비정상 주행패턴 분석을 통한 WIM 시스템 개선 연구

A Research for Improvement of WIM System by Abnormal Driving Patterns Analysis

박 제 우* 김 영 백** 정 경 호*** 안 광 선****
Park Je-U Kim Young Back Chung Kyung Ho Ahn Kwang Seon

요 약

WIM(Weigh-In-Motion) 시스템은 고속으로 이동 중인 차량의 무게를 측정하는 시스템이다. 기존의 WIM 시스템에서는 등속을 기준으로 차량의 무게를 측정하며 오차율이 10% 범위에 있다. 하지만 운전자의 가·감속 조작과 같은 비정상 주행패턴을 고려하고 있지 않으므로 실제 오차율은 더욱 크다. 이러한 오차를 최소화하기 위해서 비정상적인 주행패턴을 찾고 이를 적용한 개선된 WIM 시스템이 필요하다. 본 논문에서는 기존의 WIM 시스템의 오차율에 영향을 미치는 비정상 주행패턴을 분석하고 오차율을 최소화하는 개선된 WIM 시스템을 설계한다. 개선된 WIM 시스템은 기존의 시스템에 루프센서를 추가한 다단 루프 구조를 가진다. 또한 내부적으로 정의된 측정 함수를 개선하여 비정상 주행패턴별로 측정된 무게를 보정한다. 실험 분석 결과 개선된 WIM 시스템은 기존의 최대 평균 오차율 22.98% 에서 8% 미만으로 오차율이 감소한 사실을 알 수 있다.

ABSTRACT

WIM(Weigh-In-Motion) is the system measuring the weight of the vehicle with a high-speed. In the existing WIM system, vehicle weight is measured based on the constant speed and the error ratio has 10%. However, because of measuring the driving pattern, that is abnormal driving pattern which is like the acceleration and down-shift of the drivers, it has the error ratio which is bigger than the real. In order to it reduces the error ratio of WIM system, the improved WIM system needs to find the abnormal driving pattern. In order to reducing the error ratio of these WIM systems, the improved WIM system can find abnormal driving patterns. In this paper, the improved WIM system which analyzes the abnormality driving pattern influencing on the error ratio of WIM system of an existing and minimizes the error span is designed. The improved WIM system has the multi step loop structure of adding the loop sensor to an existing system. In addition, the measure function defined as an intrinsic is improved and the weight measured by the abnormal driving pattern is amended. The analysis of experiment result improved WIM system can know the fact that the error span reduces by 8% less than in the existing the maximum average sampling error 22.98%.

☞ KeyWords : Intelligent Transportation System, WIM System, Driving Pattern, Multi Step Loop, 지능형 교통망, 윔, 주행패턴

1. 서 론

WIM(Weigh-In-Motion) 시스템은 도로에 이동 중인 화물 차량의 차종, 속도, 무게를 측정하여 고속으로 이동 중인 차축의 무게를 측정하는 시스템이다. WIM 시스템은 도로 및 교량의 유지보수를 위한 과적단속에도 사용되며 미국, 일본, 중국, 네덜란드 등 70개국 이상의 나라에서 사용한다. WIM 시스템은 WIM과 BWIM(Bridge Weigh-In-Motion)으로 구분하며 일반도로에는 WIM을 설치하여 무게를 측정한다.[1] 국내에서는 정적 측정방법을 통해 측정된 차량의 총중량과

* 정 회 원 : 경북대학교 컴퓨터공학과 박사수료
jeup@knu.ac.kr
** 준 회 원 : 한국전자통신연구원 선임연구원
realtech@etri.re.kr
*** 정 회 원 : 경운대학교 컴퓨터공학과 교수
mccart@knu.ac.kr
**** 정 회 원 : 경북대학교 컴퓨터공학과 교수
gsahn@knu.ac.kr(교신저자)
[2010/02/05 투고 - 2010/02/11 심사(2010/06/04 2차) - 2010/06/14 심사완료]

축의 중량을 기준으로 차량 무게를 판정한다. 정적 측정 방식의 경우 과적 차량을 정지하여 이동식 축중기에 의해 수작업 형태로 차량의 무게를 측정한다. 하지만 많은 시간과 인력이 필요하며 글로벌 ITS(Intelligent Transportation System)와의 호환성이 부족하다는 단점이 있다.

기존의 WIM 시스템은 과적 검문소(Weigh Station) 전방에 설치되어 있으며 과적 차량이 통과할 때 경고음이 발생한 차량을 카메라로 확인한 후 차량을 이동식 축중기로 재 측정하는 보조 장비의 역할을 하고 있다. 하지만 기존의 WIM 시스템은 비정상적인 주행패턴을 고려하지 않기 때문에 오차가 크게 발생 할 수 있다. 이러한 오차는 운전자가 측정을 피하기 위한 비정상적인 주행패턴에 따라 차이가 있으며 등속을 기준으로 무게를 측정하는 경우 오차가 더욱 크게 발생한다. 따라서 WIM 시스템을 주 단속 장비로 활용되기 위해서는 이러한 오차를 최소화할 필요가 있다. 본 논문에서는 가·감속 조작과 같은 비정상적인 주행패턴을 분석하여 오차율을 줄이기 위한 방안을 제시한다. 또한 기존의 시스템에 루프센서를 추가한 다단 루프 구조를 가진 개선된 WIM 시스템을 설계한다. 시스템의 분석 평가는 기존의 시스템과 개선된 시스템의 가변속도 정보를 이용하여 주행패턴별 측정무게의 오차율을 비교분석한다.

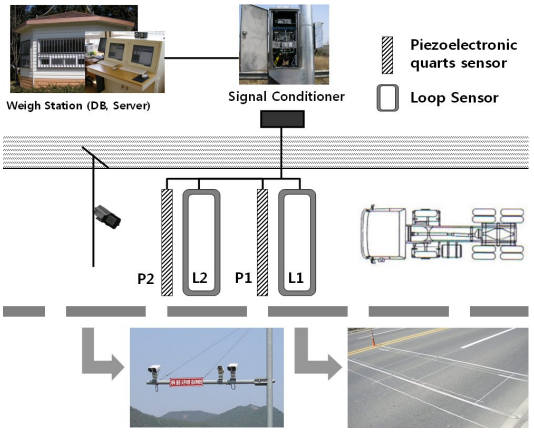
본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기존의 WIM 시스템과 관련한 연구와 문제점을 살펴보고 3장에서는 비정상 주행패턴을 분류하고 개선된 WIM 시스템의 구조를 기술하고 4장에서는 개선된 시스템의 효율성을 위해 실험 분석한다. 마지막으로 5장에서는 결론을 맺는다.

