연구논문

Journal of Drive and Control, Vol.18 No.1 pp.9-16 Mar. 2021
ISSN 2671-7972(print) ISSN 2671-7980(online)
http://dx.doi.org/10.7839/ksfc.2021.18.1.009

상용차량의 하중을 측정하기 위한 탑재형 자중계 개발
Development of Onboard Scales to Measure the Weight of Trucks

서명국[1*] · 신희영[1] · 이호연[1] · 고재일[2] · 투멘자르갈 엔크바타르[2]
Myoung Kook Seo[1*], Hee Yong Shin[1], Ho Yeon Lee[1], Jea Il Ko[2]
and Enkhbaatar Tumenjargal[2]

Received: 15 Jan. 2021, Accepted: 28 Jan. 2021

Key Words : Truck(상용차), Weight Measurement(하중 측정), Onboard Scale(탑재형 자중계), Leaf Spring(겹판 스프링)

Abstract: Overloaded vehicles increase the maintenance cost of road structures, and they are a major factor in causing damage to the roads and bridges. In addition, overloaded vehicles compromise the braking capability of the vehicle; thus, threatening the safety of the driver. In order to prevent overloading of vehicles, the government is cracking down on the roads by using a device that measures the weight of vehicles. But this process is inconvenient because the place where the equipment is installed is far away from where the cargo is loaded. Due to the limitations of these fixed weighing devices, there is a growing need for technology that can monitor vehicle weight distribution and overload conditions in real time. In this work, we develop an onboard scale that can measure the load (weight) of trucks in real time. The onboard scale consists of high sensors, a signal processing unit, and a display, and it measures the load using height-displacement of the vehicle's leaf spring suspension.

1. 서 론

과적 차량은 도로와 교량을 파손하는 주요 요인으로 도로 및 교량의 내구성을 약화시켜, 유지보수 비용을 증가시킨다. 그리고 과적 차량은 차량의 제동능력을 저하시키고 회전 또는 급정차 시에 화물의 무게중심 때문에 전복 등 대형 사고를 유발시켜 운전자의 안전을 위협한다.

차량의 과적 운행을 막기 위해서 도로에 차량의 무게를 측정하는 계근대를 도입하여 단속을 하고 있다. 하지만 설치 장소가 주로 도시 외곽에 집중되어 있어 효율성이 떨어지고, 측정 장비의 오차로 인해 부당하게 벌금을 부과 받는 피해도 발생하고 있다. 최근에는 빠르게 단속패턴 및 위치 정보 등이 공유되면서 계근대를 이용한 단속은 회피가 가능해 실제로 지방자치단체 등의 단속통계를 보면 10% 미만으로 확인되고 있다. 비록 이동식 계근대를 사용 가능하지만, 여전히 설치된 지점까지 이동해서 검사해야 하는 불편함을 가지고 있다. 이러한 고정식 무게 측정 장치에 대한 한계점으로 인하여 최근 실시간으로 차량의 무게 분포 및 과적 상태 등을 모니터링 할 수 있는 기술에 대한 필요성이 증가하고 있다.[1-7)]

* Corresponding author: seomk@koceti.re.kr
1 Smart Engineering Lab., Korea Constructions Equipment Technology Institute, Gunsan, Jeollabuk-do 54004, Korea
2 Kiwon Electronics Co. Ltd., Iksan-si, Jeollabuk-do 54631, Korea

Copyright Ⓒ 2021, KSFC
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

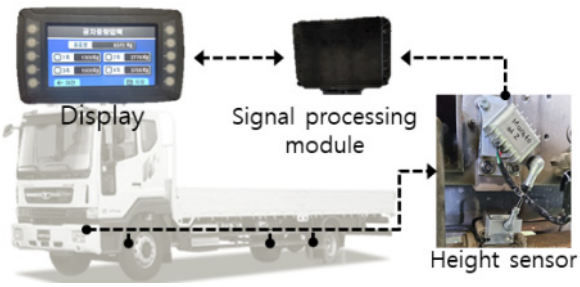

Fig. 1 The configuration of onboard scales

본 연구에서는 트럭의 하중(무게)을 실시간으로 측정 가능한 탑재형 자중계(Onboard Scale)[1,5,7]를 개발한다(Fig. 1). 탑재형 자중계는 크게 하이트센서(height sensor)와 신호처리부, 디스플레이로 구성되고 있으며, 차량의 현가장치인 겹판스프링의 처짐 변위를 이용하여 하중을 측정한다.

