

계측장치 실장 차량을 이용한 동적 하중 모니터링 연구

Study on the Dynamic Load Monitoring Using the Instrumented Vehicle

김종우*
(Jong-Woo Kim)
(Judico,Co.LTD)

정영우**
(Young-Woo Jung)
(Judico,Co.LTD)

권순민***
(Soon-Min Kwon)
(Korea Expressway Corporation)

요약

주행 차량의 축하중은 저속 혹은 고속 축중기(WIM)에 의하여 측정 할 수 있으나, 주행 차량의 차시, 축 구조 등과 같은 차량 고유 특성과 주행 속도, 도로의 평탄도 등과 같은 주행 환경 특성에 따라 동적으로 변화하며, 이러한 순간적인 동적 하중 변화에 의해 정적 상태에서 측정된 기준 중량과 오차가 발생하게 된다. 본 연구에서는 향후 무인 과적단속 체계 도입에 앞서, 주행 차량의 동적 하중 변화 특성을 파악하여 통제 불가능한 환경적 기본 오차의 범위에 대해 분석하고, 고속 축중기의 중량정확도 성능평가 기준에 대한 척도를 적절히 설정하기 위한 실차 시험을 수행하였으며, 주요 시험 결과는 다음과 같다. 첫째, 총중량의 경우 저속일 때 약 1%, 고속일 때 약 4%의 변화가 나타났고, 축하중의 경우 저속일 때 약 1-3%, 고속일 때 약 2-9%의 변화가 나타났으며, 이러한 현상은 단일축보다 그룹내 개별축에서 더 크게 나타났다. 둘째, 정상 평탄도 구간에 비해 충격 구간에서는 총중량의 경우 최대 약 8배, 축하중의 경우 최대 약 3~12배의 변화가 나타났으며, 이러한 동적 하중 변화의 진동 주파수는 2.4-5.8Hz로 나타났으며, 약 30m를 주행한 후에 정상 상태의 진폭으로 수렴하는 것으로 분석되었다.

핵심어 : 화물차, 동적하중, 과적단속, 고속축중기

ABSTRACT

The axle weight of a vehicle in motion can be measured with a low-speed or high-speed weigh-in-motion (WIM). However, the axial load dynamically change depending on the vehicle's characteristics-such as the chassis or axle structure-or the characteristics of the driving environment such as road flatness. The changes in dynamic load lead to differences between the vehicle's weight measured at rest and the vehicle's weight measured in motion. For this Study, an experiment was conducted with an instrumented vehicle to analyze the range of errors caused by uncontrollable environmental factors by identifying the characteristics of the dynamic load changes of a vehicle in motion, and determine the appropriate scale for the accuracy evaluation of a high-speed WIM, as a preparatory research for the introduction of unmanned overweight enforcement systems in the future. The key findings from the experiment are summarized as follows. First, The gross weight of the tested vehicle changed by approximately 1% at low velocities and approximately by 4% at high velocities, and the vehicle's axle weight changed by approximately 1-3%, at low velocities and by 2-9% at high velocities. A single axle showed larger weight changes than individual axles in a group. Secondly, The vehicle's gross weight and the axle weight on the impact section were up to eight times and three-to-twelve times higher, respectively, than its gross weight and the axle weight on the flat section. The vibration frequency of the vehicle's dynamic load was measured at between 2.4 and 5.8Hz, and found to return to the normal amplitude after moving approximately 30 meters.

Key words : Truck, Dynamic Load, Overweight Enforcement, High-Speed Weigh-In-Motion(WIM)

† 본 연구는 국토교통부 교통물류연구사업 “고속무인 과적단속 시스템의 성능평가체계 개발(14TRP-C090750-01)”의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다.

* 주저자 : ENB GROUP (주)유디코 대표이사

** 교신저자 : ENB GROUP (주)유디코 선임연구원

*** 공저자 : 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원

† Corresponding author : Youngwoo Jung(ENB GROUP Judico co. Ltd), E-mail : turtlefox@enbgroup.co.kr

† Received 6 September 2016; reviewed 7 October 2016; Accepted 11 October 2016

I. 서 론

1. 연구의 배경 및 목적

일반 대중들에게 몸무게를 측정하는 체중계의 정적 측정 오차 범위와 주행 차량의 중량을 측정하는 축중기의 동적 측정 오차 범위는 큰 괴리감이 있을 수 있다. 주행 차량의 중량은 차량의 사시, 축구조 등과 같은 차량 고유 특성과 주행 속도, 도로의 평탄도 등과 같은 주행 환경 특성에 따라 동적으로 변화하며, 이러한 순간적인 동적 하중 변화에 의해 주행 중 차량의 중량은 정적 상태에서 측정된 중량보다 더 큰 오차 범위를 지니게 된다.

현행 과적단속체계는 이러한 동적 하중에 대한 영향을 최소화하여 측정 정확도를 확보하고자 화물 차량을 정지 또는 서행 상태(10km/h 이내)에서 저속 축중기를 이용하여 단속이 이루어지며, 단속지점 또한 검문소(고속국도의 경우 영업소 축중차로)로 유도하여 검측하고 있다. 그러나 가변축을 장착하고 있는 대형화물차량의 경우 검측 과정에서 다양한 형태의 축조작 행위를 통해 정상적인 계측을 방해하거나 위반사실을 은폐하는 사례가 빈번히 발생하고 있으며, 이를 현행 고정식(저속축중기) 및 이동식 단속 방식에서 단속하는 데에 현실적 어려움이 존재함에 따라 단속 체계가 무력화 되고 있는 실정이다[1]. 이러한 현행 과적단속체계의 인력적 한계와 단속의 실효성을 보완하고, 스마트톨링과 같은 새로운 운영체계에 대응하기 위하여 향후 과적단속체계는 고속 축중기를 이용한 고속 무정차 무인 과적단속 방식으로 변화될 것으로 예상되며, 현재 국내 무인 과적단속 시스템 도입을 위하여 동적 하중 오차의 한계를 극복하고 국내 실정에 맞는 중량 측정 정확도를 확보하고자 고속 축중기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[2].

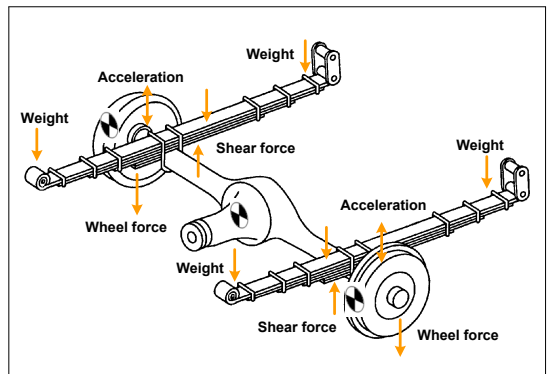
국외의 경우 고속 축중기 도입에 앞서 동적 하중에 대한 사전 연구가 다양하게 이루어져 왔으나 국내의 경우 운영 사례를 통해 평탄도가 나쁠수록 속도가 높을수록 동적 하중 오차가 커진다는 현상만

을 파악하고 있는 초보 걸음 수준으로 고속 축중기의 성공적인 도입을 위해서는 동적 하중에 대한 보다 면밀한 특성 파악이 반드시 필요하다. 따라서 본 연구에서는 국내 도로교통 환경에서 실차 시험을 통해 주행 차량의 동적 하중 변화 특성을 정량적으로 파악하고, 통제 불가능한 환경적 기본 오차의 범위에 대해 분석하여 국내 고속 축중기의 중량정확도 성능평가 기준에 대한 적합한 척도를 설정할 수 있도록 유도하고자 한다.