2. 관련 연구

관련 연구에서는 기존의 WIM 시스템의 구조와 이동 차량의 무게를 측정하기 위해 필요한 루프 검지기 및 피에조센서, 마찰 계수에 대해 기술한다. 또한 이를 바탕으로 기존 WIM 시스템의 문제점을 살펴본다.

2.1 WIM 시스템 구조

WIM 시스템은 주행 중인 차량의 총 무게와 각 차축의 무게를 측정하는 장치로서 미국, 일본, 한국, 네덜란드 등의 여러 나라에서 도로포장 및 교량보호, 교통관리 등에 활용하고 있다.[2][3] 또한 WIM 시스템은 과적 차량을 단속하기 위한 목적으로 이용되기도 한다. 도로나 다리에서의 과적차량은 안전한 교통흐름을 방해하거나 수명을 단축시키는 원인이 되므로 과적 차량 단속은 매우 필요하다.[4][5] 따라서 과적 차량을 단속하기 위한 인력과 비용, 안전을 고려할 필요가 있다. 한국, 미국, 일본, 독일, 영국 등은 과적단속 대상 차량을 사전 선별하는 보조 장비로 WIM 시스템을 활용하고 있다. 그림 1은 기존 WIM 시스템의 구조와 센서 배치도를 보여준다.



(그림 1) 기존 WIM 시스템의 구조도와 센서 배치도

WIM 시스템의 구조는 크게 차량의 무게를 측정하기 위한 피에조 센서, 루프센서, 카메라 그리고 이를 관리하고 모니터링 하기 위한 서버들로 구성된다.[6] 그림 1은 기존 WIM 시스템의 센서 배치와 센서로 측정된 정보를 수집하고 분석하기 위한 시스템 구조이다. $P1$과 $P2$는 피에조 센서

를 나타내며 $L1$과 $L2$는 루프 센서를 나타낸다. 루프센서는 차량 감지를 위해서 사용되며 피에조 센서는 차량축의 무게를 측정하기 위한 센서로 사용된다. 두 가지 센서는 1개나 2개로 이루어지며 도로면에 매설되어 차량이 지나갈 때 무게를 감지한다. 센서는 루프센서와 피에조센서 외에 무게 측정에 영향을 미치는 온도와 습도, 풍향, 풍속 등을 감지할 수 있는 센서를 갖추고 있어서 주변 정보를 수집하여 서버를 통해 관리가 된다. 카메라는 과적차량을 감시하기 위한 용도로 사용되며 그 밖에 과적 검문소에 알람을 제공하는 워치독(Watch dog) 기능 등이 포함된다.

2.2 루프센서와 피에조센서

WIM 시스템에서 무게 측정의 가장 중요한 요소는 루프센서와 피에조센서이다. 루프센서의 동작은 도로면 내부에 루프센서 코일을 매설하고 단면적 내에 차량이 접근하면 자속 내에 인덕턴스의 변화를 주는 원리를 이용하여 주파수의 변화량을 검출하여 차량의 통과를 감지하는 원리를 이용한다.[7] 루프센서는 일정간격으로 두 개 이상 배치하면 차종과 차속을 구분할 수 있다. 루프센서를 활용하는 대표적인 장치로서 AVC(Automatic Vehicle Classifier)장치를 들 수 있다. AVC장치는 루프센서를 사용하여 차종을 구분하는데 사용한다. 루프센서 코일은 루프검지기 회로의 발진소자와 결합하여 일정한 전기적 특성을 나타낸다. 루프 검지기의 발진주파수는 차량이 접근하지 않을 때 최저 31.24KHz로 나타나며 접근했을 때 31.94KHz로 나타내므로 주파수의 변화폭은 약 720Hz이다. 루프센서 코일과 디텍터 사이의 매칭주파수(F_o)는 식 ①과 같다. La는 루프센서 인덕턴스, Lb는 인입선의 인덕턴스, Lc는 동조코일 인덕턴스이다. C와 Cs는 부유총량을 나타낸다.

$$F_0[Hz] = \frac{1}{\sqrt{(La+Lb+Lc)\times(C+C_s)}} = \frac{1}{2\Pi\sqrt{LC}} \quad ①$$

피에조센서는 차량축의 무게를 측정하기 위한 센서이다. 무게를 감지하는 센서에는 로드 셀 방식과 밴드플레이트 방식이 주로 이용되어 왔다. 최근에는 압력센서의 일종인 피에조 쿼츠 센서가 많이 이용된다. 피에조 쿼츠 센서의 대표적인 것으로 키슬러(Kistler)사의 리니어스(Lineas) 센서가 있다.[8] 이 센서는 폭이 작고 온도변화와 자기장에 변화가 적으며 측력(Lateral Force)과 전력(Horizontal Force)을 제외하기 때문에 하중만을 측정하는데 유리하다. 따라서 기존의 WIM 시스템 무게 센서로 많이 사용한다. 식 ②, ③, ④, ⑤는 리니어스 센서의 증폭범위(CAS : Charge Amplifier Sensitivity)에 대한 감도식과 차축의 무게(Axles Force), 피에조센서의 출력 전압, 휠로드(Wheel Load)에 대한 식이다.

$$CAS = \frac{1.8pC}{N} \times \frac{5V}{60{,}000pC} = 0.15mV/N \quad ②$$

$$AF = TIP \times TW \times SW \quad ③$$

$$VO = AF \times SL \times RA \quad ④$$

$$WL = (VV/SW) \times PA \times CC \quad ⑤$$

차축의 무게(AF : Axles Force)는 타이어압(TIP : Tire Inflation Pressure)과 타이어폭(TW : Tire Width) 그리고 센서폭(SW : Sensor Width)에 의해 결정되며 피에조센서에서 출력되는 전압(VO)은 차축무게(AF), 센서감도(SL : Sensor Lineas), 증폭범위(CAS)로 계산된다. 휠로드(WL)는 차량속도(VV : Vehicle Velocity), 센서폭(SW), 면적에 대한 적분값(PA : Product of Area), 조정상수(CC : Calibration Constant)로 계산된다. 이때 조정상수 값은 차량의 종류에 따라 결정되며 이 값에 의해 휠로드 값이 정해진다. 휠로드는 축의 무게를 결정하는 중요한 원인이 된다.