2. 하중 측정 시스템

일반적으로 하중 측정 시스템은 차량의 현가장치의 종류와 측정 방식에 따라 다양한 종류의 센서를 사용하여 하중을 측정한다.[1,3,7]

각도센서를 사용하는 시스템(Fig. 2)은 겹판스프링을 장착한 차량에 주로 사용되고 있다. 차량의 하중에 따라 겹판스프링의 처짐이 발생하는 원리를 이용하여 겹판스프링 상단에 직접 각도센서를 부착하거나, 각도센서와 링크로 구성된 하이트센서를 장착하여 각도 변위를 측정한 후 차량의 하중을 계산한다. 각도센서를 기반한 방식은 차량 구조물 변경 없이 장착이 쉬운 장점을 가지고 있으며, 보통 3~5% 이내 하중 측정 오차를 가진다. 한편, 이 방식은 시간에 따른 판스프링 노후화 및 장착 상태 변화를 고려하여 주기적인 보정이 필요로 한다.

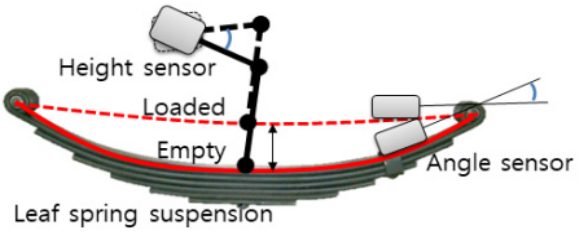

Fig. 2 Angle-sensor based weight measuring system

압력센서를 기반한 시스템(Fig. 3)은 실린더, 에어서스펜션, 타이어의 압력 상태 변위를 이용하여 하중을 측정한다. 압력센서의 성능에 따라 1%~3% 측정 오차가 발생하며, 온도에 민감한 공기 및 오일의 특성에 따라 외부 온도변화에 따른 센서 보정이 필요하다.

로드셀 기반 방식은 차량 프레임과 적재함 사이에 로드셀을 장착하여 하중을 측정한다. 1%이내 측정 오차로 다른 센서와 비교해 높은 측정 정확도를 가지지만, 측정 가능한 무게에 따라 센서 자체가 높은 가격대를 형성하고 있고, 설치 시 차량 적재함 탈거 및 부분 개조가 필요하다.[7]

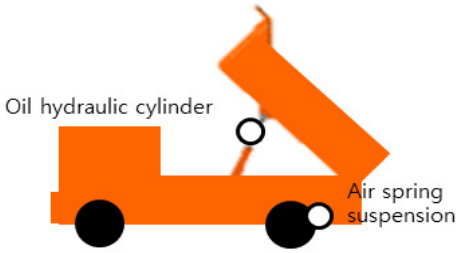

Fig. 3 Pressure-sensor based weight measuring system

상용 차량은 적재 가능한 화물의 총하중과 제조사에 따라 다양한 현가장치를 장착하고 있다. 본 연구에서는 겹판스프링을 장착한 5톤급 상용차량을 대상으로 한다. 하중 측정 정확도를 향상하기 위해서 겹판스프링에 직접 각도센서를 장착하는 방식 대신에 하이트센서를 장착하는 방식을 이용한다. 하이트센서는 링크 길이 조정을 통해 동일한 겹판스프링의 처짐 상태에서 각도변위 범위를 크게 할 수 있어, 보다 정밀한 측정이 가능하다.

Fig. 4를 보듯이 앞뒤좌우 4개의 겹판스프링에 부착된 하이트센서로부터 측정한 각도값은 신호처리부에서는 겹판스프링의 하중-각도 변위 특성 데이터를 이용하여 하중으로 환산된다. 겹판스프링은 하중이 증가할 때와 감소할 때 하중-처짐 변위 특성이 다른 이력 특성(hysteretic characteristics)[8-11]을 가지는데, 본 연구에서는 화물을 상차할 때의 하중-처짐 변위 특성을 이용하여 각도 값으로부터 하중을 계산하였다. 각 겹판스프링에서 계산된 최종 하중은 디스플레이에 표시된다.

