

주행시험을 통한 고속축중기의 융합형 중량환산 알고리즘 효과 분석

An Analysis of Test Results Using the New Fusion Weight Conversion Algorithm for High-speed Weigh-In-Motion System

김 종 우* · 정 영 우**

* 주저자 : ㈜유디엔에스 기술연구소 CTO

** 교신저자 : ㈜유디엔에스 기술연구소 선임

Jong Woo Kim* · Young Woo Jung*

* UDNS Co., Ltd

† Corresponding author : Young Woo Jung, udnsk@udnsk.com

Vol.19 No.4(2020)

August, 2020

pp.67~80

pISSN 1738-0774

eISSN 2384-1729

[https://doi.org/10.12815/kits.](https://doi.org/10.12815/kits.2020.19.4.67)

2020.19.4.67

Received 9 July 2020

Revised 3 August 2020

Accepted 3 August 2020

© 2020. The Korea Institute of
Intelligent Transport Systems. All
rights reserved.

요 약

고속축중기는 통행 흐름의 통제나 속도의 감속 없이 주행 중인 화물차량의 중량을 실시간 무인 검측하는 시스템으로, 국내에서는 축 조작 행위방지 및 주행 중 과적행위 적발을 위해 주로 고속국도 및 일반국도 본선에 설치하여 이동단속반 검차를 위한 사전선별용으로 활용된다. 본 연구에서는 고속축중기의 중량 측정정확도를 법정 기준까지 향상시키고자 기존 적분형 및 첨두형 중량환산 알고리즘에 대한 분석을 통해 개선사항을 제시하고, 매트타입형 고속축중기에 적용할 수 있는 새로운 융합형 알고리즘을 고안하였다. 이 알고리즘을 적용하여 현장 실차 주행 시험을 통한 정확도 향상 효과를 분석한 결과, 최상급의 정확도 등급을 확인할 수 있었다.

핵심어 : 고속축중기, 과적, 과적 단속, 중량환산 알고리즘, 중량측정 정확도

ABSTRACT

High-speed weigh in motion (HS-WIM) is a real-time unmanned system for measuring the weight of a freight-carrying vehicle while it is in motion without controlling vehicle traffic flow or deceleration. In Korea, HS-WIM systems are installed on the national highways and general national ways for pre-selection by law enforcement. In this study, to improve the measurement accuracy of HS-WIM, we devise improvements to the existing integral and peak weight conversion algorithms, and we provide a new fusion algorithm that can be applied to the mat-type HS-WIM. As a result of analyzing vehicle driving tests at a real site, we confirmed the highest level of weight-measuring accuracy.

Key words : High speed weigh-in-motion system, Overloading, Overload law enforcement, Weight conversion algorithm, Weight measuring accuracy

I. 서 론

1. 연구의 배경 및 목적

과적은 차량의 적재정량보다 초과하여 화물을 싣는 행위를 일컬으며, 차량의 안전운행 및 도로구조물의 수명 단축에 직접적인 영향을 준다. 미국도로교통협회의(AASHTO)의 시험 결과에 따르면 축하중이 10톤인 화물차가 1대가 통행하는 경우 승용차 7만대와, 15톤인 화물차의 경우 승용차 39만대가 통행한 것과 동일한 손상을 초래한다고 분석된 바 있다. 과적 차량으로 인해 파손된 고속도로의 포장을 보수하는데 발생하는 연간 손실비용은 280억원으로, 여기에 교량을 보수하는 비용은 44억원이 추가로 소요되는 등 모두 324억원이라는 엄청난 비용이 과적으로 인하여 발생한다. 또한 허용 적재량의 20%를 초과할 경우, 타이어 내구 수명은 30%가 감소되며, 제동거리 역시 10~20% 정도 늘어나는데, 이러한 무리한 과적은 차체의 균형을 잃고 전복되거나 선생차량과의 충돌사고를 유발하게 된다. 과적 인한 사망사고 유발 위험은 일반 승용차에 비해 무려 4배 이상이다(Korea Expressway Corporation, 2012).

따라서 국내의 경우 도로법 제 59조 및 도로법 시행령 제 55조(차량의 운행제한), 도로법 제 60조(적재량 측정 방해행위의 금지)에 근거하여 축하중이 10톤을 초과하거나 총중량이 40톤을 초과하는 차량'에 대하여 과적 단속을 실시하고 있다(National Law Information Center, 2020). 현행 과적단속체계는 화물차량을 정지 또는 서행(시속 10km/h 이내) 상태에서 단속이 이루어지며 단속지점 또한 검문소(고속국도의 경우 영업소 축중차로)로 유도 후 저속충증기를 활용하여 검측하고 있다. 이동단속의 경우 단속원의 자의적 판단에 의하여 과적의심차량을 선별하거나 검측지점을 주행하는 임의의 화물차량을 대상으로 운행을 통제 후 검측을 수행한다. 한편 가변축을 장착하고 있는 대형화물차량의 경우, 검측 과정에서 다양한 형태의 축조작 행위를 통해 정상적인 계측을 방해하거나 위반사실을 은폐하는 사례가 잦으며, 계측지점 통과 후 실제 운행 개시 전 타이어 마모 방지 및 연비 절감 등을 이유로 가변축을 조작하여 과적상태로 운행하는 사례가 빈번히 발생하고 있다. 이렇게 가변축 조작을 포함한 다양한 방법이 단속회피에 사용되고 있으나, 현행 고정식 및 이동식 단속 방식으로는 이를 단속하는 데 현실적 어려움이 존재함에 따라 단속 체계가 무력화 되고 있는 실정이다. 그 결과 실제 고속도로에서 이루어지는 검측차량 대비 고발차량 비율은 0.07%~0.09%에 그치고 있다(Korea Expressway Corporation, 2012).

고속충증기는 차량 통행 흐름의 통제나 속도의 감속 없이 주행 중인 화물차량의 중량을 실시간 무인 검측하는 시스템으로, 국내에서는 이러한 축조작 행위방지 및 주행 중 과적행위 적발을 위해 고속국도 및 일반국도 본선에 설치하여 이동단속반 검차를 위한 사전선별용으로 활용된다. 현재까지 고속충증기를 이용한 과적 단속시스템은 과적혐의차량 검측 시 통과시간, 차량번호, 차종, 축하중, 총중량 등 단속에 필요한 기본정보를 과적 이동단속반에 제공하고, 이동단속반은 제공된 정보를 바탕으로 혐의차량을 추격, 2차 중량 검측 후 과태료를 부과하는 방식으로 단속이 이루어진다. 해외의 경우, 미국 및 유럽 대부분의 나라에서는 고속충증기를 이동단속을 위한 사전선별용으로 활용하고 있다. 체코에서는 총중량 오차 $\pm 5\%$ 이내, 단일축 축하중 및 조합축 축하중 오차 $\pm 11\%$ 이내의 성능을 구현하였으며, 고속 충증기를 60개의 차선에 설치하여 세계 최초로 직접단속용에 활용하여 과태료를 부과하고 있다. 중국에서는 신뢰구간 95%이내의 총중량 오차 5~10%의 성능을 확보하고 고속충증기를 1500개가 넘는 차선에 설치하여, 고속도로 진입전 과적차량을 선별하거나 직접 단속에 활용하고 있다(Kistler Eastern Europe, 2020).