II. 동적 하중 측정 방법

1. 지배방정식 유도

차량이 주행할 때 동적 하중은 정지 하중처럼 일정하지 않으며, 도로의 평탄도, 서스펜션품질, 차량 속도 등의 환경 특성에 따라 순간적으로 변화한다. 따라서 기준 중량 차량의 공인 시험 중량을 정적 상태에서 측정하였다 하더라도, 실제 주행 시험에서 고속축중기 위를 지나가는 순간, 센서에 가해지는 축하중은 동적 가속도의 영향에 의해 정적 하중과는 다른 측정값을 나타낼 수 있다. Davis and Bunker(2007)는 이러한 동적 율하중을 전단력과 가속도, 질량을 이용하여 다음과 같은 지배방정식으로 유도하였다[3].



(Fig. 1) variables used to derive dynamic forces from axle

$$F_{wheel} = F_{shear} + ma \dots\dots\dots (1)$$

여기서, F_{wheel} : dynamic wheel load on the axle
 F_{shear} : shear force on the axle at the train gauge
 a : acceleration experienced by the mass outboard of the strain gauge
 m : mass outboard of the strain gauge

본 연구에서는 동적가속도와 축에 부착한 스트레인게이지를 통해서 정적하중과 동적하중의 관계를 보정하려는 시도에 착안하여 이를 측정하기 위한 센서 선정 및 실차 설치, 동적하중로거 연계 프로그램 개발과 시험 진행, 결과 분석 등의 단계로 연구를 진행하였다.





2. 측정 시스템 설계 및 실차 설치

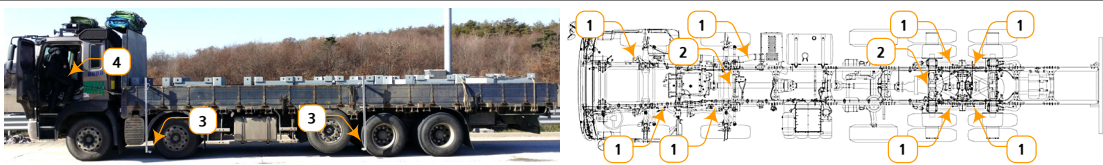
주행 중 동적 하중을 유도하기 위하여 지배방정식의 변수들을 측정 혹은 환산할 수 있는 시스템 설계가 필요하였다. 먼저 전단력 측정을 위해 상대

적으로 변형이 많이 일어나는 각 축의 판스프링 현 가장치에 스트레인게이지를 부착하여 폴브릿지 회로 기반의 변형률을 측정하였다. 가속도는 가속도 센서를 축 샤프트에 고정시켜 측정하고, 질량은 State of Queensland & Queensland University of Technology (2009)의 연구와 같이 차 축을 분해하여 가속도에 순간적으로 영향을 줄 수 있는 샤프트와 현가장치, 기타 부속품의 질량을 각각 측정 후 합산하였다[4].

또한 노면 평탄성이 동적 하중 변화에 미치는 영향에 대해 분석하기 위하여 주행 시험 구간 내 국제 평탄성지수(IRI)를 측정하였다. 이를 동적 하중과 매칭 시키기 위해서는 주행 중 타이어 접지 위치를 파악할 수 있는 위치의 기준정보가 필요하다. 따라서 본 시험에서는 주행 노면에 반사 테이프를 10m 등간격으로 고속 측중기가 설치된 지점까지 부착하였고, 마지막 지점에는 4개의 반사 테이프를 부착하였다. 이를 차량의 측면 고정압 하단에 설치된 포토센서로 측정하여 주행 중의 위치 기준용 트

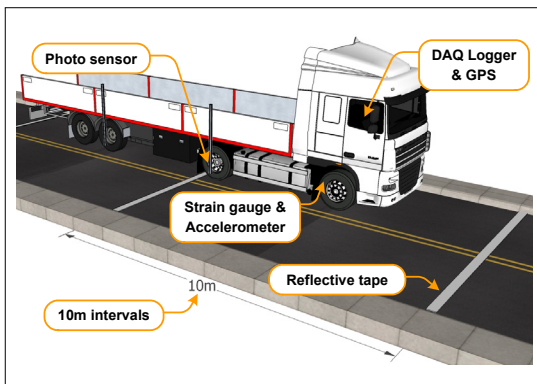
<Table 1> Install dynamic load measurement system on test vehicle

No.	Equipment	Qty	Install point	Picture
①	Full-bridge type strain gauge	32ea	Attached on leaf spring suspension for each wheel	
②	3-axis accelerometer	2ea	Mounted on each frame of axle	
③	Photo sensor	2ea	Mounted on side arm of 2,3 axle	
④	Data Logger & GPS	1set	Fixed with a portable power supply	



리거 정보로, 자중계와 GPS 신호로부터 측정된 중량/속도/위치 정보를 보조 측정 자료로 활용하였다.

측정 시스템의 전원은 출력에 따라 불안정한 차량의 시거 잭 외에 별도로 구성된 AC-DC 휴대용 전원 공급 장치를 이용하여 안정적으로 DC12V를 공급하였고, 신호 컨디셔닝 기능을 지닌 폴브릿지 측정 전용 AD 컨버터 모듈과 가속도센서와 포토센서를 측정하기 위한 고속 전압 측정 전용 모듈을 로거 사시에 연결하여 샘플링 1kHz로 동기화된 DAQ로 수집하였다. 또한 측정 소프트웨어에서는 Matti(2002)의 연구와 같이 불필요한 노이즈 요소를 제거하기 위해 디지털 필터와 이로 인해 발생된 위상차를 보상하기 위한 필터가 사용되었으며, 디지털 필터는 IIR 저역필터의 Bessel 2차 함수를 사용하였고 차단주파수는 50Hz를 사용하였다[5].



〈Fig. 2〉 Dynamic Load Measurement System design

II. 현장 시험

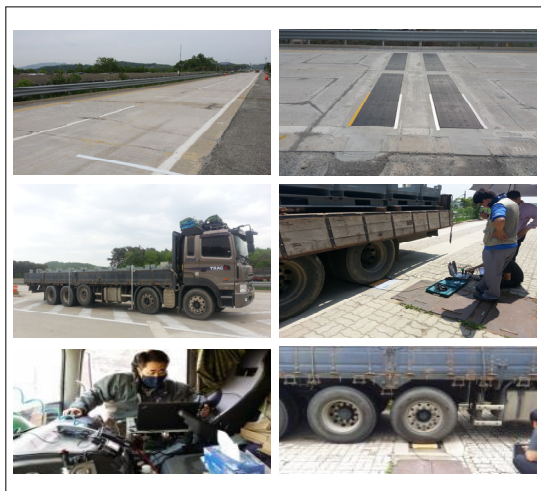
1. 주행 시험 개요

시험은 2016년 05월 02일 월요일부터 이틀간 중부내륙고속도로 내 여주시험도로 고속 축중기 설치 현장(여주시 가남면)에서 진행하였으며, IRI 기준 2.0m/km 미만의 평탄성이 확보된 2차로로 구성되어 있다. 기준 중량은 ASTM E1318-09(2014)에서 정의

한 바와 같이 평탄성이 확보된 시험도로 내의 별도 측정소에서 이동식 축중기를 이용하여 3회 반복 측정 후 평균한 값을 이용하였으며[6], 이를 동적 하중 모니터링 시스템의 공만차 입력에 사용하였다. 시험 주행 횟수는 속도 10~90km/h 사이를 10km/h의 단계로 차선별 1회씩 9회 주행하였으며, 2차선 기준 총 18회의 주행 시험을 진행하였다.