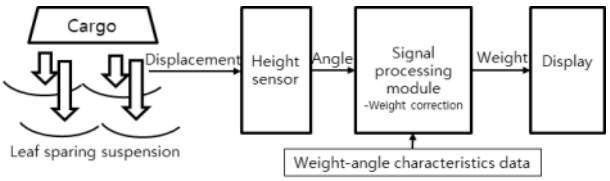

Fig. 4 The process of onboard scale system

3. 탑재형 자중계

3.1 시스템 구성

탑재형 자중계는 3가지 모듈로 구성된다. 구성 모듈로는 차량 차체와 겹판스프링 중심에 연결되어 겹판스프링의 처짐을 각도 변위로 측정하는 하중센서, 측정된 각도로 하중을 계산하고 보정하는 신호처리 모듈, 차량의 하중 정보와 다양한 사용자 인터페이스

(GUI)를 제공하는 디스플레이가 있다.

하중센서로 사용되는 하이트센서는 정확한 축 별 하중 및 총 하중을 측정하기 위해 0.03의 분해능을 만족하는 CAN 통신기반 각도센서와 길이 조정이 가능한 링크 2개로 구성되어 있다(Fig. 5).

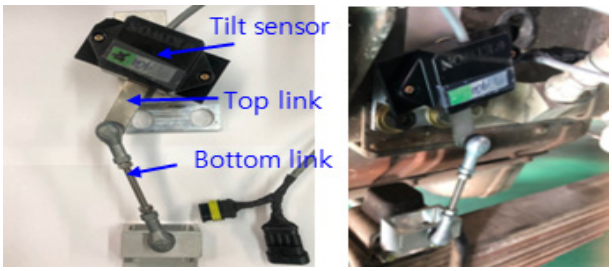

Fig. 5 A height sensor of onboard scale system

신호처리모듈은 ARM Cortex 4M를 기반으로 CAN 통신을 포함한 16개 디지털 신호 입력과 8개 아날로그 신호 입력 가능하다. 차량 실내 장착을 고려하여 ABS 재질의 하우징을 제작하였고 에폭시 처리를 통한 방수방진 기능을 가진다.

7 인치 디스플레이 모듈(Fig. 6)은 터치 기능을 제공하며, 센서 정보, 설정, 영점 보정 등 다수 사용자 인터페이스를 제공한다.

Fig. 6 A display of onboard scale system

3.2 하이트센서의 동작원리 및 링크 설계

하이트센서는 크게 각도센서 1개와 링크 2개로 구성되며, 슬라이더-크랭크(slider-crank) 구조로 동작한다. Fig. 7에서 보듯이 겹판스프링 중심에 장착된 하단링크의 연결 지점 P_2가 처짐 변위에 따라 상하 직선운동을 하면, 상단링크는 차량 프레임에 연결된 지점 P_0를 중심으로 회전 운동을 한다. 이러한 운동은 식 1로 나타낼 수 있으며, 하이트센서의 처짐 변위(y_d)는 링크의 길이(r_2, r_3), 너비(e), 각도(θ_0)로 나타낼 수 있는 것을 확인할 수 있다.

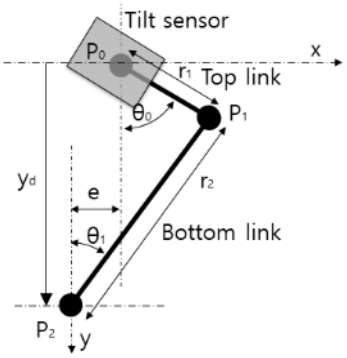

Fig. 7 The schematic diagram of a height sensor

$$
\begin{aligned}
& r_1\sin\theta_0 = r_2\sin\theta_1 - e \qquad (1)\\
& \sin\theta_1 = \frac{1}{r_2}(e + r_1\sin\theta_0)\\
& y_d = r_1\cos\theta_0 + r_2\cos\theta_1\\
& \cos\theta_1 = \pm\left(1-\sin^2\theta_1\right)^{1/2}\\
& \cos\theta_1 = \pm\left[r_2^2-(e+r_1\sin\theta_0)^2\right]^{1/2}\\
& y_d = r_1\cos\theta_0 + \left[r_2^2-(e+r_1\sin\theta_0)^2\right]^{1/2}
\end{aligned}
$$

하이트센서는 링크의 길이로 장착된 각도센서의 동작범위를 조절할 수 있다. Fig. 8에서 보듯이 하단링크의 길이가 일정할 때, 상단링크의 길이가 짧을수록 상단링크의 각도 변위 범위($\theta_a > \theta_b > \theta_c$)가 커지는 것을 확인할 수 있다.

