

고속도로 무인·무정차 과적단속시스템 개발 현황 소개



권 순 민 | 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원

이 광 호 | 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 연구개발실장

1. 서론

1969년 경부고속도로 건설을 기점으로 급격한 경제성장을 이룬 우리나라는 고속도로의 역사가 벌써 40년을 넘어서고 있다. 이제는 점차 신규도로의 건설사업 물량이 둔화되면서 기존의 도로망을 효율적으로 활용하고 최적의 공용성을 유지할 수 있도록 요구되고 있다. 고속도로에서 포장, 교량 등 도로구조물의 공용성 저하에 가장 크게 영향을 끼치는 기본요소 중의 하나는 교통하중이다. 이를 효율적으로 통제하고 관리하는 것이 고속도로를 효율적으로 활용하는 기본이 된다.

교통하중을 가장 적극적으로 통제하는 방법은 과적단속이다. 국도의 경우 주요 간선도로 및 교량부에서 과적검문소를 운영 중이며, 이중 27개소는 고속축중계시스템을 활용하여 과적혐의차량 유도시스템을 운영 중이다. 고속도로의 경우에는 모든 영업소 입구 축중차로의 축중계를 통해 화물차의 하중에 실시간 검측하고 있으며 과적차량 발견 시 이를 즉각 통제하여 고속도로 진입 억제를 유도하고 있다. 그러나 최근에 들어 가변축을 장착한 3축 이상의 화물차

량이 증가하면서 국도는 물론 고속도로에서도 영업소 진입이후 축조작에 의한 과적행위 발생빈도가 높아지고 있는 실정이다. 해외의 경우에는 프랑스, 네덜란드를 비롯한 유럽연합 국가들과 미국, 일본 등 세계 각국에서 고속축중계를 이용하여 다양한 방식으로 과적단속(또는 과적혐의차량 유도)을 시행하고 있다. 따라서 본 기사에서는 한국도로공사 도로교통연구원에서 추진하고 있는 연구과제를 통해 나타난 고속축중계(HS-WIM : High speed Weigh-in-motion)를 활용한 무인·무정차 과적단속시스템의 개발현황을 소개하고자 한다.

2. 고속축중계시스템

2.1 축중계(WIM, Wim)의 개요

WIM이라 함은 Weigh-In-Motion의 약자로 이동 중인 차량의 축하중을 측정하는 장치를 일컫는다. 흔히 우리가 알고 있는 고속도로 영업소의 축중계 또한 (저속)WIM에 해당되며 측정 가능 속도에 따라 저속

축중계(LS-WIM ; Low speed WIM)과 고속축중계(HS-WIM ; High speed WIM)으로 구분된다. 사용되어지는 축중센서의 특성에 따라 대표적으로 벤딩플레이트(Bending plat) 형식, 피에조일렉트릭(Piezo electric) 형식, 피에조세라믹(Piezo ceramic) 형식, 피에조퀼츠(Piezo quartz) 형식이 있다(그림 1 참조). 벤딩플레이트 형식은 주로 저속축중계시스템에 사용되어지고, 피에조형식은 고속축중계시스템에 사용되어진다. 다음의 표 1은 종류별 특징을 비교한 것이다.

