

# 통계적 분석법을 활용한 도로용 원더링 장비개발

김 낙 석(경기대학교 토목환경공학부 교수),  
박 창 우(한국철도기술연구원 연구원),  
박 현 식(경기대학교 대학원 토목공학과 박사과정),  
김 주 열(경기대학교 대학원 토목공학과 박사과정)

## Development of Portable Wandering Device using Statistical Analysis.

Kim, Nak-seok · Park, Chang-woo · Park, Hyun-sik · Kim, Joo-yeol

### Abstract

The role of a pavement means a social axis for the future as well as a function of road itself. To achieve its intended purposes, the maintenance technique of the pavement performance should be improved. For this, pavement investigators have dealt with the simulated pavement sites under actual environmental conditions. One of them is wandering device to improve the maintenance system of a pavement. The primary purpose of this research is to develop a portable wandering device using statistical analysis technique. It is noted that the new device using laser sensor demonstrates better field applications and reliability compare to the conventional one.

[Key words : wandering, portable wandering system, statistical analysis, reliability, laser sensor]

# I. 서론

## 1. 연구배경 및 목적

최근 도로연구에 있어 우리나라는 다양한 방향으로 연구가 진행되어지고 있는데 그 중 포장 분야에서는 실제 도로의 모사를 위해 많은 노력이 이루어지고 있다. 그 중 하나가 한국도로공사에서 운영되어지고 있는 시험도로 운영센터다. 시험도로는 기존의 실내시험이나 기타방법에 의해서 얻어진 도로의 이력과는 달리 실제 도로에서 데이터를 받는 이점이 있다. 이는 실제 하중의 모사뿐만 아니라 노상에서 도로 변화, 즉 실외에서의 온도 및 기타 제약에 따른 변화를 주어 실제 도로의 특성을 분석할 때 가장 현장에 맞는 데이터를 얻을 수 있다는 데 있다.

본 연구에서는 바로 현장 적용성을 높이기 위한 원더링 측정 장비 개발을 하는데 있다. 원더링은 차량의 주행이격거리 변동성을 의미하며 이것은 실제 차량 주행 시 도로 횡 방향으로 항상 동일한 궤적을 주행하지 않는다는 데 있다. 따라서 본 연구에서는 보다 정확한 원더링을 측정하기 위한 장비 개발을 하는데 있으며, 이를 위해 기존 방법인 수계측 측정 방식과 시험도로 운영센터에서 개발하고자 하는 휴대용 원더링 시스템 중 피에조 센서 측정방식과 레이저 측정방식을 비교 검토하고자 하는 것이다. 결과적으로 최적의 원더링 측정 방식 개발은 최근 도로연구에 있어 현장 모사가 뛰어난 데이터 취득을 돕는데 있다.

## 2. 연구내용 및 방법

본 연구는 휴대용 원더링 장비 개발을 하는데 목적이 있다. 따라서 기존의 원더링 측정 방식과 비교 검토를 통한 보다 우수한 원더링 장비 개발을 하고자 하는 것이다. 이를 위해 다음의 순서로 연구를 진행하였다.

- ① 국내·외 시험도로 내에서 활용되어지고 있는 원더링 시스템 자료조사
- ② 휴대용 원더링 시스템의 이론적 근거 마련
- ③ 수계측 판정 방식과 휴대용 원더링 시스템 계측 비교 분석
- ④ 통계적 분석을 통한 검토
- ⑤ 검토결과로 얻어진 원더링 시스템의 현장 적용

## II. 원더링 측정

### 1. 수계측 측정 방식

수계측 측정방식은 특정한 장비를 사용해서 측정하는 방식이 아니라 측정자 2인이 1조로 매 주행 차량이 계측 지점을 통과할 때마다 측정하는 방식이다. 이 방식은 측정하고자 하는 지점에 간단한 장비와 인력만 사용하여 측정하는 방식이다. 수계측 측정방식은 측정방법이 저렴하고 간편하다는데 장점이 있으나 측정자의 오차로 인해 정밀하지 못한 데이터가 획득 될 수 있는 단점을 가지고 있다. 또한 바퀴자국이 선명하지 못했을 경우는 시험을 재시도 해야 하는 어려움이 있다. 그림 2-1은 수계측 측정을 실시하고 있는 모습이다.