본 연구에서는 고속충증기가 직접단속 또는 사전선별용으로 활용되기 위한 법적 기준을 확보할 수 있도록 중량 측정정확도용 향상시킬 수 있는 방법을 제안하고자 한다. 그 방법의 하나로 고속충증기 타입에 따른

기존 중량환산 알고리즘을 분석하여 문제점을 도출하고 각각의 장점만을 채용하여 더 높은 정확도를 확보할 수 있는 알고리즘을 개발하고자 한다. 또한 개발된 알고리즘의 적용성을 평가하기 위하여 실제 공용도로에서 실차주행 검증시험을 수행하고 그 결과를 토대로 향후 활용방안을 제시하는 것을 목적으로 한다.

II. 기존 사례 및 문헌 고찰

1. 고속충증기 관련 연구

Kim(2008)은 기존 고속충증기의 단점을 보완하기 위하여 양단지지부를 갖는 새로운 고속충증기의 센서형상을 제시하고, 동적재하시험을 통하여 중량측정 정확도를 평가하였다. 또한 Kim(2010)은 피에조 퀴트 타입의 고속충증기의 최적의 계측점으로 3-point를 제시하고 그 성능을 실 도로상에서 시험하여 고속화에 따른 중량측정 정확도 향상 평가 및 검토를 하였다. Kwon(2012)은 고속충증기를 활용한 국내외 과적 단속현황과 국내 시범운영을 통한 과적운행 억제 효과를 분석하였으며, 단속 전에 비해 총중량 44톤 이상의 단속대상 교통량은 70~90% 가량 감소한 반면 40~44톤 범위의 운행제한 미단속 대상 교통량은 22% 증가하여 고속충증기를 연계한 단속의 과적중량 저감 효과 및 과적운행 억제 효과가 매우 우수한 것을 확인할 수 있었다. Kwon(2012)은 고속충증기에 의한 과적운행 억제 효과를 분석을 위하여 고속충증기를 설치한 고속도로 2개 노선의 단속 전·후 교통량 및 축하중 데이터를 분석하였다. 단속 전에 비해 총중량 44~48톤 범위의 운행차량들은 약 53%, 총중량 48톤 이상의 중량으로 운행차량들은 약 91%가 감소한 것으로 나타나 고속충증기에 의한 과적운행 억제효과를 정량적으로 분석하였다. Choi(2016)은 고속충증기 설치 구간을 우회하는 교통량 변화추이를 분석하기 위하여 단속 전후의 교통량 및 총중량 변화를 분석하였으며, 이를 평소 화물차종 별 과적 운행비율과 비교하여 단속 시작일에 급격하게 교통량이 감소하는 운행패턴의 변화를 보고하였다.

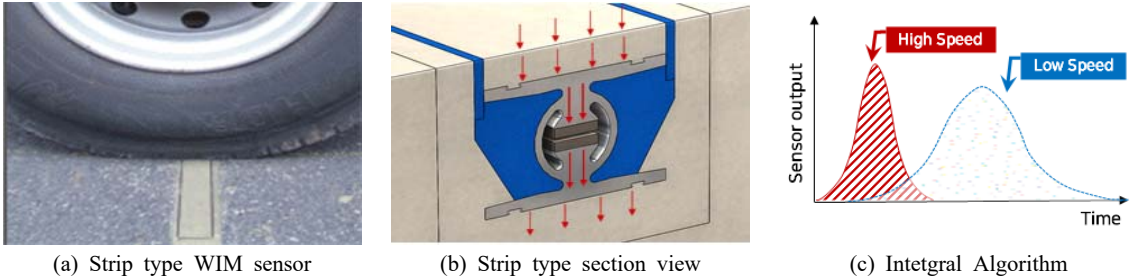
2. 센서타입에 따른 고속충증기의 중량환산 알고리즘

고속충증기는 축중센서의 폭과 차량의 타이어 접지면의 크기에 따라서 크게 스트립(Strip) 타입과 매트(Mat)타입으로 나뉜다. 스트립 타입의 대표적인 축중센서로는 피에조-퀴츠(Piezo-quartz) 타입의 바(Bar)형 센서가 있으며, 매트 타입으로는 로드셀(Loadcell) 타입과 스트레인게이지(Strain gauge) 타입의 벤딩 플레이트(Bending Plates)형 센서가 있다. 그 외에 광섬유 및 피에조세라믹 등의 타입도 있으나 오차율 한계 및 내구성 문제로 인하여 세계적으로 널리 적용되지는 못하고 있다(Burnos, 2017).

스트립 타입의 대표적 센서인 피에조퀴츠 타입은 차량 하중에 의한 압력이 수정(水晶) 소자에 의해 전하로 변환되고 이를 측정하여 하중으로 환산하는 방식을 사용하며, 센서의 폭도 50mm로 소형화 가능하여 노면 포장 내에 매립시공이 가능한 크기이다. 또한 수정 소자의 전기적 출력 특성이 매우 안정적이므로 중량 환산 시 높은 정확도를 기대할 수 있다. 그러나 소재 자체가 고가이며, 현재 세계적으로 스위스의 K사에서만 독점생산하고 있으며, 유지보수 발생 시 센서의 교환이나 수리가 불가능하여 반드시 교체 재시공을 해야 하는 단점이 있다.

매트 타입의 대표적 축중센서인 로드셀 및 스트레인게이지는 플레이트로 전달되는 차량 하중에 의하여 발생하는 반력이나 응력을 로드셀이나 스트레인게이지로 직접 측정하는 방식을 사용한다. 센서의 폭은 300mm 이상으로 크기가 상대적으로 커서 노면의 평탄도 및 구배에 맞도록 시공 품질을 높이는 것이 중요하며 시공 난이도가 높다. 그러나 센서의 가격이 저렴하고 유지보수 발생 시 교환이 가능하다는 장점이 있다.

