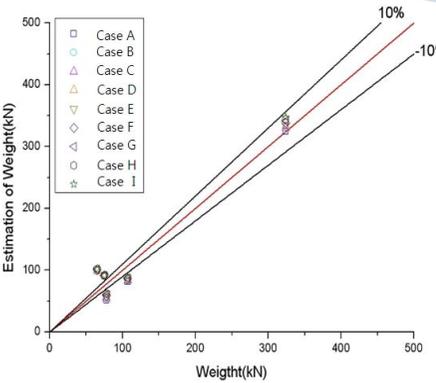
Girder 2



Girder 3



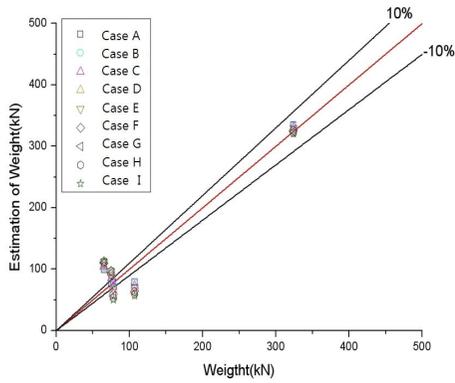
Girder 4



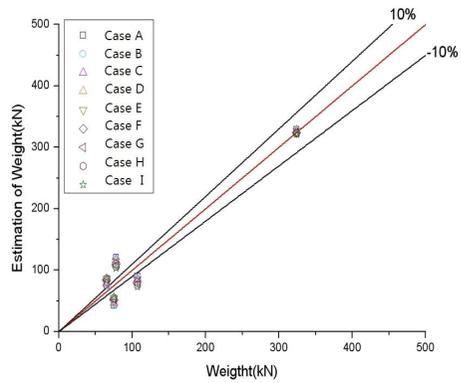
Girder 5

부록 3.12 4축 시험차량이 Case C 주행시 주행차량 중량정밀도

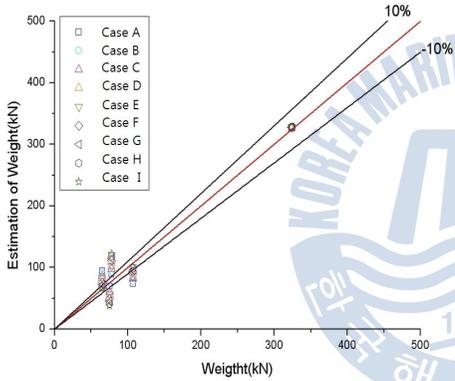
4) Case D 주행 시 미지의 차량의 정밀도



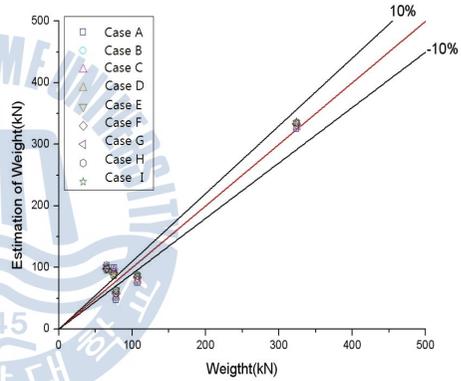
Girder 1



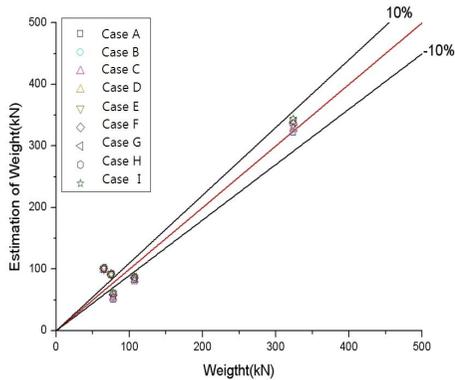
Girder 2



Girder 3



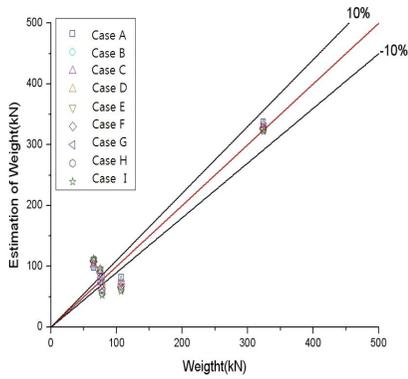
Girder 4



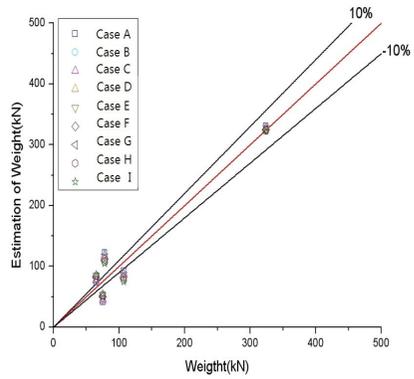
Girder 5

부록 3.13 4축 시험차량이 Case D 주행시 주행차량 중량정밀도

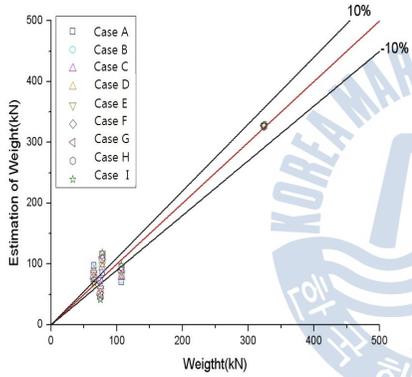
5) Case E 주행 시 미지의 차량의 정밀도