2.3 마찰력

WIM 시스템에서는 노면과 타이어의 마찰력이 중요한 변수로 작용한다. 마찰력은 주행하던 차량이 가·감속하는 과정에서 도로와 타이어 접지면

마찰에 의해 발생하며 도로와 타이어의 상태에 따라 다르게 나타난다. 차량의 가 · 감속하는 과정에서의 순간속도는 식 ⑥과 같이 표현할 수 있다. 식 ⑦은 식 ⑥을 통해 얻어진 현재 측정 시점의 이전속도를 표현한 것이다.

$$\frac{1}{2}mv_1^2 = \mu mgs + \frac{1}{2}mv_2^2 \quad ⑥$$

$$v1 = \sqrt{2\mu gs + v_2^2} \quad ⑦$$

시스템에 적용된 마찰계수 μ는 차량의 가 · 감속에 영향을 미치는 값으로 대형차의 경우는 브레이크 효율이 승용차 브레이크 효율의 70~80%이므로 승용차에 적용되는 마찰계수의 80%를 적용한다. 표 1은 미 교통사고 조사위원회의 이론적인 최대 마찰력을 바탕으로 노면과 습도를 고려한 한계 마찰계수를 나타낸 것이다.[9]

(표 1) 트럭에 미치는 마찰 계수

제동속도 / 노면상태	건조한 도로의 경우		젖은 도로의 경우	
	48km/h 이하	48km/h 이상	48km/h 이하	48km/h 이상
콘크리트	0.6	0.52	0.52	0.48
아스팔트	0.6	0.52	0.52	0.48

2.4 과적 차량 측정방법

기존의 과적 차량 측정방식은 크게 정적인 방식과 동적인 방식으로 구분할 수 있다. 정적인 방식의 경우 과적 차량을 정지하여 이동식 축중기에 의해 수작업 형태로 차량의 무게를 측정한다. 이 경우 실제 과적 차량 단속은 안전과 많은 인력을 요구하게 되어 비효율적이다. 동적인 방식의 경우 WIM 시스템을 측정 지역에 설치하여 차량이 통과 할 때 루프센서와 피에조센서, 카메라를 이용하여 차량의 무게를 실시간 자동으로 측정한다. 이 방식은 도로 및 교통관리 등에 활용하고 있으며 과적 차량을 단속하기 위한 목적으로 이용하기도 한다.

과적 차량 측정의 경우 측정 지역 전방에 설치되어 있는 WIM 시스템의 워치독 기능에 의해 차량을 카메라로 확인한 후 대상 차량을 정지하여 이동식 축중기로 재 측정하는 방법을 많이 사용한다. 국내의 과적단속 기준은 화물차의 축 당 무게가 10톤 이하이며, 무게 계측장치의 오차범위 10%를 포함한 11톤 이상을 법으로 규정하고 있다. 그리고 차량의 총중량은 40톤 이하이며 오차를 포함한 44톤 이상을 단속 기준으로 규정하고 있다. 기존의 WIM 시스템은 등속을 기준으로 무게를 측정하는 경우 10% 범위 내에서 정확도가 나타난다. 하지만 운전자의 비정상 가 · 감속 조작에 의한 주행패턴을 고려하고 있지 않으므로 실제 측정 오차는 크게 발생 할 수 있다. 따라서 WIM 시스템을 주 단속 장비로 활용되기 위해서는 이러한 오차를 최소화할 필요가 있다.

2.5 측정 오차 분석

차량 무게 측정에서의 오차의 원인은 여러 가지로 분석될 수 있다. 대표적으로 화물 적재 시 운전의 편의와 차량구조에 따라서 차량의 무게 중심을 뒤로 할 수 있다. 이 경우 차량이 감속할 때 차의 무게 중심이 앞으로 편중되므로 정적인 측정과 비교할 때 조향축의 무게는 늘어나며 템템축의 무게는 줄어든다. 이 사실은 운전자의 비정상적인 주행패턴에 따라 오차의 범위가 가변적이라는 사실을 보여준다. 표 2는 대표 차종에 따른 축의 무게 분배율을 나타낸다.[10][11]

(표 2) 대표차종 축의 무게 분배율

차종	축의 무게 분배율 (%)					
	1축	2축	3축	4축	5축	6축
40	35~38	62~65	-	-	-	-
50	22~28	36~39	36~39	-	-	-
60	20~23	18~23	27~31	27~31	-	-
70	20	17	21	21	21	-
81	11~15	27~38	25~29	25~29	-	-
91	8 ~14	17~21	17~21	24~26	24~26	-
92	10.5	20	20	16.5	16.5	16.5
41	16~19	28~33	24~28	24~28	-	-
51	16	19~22	19~22	20~23	20~23	-

대표 차종에 따른 축의 종류는 여러 가지가 있으며 표 2에서는 6가지 축을 차종별로 분류하여 차량 무게에 따른 축의 분배율을 보여준다. 예를 들어 50번 차종의 경우 1축은 조향축이 되고 2축, 3축은 템덤축이다. 1축의 축의 무게 변화 비율은 22~28%를 나타내고 있으며 2, 3축은 36~39%를 나타내고 있다. 이 사실은 템덤축의 무게 비율이 크다는 사실을 보여준다. 이와 같이 무게 비율은 차종에 따라 다양하게 나타나며 적재형태에 따라서 조금의 차이를 보일 수 있다. 여기에 비정상적인 패턴을 고려하면 축의 무게 분배율이 변하게 되어 오차는 더욱 커질 수 있다. 그림 2는 실제 WIM 시스템에서 측정된 실측 자료의 내용을 보여준다.

(그림 2) WIM 시스템의 실측 자료화면

그림 2에서 나타난 차종의 실측 자료의 경우 카메라에 포착된 이미지를 통해 차종을 파악할 수 있다. 따라서 차종에 따른 축의 무게 분배율을 기준으로 하여 각 축의 초과 값을 분석하면 과적 차량의 비정상 주행 여부를 판단 할 수 있다. 과적 차량 측정에서 또 다른 오차의 원인은 등감속과 등가속의 상태에서도 나타난다. 국내는 각 축의 무게와 전체 중량을 기준으로 무게를 제한하고 있으며 중국이나 일부 국가에서는 차량 총중량을 기준으로 과적 차량의 무게를 측정한다. 총중량을 기준으로 측정할 경우 등감속이나 등가속 상태에서도 적은 오차를 보인다. 이것은 속도의 기울기가 변하더라도 무게 센서의 한 점을 기준으로 통과하는 전체 무게 값의 오차가 적기 때문이다. 하지만 각 축의 무게를 측정 기준으로 볼 때 등감속이나 등가속 상태에서는 오차가 커질 수 있다. 따라서 총 중량을 기준으로 측정하는 것은 각 축의 편중편차를 고려하지 않았기 때문에 정확한 정보가 아니다. Hesham Rakha은 WIM TypeⅢ 시스템의 정확도를 분석하기 위해 피에조 센서간의 표준편차를 구하고 약 16% 축의 오차를 나타냈다.[12] 식 ⑧, ⑨는 차중의 표준편차 σ_τ를 이용하여 총 차량의 무게 변화 계수 cov_τ를 나타낸 것이다.

$$\sigma_\tau = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\sigma_i^2} = \sqrt{n}\,\sigma_i \qquad ⑧$$

$$cov_\tau = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\sigma_i^2}}{E\left(\sum_{i=1}^{n}w_i\right)} = \frac{\sqrt{n}\,\sigma_i}{n\overline{w}} = \frac{\sigma_i}{\sqrt{n}\,\overline{w_i}} = \frac{cov_i}{\sqrt{n}} \qquad ⑨$$

하지만 Hesham Rakha의 논문에서는 가·감속 같은 비정상적인 주행패턴의 상태를 고려하고 있지 않다. 차량의 토크 값과 무게는 가속에 영향을 주며, 마찰계수는 감속에 영향을 준다. 따라서 차량의 토크 값과 마찰계수를 이용한 비정상적인 주행패턴을 고려하지 않고 차량과 차축의 무게를 측정하면 큰 오차가 발생할 수 있다. 이러한 오차를 줄이기 위하여 구간속도를 수집하고 주행패턴에 따른 계산 구조로 변경할 필요가 있다.