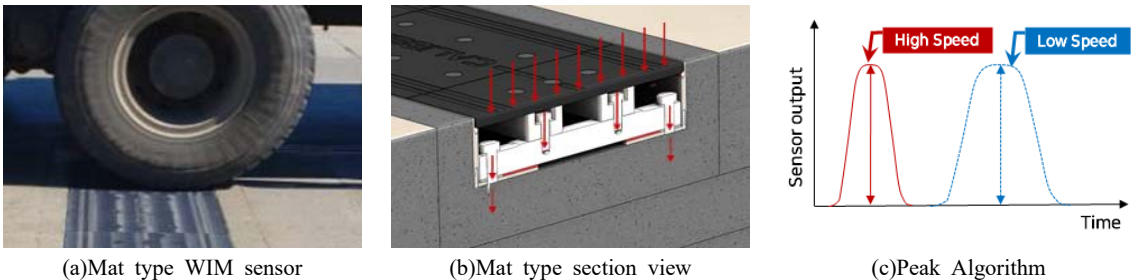
1) 스트립 타입의 적분형 중량환산 알고리즘



<Fig. 1> Strip Type WIM Sensor and Integral Weight Conversion Algorithm

스트립 타입과 매트 타입의 측중센서는 타이어 접지면의 면적차이로부터 중량을 환산하는 원리가 크게 다르다. 먼저 스트립 타입의 경우, 측중센서가 소형이기 때문에 <Fig. 1(a)>에서와 같이 센서의 폭이 타이어 접지면 면적보다 작아 센서에 재하되는 축하중은 타이어 접지면에서 노면으로 분산된 축하중의 일부가 된다. 이렇게 축하중의 일부를 압력 형태의 응답신호로 수집하는 특성으로 인하여 스트립 타입 측중센서는 주로 적분형 중량환산 알고리즘을 사용한다. 적분형 중량환산 알고리즘은 짧은 순간에 나타나는 응답신호 파형의 면적을 취하는 방법으로 정밀한 속도변수를 포함하여야 하며, 정확도는 비교적 높다. 그러나 일정한 속도로주행하지 않는 경우, 즉 속도변수에 영향을 줄 수 있는 가속 및 감속 주행이나 저속으로 주행하는 경우, 그리고 측중 센서를 차선에 여러개의 열로 배치하지 못하여 정확한 속도 변화를 측정하지 못한 경우에는 오차가 크게 나타나는 단점이 있다. 따라서 적분형 알고리즘의 경우 속도변수에 따라 좌우되는 정확도 오차를 줄이는 것이 필요하다(Kwon, 2010).

2) 매트 타입의 첨두형 중량환산 알고리즘



<Fig. 2> Mat Type WIM Sensor and Peak Weight Conversion Algorithm

반면 매트 타입의 경우, 크기가 상대적으로 크기 때문에 접지면이 모두 센서에 접촉되며 재하되는 축하중은 센서 응답신호의 크기와 비례하므로 축하중 환산에 하중에 의한 응답신호의 크기를 손쉽게 측정할 수 있는 첨두(尖頭)형 중량환산 알고리즘을 주로 사용한다. 이 알고리즘은 짧은 순간에 나타나는 응답신호 파형의 첨두값 혹은 그 평균을 취하는 방법으로 속도변수를 포함하지 않아 단순하지만 일반적으로 정확도는 적분형 알고리즘에 비하여 비교적 낮은 것으로 알려져 있다. 그 이유는 측중 센서로부터 차량의 축하중에 해당하는 응답 신호를 수집할 때, 깨끗한 신호파형을 얻어야만 첨두값을 취할 때의 높은 정확도를 확보할 수 있기 때문인데 매트 타입의 경우, 주행 중인 차량의 바퀴 전체가 지면에 설치된 센서 위를 접촉하게 되므로 주행 중

인 차량에서 발생 되는 진동이 그대로 전달되어 깨끗한 신호 파형을 얻기가 어렵기 때문이다.

그러나 속도변수를 환산에 포함하지 않기 때문에 가속 및 감속 주행, 혹은 저속으로 주행하는 경우에도 적분형 알고리즘보다 정밀한 측정이 가능하다는 장점이 있다.

Ⅲ. 고속측중기의 융합형 중량환산 알고리즘

본 연구에서는 고속측중기의 센서 타입에 따라 수행되는 기존 적분형 및 침두형 중량환산 알고리즘의 단점을 분석하여 개선 방향을 제시하고, 특히 매트 타입의 센서에 적용할 수 있는 새로운 융합형 알고리즘을 고안하여 정확도 향상 효과를 분석하고자 한다.

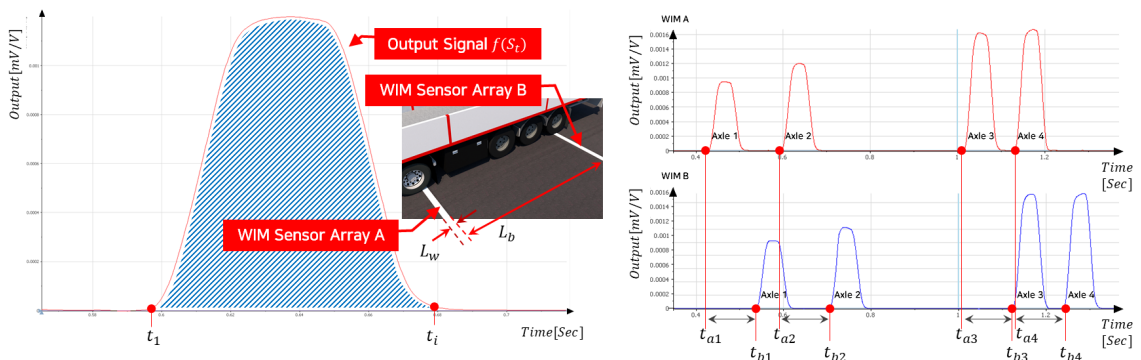
1. 기존 알고리즘 개선방향

1) 스트립 타입의 적분형 알고리즘 개선

적분형 알고리즘의 경우, 주행 차량의 속도는 복수의 열로 배치된 측중센서 사이의 거리와 응답신호 파형의 트리거 시간차로 구해지는데, 이때 가속 및 감속주행 혹은 저속주행의 경우, 센서들 사이를 통과할 때의 속도차 때문에 첫 번째 축과 마지막 축의 계산된 속도 파라미터는 다를 수 있다. 이 경우, 적분형 알고리즘에 차량의 속도를 계산된 1개의 변수로 반영하게 되면 각 축 별 속도 차이만큼 중량 오차가 발생하게 된다.