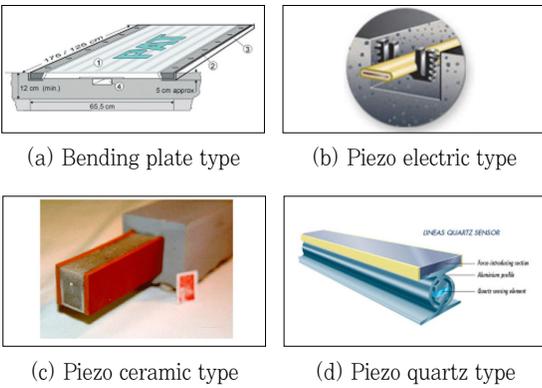


그림 1. 대표적인 WIM 센서 형식

표 1. 센서 형식별 WIM의 특성 비교

종류	특징	적용 사례
벤딩플레이트	- 중저속에 유리한 구조 - 시공 및 교정에 따른 유지관리 복잡	- 영업소 - 이동식 축중기
피에조일렉트릭	- 가격 저렴 - 온도 및 충격오차 심함	- 교통정보 시스템(AVC)
피에조세라믹	- 가격 중저가 - 온도 및 충격오차 심함	- 대부분의 국토단속 시스템
피에조퀼츠	- 가격 고가 - 온도 및 측방충격영향 매우 적음	- 시험도로 - 광안대교 - EU 국가

2.2 한국도로공사의 고속축중계시스템

한국도로공사 도로교통연구원에서는 2002년 12월 중부내륙고속도로에 건설된 편도 2차로의 시험도로에서 시험도로를 통행하는 교통의 누적하중을 측

정하여 이를 도로포장 공용성자료분석의 기본 정보로 활용하기 위한 목적으로 고속축중계를 설치하였다. 당초의 목적은 과적단속과는 무관하게 연구용으로 설치하였으며 각 차로별로 루프센서 2조, 피에조퀼츠(Piezo quartz) 센서 2조로 구성하였다. 여기에 2008년부터 기존의 고속축중계시스템을 과적단속시스템으로 활용하기 위하여 다음과 같은 요소들에 대한 개선점을 검토하였다.

- 세부적인 차종분류 기능
- 단속회피차량에 대한 판독
- 단속가능한 수준의 하중오차율

고속축중계시스템이 과적단속기능을 완벽히 수행하기 위해서는 하중에 대한 정확도 이외에도 기본적으로 차종에 대한 구분이 명확하여야 하며, 더불어 차로를 이탈하는 차량에 대한 판독이 가능하여야 한다. 따라서, 이러한 기능을 갖추기 위하여 윈더링 개념을 도입하여 하드웨어를 개선하였다(그림 2 참조). 즉 차량이 차로를 주행하는 동안 횡방향으로 어느 지점을 통과하는지를 판독하는 기능이다. 이러한 윈더링 시스템은 차선으로부터 횡방향으로 이격된 거리를 측정하는 기능 이외에 차륜의 형태(단륜/복륜)구분이 가능하여 차종을 분류함에 있어 기존의 차종구분법보다 좀 더 세분화된 구분이 가능하도록 하는 기능을 가지고 있다. 윈더링시스템은 차선별로 2개의 축감지 센서를 45° 사선으로 배치하여 주행 차량의 좌우측 각 타이어의 위치 판독, 운거측정, 단륜/복륜 구분을 명확히 할 수 있다. 본 시스템에서는 기존의 8종이나 11종 차종구분보다 좀더 세분화된 12종 차종분류법을 따라 구분하였다. 12종 차종분류는 2006년 국토해양부(당시, 건설교통부)에서 제안한 12종 통합 차종분류가이드를 기준으로 하였다. 윈더링 기법에 대한 기술은 3.1절에서 자세히 다루었다.