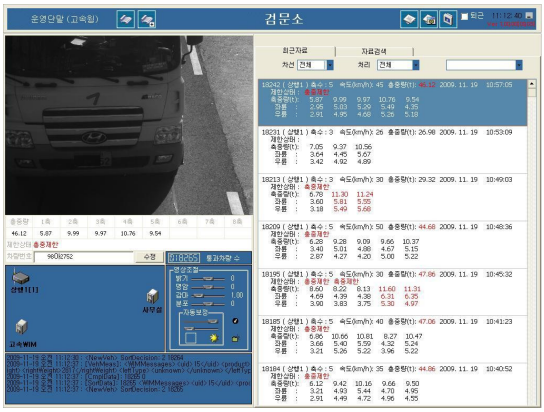
3. 비정상 주행패턴 분석을 통한 개선된 WIM 시스템

기존의 WIM 시스템은 비정상적인 주행패턴을 고려하지 않기 때문에 측정 오차율이 크게 발생할 수 있다. 따라서 비정상 주행패턴의 분석은 측정 오차를 줄이기 위한 중요한 연구 자료가 된다.

3장에서는 이러한 비정상 주행패턴을 구체적으로 분석하고 측정 무게를 보정하는 함수를 제시한다. 또한 이를 바탕으로 기존의 WIM 시스템의 구조를 개선한 시스템을 설계한다.

3.1 비정상 주행패턴 분류

현재 과적 차량의 무게는 대부분 등속을 기준으로 측정하며 차량의 속도가 일정한 상태에서 측정이 이루어진다. 하지만 등속 측정은 온도와 습도 및 풍향 등의 주변 환경에 의해 센서의 오차가 발생 할 수 있으며 타이어 압력 및 차량 서스펜스와 같은 차량 상태에 따른 오차도 발생 할 수 있다. 이러한 오차는 일반적으로 10% 범위를 보통 인정한다. 하지만 측정을 피하기 위한 과적 차량 운전자의 인위적인 주행조작은 고려하고 있지 않기 때문에 오차범위는 더욱 늘어 날 수 있다. 본 논문에서는 이러한 운전자의 인위적인 주행조작을 비정상적인 주행패턴으로 정의하고 실측 데이터 분석을 토대로 주행패턴에 따른 오차율을 제시한다. 그림 3은 기존의 WIM 시스템에서 운영중인 실측 자료를 화면으로 보여준다.



(그림 3) 실측 자료 수집 화면

비정상적인 주행패턴을 분석하기 위한 주요 정보는 차량의 총중량, 각 축의 무게, 주행속도로 볼 수 있다. 이러한 정보들을 토대로 차량의 조향축과 템템축의 그룹으로 각 축의 무게 분배율을 구하여 비정상 주행패턴 분류 할 수 있다. 표 3은 6개월간 축적된 자료를 추출하고 실측 데이터와 차량의 정적 데이터를 비교 분석하여 분류한 비정상 주행패턴과 오차의 원인을 나타낸다.

(표 3) 주행패턴 분류와 오차의 원인

주행패턴	주행모션	오차 원인
1	등속 운행	정상
2	조향축이 무게 센서 앞에서 급 가속	축 무게 분배율이 템템축에 편중
3	조향축이 무게 센서 앞에서 급 감속	축 무게 분배율이 조향축에 편중
4	템템축이 무게 센서 앞에서 급 가속	템템축 무게의 증가
5	템템축이 무게 센서 앞에서 급 감속	템템축 무게의 감소
6	조향축이 무게 센서 앞에서 급 가속 템템축이 무게 센서 앞에서 급 감속	조향축 및 템템축 무게의 감소

비정상 주행패턴은 운전자의 인위적인 주행조작으로 인해서 나타나는 형태이다. 실제로 비정상 주행패턴은 등속 주행과 비교할 때 무게 센서의 전방에서 속도변화를 일으킨다. 속도변화는 차량의 관성 에너지가 차량의 무게 중심을 순간적으로 이동시키므로 각 축의 무게 분배율을 왜곡 시킨다. 결과적으로 비정상 주행패턴은 측정 오차의 큰 원인으로 나타난다.

본 논문에서는 주행패턴을 정상인 경우를 포함하여 총 6가지로 분류한다. 주행패턴 1은 등속 주행의 정상적인 주행패턴을 의미하고 주행패턴 2에서 6까지는 비정상적인 주행패턴을 나타낸다. 주행패턴 2는 운전자가 무게센서 앞에서 차량을 급 가속하는 경우이며, 템템축의 무게는 감소하나 템템축의 무게는 증가한다. 주행패턴 3은 운전자가 무게센서 앞에서 차량을 급 감속 하는 경우이며 조향축의 무게는 증가하고 템템축의 무게는

감소한다. 주행패턴 4는 차량의 조향축이 무게센서를 지난 후 급 가속하는 경우이며 템뎀축의 무게가 증가한다. 주행패턴 5는 차량의 조향축이 무게센서를 지난 후 급 감속하는 경우이며 조향축은 변화가 적으나 템뎀축은 무게가 감속정도에 따라 감소한다. 주행패턴 6은 주행패턴 2와 5의 경우를 순차적으로 시도할 때 나타나며 조향축과 템뎀축의 무게가 감소하며 차량속도가 48km/h 미만인 경우에 나타난다.

3.2 비정상 주행패턴 오차 분석

비정상 주행 패턴에 따른 오차를 분석하기 위하여 실험 대상 차량은 자루에 담긴 모래를 적재한 25톤 화물차를 대상으로 실시하였다. 먼저 과적 차량의 차량 총 무게와 각 축의 무게를 정적으로 측정하고 기존 WIM 시스템이 설치된 구간을 주행패턴 분류에 따라서 각 10회 반복 운행하여 무게를 측정하였다.