따라서 본 연구에서는 가속 혹은 감속에 의한 오차를 줄이기 위하여 속도변수를 연산할 때 각 축 별 속도를 개별적으로 추출하고 이를 적분형 알고리즘에 적용하는 방법을 고안하였다.

$$W = \frac{\int_{t_1}^{t_i} f(S_i)}{L_w} \times \frac{L_b}{\Delta t_n} \times C_i, \quad \Delta t_n = t_{bn} - t_{an} \dots \dots \dots (1)$$



<Fig. 3> The Improved Integral Weight Conversion Algorithm

위의 수식에서 W 는 중량환산 결과값, t_i 는 i 번째 유효응답시간, $f(S_i)$ 는 WIM센서의 응답신호, L_w 는 WIM 센서의 폭, L_b 는 1열과 2열 WIM 센서의 사이거리, $TRIANGLEt_n$ 은 n 번째 축에 해당하는 응답신호파형의 축 검지 시작시간 차이, C_i 는 적분형 중량환산계수이다. 먼저 복수의 열로 배치된 센서의 응답신호를 수집 후,

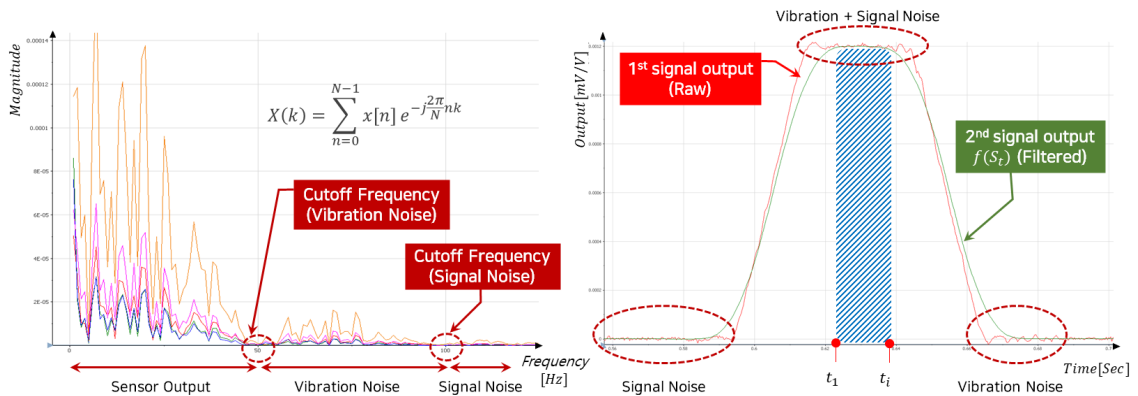
1열과 2열 센서 사이의 거리와 주행차량 각 축의 응답 신호의 시작 지점과의 시간 차를 이용하여 각 축에 해당하는 속도를 각각 분할 연산한다. 이 속도 값을 각 축에 해당하는 센서 응답신호 적분치에 곱하여 중량을 환산하면 속도 변화에 의한 오차를 저감시켜 중량측정 정확도를 향상 시킬 수 있을 것으로 예상하였다.

2) 매트 타입의 침두형 알고리즘 개선

침두형 알고리즘의 경우, 센서응답신호의 최대값을 얻어야 하므로 주행 중인 차량의 진동과 전기적 노이즈를 효과적으로 제거하여 평평한 침두구간 신호파형을 얻는 것이 중요하다. 또한 로드셀 및 스트레인게이지의 센서출력 자체가 미세한 전압 변형률을 측정하는 원리이므로 신호 자체의 노이즈를 제거하는 것 또한 필요하다. 그러나 주행 차량의 형태 및 구조에 따라 발생 되는 진동 주파수가 다르고, 또한 같은 차량이라도 주행속도 및 노면의 조건에 따라서 진동의 크기와 진폭이 다르게 발생한다(Kim, 2016). 이러한 하중 이외의 영향으로 얻어지는 노이즈를 제거하기 위해 일반적으로 다양한 노이즈 필터링을 적용하는데 사전 설정된 독립변수에 의해 천편일률적인 노이즈 필터링 방법을 적용하는 것은 오히려 신호파형의 왜곡을 야기할 수 있다. 실제 수집된 원시 응답파형을 보면 침두구간 내의 신호에 차량에 의한 진동 노이즈와 신호 노이즈가 섞여 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 응답신호가 이상적인 상태로 취득되지 못하여 유효구간의 파형이 비대칭으로 발생되거나 노이즈가 제대로 제거되지 않은 경우, 최대치인 1개의 값을 대표값으로 취하여 하중으로 환산하는 것은 오차가 커지는 요인이 될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 차량의 응답신호를 1차 수집 후 진동 및 신호 노이즈 주파수를 분석하여 저역필터로 제거하고, 필터링 된 2차 응답신호의 침두값으로부터 전후 평평한 침두구간을 추출하여 평균을 취하는 방법을 고안하였다.

$$W = \frac{\sum_{t_1}^{t_i} f(S_i)}{i} \times C_p \dots\dots\dots (2)$$



<Fig. 4> The Improved Peak Weight Conversion Algorithm

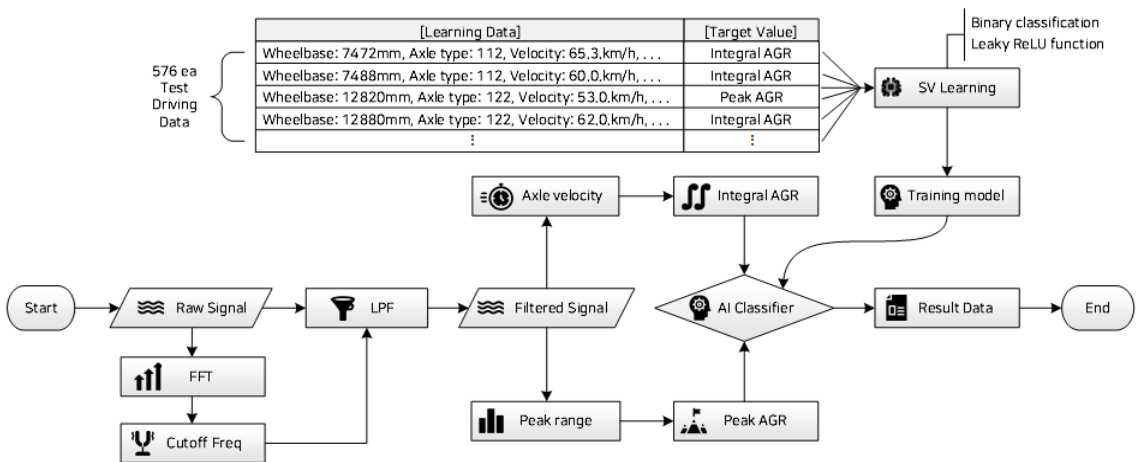
위의 수식에서 W 는 중량환산 결과값, t_i 은 i 번째 유효응답시간, $f(S_i)$ 는 필터링된 WIM 센서의 응답신호, C_p 는 침두형 중량환산계수이다. 먼저 주행 차량에 의해 발생된 진동과 전기적 신호 노이즈를 필터링하기 위하여 원시응답신호를 4,000Hz로 고속 샘플링하여 1차 수집한다. 수집된 1차 응답신호에 고속푸리에변환(Fast

Fourier transform, FFT))을 적용하여 응답신호 파형에 영향을 주는 신호 및 진동 노이즈를 제거하기 위한 특정 고유진동수를 추출하고, 이를 저역 필터링의 차단 주파수 변수로 적용하여 노이즈를 저감시킨다. 노이즈가 제거된 2차 응답신호의 깨끗한 신호 파형으로부터 미분함수를 이용하여 평평한 침두구간 범위를 별도로 분리한 후, 이를 평균하여 하중환산에 활용하면 중량측정 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 예상하였다.