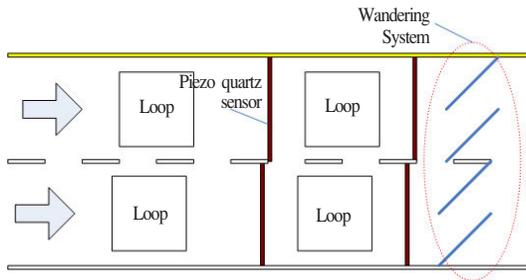


그림 2. 원더링시스템이 추가된 고속축중계시스템



그림 3. 과적단속시스템 초기모델 개념도

3. 과적단속시스템 초기모델 개발

한국도로공사 도로교통연구원에서는 향후 과적단속 또는 과적협의차량 선별용으로 활용하기 위한 목적으로 과적단속시스템을 개발하였다. 앞서 설명한 고속축중계시스템에 차량번호인식시스템을 연동하여 고속주행에서 측정가능한 무인·무정차 과적단속시스템을 구축하였다. 본 시스템에서 획득되는 자료는 차량의 축하중, 총하중, 속도, 12종 차종분류에 따른 차종, 횡방향주행패턴(원더링) 및 기본적인 차량정보들이 추출된다. 또한 번호 인식카메라 연동을 통해 과적 화물차 발견시 차량의 번호, 전면영상추출, 과적 및 총과적 발생량 등을 처리할 수 있도록 프로그램을 구성하였다. 또한, 과적단속기능을 부여하기 위하여 다음의 표 2와 같이 과적하중 발생시 처리방법을 설정하였다. 현재 본 시스템은 중부 내륙고속도로 시험도로 상에 설치되어 있으며, 다만 현재 제도적 단속력은 갖추고 있지 않다. 다음의 그림 3은 무인·무정차 과적단속시스템 초기모델에 대한 개념도이다.

표 2. 과적하중 발견시 처리방법

항 목	내 용
트리거 이벤트	- 하드웨어적인 트리거 신호 발생 - 카메라 설치시 셔터신호로 사용가능 - 경고 신호로 사용가능 - 카메라 위치와 차량길이에 따른 시간차를 고려하여 출력
통신 이벤트	- 유선/무선 통신으로 이벤트 내용 전송 - 원격지에서 과적차량 모니터링 가능

3.1 원더링(Wandering) 기법 개발

차종의 세분류를 위하여 선정한 차종분류인자인 차량의 길이, 축간거리, 축구조, 각 축별 윤간거리, 각 축별 유행식을 판독하기 위한 방법으로 피에조센서를 측정지기 진출부에 사선으로 설치하는 원더링 기법을 적용하였다. 원더링 기법은 도로를 주행하는 차량의 차륜이 도로 진행의 수직방향 즉, 횡방향의 어느 위치로 주행 하는지를 감지하기 위한 것으로 좌우 각 차륜의 횡방향 접지위치를 판독함으로써 각 축의 좌우 윤거를 정확히 판독할 수 있다. 이러한 판독을 통해 기존에 오분류되기 쉬웠던 4종 이하차량을 명확히 분류할 수 있도록 하였다.

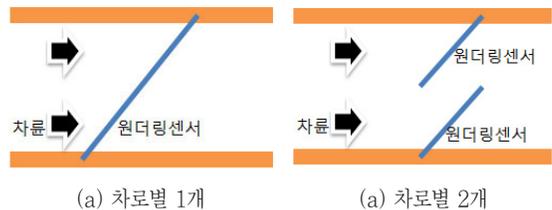


그림 4. 원더링 센서 구성방법

기존의 원더링 기법은 그림 4의 (a)와 같이 차로별 1개의 원더링 센서를 사각으로 설치하여 주행차량의 차륜접지 위치를 판독하고 윤거를 측정하는 방식이었다. 이러한 기법은 1번 축과 2번 축의 축간거

리가 짧은 차량이 주행할 경우 신호의 중첩이 발생하여 설치 각을 크게 할 수 없고, 설치 각을 작게 할 경우 바퀴 개수판독이 어려운 단점을 가지고 있다. 따라서 시스템에서는 기존 방식의 문제점을 보완하고자 그림 4의 (b)와 같이 차로별 2개의 원더링 센서를 설치하여 좌·우측 차륜의 접지위치를 분리하여 측정하도록 하였다. 이러한 센서구성을 통하여 주행 차량의 모든 차륜의 접지위치와 윤거, 바퀴수를 판독할 수 있다. 본 시스템의 원더링 센서는 Piezo - electric 센서를 사용하였다. 다음의 그림 5는 원더링 센서에 의해 주행하는 차량의 횡방향 차륜위치를 판독하는 원리를 보여주고 있다.