〈Table 2〉 Field Test case

Test vehicle reference weight [kg]								
Gross	1 axle	2 axle	3 axle	4 axle				
40,450	7,250	8,550	12,350	12,300				
Run case / Lane [times]								
10km/h	20km/h	30km/h	40km/h	50km/h	60km/h	70km/h	80km/h	90km/h
1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sum	18 times = 9 times × 2 Lane							



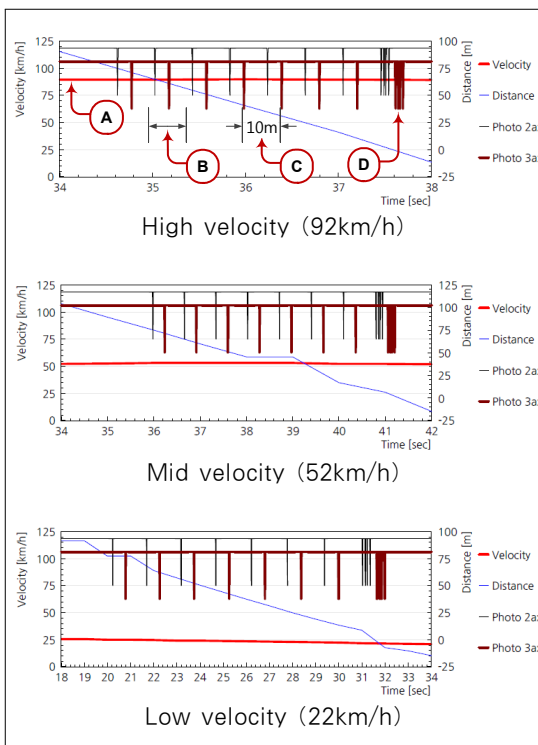
〈Fig. 3〉 Field test photos

2. 주행 시험 분석

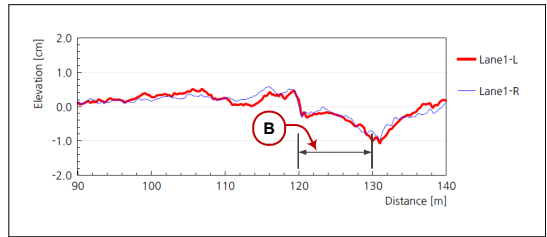
스트레인게이지로 측정된 변형률을 중량으로 환산하기 위하여 이동식 축중기를 이용하여 공차시와 만차시 기준 중량을 측정하였고, 변형률 대비 중량 값을 1차식으로 추정한 환산식을 구하고 스트레인 게이지가 설치된 좌/우륵에 따라 각각 칼리브레이

선을 수행하였다. 가속도는 데이터로거에서 측정된 전압값을 센서 데이터시트의 환산식을 통해 gal로 환산하였고, 주행 중 포토센서에서 측정된 전압값은 반사테이프가 있는 지점에서만 비활성화되므로 이를 on/off 트리거 신호화하여 이를 기준으로 모든 측정 신호를 1kHz로 동기화 샘플링 된 그래프를 작성하였다. 따라서 트리거가 off되는 시점들 사이의 거리를 10m로 유추할 수 있으며, 4개의 트리거가 연속적으로 off되는 시점을 고속 측정기가 설치된 지점으로 유추할 수 있다. GPS에서 측정된 위치 정보는 고속 측정기가 설치된 지점을 거리값 '0'으로 칼리브레이션 한 후, 1Hz 샘플링으로 거리를 추출하였으며 이를 기반으로 속도를 계산하여 그래프에 별도로 매칭하였다.

1) 주행속도와 주행거리 변화



<Fig. 4> Driving velocity and distance result



<Fig. 5> Test road IRI result

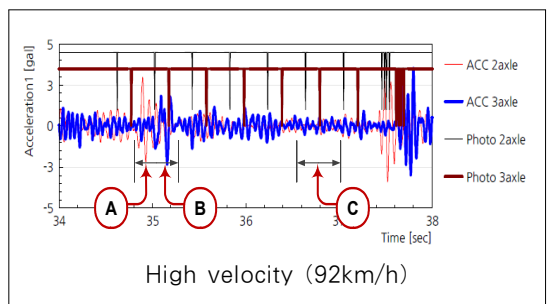
<Fig. 4>의 ㉠“Velocity”는 GPS로부터 계산된 속도로, 포토센서 트리거 구간 내에서는 각 속도별 등속을 유지하여 시험이 정상적으로 수행되었는지 확인하였다.

주행 시, <Fig. 4>의 ㉢에서처럼 첫 번째와 두 번째 위치 트리거 사이, IRI 측정 결과 <Fig. 5>의 ㉢에서처럼 약 120-130m 구간엔 노면 평탄도가 급격하게 감소하는 충격 구간이 존재하였으며, 분석 결과에서 이 구간을 지날 때 충격에 따른 동적 중량 변화와 수렴 길이에 대한 결과를 파형으로부터 추출하였다.

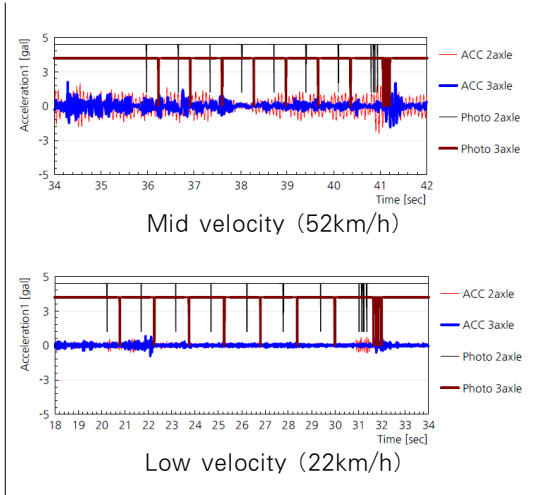
<Fig. 4>의 ㉣와 같이 포토센서의 트리거 구간의 사이 간격은 10m로, 시험 차량이 등속 주행을 하므로 그래프 내에서 사이 간격이 일정하게 유지되는 것을 확인하였으며, 충격 구간으로부터 중량 변화가 수렴하는 길이를 파형으로부터 추출하였다.

<Fig. 4>의 ㉤와 같이 고속 측정기가 위치해 있는 구간엔 반사 테이프를 4개 연속 부착하여 포토센서의 연속 위치 트리거가 발생하는 지점으로 확인 가능하였다.