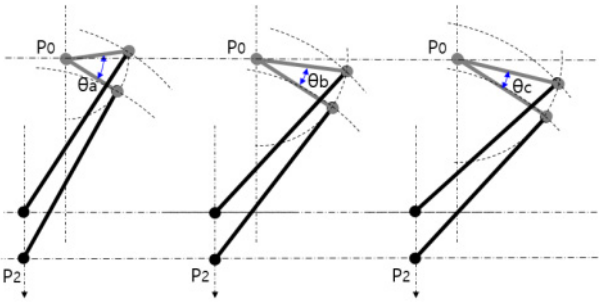

Fig. 8 Angle range by top-link length

반면에, Fig. 9에서 보듯이 상단링크의 길이가 일정하고 하단링크의 길이가 다를 경우, 하단링크의 길이가 길수록 상단링크의 각도 변위 범위($\theta_a < \theta_b < \theta_c$)가 커지는 것을 확인할 수 있다.

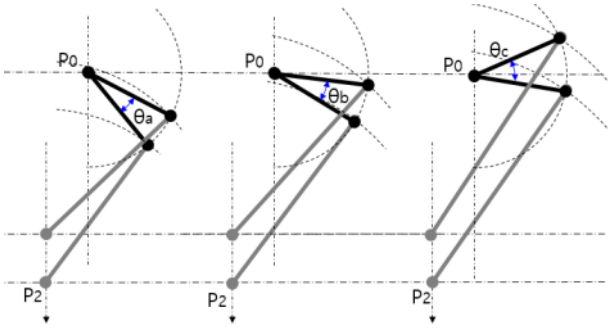

Fig. 9 Angle range by bottom-link length

하이트센서를 장착할 때, P_0 지점을 기준으로 P_2지점의 위치는 처짐(displacement)과 각도 변위 사이에 영향을 미치다. Fig. 10은 P_0 지점을 기준으로 P_2 지점이 오른쪽(-30mm), 중심, 왼쪽(30mm) 위치에 있을 때 처짐과 각도 변위 사이를 보여 주고 있다.

P_2 지점이 중심과 오른쪽에 위치할 경우 50도에서 110도까지 넓은 범위에서 처짐과 각도 사이에 직선 형태의 비례관계를 보인다. 이 구간에 대해서는 처짐과 각도 관계를 일차원 방정식(y=ax+b)으로 모델링 가능하다. 반면에 P_2 지점이 왼쪽에 있을 경우에는 곡선 형태를 가진다.

본 연구에서는 처짐과 각도 변위가 선형 관계를 가지도록 P_2 지점이 P_0 지점의 중심과 오른쪽에 위치하도록 하이트센서를 장착하였고, 최대 측정 하중에 대해서 하이트센서의 각도가 90도 이하에서 동작하도록 링크 길이를 조절하였다.

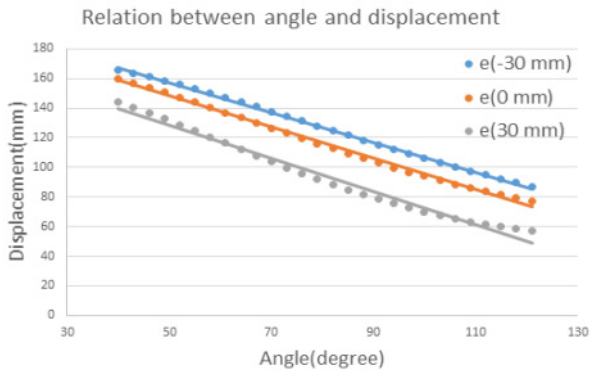

Fig. 10 Relation between angle and displacement of a leaf spring

4. 겹판스프링의 이력 특성 및 모델링

4.1 경판스프링의 이력 특성

겹판스프링은 단의 개수, 판의 수, 판의 재질, 판의 두께 등 다양한 설계 변수에 따라 고유한 하중-처짐 특성을 가진다. 특히 겹판스프링은 판 사이의 접촉과 마찰에 의한 하중 증감 시에 다른 이력 특성을 보인다[8-11].