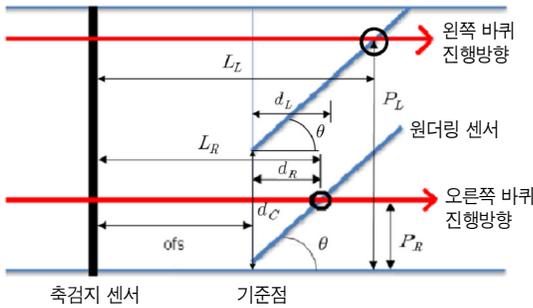


그림 5. 원더링 센서에 의한 횡방향 위치 판독방법

- $P_R = d_R \times \tan(\theta)$ 식 (1)
- $P_L = d_C + \{d_L \times \tan(\theta)\}$ 식 (2)
- $d_R = (L_R - ofs)$ 식 (3)
- $d_L = (L_L - ofs)$ 식 (4)
- $wd_i = P_{Li} - P_{Ri}$ 식 (5)

- P_R = 오른쪽 바퀴 접지 위치
- P_L = 왼쪽 바퀴 접지 위치
- d_R = 기준점에서부터 오른쪽 바퀴의 진행거리
- d_L = 기준점에서부터 왼쪽 바퀴의 진행거리
- ofs = 측정지센서와 원더링센서 간의 이격거리
- L_R = 측정지센서를 기준으로한 오른쪽 바퀴의 이동거리
- L_L = 측정지센서를 기준으로한 왼쪽 바퀴의 이동거리

- d_C = 오른쪽 원더링센서 기준점에서 왼쪽 원더링 센서 기준점까지의 거리
- wd_i = 모든 축의 윤거
- i = 축번호

원더링 센서에 의한 횡방향 위치 판독방법은 식 (1)~(5)를 사용한다. 그림 5와 같이 주행차량의 양측차륜 접지위치를 2개의 원더링 센서 응답신호로부터 판독한다. 원더링 설치 각도는 $P_R = d_R$ 이 되도록 하기 위하여 θ 를 45° 로 하여 차륜접지위치 계산을 단순화하였다.

차종분류에서 축간거리가 짧은 1종 차량과 3종 차량의 구분은 윤거와 축거가 서로 중첩되어 기존의 분류방식인 축거만으로는 2개의 차종구분이 매우 어려웠다. 본 시스템에서는 사각으로 설치된 원더링 센서 응답파형으로부터 각 축의 차륜에 대한 바퀴수를 구하여 이를 차종 구분에 사용한다. 2종 소형화물차의 경우 대부분 마지막 차륜이 복륜구조이므로 바퀴수를 판독하면 이들 차종의 구분이 가능하다. 표 3은 단륜과 복륜구조 차량에 대한 원더링 센서 응답파형으로 바퀴수 판독은 피크 검출기법을 사용하여 피크를 판독하고, 피크간격이 일정범위 이내일 때 이를 계수하여 바퀴수를 판독한다.

표 3. 단륜과 복륜 구조 차량의 원더링 센서 파형

차륜형태	원더링 센서 파형

그림 6은 4축 덤프 차량 주행 시 측정지센서와 원더링 센서의 응답파형으로 WDR_R은 운전석 기준 우측 원더링 센서 응답이고, WDR_L은 좌측 원더링 센서의 응답신호이다. 3번째 축부터 바퀴수가 2개인 복륜구조임을 알 수 있다.