2) 가속도 변화



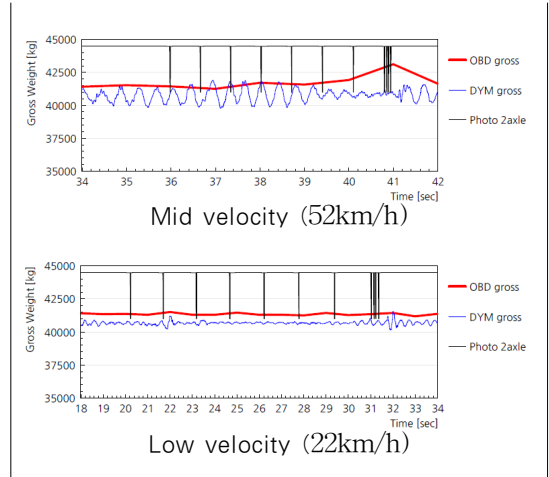
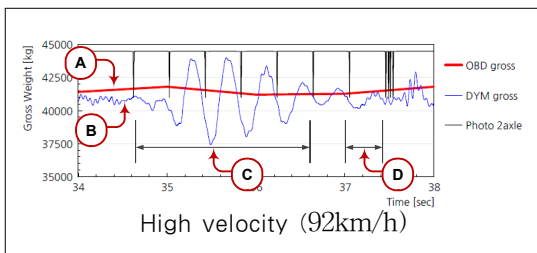
High velocity (92km/h)



〈Fig. 6〉 Acceleration result

〈Fig. 6〉의 “ACC 2axle”은 2축(싱글축)에 설치된 가속도센서로부터 측정된 가속도(gal) 변화이며, “ACC 3axle”은 충격 구간을 지날 때 3축(조합축)에 설치된 가속도센서로부터 측정된 가속도(gal) 변화이다. ㉠는 충격 구간을 지날 때 2축 가속도변화이다. ㉡는 충격 구간을 지날 때 3축 가속도변화이며, ㉢는 충격 구간을 지난 후 가속도의 진동이 수렴하여 정상 구간을 지날 때 가속도 측정값 변화이다. 저속 11.0km/h로 주행 시 0.21- 0.27gal이었던 가속도는 고속 92.2km/h로 주행 시 1.66-1.9gal로 약 6.2배 증가하였으며, 이때 단일 축보다 조합내 개별 축의 가속도 기본 진폭이 1.2-1.3배 더 크게 나타났다. 충격 구간을 지날 때와 정상 구간을 지날 때의 가속도 진폭을 각각의 파형으로부터 추출하여 이를 동적 하중 환산에 이용하였다.

3) 동적 총중량 변화



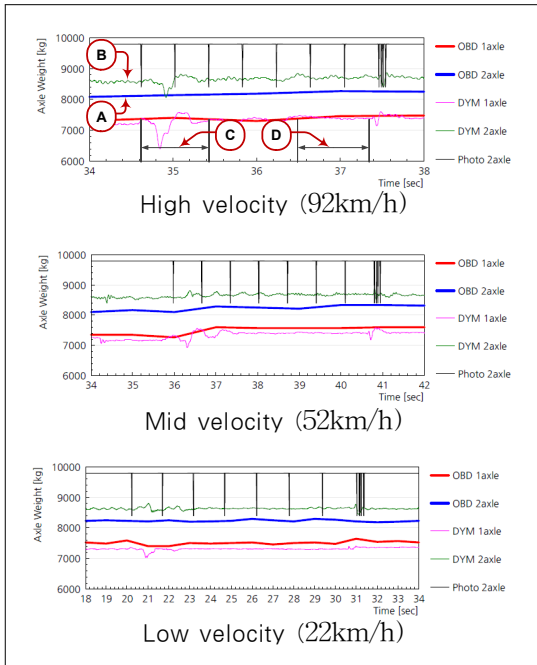
〈Fig. 7〉 Dynamic gross weight result

〈Fig. 7〉의 ㉠ “OBD gross”는 보조 측정 자료로 활용을 위하여 시험 차량에 기 설치된 자중계로부터 수신된 정적 총중량 정보로, 동적 하중 측정용 데이터 로거와 동기화하여 측정된 결과 값이다.

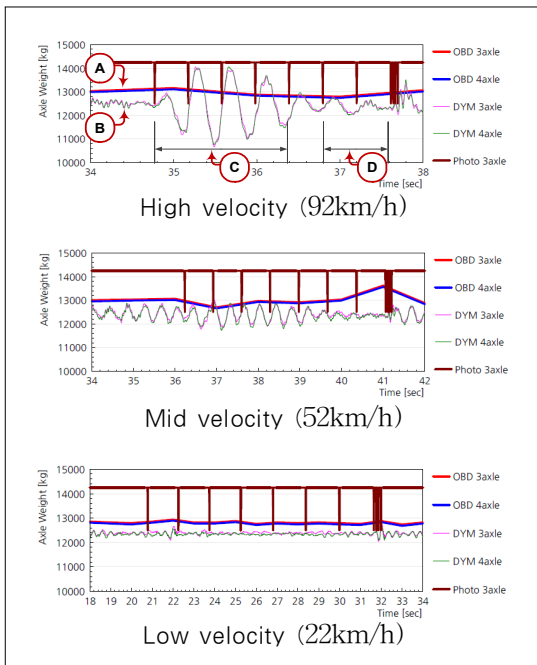
〈Fig. 7〉의 ㉡ “DYM gross”는 동적 총중량으로 각 축 별 지배방정식에 따라 계산된 모든 축의 하중을 합산한 결과이며, 이를 FFT 변환하여 1차 모드에서 동적 하중 변화에 대한 진동주파수를 추출하였다.

〈Fig. 7〉의 ㉢ 구간은 포토센서의 첫 번째와 두 번째 사이 위치 트리거의 노면 평탄도에 문제가 있는 구간을 시작으로 동적 총중량의 오실레이션 파형이 정상 구간의 파형과 동일한 진폭으로 수렴할 때까지의 구간으로, 이를 충격 구간으로 정의하였다. ㉣ 구간은 충격 구간의 파형이 정상 구간의 진폭으로 수렴한 이후 구간으로, 이를 정상 구간으로 정의하였다. 충격 구간 시작 지점에서부터 정상 구간으로 수렴하기까지 소요 거리를 수렴 거리로 정의하고 파형의 위치 트리거로 판단하여 속도 별로 추출하였다.

동적 총중량도 가속도와 같이 저속 11.0km/h로 주행 시 0.4-0.9%이었던 변화 진폭이 고속 92.2km/h로 주행 시 1.5-3.1%로 약 3.5배 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 고속 측중기 자체의 측정 오차 외에 노면 평탄도와 주행 속도에 따른 동적 하중의 진동이 오차를 증가시키는 요인임을 확인할 수 있었다.



<Fig. 8> Dynamic 1,2 axle weight result



<Fig. 9> Dynamic 3,4 axle weight result

4) 동적 축하중 변화

<Fig. 9>의 ㉠“OBD axle weight”는 시험 차량에 기 설치된 자중계로부터 수신된 1Hz 샘플링의 축하중 정

보로 동적 하중 측정용 데이터 로거와 동기화하였다.

㉢“DYM axle weight”는 동적 축하중으로 각 축 별 지배 방정식에 따라 계산되었다. ㉣는 충격 구간을 지날 때 동적 축하중 변화를, ㉤는 정상 구간을 지날 때 동적 축하중 변화를 나타낸다. 각 그래프는 1,2축의 단일축 축하중의 경우 2축에 설치된 포토 센서의 위치 트리거를 기준으로 작성되었으며, 3,4축의 조합내 개별축 축하중의 경우 3축에 설치된 포토 센서의 위치 트리거를 기준으로 작성하였다.