(표 4) 기존의 측정방식에 따른 무게의 평균(kg)

주행패턴	1축	2축	3축	총중량
정적무게	7,968	8,655	8,674	25,297
1	8,133	8,792	8,870	25,795
2	6,873	9,664	9,732	26,269
3	9,549	7,263	7,461	24,273
4	8,290	9,701	9,891	27,882
5	8,012	7,038	7,163	22,213
6	6,669	7,823	7,754	22,246

표 4의 정적무게는 첫 번째 측정한 정적인 측정방식에 의해 구해진 값이며 주행패턴 1은 등속 주행의 측정값을 속도에 따라 보정한 자료이다. 주행패턴 2에서 6까지는 WIM 시스템을 통해 측정된 자료를 비정상 주행패턴별로 구한 무게의 평균이다. 1축은 조향축의 무게를 나타내며 2축, 3축은 템뎀축의 무게를 나타낸다. 표 5는 표 4의 자료를 바탕으로 각 축의 무게와 총중량을 각 주행패턴에 따라 정적 무게와의 평균 오차율을 구분하여 나타낸 것이다.

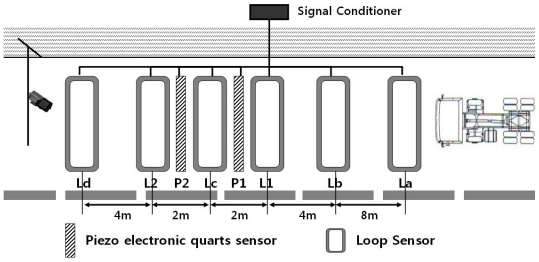
(표 5) 기존 시스템에서 각 주행패턴별 축과 총중량 평균오차율

주행패턴	1축	2축	3축	총중량
1	2.03%	1.56%	2.21%	1.93%
2	-15.93%	10.44%	10.87%	3.70%
3	16.56%	-19.17%	-16.26%	-4.22%
4	3.88%	10.78%	12.30%	9.27%
5	0.55%	-22.98%	-21.09%	-13.88%
6	-19.48%	-10.64%	-11.86%	-13.71%

Hesham Rakha의 논문에서는 각 축의 무게 편차는 ±16%로 나타내고 있으며 총중량의 편차는 ±6%로 기술하고 있다. 이것은 식 ⑧, ⑨의 방법으로 측정 구간의 평균 속도 기준에 의해서 산출한 결과이다. 하지만 Hesham Rakha는 표 3에서 나타난 주행패턴 1에서 6까지의 경우를 모두 고려한 것은 아니다. 실제 주행패턴 1의 경우 등속 주행을 평균 속도를 기준으로 산출하였기 때문에 각 축의 무게와 총중량의 오차는 오히려 3%내로 줄었다. 표 5에서 주행패턴 5의 경우 2축에서의 평균 오차율은 약 23%의 결과를 보이고 있다. 이것은 측정 지점에서 조향축이 통과한 후 운전자에 의해 템뎀축이 급감소하는 경우이며 템뎀축의 무게가 크게 감소했기 때문에 오차율이 커지는 경우 이다. 따라서 주행패턴 2에서 6까지를 분석해 볼 때 오차율은 각기 다르게 나타나므로 각 주행패턴에 따른 속도변화를 고려하여 차량의 무게를 측정하는 것이 중요하다.

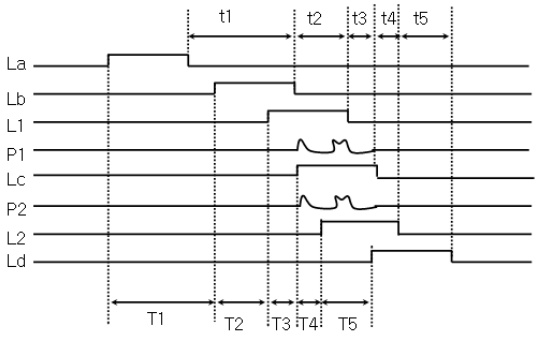
3.3 개선된 WIM 시스템의 구조

개선된 WIM 시스템은 기존 WIM 시스템의 비정상 주행패턴에 따른 오차를 최소화하기 위하여 제안된 시스템이다. 무게 측정은 내부적으로 정의된 측정 함수에 의해 산출되며 이러한 함수를 개선하면 오차가 감소한다. 개선하는 함수는 각 구간별 속도를 이용하여 보정 계수를 구하고 적용하여 정확한 측정을 보장한다. 그림 4는 개선된 WIM 시스템의 구조를 나타낸다.



(그림 4) 개선된 WIM 시스템 구조도

개선된 시스템은 기존 $L1, L2$ 2개의 루프센서에 La, Lb, Lc, Ld 4개의 루프센서를 추가하여 속도 변화를 구한다. 기존의 시스템에서는 $L1, L2$를 이용하여 2개 구간의 속도 변화만을 얻을 수 있었다. 하지만 무게 센서 값에 영향을 미치는 비정상 주행패턴을 구분하기에는 부족하다. 따라서 각 측정 구간별 속도를 측정하기 위해 무게센서를 중심으로 간격을 2배수로 루프센서를 배치하여 가 · 감속 상태를 판정한다. 이때 총 5개의 루프센서간의 구간에서 측정된 신호의 상승 에지(Rising Edge)와 하강 에지(Falling Edge)를 이용하여 10개의 구간별 반발계수 파라미터를 얻는다. 이 파라미터는 6개의 주행패턴별로 무게센서 P1과 P2에서 얻어진 측정값을 보정한다. 그림 5는 그림 4의 구조에서 얻어지는 타이밍도이며 그림 6은 실험용 루프 센서가 설치된 모습을 보여준다.



(그림 5) 개선된 WIM 시스템의 타이밍도

(그림 6) 설치된 루프센서

그림 5에서 $T1$에서 $T5$는 루프센서 신호의 상승 에지를 이용하여 다음 루프센서 신호와의 지연시간을 나타낸다. $t1$에서 $t5$는 루프센서 신호의 하강 에지를 이용하여 다음 루프센서 신호와의 지연시간을 나타낸다. 각 신호의 레벨 길이는 등속일 경우 일정하다. 그러나 차량이 가속으로 루프센서를 통과할 경우 짧게 나타나며, 감속으로 통과 할 경우 길게 나타난다. 즉 루프센서 신호의 상승 에지는 차량 앞부분의 통과를 나타내며 하강 에지는 차량 뒷부분을 나타낸다. 이렇게 추출된 10개의 구간별 반발계수 파라미터를 이용하여 주행패턴을 판정한다. $P1$과 $P2$는 피에조센서의 신호변화를 나타낸 것이다. 여기에서 추출된 보정계수를 이용하여 $P1$과 $P2$의 피에조센서 무게값 변화를 조향축과 템뎀축의 보정계수로 조정하면 더 나은 결과를 얻을 수 있다.