본 연구에서는 5톤급 상용 차량 전방에 장착된 1단 겹판스프링과 후방에 장착된 2단 겹판스프링의 하중-처짐의 이력 특성을 분석하기 위해서 유압장비를 이용하여 부하 시험을 수행하였다. 유압 프레스로 겹판 스프링 중심을 1mm/s 속도로 2 ton~6 ton까지 하중을 가하면서 실시간으로 처짐 상태를 기록하였다.

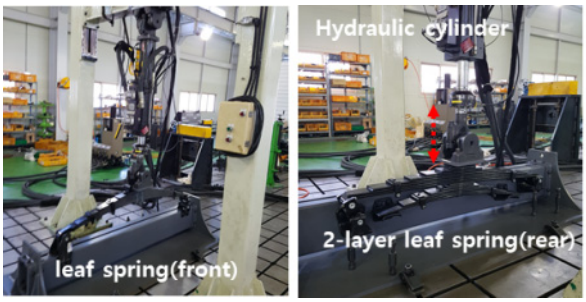

Fig. 11 Load test of leaf springs

차량 전방에 장착되는 1단 겹판스프링의 하중- 처짐 변위 특성(Fig. 12)으로 하중이 계속 증가할 때와 계속 감소할 때 선형적으로 처짐이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 기울기는 하중을 증가할 때 높게 나타난다. 반면, 하중이 변화하는 천이 구간(transition range: 빨간색 원)에서는 비선형적인 특성을 보인다.

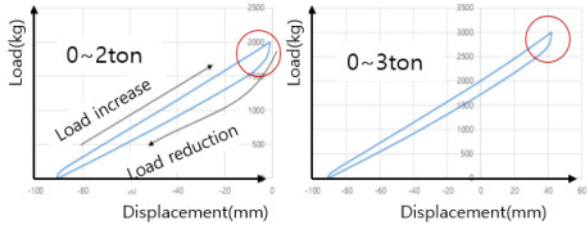

Fig. 12 Load-displacement characteristic of a leaf spring

2단 겹판스프링(뒷바퀴)은 하중이 연속적으로 증가할 때와 감소할 때 두 구간으로 나뉘어서 선형적인 처짐 변위를 보인다.(Fig. 13) 2단 겹판스프링은 공차에서부터 저하중일 때에는 2단 겹판스프링 중 상단의 겹판스프링만 역할을 수행하다가 일정 하중을 초과하면 상단과 하단 겹판스프링이 동시에 역할을 수행하여 저하중 구간과 다른 특성을 가진다. 1단 겹판스프링과 마찬가지로 하중-처짐 변위 특성의 기울기는 하중을 가할 때 높게 나타나며, 하중이 변하는 천이 구간(빨간색 원)에서는 비선형적인 구간이 나타난다.

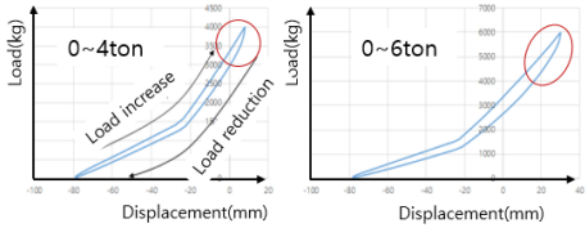

Fig. 13 Load-displacement characteristic of a two-layer leaf spring

4.2 하중 특성 모델링

슬라이드-크랭크 구동 방식의 하이트센서는 각도와 처짐 변위사이에 비례 관계를 가지며, 겹판스프링은 하중이 계속 증가하는 구간에서 처짐과 하중사이에 비례 관계를 가진다. 본 연구에서는 이러한 선형 특징을 이용하여 각 바퀴의 겹판스프링에 대해서 하중과 각도 변위 관계를 일차방정식(y=ax+b)으로 모델링 하였다(Fig. 14).