단일축의 경우 각 축의 현가장치는 별개로 거동하기 때문에 충격 구간을 지난 후 1축과 2축의 동적 축하중 진폭의 시작 방향과 크기는 속도에 따라 다르게 나타났으나, 조합내 개별축의 경우 텐덤축의 특성상 한 개의 현가장치에 두 개의 바퀴를 공유하므로 충격 구간을 지난 후 3축과 4축의 동적 축하중 진폭의 시작 방향과 크기가 모두 매우 유사한 거동을 보였다. 또한 충격 구간을 지날 때 발생하는 동적 축하중의 진폭의 크기도 단일축에 비해 조합내 단일축이 크게 나타났으며, 수렴 거리 역시 더 길게 나타났다. 조합내 단일축의 동적 축하중 진동은 동적 총중량과 유사한 패턴으로 나타났는데, 이는 총중량에서 조합축이 차지하는 중량 비율이 높기 때문으로 판단된다.

이러한 동적 하중의 진동 요인은 노면은 평탄도와의 주행 속도와 차량 샤시 자체의 특성과 현가장치의 특성이 복합적으로 상호작용하여 나타나는 결과로, 향후 차량 종류 및 축 구조별 동적 하중의 진동 모델에 대한 데이터베이스가 쌓인다면 이를 이용하여 Kim(2010)의 연구와 같이 측정 오차를 최소화 할 수 있는 센서의 최적 배치를 산정하는데 좀 더 유의한 결론을 유추할 수 있을 것으로 예상된다[7].

5) 동적 하중 변화 결과 요약

주행 시험의 차선/속도별 가속도의 최대 진폭과 자중계로부터 보조 측정된 중량 정보를 요약한 표는 <Table 3>이며, 이때 동적 총중량 변화만을 추출하여 요약한 표는 <Table 4>와 같고 정상 구간과 충격 구간의 최대/최소/진폭과 동적 하중 변화의 주파수, 수렴거리를 그래프 파형으로부터 추출하였다.

동적 축하중 변화만을 추출하여 요약한 표는 축의 동적 축하중 변화를 요약한 표이며 정상 구간 <Table 5>와 <Table 6>과 같으며, <Table 5>는 단일 간의 최대/최소/진폭과 충격 구간의 진폭을 차선/속 축의 동적 축하중 변화를, <Table 6>는 조합내 개별 도별로 비교하여 나타내었다.

<Table 3> OBD weight variation and acceleration results

Lane	Velocity	Acceleration		On Board Scale - Normal zone							
		2axle	3axle	Gross weight variation							
				Maximum		Minimum		Central		Amplitude	
[1/2]	[km/h]	[gal]	[gal]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]
1	11.0	0.21	0.27	41071	1.5	40701	0.6	40886	1.1	185	0.5
	26.6	0.45	0.54	41410	2.4	40837	1.0	41124	1.7	287	0.7
	35.9	0.70	0.65	41169	1.8	40571	0.3	40870	1.0	299	0.7
	42.6	0.88	0.74	41372	2.3	40902	1.1	41137	1.7	235	0.6
	53.5	2.17	0.84	41601	2.8	41062	1.5	41332	2.2	270	0.7
	63.5	1.25	1.23	41733	3.2	41046	1.5	41390	2.3	344	0.8
	74.0	1.02	1.21	42037	3.9	41082	1.6	41560	2.7	478	1.2
	81.2	0.85	1.56	42556	5.2	41314	2.1	41935	3.7	621	1.5
2	92.2	1.66	1.90	42251	4.5	41666	3.0	41959	3.7	293	0.7
	13.9	0.25	0.20	41584	2.8	41169	1.8	41377	2.3	208	0.5
	22.0	0.25	0.25	41432	2.4	41273	2.0	41353	2.2	80	0.2
	34.6	0.46	0.75	41414	2.4	41261	2.0	41338	2.2	77	0.2
	42.3	0.62	0.72	41617	2.9	41410	2.4	41514	2.6	104	0.3
	52.5	1.87	0.88	41936	3.7	41579	2.8	41758	3.2	179	0.4
	63.2	1.47	0.77	41603	2.9	41384	2.3	41494	2.6	110	0.3
	72.2	1.31	1.62	41930	3.7	41596	2.8	41763	3.2	167	0.4
	80.3	1.73	1.85	41646	3.0	41448	2.5	41547	2.7	99	0.2
	92.2	0.95	1.24	41274	2.0	41210	1.9	41242	2.0	32	0.1

<Table 4> Dynamic gross weight variation results

Lane	Velocity	Dynamic Gross weight variation													
		Normal zone							Impact zone						
		Maximum		Minimum		Amplitude		Freq	Maximum		Minimum		Amplitude		Convergence
[1/2]	[km/h]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[Hz]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[m]
1	11.0	40913	1.1	40158	-0.7	378	0.9	3.84	41092	1.6	39840	-1.5	626	1.5	-
	26.6	40759	0.8	40476	0.1	142	0.3	3.84	41804	3.3	39447	-2.5	1179	2.9	20
	35.9	40867	1.0	40170	-0.7	349	0.9	3.84	42174	4.3	38981	-3.6	1597	3.9	15
	42.6	41302	2.1	40068	-0.9	617	1.5	3.84	42256	4.5	39133	-3.3	1562	3.9	20
	53.5	41108	1.6	40247	-0.5	431	1.1	3.84	42254	4.5	39385	-2.6	1435	3.5	25
	63.5	41640	2.9	39655	-2.0	993	2.5	2.88	42254	4.5	39255	-3.0	1500	3.7	20
	74.0	41674	3.0	39915	-1.3	880	2.2	3.84	43962	8.7	38102	-5.8	2930	7.2	25
	81.2	41825	3.4	39689	-1.9	1068	2.6	2.46	44855	10.9	37407	-7.5	3724	9.2	25
2	92.2	41719	3.1	39186	-3.1	1267	3.1	2.44	43911	8.6	37839	-6.5	3036	7.5	30
	13.9	41000	1.4	40676	0.6	162	0.4	3.84	41269	2.0	40360	-0.2	455	1.1	-
	22.0	40802	0.9	40567	0.3	118	0.3	3.84	41192	1.8	40229	-0.5	482	1.2	10
	34.6	40888	1.1	40496	0.1	196	0.5	3.84	42011	3.9	39440	-2.5	1286	3.2	15
	42.3	41085	1.6	40428	-0.1	329	0.8	3.84	41859	3.5	39322	-2.8	1269	3.1	25
	52.5	41230	1.9	40436	0.0	397	1.0	3.84	41842	3.4	39765	-1.7	1039	2.6	25
	63.2	41612	2.9	39950	-1.2	831	2.1	3.84	41798	3.3	39204	-3.1	1297	3.2	20
	72.2	41374	2.3	40095	-0.9	640	1.6	3.84	43484	7.5	38145	-5.7	2670	6.6	30
	80.3	41599	2.8	39846	-1.5	877	2.2	5.76	44306	9.5	37550	-7.2	3378	8.4	30
	92.2	41663	3.0	40441	0.0	611	1.5	5.76	43918	8.6	37398	-7.5	3260	8.1	30