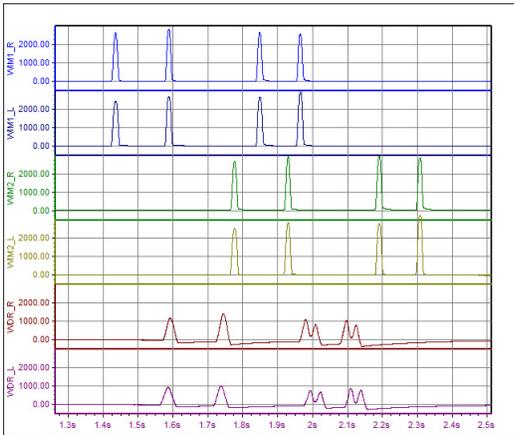


그림 6. 축검지센서와 원더링 센서 응답파형

차종분류가 가장 어려운 차량은 2축 차량으로 1종 소형승용 및 승합차, 2종 중형이상 버스, 3종 소형트럭, 4종 중형트럭이다. 5종 이상의 차량은 축수가 3개 이상으로 트레일러 차량과 세미 트레일러 차량을 추출하면 모든 차종이 분류된다. 2축 차량의 경우 그림 7과 같이 축거기준(280cm)과 윤거기준(180cm), 두 번째 축의 바퀴수를 이용하여 1종과 3종, 4종을 구분하고, 축거가 280cm 이상 350cm 이하 차량에서도 같은 방법으로 3종과 4종 차량을 구분한다. 350cm 이상 차량의 경우 2종 중·대형 이상

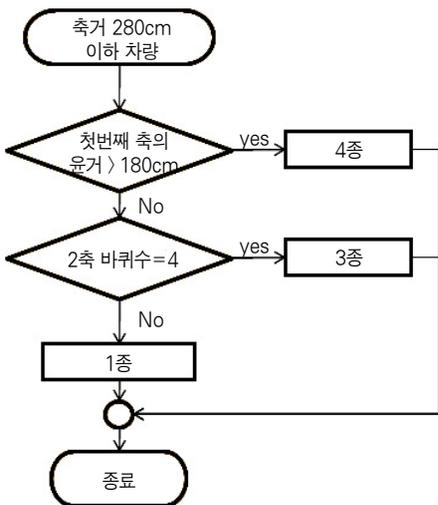


그림 7. 축거 280cm 이하 2축 차량 분류과정 흐름도

버스와 4종 8.5톤 미만 화물차량으로 오버행이 180cm 이상인 경우 2종 차량으로 분류하고, 180cm 미만인 경우 4종 차량으로 분류한다. 표 4는 이들 차량에 대한 대표적인 형태로 4종 트랙터의 경우 가변 축을 들고 주행할 경우 축거가 짧아져 이들 차량과 축거가 중첩된다.

표 4. 축거 280cm 미만 1, 3, 4종 차량 형태

차종별	분류 기준				대표적 차체 및 차축 배열		
	축수 (축)	바퀴수 (륜)	단위 (개)	축거 (cm)			
1	16인승 이하 승용/승합	2	4	1	≤280		
3	1~2.5톤 미만의 화물차	2	6(4)	1	≤350		
4	트랙터 (가변축)						

이러한 과정을 통해 본 시스템에서는 다음의 표 5와 같이 문자형태의 내부 분류코드와 12종 차종분류를 함께 제공하고 있다.

표 5. 차종 형식별 구분 코드

트랙터+트레일러			화물차 계열			덤프/믹서 계열		
형식	분류	차종	형식	분류	차종	형식	분류	차종
	T2R1	8		C2	4		D3	5
	T2R2	8		C2R1	(9)		D13	6
	T2R3	11		C2R2	9		D22	6
	T3R1	8		C3	5		B2	2/3
	T3R2	11		C3R1	9		B3	3
	T3R3	12		C3R2	10			
T : 트랙터								
C : 카고				C13	6		V2	1
D : 덤프				C21	5		V2R1	-
B : 버스				C22	6		V2R2	-
V,F : 승용차				C23	7		F2	1
P : 포터(소형화물차)							P2	4