2. 매트타입 센서용 융합형 알고리즘 고안

스트립타입 센서는 바퀴 전체면적이 아닌 일부 면적에 의한 압력을 측정하므로 반드시 적분형 알고리즘만 적용 가능하다. 그러나 매트타입 센서의 경우, 바퀴 전체면적에 의한 변형을 측정하므로 침두형 뿐만 아니라 적분형 알고리즘도 모두 적용하여 중량을 구할 수 있으며, 이 경우 어떤 결과가 더 정확한 측정값인지 판단할 필요가 있다. 등속주행을 하는 대부분의 경우에는 응답파형의 일부분을 취하는 침두형 알고리즘보다는 전체 응답파형이 반영되는 적분형 알고리즘을 사용하는 것이 중량 정확도를 높일 수 있을 것이다. 그러나 주행방법에 대한 경우의 수를 살펴보면, 차량이 정차 후 주행, 회피 주행을 하는 경우, 혹은 차선변경 혹은 이탈로 주행하여 복수의 열로 배치된 WIM 센서의 1열은 비스듬히 주행하고 2열에서 마지막 축이 벗어나 주행한 경우 등 응답 신호의 축 검지가 제대로 이루어지지 않은 경우가 있을 수 있다. 이러한 경우, 축별 속도는 정확히 연산되지 않을 수 있으며 만일 적분형 중량환산 알고리즘을 그대로 적용할 경우 오차가 크게 발생될 수 있다. 따라서 이러한 이상주행을 하는 경우에는 침두형 중량환산 알고리즘을 적용하는 것이 오히려 오차를 줄일 수 있다. 한편 측정결과에 영향을 주는 인자로는 주행방법 외에도 온도, 차량구조, 속도 등의 다양한 경계조건이 존재함에 따라 어느 알고리즘이 더 정확한 결과가 예측되는지 전통적인 프로그래밍으로 이를 판단하기에는 무리가 있다.

따라서 본 연구에서는 대규모 실차 주행 시험의 결과로 얻어진 다수의 검측연산결과를 입력값으로, 적분형과 침두형 알고리즘 중 정확도가 높은 결과를 타겟값으로 하는 지도학습(Supervised Learning)을 수행하여 머신러닝의 학습모델을 생성하였다. 그리고 생성된 학습모델을 알고리즘 분류기로 활용하여 측정된 검측결과를 기반으로 최종결과값을 선별하는 방법을 사용하였다.



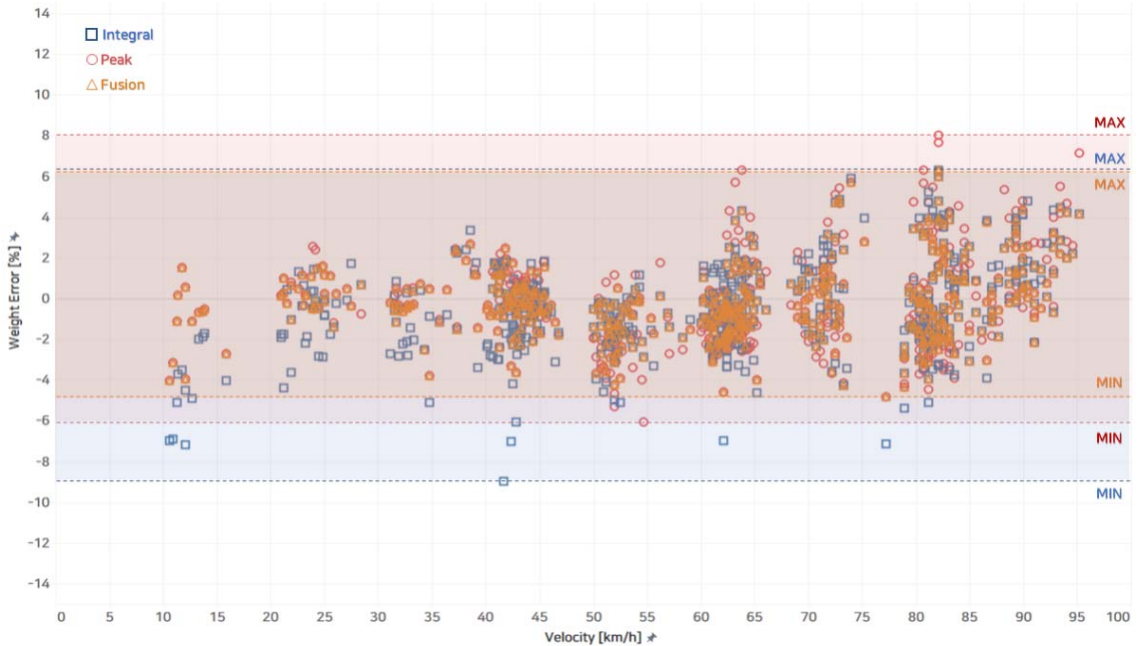
<Fig. 5> The New Fusion Weight Conversion Algorithm for Mat type sensor

$$f(x) = \max(0.01x, x) \dots\dots\dots (3)$$

위의 수식에서 $f(x)$ 는 생성 학습모델, x 는 지도학습을 위한 데이터이다. 먼저 고속 측중기의 검측연산결과 중에서 중량측정 정확도에 영향을 줄수 있는 인자를 분류해보면, 속도 및 가속도, 주행위치 등의 주행정보와, 축거, 축중, 윤거, 윤중, 차중분류, 데이터 수 등의 차량제원정보, 그리고 축하중, 총중량, 축하중 분배결과 등의 중량정보필드로 나눌 수 있으며, 모두 38개의 데이터셋으로 구성된다. 각각의 데이터셋을 뉴럴네트워크의 개별 뉴런에 들어오는 입력값으로 보고 적분형 알고리즘과 첨두형 알고리즘을 출력값으로하는 로지스틱 회귀(Logistic Rgression)의 이진분류(Binary Classification) 구조로 정의하였다. 학습을 위한 모델의 비선형 활성화 함수(Activation function)는 리키 렐루(Leaky ReLU)를 사용하였으며, 학습 데이터는 정상주행과 이상주행을 모두 포함한 과거 576회의 주행시험 데이터를 활용하였다. 단위시험별 취득한 데이터셋 대비 상대적으로 정확도가 높은 중량환산 알고리즘을 지정하여 학습모델을 생성하였다. 최종 생성된 모델의 손실율은 93.43%로 높은 정확도의 학습결과를 확인하였다.