3.4 오차를 줄이기 위한 보정 함수

WIM 시스템에서 이동 중인 차량의 무게 측정은 각 차량의 정적 무게를 기준으로 속도에 따라 상대적 무게를 판정하는 방식으로 운영된다. 또한 무게 측정은 내부적으로 정의된 측정 함수를 이용한다. 이러한 함수의 중요 요소는 속도와 무게이며 속도 변화에 따른 편중편차를 해결하기 위하여 조향축과 템뎀축 그룹간 변화요인을 함수화할 필요가 있다. 본 논문에서는 개선된 시스템에

사용되는 보정 함수를 제시한다. 보정 함수에 의해 계산된 보정 계수(Q)는 오차를 줄이기 위한 방안으로 속도 측정 구간별 반발계수와 비정상 주행패턴별 조정상수를 고려하여 구해진다. 또한 조향축 무게의 평균값(FA)과 템뎀축 무게의 평균값(TA)이 이용된다. 다음의 식 ⑩, ⑪은 조향축 무게의 평균과 템뎀축 무게의 평균을 나타낸다. FWL은 조향축 휠로드를 나타내며 TWL은 템뎀축 휠로드를 나타낸다.

$$FA = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} FWL \quad ⑩$$

$$TA = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} TWL \quad ⑪$$

식 ⑫는 각 구간별 반발계수를 나타내며 식 ⑬은 보정계수 Q를 구하는 보정 함수이다. c_i는 수집된 데이터를 분석하여 얻은 주행패턴에 따른 조정상수를 나타내며 e_j는 구간별 반발계수를 나타낸다.

$$e_{(n)} = \frac{V_{(n)}}{V_{(n-1)}} \quad ⑫$$

$$Q = c_i \times e_j \times \frac{FA}{TA} \quad ⑬$$

만약 $e_{(n)} = 1$ 이면 등속을 나타내고 가변속도 $\Delta V = 0$가 되며 축 무게의 비율변화가 없으므로 측정된 값들을 위치에 따른 영향선에 따라 속도에 보정하여 계산한다. $e_{(n)} > 1$ 이면 가속이며 가변속도 $\Delta V_{(n)}$>0 가되며 템뎀축은 $FA \times Q$이 되고 템뎀축은 $TA \times (1/Q)$이 된다. $\Delta V_{(n)} < 0$ 이면 감속이며 템뎀축은 $FA \times (1/Q)$이 되고 템뎀축은 $TA \times Q$로 된다.

4. 시스템 분석 및 평가

시스템의 분석 및 평가는 기존의 WIM 시스템에서 측정한 차량의 무게와 개선된 WIM 시스템에서 측정한 차량의 무게를 비정상 주행패턴별로 각 축의 오차율을 비교하여 이루어 졌다. 실험 방법은 자루에 담긴 모래를 적재한 25톤 화물차를 대상으로 차량의 차량 총 무게와 각 축의 무게를 정적으로 측정한 후 기존의 시스템과 개선된 시스템에서 동일하게 각 10회 반복 운행하여 무게를 측정하였다.

4.1 개선된 WIM 시스템의 오차율 분석

개선된 WIM 시스템은 기존 시스템 방식에 비정상 주행패턴을 고려한 보정 계수를 적용하여 설계하였다. 따라서 개선된 시스템을 이용한 차량의 무게 측정은 기존의 측정 방식과 동일하다. 그림 7은 정적인 무게 측정 과정을 보여주고 있으며 그림 8은 주행 중인 차량의 무게를 측정하는 모습이다. 표 6은 두 가지 무게 측정 방법에 따라 산출된 무게의 평균 결과이다.

(그림 7) 정적인 무게 측정 모습

(그림 8) 주행 중 차량의 무게 측정 모습

(표 6) 개선된 측정방식에 따른 무게의 평균(kg)

주행패턴	1축	2축	3축	총중량
정적무게	7,968	8,655	8,674	25,297
1	8,124	8,802	8,852	25,778
2	7,491	9,117	9,203	25,811
3	8,556	8,112	8,121	24,789
4	8,181	9,073	9,129	26,383
5	7,806	8,029	8,096	23,931
6	7,404	8,197	8,123	23,724

표 6에서 주행패턴은 정적 측정 방식에 따른 차량의 정적무게와 비정상 주행패턴들로 분류하며 조향축 무게를 나타내는 1축과 템뎀축 무게를 나타내는 2, 3축으로 구분한다. 표 7은 표 6에서 나타난 정적무게와 주행패턴별 무게와의 편차를 통해 각 축과 총중량의 평균오차율을 나타낸다.

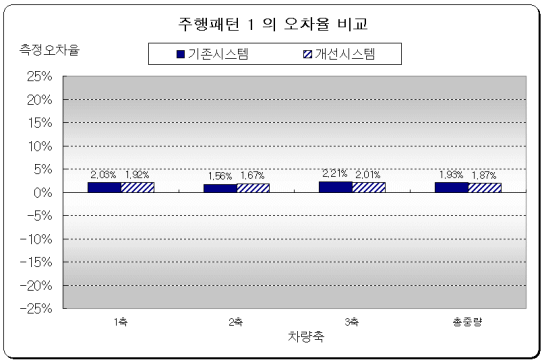
(표 7) 개선된 시스템에서 각 주행패턴별 축과 총중량 평균오차율

주행패턴	1축	2축	3축	총중량
1	1.92%	1.67%	2.01%	1.87%
2	-6.37%	5.07%	5.75%	1.99%
3	6.87%	-6.69%	-6.81%	-2.05%
4	2.60%	4.61%	4.98%	4.12%
5	-2.08%	-7.80%	-7.14%	-5.71%
6	-7.62%	-5.59%	-6.78%	-6.63%

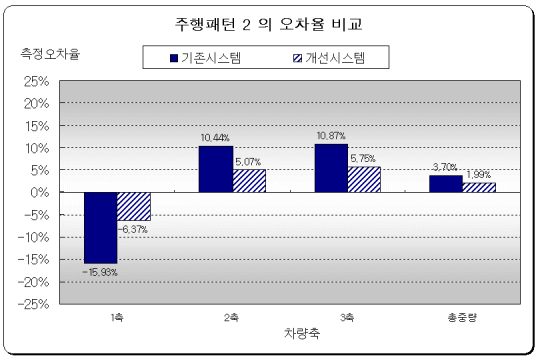
오차율 분석 결과 개선된 시스템은 기존의 시스템에 비해 최대 오차율이 8% 미만으로 나타나며 각 주행패턴 별로 고르게 오차율이 줄어들었다. 각 비정상 주행패턴별로 분석할 때 주행패턴 1은 등속 측정으로, 주변 환경의 변화를 감안하지 않는다면 거의 차이가 없으며 주행패턴 2는 오차율이 10% 줄어들어 6%의 오차율을 보인다. 주행패턴 5의 경우 기존의 시스템에서 최대 23% 오차율을 보인 반면 개선된 시스템에서 8% 오차율을 보여주어 15% 감소된 사실을 알 수 있다. 개선된 시스템에서 총 중량은 기존 시스템과 동일하게 오차율은 적으나 각 축의 오차는 크게 나타났다. 이 결과는 차량이 무게센서를 통과할 때 속도의 변화가 편중편차로 나타나는 경우로 해석할 수 있다.