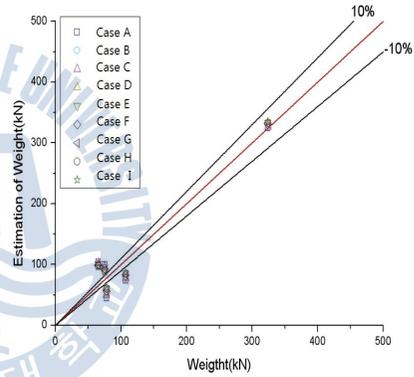
Girder 1



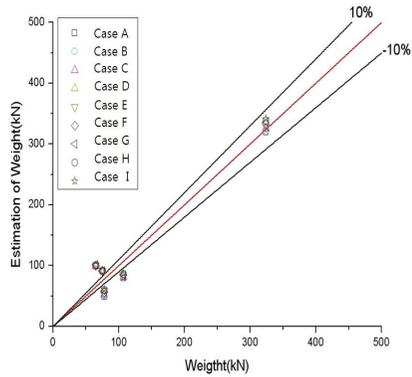
Girder 2



Girder 3



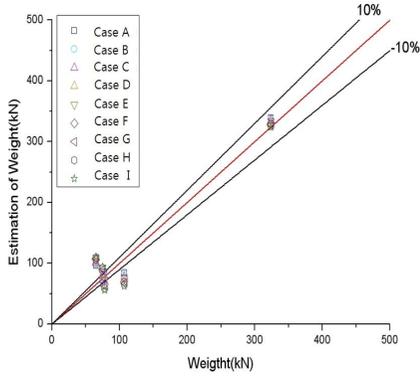
Girder 4



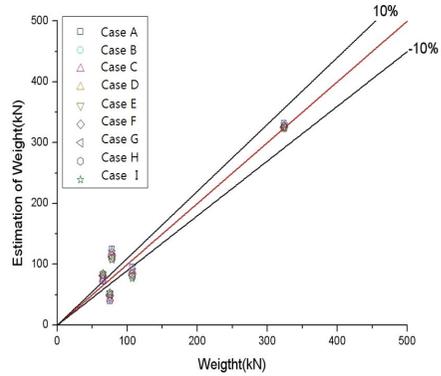
Girder 5

부록 3.14 4층 시험차량이 Case E 주행시 주행차량 중량정밀도

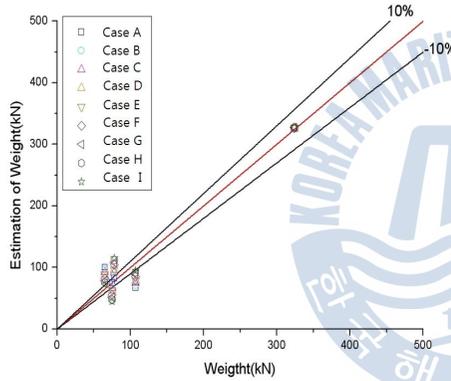
6) Case F 주행 시 미지의 차량의 정밀도



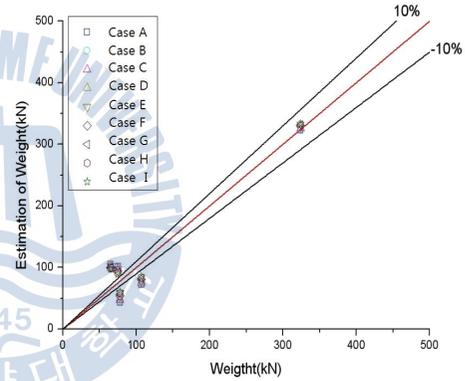
Girder 1



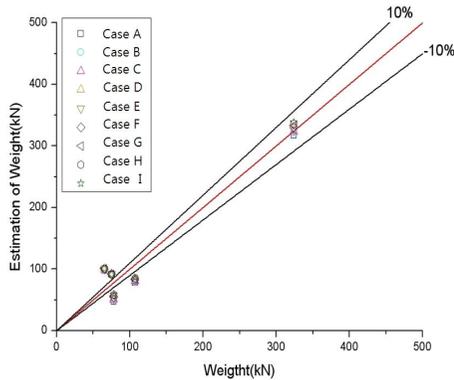
Girder 2



Girder 3



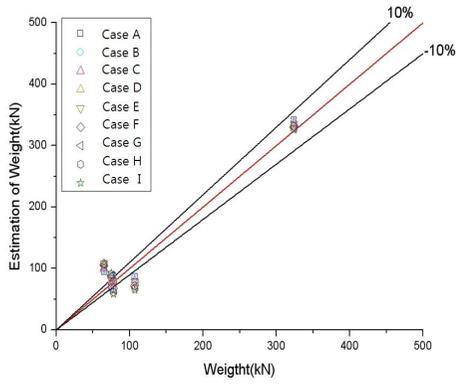
Girder 4



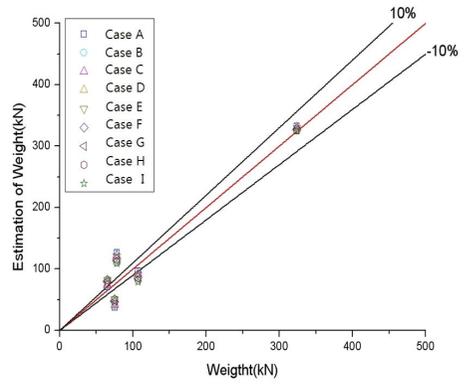
Girder 5

부록 3.15 4축 시험차량이 Case F 주행시 주행차량 중량정밀도

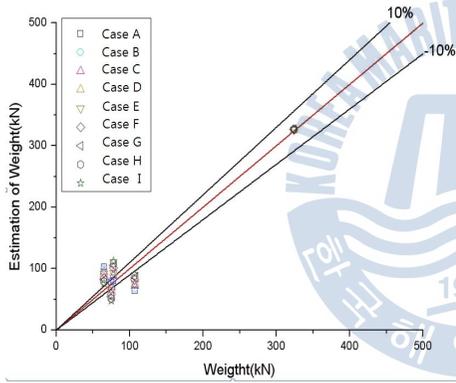