3. 매트타입 센서용 융합형 알고리즘 검증

매트타입 센서용 융합형 알고리즘에 대한 검증을 위하여 알고리즘별로 분석을 수행하였다. 576회의 실차 주행시험 데이터를 활용하여 개선 전의 적분형, 첨두형 알고리즘으로 다시 시뮬레이션하여 검측결과값을 취득하고 이를 학습모델에 의해 생성된 융합형 알고리즘과 비교 분석하였다. 총중량 및 축하중의 중량 측정 정확도를 분석한 결과는 아래 표 <Table 1>과 같다. 10.6 ~ 95.2km/h의 전체 속도 구간에서 총중량의 경우, RMS 값은 적분형 알고리즘 2.24%, 첨두형 알고리즘 2.22% 인데 비해 융합형 알고리즘은 1.80%으로 더 높은 정확도가 나타났다. 최대값 및 최소값의 경우에는 아래 그림 <Fig. 6>과 같이 기존 알고리즘이 최대 8.02% ~ 최소 -8.98%의 분포를 보이는 것에 비해 융합형 알고리즘은 최대 6.30% ~ 최소 -4.83%로 기준값에 더 근접한 결과가 나타난 것을 확인할 수 있었다.



<Fig. 6> Gross Vehicle Weight Error Analysis Result by Algorithm

<Table 1> Weight Error analysis result by Algorithm

Algorithm	Error Result	GVW	AOW2	AOW3	AOW4	AOW5
		[ff.f %]	[ff.f %]	[ff.f %]	[ff.f %]	[ff.f %]
Integral	RMS	2.24	3.66	4.85	4.29	3.07
	MAX	6.30	11.19	13.40	9.86	12.71
	MIN	-8.98	-12.35	-12.80	-13.86	-11.19
	STD	2.21	3.56	4.81	3.62	4.06
Peak	RMS	2.22	3.87	4.80	4.23	2.79
	MAX	8.02	12.80	15.65	9.79	10.94
	MIN	-6.07	-6.63	-12.48	-11.69	-9.83
	STD	2.20	3.62	4.75	3.49	3.44
Fusion	RMS	1.80	3.28	4.44	3.90	2.76
	MAX	6.30	11.19	13.40	9.86	10.63
	MIN	-4.83	-8.04	-10.83	-11.49	-8.41
	STD	1.79	3.07	4.39	3.30	3.40

IV. 실차 주행시험 데이터 분석

본 연구에서 제시한 고속측중기의 중량환산 알고리즘의 개선안과 매트형 센서에 적용되는 융합형 알고리즘의 정확도 향상 효과를 분석하기 위하여 실차 주행시험을 수행하였다. 시험은 전라남도 묘도의 이순신대교 진입로에 설치된 ‘여수국가산단 진입도로 중차량 중량정보 관리시스템’을 활용하여 진행하였으며, 이 현장의 광양방향 상행은 매트타입 센서가, 여수방향 하행은 스트립타입 센서가 설치되어 있으며, 2018년 이설 평가 당시 모두 최상급의 등급평가를 받은 시스템이다.



<Fig. 7> Vehicle driving test overview

1. 시험방법

시험방법은 국가교통체계효율화법에서 제시하고 있는 ‘고속측중기 성능평가 기준’에서 명시한 평가방법을 준수하였다. 시험 차량은 5축 이상의 연결차량과 5축 이상의 단일차량을 선정하였으며, 총중량 및 조향축을 제외한 축하중이 모두 유효중량인 8톤을 넘도록 분동(分銅)을 적재하였다. 시험차량의 중량 기준값은 정

적인 상태에서 법정계량기인 정기검사(교정)를 받은 이동식 측중기를 이용하여 중량을 측정하였으며, 시험 시작 전과 종료 시 동일장소의 평탄한 곳에서 방향별 2회 측정하여 총 4회의 평균값을 사용하였다. 측정 시 평균값에서 각 회수 별 측정값 하중의 편차는 총중량 0.2%, 각 축하중 1.7% 이내로 편차 기준인 총중량 2.0%, 축하중 4.0% 이내를 만족하였다. 주행 시 단일차량의 경우 가변축이 장착된 차량은 가변축을 들어 올려 과적상태를 모사하여 평가하였으며, 주행속도의 경우 시스템이 설치된 도로의 최대 제한속도 +5% ~ 최소 제한속도 -5% 내에서 주행하도록 하였다. 정상주행 시, 도로 내 시공된 센서의 검지 구간 내에서 차선내에서 우밀착 주행과 중앙주행, 좌밀착 주행과 같이 주행위치를 조절하여 평가하였다. 시험주행 횟수는 시험차량별로 10회/차로를 주행하였다. 고속측중기의 중량정확도는 기준장비로 측정한 시험차량의 총중량 및 축하중(단일축하중 및 조합축하중)의 기준값과 고속측중기에서 측정된 시험차량의 총중량 및 축하중(단일축하중 및 조합축하중)의 중량값을 비교하여 평가하였다. 또한 조향축은 유효중량(운행제한기준의 80% 이상 중량, 축하중 8t 이상)이 아니므로, 정확도 평가에서 제외하였다. 시험 주행 전 매트타입 센서는 융합형 중량환산 알고리즘이 적용되었으며, 스트립 타입 센서는 기존 적분형 알고리즘만 활용하여 운영하였다.

<Table 2> Reference Vehicle Type 1

	GVW	AOW1	AOW2	AOW3	AOW4	AOW5
Reference Weight	38,775kg	7,275kg	8,650kg	11,463kg	11,388kg	
Measuring Error	< ±0.2%	< ±1.7%	< ±1.7%	< ±0.8%	< ±0.3%	
Photo						

<Table 3> Reference Vehicle Type 2

	GVW	AOW1	AOW2	AOW3	AOW4	AOW5
Reference Weight	40,575kg	6,950kg	8,675kg	8,425kg	8,263kg	8,263kg
Measuring Error	< ±0.2%	< ±1.4%	< ±0.3%	< ±0.3%	< ±0.2%	< ±1.1%
Photo						

2. 시험결과

1) 차량별 시험결과

실차 주행시험 결과는 아래 표와 같으며, 개선된 융합형 중량환산 알고리즘이 적용된 매트타입의 고속측중기는 스트립타입의 결과보다 더 정확한 측정결과가 나타났다. 특히 연결차량의 경우, 1, 2차선으로 나뉜

포장조건, 총중량, 축하중의 평가항목과 분석방법에 상관없이 모든 경우에서 스트립타입보다 매트타입이 더 높은 정확도를 확인하였다. 이는 차량길이가 긴 연결차량이 도로의 포장조건 및 주행조건에 대하여 더 많은 영향을 받지만, 융합형 중량환산 알고리즘이 이러한 발생 오차를 상쇄하기 때문으로 판단된다.