4.2 기존 WIM 시스템과 개선된 시스템의 비교 분석

기존의 시스템과 개선된 시스템과의 비교 분석은 실험을 통해 얻어진 오차율을 토대로 이루어졌으며 비정상 주행패턴별로 각 축과 총중량을 비교하여 제안 시스템의 효율성을 제시하였다. 그림 9와 그림 10은 주행패턴 1과 주행패턴 2의 오차율 비교를 그래프로 나타낸 것이다.

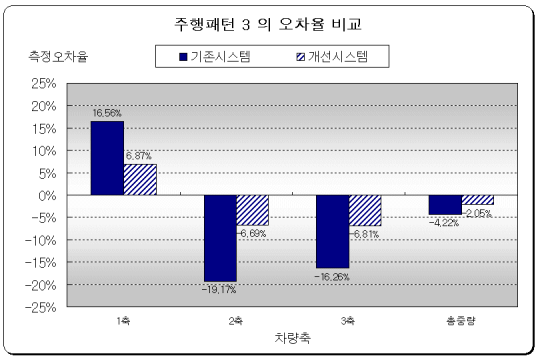


(그림 9) 주행패턴 1의 오차율 비교

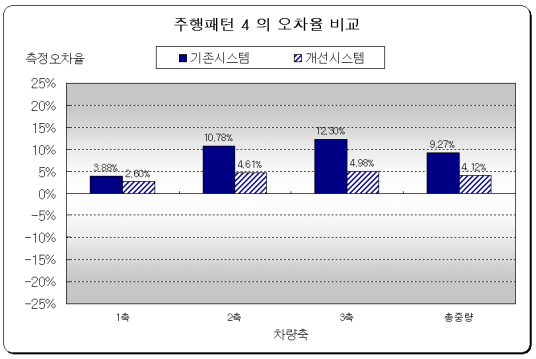


(그림 10) 주행패턴 2의 오차율 비교

주행패턴 1은 등속 측정으로 두 가지 시스템 모두 3% 이내에서 비슷한 오차율이 나타났다. 등속 주행은 차량의 속도 변화가 거의 없기 때문에 과적 차량의 정확한 무게를 측정하는 기준이 된다. 따라서 기존의 시스템이나 개선 시스템에서는 오차율의 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 주행패턴 2에서 1축은 조향축으로 오차율은 음수 값으로 나타나는데 이것은 차량이 측정 센서 앞에서 가속한 경우를 나타낸다. 2축과 3축은 템템축으로 가속 후 무게 중심이 뒤로 이동한 사실을 보여준다. 따라서 주행패턴 2는 운전자가 측정 지점 앞에서 급 가속하는 비정상 주행패턴을 의미한다. 그림 11과 그림 12는 주행패턴 3과 주행패턴 4의 오차율 비교를 그래프로 나타낸 것이다.

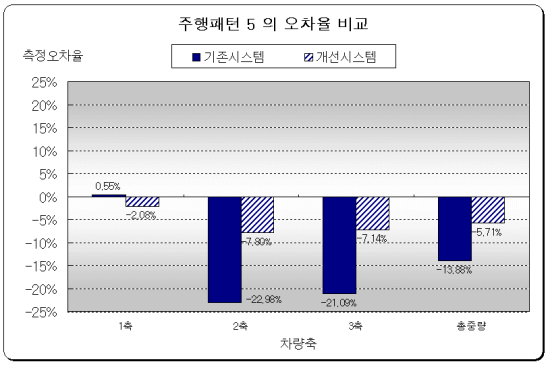


(그림 11) 주행패턴 3의 오차율 비교

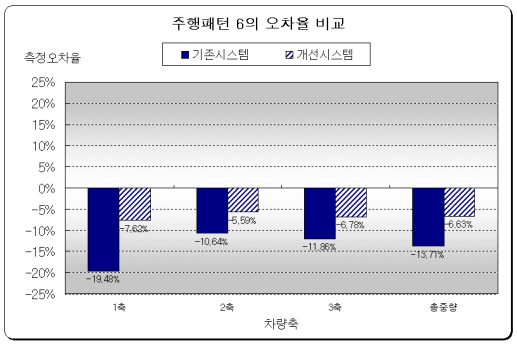


(그림 12) 주행패턴 4의 오차율 비교

주행패턴 3은 1축에서 양수의 오차율을 보이고 있으며 2, 3축에서는 음수의 오차율을 보이고 있다. 이것은 차량이 측정 센서 앞에서 감속하여 무게 중심이 앞으로 이동한 사실을 보여준다. 주행패턴 4는 1, 2, 3축 모두 양의 오차율을 보이고 있지만 1축의 오차율에 비해 2, 3축의 오차율이 더 크다. 이것은 차량의 조향축이 측정센서를 지난 후 급 가속하기 때문에 무게 중심이 뒤로 이동하였기 때문이다. 따라서 주행패턴 3과 4도 비정상 주행패턴이라고 할 수 있다. 그림 13과 그림 14은 주행패턴 5와 주행패턴 6의 오차율 비교를 그래프로 나타낸 것이다.



(그림 13) 주행패턴 5의 오차율 비교



(그림 14) 주행패턴 6의 오차율 비교

주행패턴 5는 1축에서 오차율이 적게 나타나며 2, 3축에서는 음의 오차율이 크게 나타난다. 이것은 무게센서 앞에서 조향축은 등속으로 진행하고 템템축이 지나기 전 감속한 경우로서 템템축의 무게가 급 감소한다. 실제 기존의 시스템에서 주행패턴 5로 차량 무게를 측정을 할 경우 각 축의 무게와 총중량 기준으로 무게를 측정하므로 실제 무게보다 적게 나타날 수 있다. 이 사실은 운전자가 의도적으로 무게 측정을 왜곡 시킬 수 있다는 것을 의미한다. 주행패턴 5는 기존의 시스템에서 가장 큰 오차를 보이고 있으며 개선된 시스템에서 오차율을 크게 줄이고 있다. 주행패턴 6은 1, 2, 3축 모두 대체적으로 음의 오차율이 크게 나타난다. 이것은 주행패턴 2와 5가 순차적으로 나타난 경우이며 조향축 및 템템축 무게가 감소한 경우이다. 이 사실은 운전자가 의도적으로 저속으로 운행하여 속도를 조작한 경우라 할 수 있으며 주행패턴 5와 6은 비정상적인 주행패턴의 대표적인 예이다.