7) Case G 주행 시 미지의 차량의 정밀도



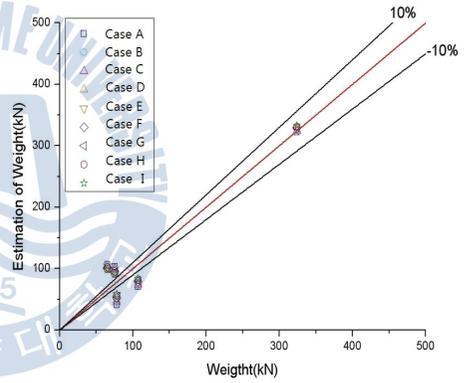
Girder 1



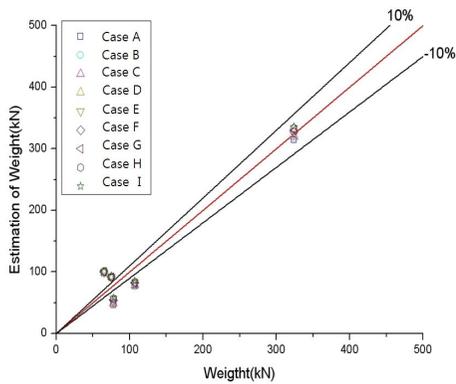
Girder 2



Girder 3



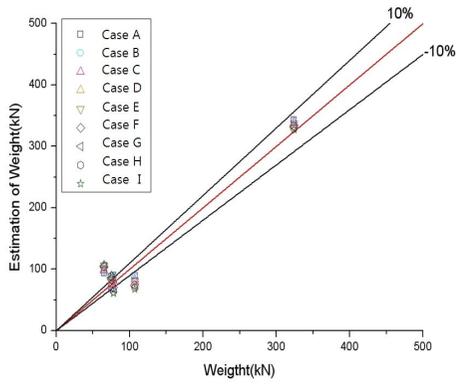
Girder 4



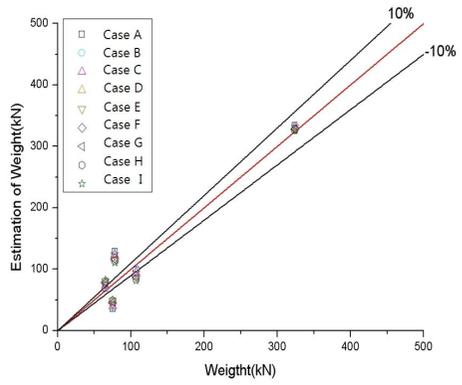
Girder 5

부록 3.16 4축 시험차량이 Case G 주행시 주행차량 중량정밀도

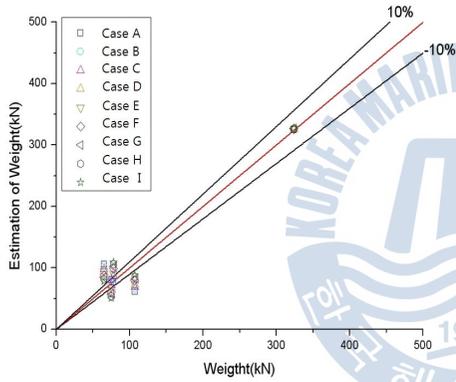
8) Case H 주행 시 미지의 차량의 정밀도



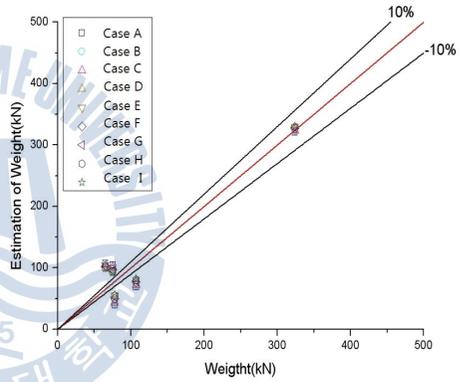
Girder 1



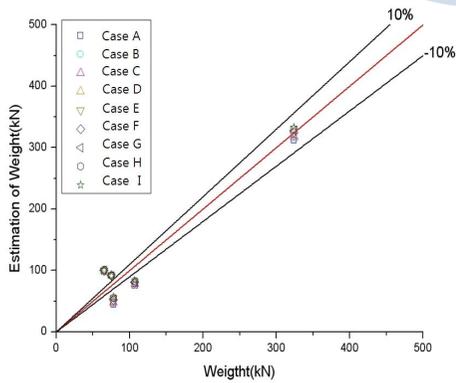
Girder 2



Girder 3



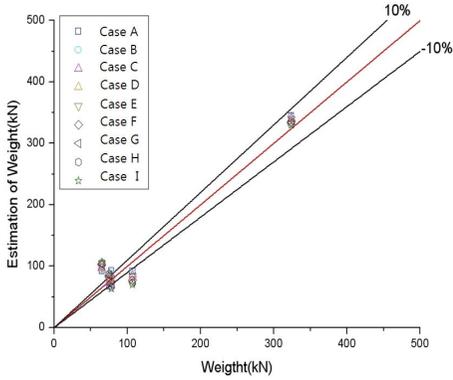
Girder 4



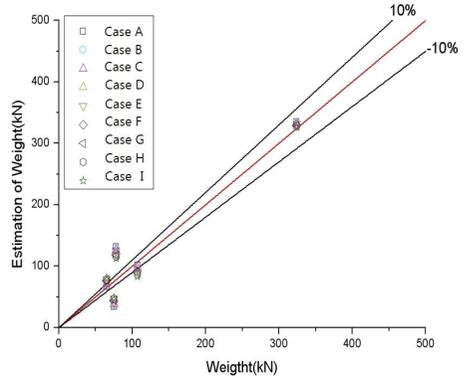
Girder 5

부록 3.17 4축 시험차량이 Case H 주행시주행차량 중량정밀도