〈Table 5〉 Dynamic single axle weight variation results

Lane	Velocity	dynamic axle weight variation - 1 axle								dynamic axle weight variation - 2 axle							
		Normal zone						Impact zone		Normal zone						Impact zone	
		Maximum		Minimum		Amplitude		Amplitude		Maximum		Minimum		Amplitude		Amplitude	
[1/2]	[km/h]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]
1	11.0	7268	0.2	7251	0.0	9	0.1	103	1.4	8579	0.3	8494	-0.7	43	0.5	141	1.6
	26.6	7345	1.3	7300	0.7	23	0.3	145	2.0	8646	1.1	8557	0.1	45	0.5	146	1.7
	35.9	7304	0.7	7267	0.2	19	0.3	163	2.2	8597	0.5	8495	-0.6	51	0.6	194	2.3
	42.6	7327	1.1	7279	0.4	24	0.3	176	2.4	8619	0.8	8524	-0.3	48	0.6	169	2.0
	53.5	7398	2.0	7320	1.0	39	0.5	378	5.2	8673	1.4	8541	-0.1	66	0.8	161	1.9
	63.5	7313	0.9	7179	-1.0	67	0.9	507	7.0	8692	1.7	8518	-0.4	87	1.0	212	2.5
	74.0	7348	1.4	7241	-0.1	54	0.7	523	7.2	8712	1.9	8548	0.0	82	1.0	263	3.1
	81.2	7395	2.0	7230	-0.3	83	1.1	568	7.8	8732	2.1	8555	0.1	89	1.0	262	3.1
	92.2	7351	1.4	7234	-0.2	59	0.8	383	5.3	8768	2.5	8575	0.3	97	1.1	339	4.0
2	13.9	7394	2.0	7347	1.3	24	0.3	36	0.5	8706	1.8	8623	0.9	42	0.5	141	1.6
	22.0	7331	1.1	7291	0.6	20	0.3	136	1.9	8684	1.6	8604	0.6	40	0.5	142	1.7
	34.6	7376	1.7	7328	1.1	24	0.3	112	1.5	8677	1.5	8577	0.3	50	0.6	105	1.2
	42.3	7358	1.5	7312	0.9	23	0.3	125	1.7	8707	1.8	8597	0.5	55	0.6	128	1.5
	52.5	7446	2.7	7380	1.8	33	0.5	201	2.8	8770	2.6	8617	0.8	77	0.9	120	1.4
	63.2	7366	1.6	7254	0.1	56	0.8	374	5.2	8742	2.2	8540	-0.1	101	1.2	132	1.5
	72.2	7431	2.5	7288	0.5	72	1.0	443	6.1	8711	1.9	8559	0.1	76	0.9	180	2.1
	80.3	7451	2.8	7223	-0.4	114	1.6	443	6.1	8729	2.1	8539	-0.1	95	1.1	225	2.6
	92.2	7483	3.2	7277	0.4	103	1.4	477	6.6	8852	3.5	8585	0.4	134	1.6	304	3.6

〈Table 6〉 Dynamic group axle weight variation results

Lane	Velocity	dynamic axle weight variation - 3 axle								dynamic axle weight variation - 4 axle							
		Normal zone						Impact zone		Normal zone						Impact zone	
		Maximum		Minimum		Amplitude		Amplitude		Maximum		Minimum		Amplitude		Amplitude	
[1/2]	[km/h]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]
1	11.0	12598	2.0	12119	-1.9	240	1.9	288	2.3	12684	3.1	12035	-2.2	325	2.6	288	2.3
	26.6	12564	1.7	12250	-0.8	157	1.3	523	4.2	12517	1.8	12193	-0.9	162	1.3	584	4.7
	35.9	12711	2.9	12152	-1.6	280	2.3	823	6.7	12587	2.3	12084	-1.8	252	2.0	755	6.1
	42.6	12637	2.3	12033	-2.6	302	2.4	767	6.2	12664	3.0	11937	-3.0	364	3.0	771	6.3
	53.5	12821	3.8	11914	-3.5	454	3.7	765	6.2	12889	4.8	11898	-3.3	496	4.0	749	6.1
	63.5	12980	5.1	11835	-4.2	573	4.6	965	7.8	12918	5.0	11710	-4.8	604	4.9	917	7.5
	74.0	13231	7.1	11616	-5.9	808	6.5	1301	10.5	13329	8.4	11457	-6.9	936	7.6	1546	12.6
	81.2	13450	8.9	11741	-4.9	855	6.9	1815	14.7	13456	9.4	11624	-5.5	916	7.4	1909	15.5
	92.2	13126	6.3	11677	-5.4	725	5.9	1450	11.7	13197	7.3	11563	-6.0	817	6.6	1607	13.1
2	13.9	12578	1.8	12277	-0.6	151	1.2	214	1.7	12545	2.0	12231	-0.6	157	1.3	246	2.0
	22.0	12489	1.1	12334	-0.1	78	0.6	281	2.3	12416	0.9	12213	-0.7	102	0.8	196	1.6
	34.6	12586	1.9	12244	-0.9	171	1.4	607	4.9	12508	1.7	12129	-1.4	190	1.5	627	5.1
	42.3	12693	2.8	12088	-2.1	303	2.4	591	4.8	12658	2.9	12008	-2.4	325	2.6	650	5.3
	52.5	12855	4.1	11948	-3.3	454	3.7	538	4.4	12847	4.4	11802	-4.0	523	4.2	577	4.7
	63.2	12896	4.4	11992	-2.9	452	3.7	826	6.7	12847	4.4	11856	-3.6	496	4.0	802	6.5
	72.2	12881	4.3	11917	-3.5	482	3.9	1324	10.7	12908	4.9	11789	-4.2	560	4.5	1393	11.3
	80.3	13504	9.3	11604	-6.0	950	7.7	1631	13.2	13448	9.3	11495	-6.5	977	7.9	1701	13.8
	92.2	12891	4.4	12038	-2.5	427	3.5	1650	13.4	12974	5.5	12051	-2.0	462	3.8	1625	13.2