각 겹판스프링의 모델링 파라미터(a, b)는 식 2와 같이 공차 시점의 각도(x_0)와 하중값(y_0)과 만차 시점의 각도(x_1)와 하중값(y_1)을 이용하여 계산하였다.

$$y = ax + b \qquad (2)$$
$$y = \frac{(y_1 - y_0)}{(x_1 - x_0)}x + \frac{(x_1 \times y_0 - x_0 \times y_1)}{(x_1 - x_0)}$$

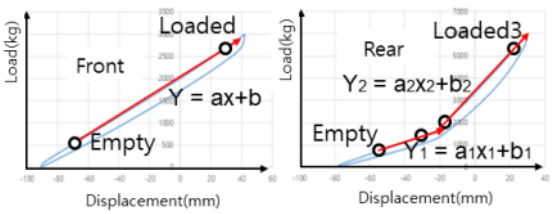

Fig. 14 Characteristic modeling using linear Equation

각도는 하이트센서를 통해 직접 획득하였으며, 하중은 이동식 축중계를 이용하여 측정하였다.

2단 겹판스프링의 경우, 저하중부와 고하중부를 분리하여 모델링해야 하며, 1단 겹판스프링과 다르게 4개 지점의 각도와 하중값이 필요하다.

본 연구에서 대상으로 한 5톤급 상용 차량의 경우, 대다수 차량이 적재 효율을 향상하기 위해서 가변축과 확장 적재함을 장착하고 있다. 이러한 경우, 후방 바퀴에 장착된 2단 겹판스프링은 공차 상태에서도 상하단 겹판스프링이 동시에 동작하여 2개 지점의 데이터로 하중과 각도 변위를 모델링할 수 있다.

4.3 하중 보정

탑재형 자중계를 장착하고 사용 시간이 증가함에 따라 운행과정에서 발생하는 차량의 진동과 충격으로 인하여 하이트센서와 겹판스프링의 장착 상태가 미세 변화하고, 차량의 공차 상태도 변화한다. 그리고 겹판스프링 노후화, 수리, 교체 등이 발생하면, 하중-각도 변위 특성이 달라진다. 따라서 주기적으로 탑재형 자중계는 초기 설치 상태, 하중-각도 변위 특성을 보정해야 한다.

공차보정은 차량의 공차 시점을 설정하는 작업으로 탑재형 자중계를 설치하거나 차량 상태가 일부 변경되었을 때, 각 바퀴가 바닥에 가하는 하중(무게)을 입력한다. 하중은 이동식 축중계를 통해 측정할 수 있다. 각 바퀴의 겹판스프링에 입력된 하중값을 모두 합하게 되면 차량의 공차 하중이 된다.

정밀보정은 겹판스프링의 노후화로 인하여 하중-각도 변위 특성이 달라졌을 경우, 식 2처럼 공차와 만차 시 점에서 각도와 하중값을 입력하여 파라미터(a, b)를 업데이트한다. 공차보정과 마찬가지로 각 바퀴에 가해지는 하중은 이동식 축중계를 통해 측정할 수 있고, 각도는 하이트센서에서 직접 측정할 수 있다.

Fig. 15 User Interface related to calibration

영점보정은 불균일한 지면 등으로 의해서 공차 상태에서 적재물의 하중이 일부 측정될 때, 측정한 총 하중이 공차하중으로 되도록 하중값을 수정하는 작업이다. 영점보정은 식2의 각 겹판스프링의 모델링 방정식 파라미터(b)에 영점보정값(c)을 입력하여, 현재 각 겹판스프링에서 측정되는 하중이 사전에 설정했던 공차하중으로 되도록 수정한다.

5. 실 험

개발한 탑재형 자중계의 하중 측정 정확도를 검증하기 위해서 6.5 ton 차량(공차 시 8.3톤)을 대상으로 0.3ton, 2.7 ton, 5 ton 중량물(육면체 형태)을 적재하여 하중을 측정하였다. 참조용 하중은 10 ton급 이동식 축중계(로드셀 기반)를 이용하여 측정하였다(Fig. 16).

Fig. 16 Load measuring test

하중 측정은 정밀보정과 영점보정을 수행한 후 진행되었으며, 차량을 이동식 축중계에 올라간 후에 0.3ton 중량물을 제외하고 2.7 ton과 5 ton중량물 위치를 변경하면서 하중 분포에 따른 정확도를 측정하였다.