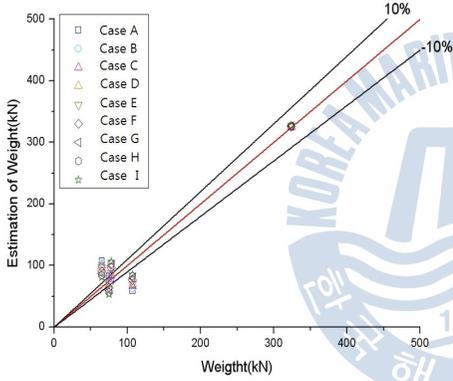
9) Case I 주행 시 미지의 차량의 정밀도



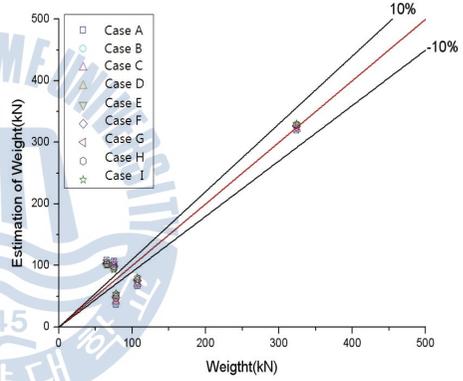
Girder 1



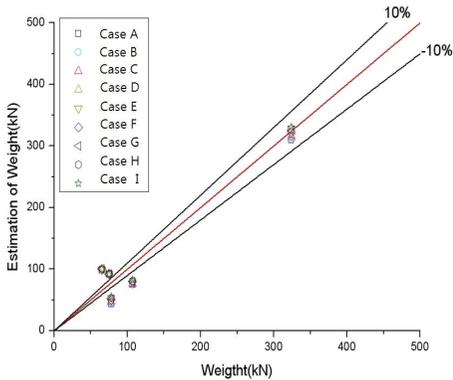
Girder 2



Girder 3



Girder 4



Girder 5

부록 3.18 4축 시험차량이 Case I 주행시 주행차량 중량정밀도

감사의 글

2년이라는 시간동안 잃은 것, 놓친 것 많은 시간이었지만 앞으로 살아갈 인생 전체에서는 지적으로도 인격적으로 성숙해지고 발전한 기간이었다고 생각합니다.

먼저 작은 것 하나하나 정성으로 지도해주시고 딸처럼 아껴주신 경갑수 교수님께 감사드립니다. 학교생활에 버팀목이 되어주신 김도삼 교수님, 김태형 교수님, 이중우 교수님, 김태곤 교수님, 논문에 많은 지도를 주신 박수용 교수님께도 감사의 말씀 올립니다. 또한 많은 가르침을 주신 이희현 박사님, 전준창 박사님, 정지영 상무님 감사합니다.

많은 격려와 조언을 해주시는 순철이 오빠, 영직이 오빠, 준호오빠, 은경이 언니 등 연구실 선배님 모두 감사합니다. 석사기간동안 함께 울고 웃으며 생활한 진은 오빠, 현기오빠, 성진오빠, 효상오빠, 동균오빠에게 감사를 포함합니다.