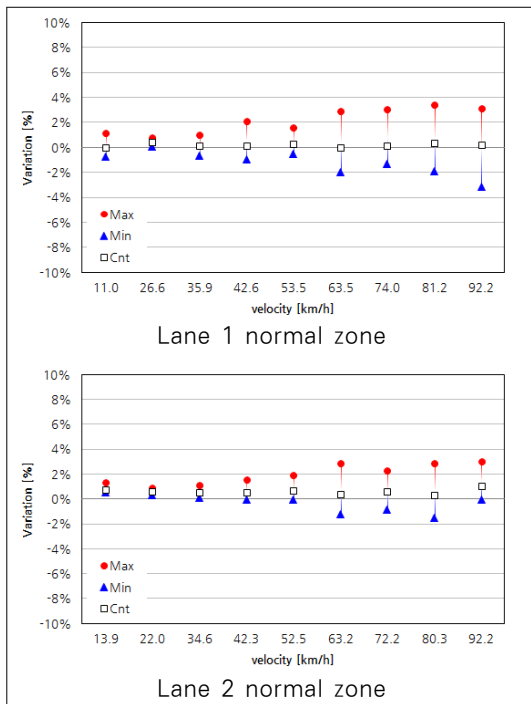
Ⅲ. 분석 결과

1. 속도와 축구조에 따른 차량 동적 하중

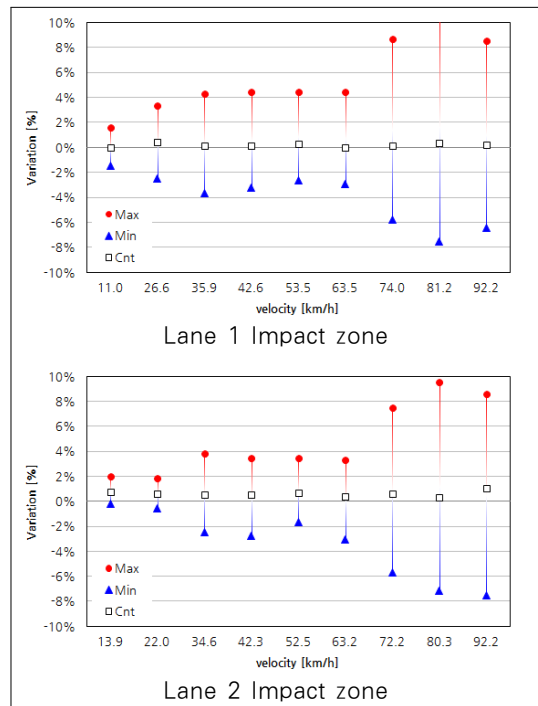
동적 총중량과 동적 축하중의 중심값은 <Fig. 10>와 같이 속도에 따른 변화 없이 항상 오차 1.0% 이하로 유지되나 속도가 높아짐에 따라 동적 하중의 진폭 변화가 크게 발생하였다. 정상구간의 동적 총중량을 절대값 오차에 대해서 판단한 결과, 저속(11.0-35.9km/h)으로 주행하는 경우 동적 총중량 1.1%, 축하중은 단일축 1.3%, 조합축 2.3%, 조합내 개별축 3.1%의 최대 오차를 초래하였다. 중속(42.6-63.5km/h)으로 주행하는 경우 동적 총중량은 2.9%, 축하중은 단일축 2.0%, 조합내 개별축 5.1%의 최대 오차를, 고속(74.0-92.2 km/h)으로 주행하는 경우 동적 총중량은 3.4%, 축하중은 단일축 2.5%, 조합내 개별축 9.3%의 최대 오차를 초래하였다. 이

는 저속에서 잘 나타나지 않는 동적 하중의 진동 특성이 고속에서는 뚜렷하게 발현됨을 알 수 있으며, 고속 주행 시 이러한 동적 하중에 의해 중량 측정 오차가 총중량 $\pm 4\%$, 단일축 $\pm 4\%$, 조합내 개별축 $\pm 9\%$ 이내로 나타날 수 있다는 것을 알 수 있다. 만일 이러한 동적 하중 특성으로부터 발생하는 통계 불가능한 기본 오차와 고속 축중기 자체의 측정 오차가 더해진다면 중량 측정 정확도는 현저히 낮아 질 수 있으나 대부분의 고속 축중기는 복수개의 센서 조합으로 이루어져 각 센서 측정값을 평균 취함으로써 측정 정확도를 향상시킬 수 있다.

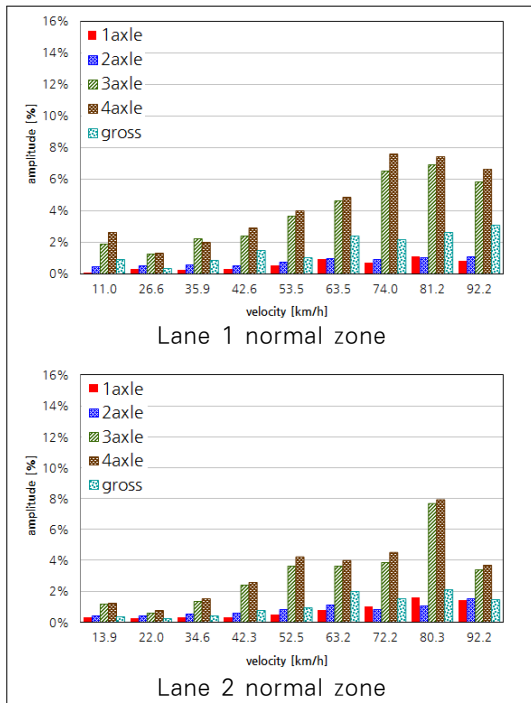
정상 구간 주행 시 발생하는 동적 하중 변화는 FFT 분석결과 2.4-5.8Hz의 저주파 진동수를 지니고 있었으며, 이 진동 주파수 범위를 고속 축중기의 최적의 센서 배치 간격 설계에 사용한다면 복수개의 센서로 부터 고평가 혹은 저평가된 동적 하중 측정



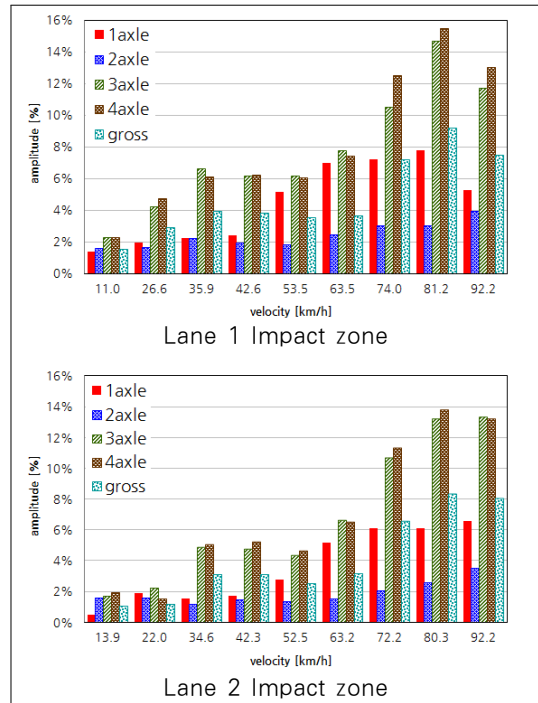
<Fig. 10> Dynamic gross weight variation-normal zone



<Fig. 11> Dynamic gross weight variation-Impact zone



<Fig. 12> Dynamic axle weight amplitude - normal zone



<Fig. 13> Dynamic axle weight amplitude - Impact zone

값을 평균하거나, 혹은 속도에 따른 별도의 보정을 통해서 그 영향을 효과적으로 소거할 수 있을 것으로 판단된다.

단일축과 조합내 개별축은 현행 과적단속법상 같은 축하중으로 분류되더라도 동적 하중에서 나타나는 차이는 <Fig. 12>와 같이 단일 축에 비해 조합내 개별축의 하중 변화 진폭이 최소 2배에서 최대 10배로 큰 차이가 나타났다. 이는 고속 축중기의 축하중 측정 정확도에도 지대한 영향을 미칠 수 있으므로 조합축에 대한 별도 성능평가 규정이나 제도적 변경에 대한 검토가 필요해 보인다.