3.2 보정기법 적용

고속측중계시스템에서 측정된 하중결과를 단속의 근거로 활용하기 위해서는 측정오차를 최소화하여야 한다. 고속측중계시스템에서 측정되는 하중값은 실제 도로 노면에 매설된 측중센서가 주행하중에 의해 변형되는 양에 대한 응답값으로 센서가 매설된 포장의 노면특성과 포장체의 거동특성에 영향을 받는다. 따라서 본 시스템에서는 측정하중값이 실제하중에 근접하도록 하기 위하여 보정기법을 개발하여 적용하였다. 보정기법은 다음과 같은 두 단계 과정을 통해 고속측중계시스템에서 내포하고 있는 측정오차를 줄이는 결과를 도출하였다. 다음은 각 보정 단계를 실제 시스템에서 측정된 사례를 가지고 기술한 것이다.

(1) 제1단계 : 원더링 분포에 따른 측정오차 보정

1차적으로 측정된 하중값들은 그림 8에서 보이는 바와 같이 특정한 패턴이 없이 랜덤하게 약 ±9% 대역 내에서 오차율을 나타낸다. 하지만 이러한 각각의 개별 데이터를 원더링센서를 통해 측정된 각 데이터의 개별 횡방향 주행위치(wandering)에 따라 분포시키면 차량이 차로내에서 주행한 횡방향 위치에 따라 오차율이 일정한 패턴을 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 패턴에 대하여 원더링 위치에 따른 오차율의 추세식을 산정하고 그에 따른 보정함수를 결정할 수 있다.

그림 9는 원더링 분포에 따른 총중량 오차율을 나타낸 것으로 차량의 횡방향 주행패턴이 'S' 자 형태의 3차 곡선으로 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 패턴에 대한 보정함수는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 그림 10은 개별 주행시험 결과값에 대하여 횡방향 주행 이격거리를 반영한 원더링 보정 후의 총중량 오차율 결과이다. 원더링 보정 후 전반적인 오차율은 ±6% 대역 이내로 좁혀지는 것을 알 수 있다.

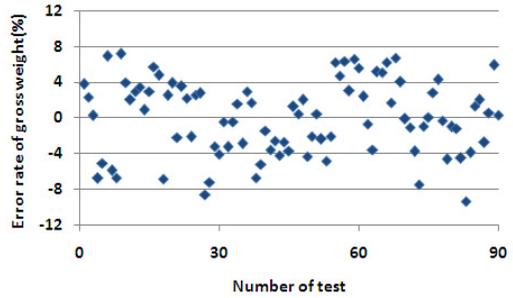


그림 8. 총중량 측정 오차율

$$yw = 3E-05x^3 - 0.0096x^2 + 1.014x - 27.858 \quad \text{식 (6)}$$

yw : 원더링보정계수

x : 우측차선 기준 횡방향 주행이격 거리(cm)

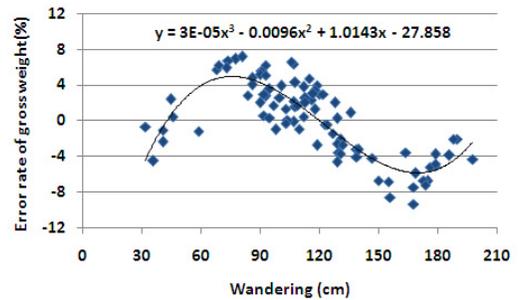


그림 9. 원더링 분포에 따른 총중량 오차율

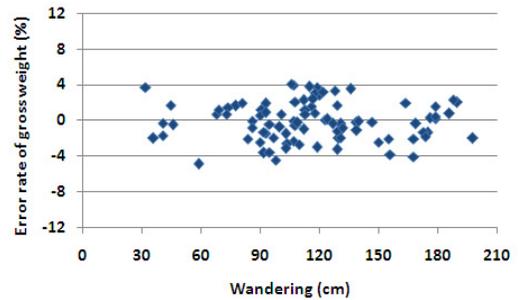


그림 10. 원더링 보정 후 총중량 오차율

(2) 제2단계 : 포장체 상하부의 온도차에 대한 측정오차 보정

제1단계에서 보정된 총중량값의 오차율을 측정시점의 포장체 슬래브 상하부 온도차에 따라 분포시킨 후 온도차에 대한 보정계수를 산정하여 측정값을 보정한다. 온도차에 대한 보정은 동일한 하중에 대하여 슬래브 상하부의 온도차에 따른 슬래브의 Curling 거동에 의해 슬래브 상부에 매립되어 있는 센서의 응답이 영향을 받기 때문이다(그림 11 참조).