학교생활에 큰 힘이 되어준 나의 사랑 성심이와 같이 고생한 명랑에너지 보배 언니 우리 꼭 성공하자. 또한 사사건건 조잘대도 군소리 없이 들어주는 항만연구실의 상길이 오빠, 해안연구실에 가면 찾게 되는 무덤덤한 동진오빠, 보고픈 진우오빠와 선욱오빠, 박학다식한 토질연구실의 웅기오빠와 성규오빠, 도로연구실의 착한 연우언니뿐만 아니라 토목공학과 동문 모든 선·후배들님들 감사드립니다. 힘들 때 곁에서 지켜주고 지나치게 심각한 생각에 빠져있을 때 미소 짓게 해준 윤재, 언제나 철없고 유쾌한 정호, 참 착한 흥표 그리고 동기들 모두 감사합니다.

갈등과 화해를 겪으며 함께한 오랜 벗 세미, 경하, 지영이, 민지, 지숙아 항상 곁에 있어줘서 고마워.

언니이자 누나의 모습을 보이지 못해도 잘 따라주는 동생 성희와 희재에게 고마움을 전하고 싶습니다. 제 인생에 든든한 후원자가 되어주시는 부모님께 마음 깊이 감사합니다. 성실하고 열정적인 사람이 되도록 노력하겠습니다. 부족하지만 대학원 생활의 마지막 결실인 이 논문을 바치고 싶습니다.

또한 지면으로 통해서 일일이 언급을 하지 못했지만 그 동안 저를 아끼고 사랑 해주신 모든 분들께 진심으로 감사드립니다. 2012년 2월 -정민선-