2. 노면 평탄도에 따른 차량 동적 하중

본 주행 시험을 수행한 노면은 전체 구간에서 IRI 2.0을 만족하는 평탄도를 지니고 있으나, 충격 구간처럼 일부 국소 구간에는 평탄도가 급격하게 변화하는 지점이 존재한다. 국소 구간이라도 이런

급격한 노면 평탄도 변화에 의해 <Fig. 11>에 나타난 바와 같이 동적 총중량은 최대 8배, <Fig. 13>에 나타난 바와 같이 동적 축하중은 최대 12배의 편차가 나타날 수 있으며, 이 경우 동적 하중의 중심값은 유지되나 순간적으로 진폭이 변화하는 결과가 나타난다. 정상구간에 비해 충격구간에서는 동적 총중량 진폭 변화는 1.5-8.3배 초래하고, 동적 축하중의 진폭 변화는 1축 6.4-12.1배, 2축 2.4-3.8배, 3축 1.2-3.3배, 4축 0.9-3.6배로 나타났다. 단일축에 비해 조합내 개별축의 진폭 변화는 약 5.8배로 크게 발생하였으며, 충격 구간에서는 정상 구간에 비해 1축의 동적 축하중 변화가 상대적으로 가장 크게 나타났다. 그 다음으로는 조합내 개별축의 변화가 크게 나타났다. 가속도 변화는 속도 92.2km/h에서 1.9gal 까지 발생되며, 동적 하중의 진동은 최대 30m를 수행한 후에 정상 상태의 진폭으로 수렴하게 된다. 따라서 고속 축중기 설치 시에 IRI 기준을 준용하는

것 외에 적어도 설치 지점의 전후 30m 구간의 노면 프로파일링에서 평탄도에 급격한 변화가 없는 구간으로 산정하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

지난 1994년 성수대교 붕괴사고 이후 최근 국가적 대참사인 세월호 사고에서도 참사의 원인으로 과적의 가능성이 제기되면서 도로상 화물 자동차 과적 근절에 대한 관심이 높아지고 있다. 현행 과적 단속체계는 인력적 한계와 단속의 실효성을 보완할 수 있고 다차로 무정차 스마트톨링과 같은 새로운 운영체계에 대응 가능한 고속 축중기를 이용한 고속 무정차 무인 과적단속 체계로의 기술적, 제도적 진화가 필요하다. 그리고 이를 위해서는 저속에서 고속으로 변화하면서 더욱 뚜렷하게 발현되는 동적 하중의 진동 특성에 대한 기술적인 이해와 이를 정량적으로 측정할 수 있는 면밀한 선행 연구가 필요하다.

본 연구에서는 주행 차량의 동적 하중에서 발생되는 정적 하중과의 오차를 동적 하중 모니터링 시스템을 장착한 실차 주행 시험을 통해 정량적으로 규명함으로써 동적 총중량과 동적 축하중이 노면 평탄도와 속도, 축구조에 따라 어떠한 특성이 나타나는지 분석하였다. 시험 결과, 고속 주행 시 이러한 동적 하중에 의해 정적으로 측정된 중량에 비해 측정 오차가 총중량 $\pm 4\%$, 단일축 $\pm 4\%$, 조합내 개별축 $\pm 9\%$ 이내로 발생될 수 있다는 것을 확인하였다. 또한 IRI 2.0을 만족하는 평탄도를 지니더라도 평탄도가 급격하게 변화하는 충격 구간이 존재한다면, 동적 총중량은 이 구간을 지나면서 정상 구간의 최대 8배, 동적 축하중은 최대 12배의 편차가 나타날 수 있고, 이러한 동적 하중의 진동은 2.4-5.8Hz의 저주파 진동수를 지니며 최대 30m를 주행한 후에 정상 상태의 진폭으로 수렴하게 된다는 것을 확인하였다.

향후 고속 축중기 도입에 앞서 동적 하중이라는 통제 불가능한 환경적 기본 측정 오차 범위에 대한 이해와 이를 토대로 고속 축중기의 최소 허용 오차에 대한 제도적 및 사회적 인식의 변화가 필요하다. 특히 축하중 단속을 위해서는 기술적으로 반드시 이를 극복하기 위한 센서 배치 간격 설계 및 별도의 보정 요소 기술이 필요하며, 제도적으로는 조합 축과 개별축을 구분한 허용 오차 범위를 산정하는 것과 IRI 2.0 이하의 설치 기준 외에 노면의 급격한 평탄도 변화를 제한하는 별도의 설치 시공 규정이 필요할 것으로 판단된다.

해외의 경우 유럽에서는 고속축중기의 성능검증 평가 방법으로 COST 323 WIM Specification(이하, COST 323 방법)이 보편적으로 중용되고 있다. COST 323에서는 법적인 과적단속이나 기타 특별한 필요에 의해 법적인 제재 목적으로 사용가능한 등급을 A(5)로 규정하고, 유럽에서는 이 등급의 고속 축중기를 사전선별 및 직접단속에 이용하고 있다. 그러나 국내의 경우 고속 축중기에 대한 정확도 등급과 허용오차 범위와 같은 명확한 규정이 마련되어 있지 않는 실정으로, 향후 국내 무인 과적단속체계의 성공적인 도입을 위해서는 COST 323처럼 환경 특성과 활용 목적에 따라 동적 하중을 고려하여 적절한 성능 기준을 산정하여 시장 도입 유도를 위한 제도적 뒷받침을 마련하는 것이 무엇보다 중요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] Korea Expressway Corporation(2012), "Status of overweight trucks on expressway," Korea Expressway Corporation.
- [2] COST323(2002), Weigh-In-Motion road vehicle : Final report of the COST323 Action 1993-1998, eds. Jacob, E.J. O. Brien and Jehaes, LCPC, Boulevard Lefebvre, Paris.
- [3] Davis, L. and Bunker, J.(2007), Heavy Vehicle Suspensions - Testing and Analysis. A literature review, Brisbane, Queensland : Queensland

- Department of Main Roads; Queensland University of Technology.
- [4] State of Queensland (Department of Main Roads) & Queensland University of Technology(2009), "Suspension testing of 3 heavy vehicles - dynamic wheel force analysis Report," pp.32-33.
- [5] Matti H.(2002), "Instrumented Vehicle and its use for calibration of WIM-systems," 7th International Symposium on heavy vehicle weights & Dimensions, Delft The Netherlands, June 16-20, 2002.
- [6] ASTM E1318-09(2014), Standard Specification for Highway Weigh-In-Motion (WIM) Systems with User Requirements and Test Methods, pp.13-14.
- [7] Kim, J. H.(2010), "Development and Evaluation of High Speed weigh-in-motion system," *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, vol. 12, no. 3, pp.17-28.

저자소개



김 종 우(Kim, Jong-Woo)
2008년 2월 : 상지대학교 토목공학과 박사(토목공학전공)
2004년 7월~현재 : ENB GROUP (주)유디코 대표이사, (주)에이티맥스 기술이사
2000년 5월~2003년 3월 : (주)아이세스 기술이사
1999년 1월~2000년 4월 : (재)한국재난연구원 특수사업팀 팀장
1995년 1월~1998년 12월 : 쌍용중앙연구소 건설기술연구실 연구원
1995년 2월 : 연세대학교 토목공학과 석사(토목공학전공)
1993년 2월 : 연세대학교 토목공학과 학사
e-mail : jwkim@judico.co.kr



정 영 우(Jung, Young-Woo)
2010년 1월~현재 : ENB GROUP (주)유디코 선임연구원
2010년 2월 : 한성대학교 기계시스템공학과 학사
e-mail : turtlefox@enbgroup.co.kr



권 순 민(Kwon, Sun-Min)
1998년 3월~현재 : 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원
2010년 2월 : 한양대학교 교통공학과 박사(교통공학전공)
1998년 2월 : 한양대학교 교통공학과 석사(교통공학전공)
1995년 2월 : 한양대학교 교통공학과 학사
e-mail : soonmini2@ex.co.kr