아래 Fig. 17과 Table 1은 중량물의 위치를 앞뒤 변경하면서 총하중을 측정한 결과이다. 5톤 중량물과 2.7톤 중량물을 독립적으로 이동시킨 시험에서 하중 측정 오차는 23kg~470kg으로 나타났으며, 총 하중 대비 평균 1.13% 오차를 보였다.

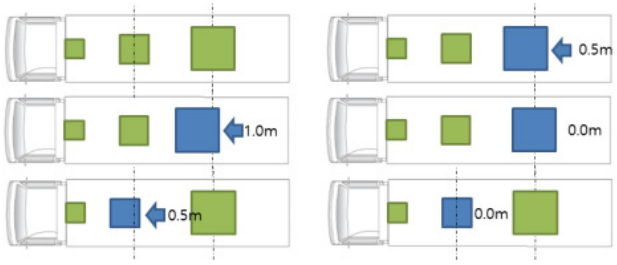

Fig. 17 Changing the forward and backward position of heavy loads

Table 1 Result of load measuring test 1

Test	Load cell (kg)	Onboard scale(kg)	Error (kg)	Error (%)
1	16,310	16,232	78	0.48
2	16,310	16,333	-23	0.14
3	16,310	16,550	-240	1.47
4	16,310	16,232	78	0.48
5	16,310	16,780	-470	2.88
6	16,310	16,508	-213	1.31

Fig. 18과 Table 2는 중량물의 위치를 좌우로 변경하면서 총하중을 측정한 결과이다. 5톤 중량물과 2.7톤 중량물을 각각 이동시킨 시험에서 하중 측정 오차는 295kg~904kg으로 나타났으며, 평균 3.26% 오차를 보였다.

적재물의 위치를 앞뒤로 이동시킨 결과와 비교할 때 2배 이상의 오차를 보였는데, 하중 편중으로 각 겹판스프링에는 하중이 감소하거나 증가하면서, 겹판스프링의 이력 특성이 발생하였고, 특히 증가하는 곳에서 상대적으로 오차가 크게 나타났다.

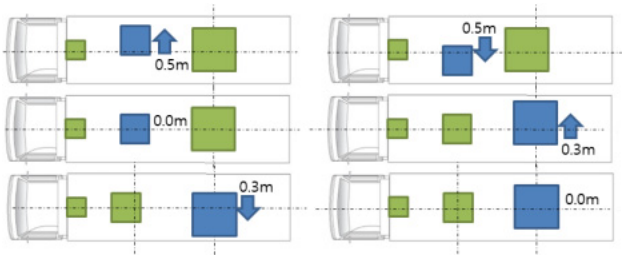

Fig. 18 Changing the position of heavy loads

Table 2 Result of load measuring test 2

Test	Load cell (kg)	Onboard scale(kg)	Error (kg)	Error (%)
1	16,310	17,214	-904	5.54
2	16,310	16,913	-603	3.70
3	16,310	16,833	-523	3.21
4	16,310	16,646	-336	2.06
5	16,310	16,605	-295	1.81
6	16,310	16,815	-505	3.10

Fig. 19과 Table 3은 중량물을 같은 위치에서 반복 상차하면서 하중을 측정한 결과이다. 비록 각 겹판스프링에 가해지는 하중은 같지만 상하차 과정에서 각 겹판스프링에 가해지는 하중은 증감이 발생하였으며, 겹판스프링의 이력 특성으로 인하여 하중 측정 오차는 95kg~422kg으로 평균 1.60% 오차를 보였다.

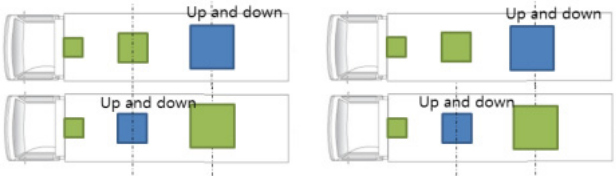

Fig. 19 Repetitive loading of heavy loads

Table 3 Result of load measuring test 3

Test	Load cell (kg)	Onboard scale(kg)	Error (kg)	Error (%)
1	16,310	16,732	-422	2.59
2	16,310	16,694	-384	2.35
3	16,310	16,405	-95	0.58
4	16,310	16,455	-145	0.89

적재물의 위치를 변경하면서 하중을 측정한 결과 하중 오차는 최소 23kg부터 최대 904kg 발생하였고,

전체적으로 탑재형 자중계의 하중이 높게 측정되는 경향을 보였다. 하중 측정 오차의 주요 요인으로는 각 겹판스프링에 하중의 증감이 일어날 때, 겹판스프링의 이력특성을 충분히 고려하지 못하여 발생하는 것으로 분석되었다.