<Table 4> Strip Type System Test Result

Vehicle	Lane	Error Result	GVW	AOW2	AOW3	AOW4	AOW5
[Type]	[1/2]	[value]	[ff.f %]	[ff.f %]	[ff.f %]	[ff.f %]	[ff.f %]
Type 1	1	RMS	3.1%	5.4%	3.6%	3.2%	
		MAX	5.1%	9.0%	5.2%	0.1%	
		MIN	-1.9%	-1.0%	0.3%	-6.9%	
		STD	2.4%	3.4%	1.8%	2.1%	
	2	RMS	1.2%	2.2%	6.0%	5.9%	
		MAX	2.4%	-0.2%	8.1%	-3.6%	
		MIN	-0.3%	-3.4%	3.7%	-8.1%	
		STD	0.9%	1.1%	1.4%	1.6%	
Type 2	1	RMS	3.3%	6.2%	5.4%	5.1%	7.5%
		MAX	5.3%	11.6%	5.6%	8.7%	5.4%
		MIN	-3.2%	0.1%	-12.2%	2.8%	-13.3%
		STD	3.3%	3.6%	4.9%	2.0%	6.2%
	2	RMS	3.8%	4.0%	5.5%	8.1%	8.2%
		MAX	6.6%	6.1%	-0.8%	12.4%	13.4%
		MIN	-3.0%	1.1%	-12.0%	-0.5%	-3.3%
		STD	3.4%	1.4%	3.5%	5.2%	6.1%

<Table 5> Mat Type System Test Result (New Algorithm)

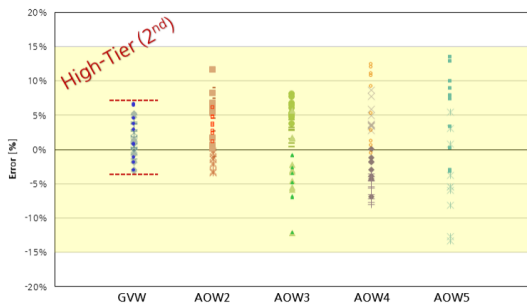
Vehicle	Lane	Error Result	GVW	AOW2	AOW3	AOW4	AOW5
[Type]	[1/2]	[value]	[ff.f %]	[ff.f %]	[ff.f %]	[ff.f %]	[ff.f %]
Type 1	1	RMS	0.6%	3.3%	3.1%	2.5%	
		MAX	0.5%	4.6%	-2.0%	-0.7%	
		MIN	-1.4%	1.7%	-3.8%	-3.2%	
		STD	0.6%	0.8%	0.6%	0.8%	
	2	RMS	2.3%	1.8%	3.6%	3.6%	
		MAX	2.4%	3.3%	4.2%	5.8%	
		MIN	-4.2%	-2.4%	-5.6%	-5.3%	
Type 2	1	RMS	1.6%	2.9%	4.5%	2.7%	3.2%
		MAX	2.6%	4.0%	6.7%	4.3%	5.7%
		MIN	-1.9%	-2.8%	1.5%	-5.5%	-4.2%
		STD	1.7%	2.9%	1.9%	2.9%	3.0%
	2	RMS	1.2%	2.3%	3.0%	2.0%	2.2%
		MAX	2.2%	7.4%	7.3%	0.5%	0.1%
		MIN	-1.9%	-1.3%	-0.1%	-3.3%	-3.2%
STD	1.0%	2.2%	1.9%	1.1%	1.0%		

2) 중량측정 정확도 분석결과

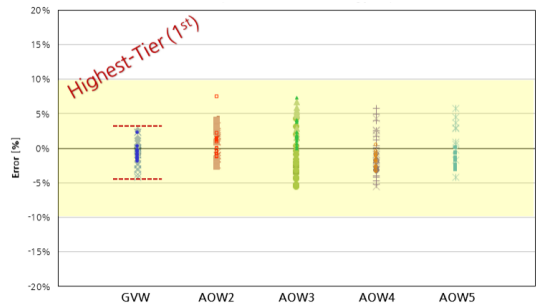
단일차량 및 연결차량에 대한 결과와, 1차로 및 2차로에 대한 모든 측정 결과를 토대로 중량측정 정확도를 분석하고 이를 기준으로 평가등급을 산정해보았다. 신규 알고리즘이 적용되지 않은 스트립타입의 고속측중기는 총중량의 경우 93.4%, 축하중의 경우 86.6%로 국내 기준 상급(총중량 95%, ≥93%, 축하중 90%, ≥85%)으로 나타났다. 개선된 융합형 중량환산 알고리즘이 적용된 매트타입의 고속측중기는 총중량의 경우 95.8%, 축하중의 경우 92.6%로 국내 기준 최상급(총중량 ≥95%, 축하중 ≥90%)으로 나타났다.

<Table 6> Driving Test Result Summary

Vehicle Type	Lane	Strip Type Error		Mat Type Error (New Algorithm)	
		GVW	AOW	GVW	AOW
1	1	< ±5.1%	< ±9.0%	< ±1.4%	< ±4.6%
	2	< ±2.4%	< ±8.1%	< ±4.2%	< ±5.8%
2	1	< ±5.3%	< ±13.3%	< ±2.6%	< ±6.7%
	2	< ±6.6%	< ±13.4%	< ±2.2%	< ±7.4%
Class		93.4%	86.6%	95.8%	92.6%
		High-Tier (2nd)		Highest-Tier (1st)	



<Fig. 8> Error rate of Strip Type System



<Fig. 9> Error rate of Mat Type System

V. 결 론

현행 대면 과적단속체계의 인력적 한계를 보완하고, 축 조작과 같은 회피 방법으로부터 단속 실효성을 확보하기 위해서는 고속측중기의 활용이 반드시 필요하다. 또한 향후 확대적용 될 스마트 톨링과의 연계 및 무인 과적단속 체계로의 전환을 위해서는 고속측중기의 중량 측정정확도를 향상시켜 법적 기준을 확보할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 고속측중기의 센서 타입에 따라 수행되는 기존 적분형 및 침두형 중량환산 알고리즘의 한계를 극복할 수 있는 개선 방향을 제시하고, 매트 타입형 고속측중기에 적용할 수 있는 새로운 융합형 알고리즘을 고안하여 정확도를 향상시키는 것을 목표로 하였다. 그리고 고안된 알고리즘을 운영현장에 적용하여 실차 주행시험을 수행하고 그 측정결과를 분석하여 그 효과를 확인하고자 하였다.