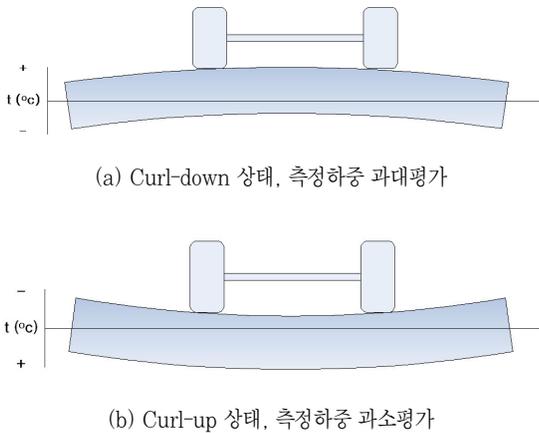


그림 11. 포장체의 온도거동에 따른 하중재하 특성

그림 12는 슬래브 상하부 온도차에 따른 총중량 오차율을 나타낸 것으로 상부의 온도가 하부의 온도보다 높을수록 선형적으로 과대평가되는 경향을 나타내었다. 이러한 패턴에 대한 보정함수는 식 7과 같이 나타낼 수 있다. 그림 13은 원더링 보정이 된 이후의 개별 주행시험 결과값에 대하여 슬래브 상하부 온도차(Δt)에 따른 영향을 반영한 온도차 보정 후의 총중량 오차율 결과이다. 슬래브 상하부 온도차에 대한 보정 후 총중량 오차율은 전반적으로 $\pm 5\%$ 대역 이내로 좁혀지는 것을 알 수 있다.

$$yt = 0.32c - 0.6984 \quad \text{식 (7)}$$

yt : 온도보정계수, x : 상하부 온도차($^{\circ}\text{C}$)

이와 같이 고속측중계시스템에서 측정된 측정값에 대한 원더링 분포 보정과 슬래브 상하부 온도차 보정을 수행한 결과 그림 14에서 보이는 바와 같이 $\pm 9\%$ 대역에 분포하던 오차율을 약 $\pm 5\%$ 대역으로 좁힐 수 있음을 확인하였다.