하중 측정 시험에서 평균 오차는 약 2%를 보였지만 하중 편중에 따라 3%를 초과하는 오차는 하중 측정 시스템의 신뢰도를 저하시킨다. 따라서 하중 측정 정확도 향상을 위해서 겹판스프링의 이력특성을 고려한 하중 모델링 방법이 필요하다.

5. 결 론

본 논문에서는 지상의 계근대로 이동 없이 실시간으로 차량의 하중을 측정할 수 있는 탑재형 자중계의 시제품을 개발하였다. 대상 차량은 겹판스프링을 장착한 5톤급 사용차량으로 하였으며, 하중에 따른 겹판스프링의 처짐(각도) 변위를 이용하여 차량의 총 하중을 측정하였다.

겹판스프링의 하중과 각도 변위사이의 특성을 분석하기 위해 유압장치를 사용하여 특성 데이터를 획득하였으며, 하중 증가할 때의 특성을 일차원 방정식으로 모델링하였다. 하중 측정 시험에서는 평균 오차가 2% 발생하였다. 하중 측정 오차는 주로 적재물의 위치 이동에 따른 하중 증감으로 인하여 겹판스프링의 이력특성을 충분히 고려하지 못한 것에서 발생한 것으로 확인하였다. 향후에는 측정 정확도 향상을 위해 겹판 스프링의 이력특성 모델링 연구를 수행하고 차량 기울기에 따른 오차 분석과 보정 연구를 계획하고 있다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 재원 지원을 받아 수행되었습니다. (P0006210, 5톤급 상용차량의 하중분포 측정과 원격 모니터링이 가능한 탑재형 자중계 개발)

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

1) M. K. Seo et al., “Development of an Onboard Scale for Measuring the Load of 5 ton Vehicles,” Proceedings of 2020 Spring Conference on Drive and Control, pp.23-24, 2020.
2) D. Lloyd et al., “On-board Mass Monitoring of Heavy Vehicles: Results of Testing Program,” Road and Transport Research, Vol.19, No.1, pp.3-17, 2010.
3) G. Trzcinski, T. Moskalik and R. Wojtan, “Total Weight and Axle Loads of Truck Units in the Transport of Timber Depending on the Timber Cargo,” Forests, Vol.9, No.4, pp.164-176, 2018.
4) M. S. Park and B. W. Jo, “The Development of Bridge Weigh-in-Motion System for the Measurement of Traffic Load,” Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, Vol.10, No.2, pp.111-123, 2006.
5) J. W. Kim, Y. B. Jho and Y. W. Jung, “An Effectiveness Analysis of Commercial Vehicle’s Loading Pattern and Prevention of Overloading with On-board Truck Weight Sensors,” The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems, Vol.17, No.6, pp.153-172, 2018.
6) H. B. Gil and S. G. Kang, “Characteristics of Heavy Vehicles Using Expressway Networks Based on Weigh-in-motion Data,” Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 33, No.5, pp.1731-1740, 2013.
7) J. W. Kim, Y. W. Jung and Y. B. Jho, “An Analysis of Driving Pattern and Transportation Efficiency of Commercial Vehicle using On-board truck scale,” The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems, Vol.18 No.6, pp.76-95, 2019.
8) Z. WU, Y. Xiang and C. Liu, “Influence of Suspension Hysteresis Characteristics on Vehicle Vibration Performance,” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2020.
9) B. Kadziela et al., “Validation and Optimization of the Leaf Spring Multibody Numerical Model,” Archive of Applied Mechanics, Vol.85, pp.1899-1914, 2015.

10) J. Zhang et al., “Dynamic Analysis of a Vehicle with Leaf Spring based on the Hysteresis Model,” International Journal of Vehicle Performance, Vol.4, No.3, 2018.

11) W. K. Moon and C. K. Song, “Hysteretic Characteristics of Leaf Springs in Commercial Vehicles,” The Korean Society Of Automotive Engineers, Vol.16, No.2, pp.99-105, 2008.