5. 결 론

본 논문에서는 기존의 WIM 시스템의 오차율에 영향을 미치는 비정상 주행패턴을 분석하고 오차율을 최소화하는 개선된 WIM 시스템을 설계하였다. 개선된 WIM 시스템은 기존의 시스템에 루프 센서를 추가한 다단 루프 구조를 가지며 개선된 측정 함수를 통해 비정상 주행패턴별 측정 무게를 보정한다. 기존의 과적 차량의 무게는 대부분 등속을 기준으로 측정하므로 측정을 피하기 위한 과적 차량 운전자의 인위적인 주행조작은 고려하고 있지 않다. 이러한 인위적인 주행조작은 무게 측정의 오차율을 높인다. 본 논문에서는 이러한 주행조작을 비정상 주행패턴으로 정의하고 총 6가지로 분류하여 실측 데이터 분석을 토대로 주행패턴에 따른 오차율을 제시하였다. 등속을 기준으로 무게를 측정하는 경우 10% 범위 내에서 정확도가 나타나지만 기존의 WIM 시스템에서 분석한 평균 오차율은 최대 23%까지 나타났다. 이것은 비정상적인 주행패턴을 고려하고 있지 않은 사실을 보여준다. 개선된 시스템에서는 각 주행패턴 별로 고르게 오차율이 줄어들었으며 최대 15%까지 감소한 사실을 알 수 있다. 이것은 비정상적인 주행패턴을 고려한 것으로 차량이 무게센서를 통과할 때 속도의 변화가 편중편차로 나타나는 경우라 할 수 있다.

따라서 기존의 WIM 시스템과 개선된 WIM 시스템의 성능 측면에서 보면 기존의 시스템에 비해 가·감속시 오차율이 22.98%에서 8%로 줄어든 사실로 보아 성능이 훨씬 향상되었음을 알 수 있다. 이것은 미 교통안전국(FHWA)이 제시하는 축의 오차율 16% 보다 낮은 8% 미만의 오차율에 접근하는 결과를 얻을 수 있으므로 개선된 WIM 시스템은 주 단속 장비로 활용이 가능하다. 향후 더욱 정밀한 측정을 위해서는 개선된 구조를 다중으로 적용 할 수 있으며 3%이내의 오차율이 예상 가능하다. 성능 대비 설치비용을 볼 때 추가적으로 루프 센서를 설치비용과 소프트웨어 비용을 고려하여야 한다. 따라서 기존 시스템 설치비용의 30%가 추가될 것으로 예상 할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] Sarah K. Leming, Harold L. Stalford, "Bridge Weigh-in-Motion System Development Using

Superposition of Dynamic Truck Static Bridge Interaction", Proceedings of the American Control Conference, pp. 815-820, 2003.

[2] B. Jacob, "Weigh-In-Motion Road Vehicle Final report", COST323, http://wim.zag.si/cost323/index.htm, 2002

[3] Marieke Koopmans-Van Berlo, Hans De Bruijin, "Effects of E-Enforcement in the Netherlands" IEEE TECHNOLOGY AND SOCIETY MAGAZINE, pp. 38-47, 2006

[4] Q. Lu, J. Harvey, T. Le, J. Lea, R. Quinley, D. Redo, J. Avis "Truck Traffic Analysis using Weigh-In-Motion (WIM) Data in California", University of California, Berkeley Institute of Transportation Studies Pavement Research Center, 2002

[5] 박민석, 조병완, 배두병, "BWIM 시스템을 이용한 고속도로 교량 차량하중 모형 개발", 대한토목학회논문집 A, pp. 143~153, 2006.

[6] Xuemin Chen, Lianhe Guo, Jingyan Yu, Jing Li, Liu, R., "Evaluating Innovative Sensors and Techniques for Measuring Traffic Loads", Networking, Sensing and Control, 2008. ICNSC 2008. IEEE International Conference on, pp. 1074-1079, 2008.

[7] 김상효, 박흥석, "도로교 차량하중 및 통행특성에 관한연구" 대한토목학회 논문집 제2권 제4호, pp. 299~302, 1992.

[8] Christian Helg, Lou Pfohl, "Signal Processing Requirements for WIM Lineas® Type 9195", Kistler Instrument Corp., 2009

[9] "US Patent 6526804 - Road friction coefficient estimating apparatus for vehicle", http://www.patentstorm.us/patents/6526804.html, 2003

[10] 박민석, 조병완, "주행중인 차량하중 측정을 위한 BWIM 시스템개발", 한국 구조물 진단학회 제10권 제2호, pp. 111-122, 2006.

[11] 김범진, 임종길, 손영태 "WIM[Weigh-In-Motion] 장비 보정을 위한 대표차종 선정에 관한 연구" 한국도로학회 2005년도 춘계학술대회 논문집, pp. 179-184, 2005

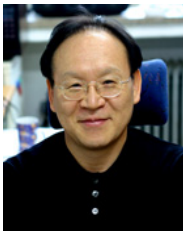
[12] Hesham Rakha, Bryan Katz, Ahmed AI-Kaii, "Field Evalution Weigh-In-Motion Screening On Truck Weigh Station Operations", Intelligent Vehicles Symposium, 2003. Proceedings. IEEE, pp. 74-79, 2003

◐ 저 자 소 개 ◑

박 제 우
1990년 경일대학교 컴퓨터공학과 졸업(학사)
1992년 경북대학교 대학원 컴퓨터공학과 졸업(석사)
2003년 경북대학교 대학원 컴퓨터공학과 수료(박사)
1992~2009 정훈시스템 대표
2009현재 윔코리아 대표이사
관심분야 : 지능형시스템, ITS, WIM.
E-mail : jeup@knu.ac.kr

김 영 백
1996년 영남대학교 사회학과 졸업(학사)
2007년 경북대학교 컴퓨터공학과 졸업(석사)
2010년 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 수료(박사)
2010~현재 한국전자통신연구원 선임연구원
관심분야 : 유비쿼터스, 임베디드, 모바일, 멀티미디어
E-mail : realtech@etri.re.kr

정 경 호
2002년 2월 대구대학교 컴퓨터정보공학부 졸업(학사)
2002년 8월 경북대학교 컴퓨터공학과 졸업(석사)
2005년 2월 경북대학교 컴퓨터공학과 수료(박사)
2005년 3월~현재 경운대학교 컴퓨터공학과 교수
관심분야 : 임베디드 시스템, 시스템 프로그래밍, RFID, WIM
E-mail : mccart@knu.ac.kr



안 광 선
1972년 2월 연세대학교 전기공학과 졸업(학사)
1975년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업(석사)
1980년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업(박사)
1977년 3월~현재 경북대학교 컴퓨터공학과 교수
관심분야 : 임베디드 시스템 설계, RFID
E-mail : gsahn@knu.ac.kr