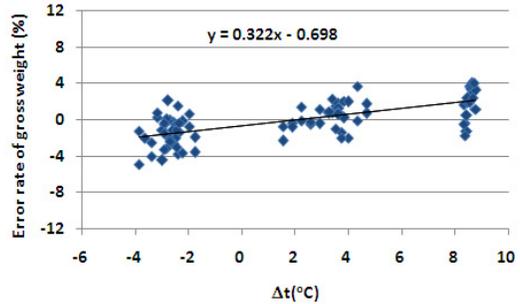


그림 12. Δt 에 따른 총중량 오차율

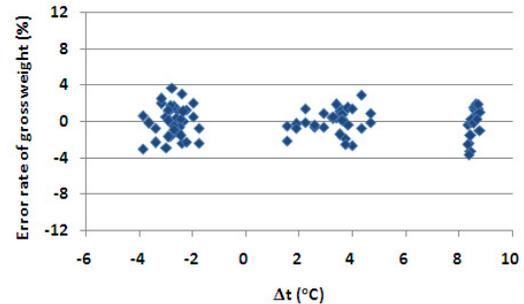


그림 13. Δt 보정 후 총중량 오차율

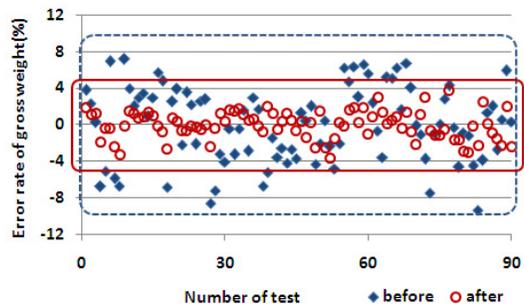


그림 14. 보정 전후의 오차율 비교

4. 결론 및 향후 연구방향

한국도로공사 도로교통연구원에서는 고속측중계 시스템을 무인·무정차 과적단속시스템으로 활용하기 위한 목적으로 윈더링시스템 기반의 고속측중계시스템으로 그 성능을 개선하였다. 그 결과 기본적인 단속장비로서의 기능을 위해 요구되는 세부적인 차중분류 기능과 횡방향 주행위치 판독을 통한 단속회피차량 판독 기능을 구현하였으며, 횡방향 주행위치 및 포장체 내부온도 변화에 따른 측정하중 오차의 보정 기법을 개발하여 기존의 고속측중계에서 내포하고 있던 측정오차범위를 좁혀 단속가능한 수준의 하중 오차율을 확보할 수 있음을 검증하였다. 이는 고속측중계시스템의 정확도 향상이라는 측면에서도 중요한 의미를 가지지만, 고속측중계를 과적단속시스템으로 활용하고자 할 경우 측정값의 정확도를 향상시킴으로써 단속 결과에 대한 신뢰성을 확보할 수 있다는 점에서 그 의의를 둘 수 있다. 다만, 이를 실용화하기 위해서는 법적, 제도적 검토를 신중히 하여 적용 시 단속 효용성을 갖도록 뒷받침하여야 할 것이다.

본 시스템이 실제 과적단속시스템으로 활용된다면 도로 본선 상에서 교통의 흐름을 방해하지 않고 과적 차량을 검측하는 것이 가능해지므로 기존에 저속 또

는 정지 상태에서 검측하던 방식에서 측정방해행위로 이루어지던 측조작 등에 의한 고의과적회피현상을 근본적으로 차단할 수 있으며, 특히 고속도로의 개방식구간과 같이 과적단속이 불가능한 구간에서 단속 실효성을 확보할 수 있다. 이는 곧 과적화물차 진입억제를 통해 고속도로 포장, 교량 등 도로구조물의 공용수명 증가와 대형사고 감소 효과를 기대할 수 있다.

단속의 경우 현재의 허용범위 10% 이내에서 오인식율을 0%에 가깝게 하여야 하므로, 하중측정값에 대한 정확도 향상이 기술적으로 가장 중요한 과제이다. 따라서, 향후 연구방향을 실제 과적화물차의 하중 및 속도대역에서 오차율을 최소화하는 방안 에 대한 연구가 필요하다. 예를 들면, 시스템 적용구간의 일정 구간에 대한 노면 평탄성 기준 수립, 측중 센서 설치에 필요한 충전재에 대한 내구성 검토, 주기적인 보정기법 및 유지관리기법 개발 등이 이에 해당된다.

본 기술기사는 한국도로공사 도로교통연구원의 “고속도로 이용의 효율성 증대를 위한 고속 측하중 측정 시스템 개발” 연구 결과의 일부입니다.

회비 납입 안내

회원 여러분께서 납부하시는 회비는 학회 운영의 소중한 재원으로 쓰이고 있습니다. 회원 재워께서는 체납된 회비를 납부하시어 원활한 학회운영에 협조하여 주시기 바랍니다.

- 회비납부는 한국씨티은행 : 102-53510-243
- 찬조금은 한국씨티은행 : 102-53512-294
(예금주(사)/한국도로학회)
- 지로번호 : 6970529

〈학회사무국〉