본 연구에서 고안한 융합형 중량환산 알고리즘은 다음과 같다. 먼저 적분형 알고리즘의 경우, 속도변수를 연산할 때 각 축별 속도를 별개로 추출하고 이를 적분형 알고리즘에 적용하는 개선방안을 고안하였다. 침두형 알고리즘의 경우, 차량의 응답신호를 1차 수집 후 진동 및 신호노이즈 주파수를 분석하여 저역필터로 제

거하고, 필터링된 2차 응답신호로부터 침두구간을 추출하여 평균값을 취하는 개선방안을 고안하였다. 또한 매트타입형 고속측중기는 침두형 뿐만 아니라 적분형 알고리즘도 모두 적용하여 중량환산 결과값을 취할 수 있으며, 이 경우 어느 결과값이 더 정확한 중량값인지 판단할 필요가 있는데, 검측연산결과 주행정보와, 차량제원정보, 중량측정정보를 데이터셋으로 활용하여 적분형과 침두형 알고리즘 중에 어느 결과값이 더 정확한 중량값인지 인공지능에 지도학습시키는 방법을 고안하였다. 그리고 적용결과를 확인하기 위하여 매트타입 및 스트립타입 고속측중기가 모두 설치되어 있는 국내 현장에서 실차 주행시험을 수행하였으며, 매트타입 센서의 고속측중기는 융합형 중량환산 알고리즘을 적용하고, 스트립타입 센서의 고속측중기는 기존 적분형 알고리즘만 활용하여 시험을 진행하였다. 실차 주행시험결과 개선된 융합형 중량환산 알고리즘이 적용된 매트타입의 고속측중기가 스트립타입의 결과보다 더 정확한 측정결과를 보였으며, 평가등급을 산정한 결과 매트타입의 고속측중기는 국내 기준 최상급으로, 신규 알고리즘이 적용되지 않은 스트립타입의 고속측중기는 국내 기준 상급으로 나타나 정확도 향상효과를 확인할 수 있었다. 한편, 고속측중기의 측정결과에 영향을 주는 인자로는 센서 타입과 중량환산 알고리즘 외에도 온도 및 포장조건 등의 외부환경 요인과 재하하중 및 시험차량의 종류와 주행조건 등의 시험환경 요인, 그리고 제어기 및 센서 운영기술에 대한 내부요인 등 다양한 영향인자가 존재한다. 따라서 본 시험결과에서 더 높은 정확도가 나타난 원인이 모두 융합형 알고리즘으로부터 기인한 것이라고 보기엔 무리이며, 이번 시험에서는 통계적 신뢰성을 뒷받침 할만큼 많은 데이터를 확보하지는 못하였다. 그러나 설치 직후 모두 최상급이었던 시스템이 노후화 영향에 스트립타입처럼 상급으로 강등된 것이 아니라 매트타입이 최상급으로 성능이 계속 유지되고 있다는 것은 고무적이며, 융합형 알고리즘을 적용한 효과가 일부 반영된 결과임에는 틀림없다. 이는 우리나라의 법정 단속기준을 반영하더라도 직접 단속이 가능한 수준이다.

매년 과적으로 인하여 손상된 도로포장 및 교량을 보수하는데 소요되는 약 324억원의 혈세를 보전하기 위해서는 효과적인 과적 단속을 수행하여 그 실효성을 확보하는 것이 중요하다. 현장에서 빈번하게 발생하는 축조작 및 주행 중 과적행위와 과적 차량들이 일삼았던 심야시간대 대면단속 감감이 회피 등은 대부분 고속측중기를 도입함으로써 단속 실효성 확보가 가능하다. 24시간 빈틈없이 촘촘한 무인 단속망을 유지하여 혐의차량을 효과적으로 선별할 수 있으며, 직접 단속을 하지 않더라도 경고장 및 계도 우편 발송 등으로 과적 운행에 대한 최소한의 경각심을 일깨우는 일도 가능하다. 혹은 전국에 설치된 고속측중기로부터 혐의운행 기록을 누적 분석하여 이동단속반에게 검차차량 블랙리스트를 제공함으로써 대면단속의 효율을 높일 수도 있다. 각 국토관리청 및 지자체에서 과적을 근절하기 위하여 고속측중기를 활용할 수 있도록 활용방안에 대한 세부지침 및 의무설치에 대한 근거를 제도적으로 마련하는 것이 필요하다. 2017년에는 도로상 화물자동차 과적근절 대책의 일환으로 국가통합교통체계효율화법 예하 자동차·도로교통분야 ITS 성능평가기준에 고속측중기(HS-WIM) 성능평가 기준이 신설되었지만, 제정 이후 아직까지도 고속측중기에 대한 활용 및 설치 규정에 대한 제도적 개선에는 어려움을 겪고 있다. 체코에서도 직접 단속법이 제정된 이후에도 실제 공용중 도로에서 고속측중기를 활용하여 직접 단속을 수행하기까지 무려 5년의 시간이 소요되었다. 우리나라도 최고 등급인 직접단속까지는 아직 넘어야할 단계가 많다는 것을 의미한다. 현행 과적단속대책의 실효성 확보 및 효율적인 단속을 도모하기 위해서는 최소한 신설도로의 교통량 조사결과에 과적운행 분석을 추가하여 고속측중기의 의무설치 여부를 판단하는 의무도입 검토단계를 추가하는 것이 우선적으로 필요하다. 의무 설치 후로는 고속측중기를 심분 활용할 수 있도록 각 도로관리청 및 지자체에 선별단속, 계도 우편발송, 경고장 송부 등 활용 세부 지침을 마련하여 단계적 도입의 초석을 다지는 것이 필요하다. 현재 ‘임의검차’ 수준의 단계에서 ‘통계 및 계획’, ‘사전 선별’을 넘어 ‘직접 단속’, ‘지능형 운영’까지 단계적 성장이 이루어질 수 있도록 제도적 뒷받침이 하루빨리 마련되길 기대한다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음. (과제번호 20CTAP-C151793-02)

REFERENCES

- Burnos P.(2017), “The Effect of Flexible Pavement Mechanics on the Accuracy of Axle Load Sensors in Vehicle Weigh in Motion Systems,” *Sensors*, vol. 17, no. 9, p.2053.
- Choi Y. H.(2016), “An Effectiveness Analysis of Pilot Enforcement for Overweight Vehicles(Trucks) using High-Speed Weigh-In-Motion System,” *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transportation Systems*, vol. 15, no. 2, pp.63-73.
- 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.
- Kim J. W.(2008), “Introduction on the Development of Dynamic WIM System for the Low/Medium Moving Speed using Superbeam Loadcell,” *International Journal of Highway Engineering*, vol. 10, no. 10, pp.493-497.
- Kim J. W.(2016), “Study on the Dynamic Load Monitoring Using the Instrumented Vehicle,” *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transportation Systems*, vol. 15, no. 5, pp.99-105.
- Kistler Eastern Europe, www.kistler.com, 2020.06.19.
- Korea Expressway Corporation(2012), *Status of overweight trucks on expressway*, pp.27-41.
- Kwon S. M.(2010), *Development and Implementation of High Speed Weigh-in-Motion System Using Double Diagonal Sensor Array for Overweight Enforcement*, Hanyang University Dept. of Transportation Engineering, pp.54-59.
- Kwon S. M.(2012), “Overloading Control Effectiveness of Overweight Enforcement System using High-Speed Weigh-In-Motion,” *International Journal of Highway Engineering*, vol. 14, no. 5, pp.179-188.
- Kwon S. M.(2012), “Technical Trends of Overweight Enforcement Using the HS-WIM,” *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, vol. 16, no. 02, pp.4-12.
- National Law Information Center, <http://www.law.go.kr/>, 2020.06.16.