<그림 2-1> 수계측 측정 모습



### 2. 비디오 측정 방식

비디오 측정방식은 도로 인근에 비디오 캠코더를 설치하여 차량의 원더링을 측정하는 방식이다. 이는 수계측 방식과는 달리 설치된 캠코더가 인력을 대신하여 주행행태를 측정하고 이후 캠코더를 수거하여 분석하는 방식이다. 비디오를 통한 원더링 분석시 사용되어지는 모니터의 화면 굴곡으로 인해 차로 중심에서 멀어질수록 오차가 커지고 차량의 그림자로 인해서 하중이 닿는 부분을 정확히 측정하기가 어렵다. 따라서 차로 중심에서 떨어진 차량의 중심을 측정한 후 차량의 제원을 참고하여 원더링을 측정함으로써 오차를 최소화 할 수 있다.

### 3. 안테나 측정방식

안테나 측정방식은 Westarck(미)에서 사용한 방식으로 측정하고자 하는 차량에 일정한 간격(linch)으로 안테나를 설치하여 측정지점 통과 시 도로에 매설되어 있는 안테나와의 이격거리를 측정하는 방식이다. 이를 통하여 원더링을 알 수 있으며 정밀한 측정방식이기는 하나 고정되어 있는 측정 방식이다.

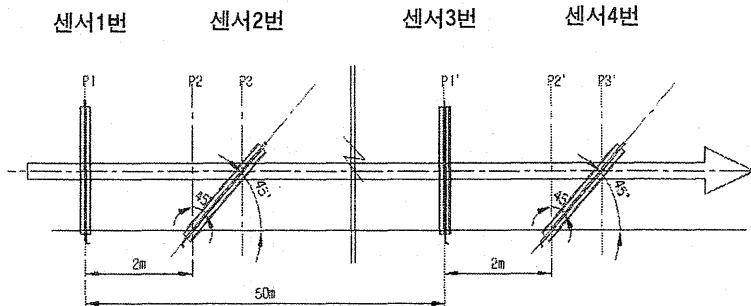
### 4. 휴대용 원더링 시스템

기존 측정 방식을 대신할 휴대용 원더링 시스템은 피에조 센서 측정방식과 레이저 센서 측정방식을 연구하였다. 휴대용 원더링 시스템은 지표면에 설치 후 바로 실시간으로 데이터를 획득할 수 있다는데 가장 큰 장점이 있다. 설치된 센서에서 주행중이 통과하면, 미리 입력된 차량제원을 이용하여, 차량의 진출입속도와 원더링이 실시간으로 컴퓨터에 저장된다. 이는 기존의 방법들이 가지고 있던 단점들을 상당 부분 보완한 것이다.

#### 1) 피에조 센서 측정방식

피에조 센서 측정방식은 종래의 비디오 판정 방식, 수계측 판정방식과는 다른 실시간 계측 방식이다.(피에조반응을 이용한 전기적 방식) 이것은 센서와 연결된 컴퓨터에 실시간으로 차량 주행의 이격거리를 송신, 저장되는 방식이다. 원더링 시스템의 구성은 원더링 측정센서, 연결케이블, 데이터 로거, 휴대용 컴퓨터로 구성되어 있다.

<그림 2-2> 피에조센서 개략도



위 그림 2-2에서와 같이 피에조 센서 측정방식은 수직센서와 경사센서의 위상차로 주행중의 위치를 추적하며, 그 수직센서와 경사센서(45°)의 거리로 주행속도를 알

수 있는 방식이다. 설치 시 길어깨(아래방향)쪽을 기준으로 거리를 측정하였으며 1번과 3번 센서는 속도를 2번과 4번 센서는 이격거리를 측정하는데 사용되어진다.

## 2) 레이저 센서 측정방식

레이저 센서 측정방식은 피에조 센서 측정방식과는 달리 초기 설치가 매우 용이하게 되어 있다. 초기 설치 시 레이저 센서의 지점 확인이 이루어지면 이후 레이저 센서가 주행 차량이 통과할 때 레이저의 반사를 통하여 이격거리 및 속도를 측정하는 시스템이다. 그림 2-3의 경우 레이저 센서의 모습이다. 본 연구에서는 원더링 측정을 하기 위하여 최적의 모델을 디자인 한 것이다.

<그림 2-3> 레이저 센서

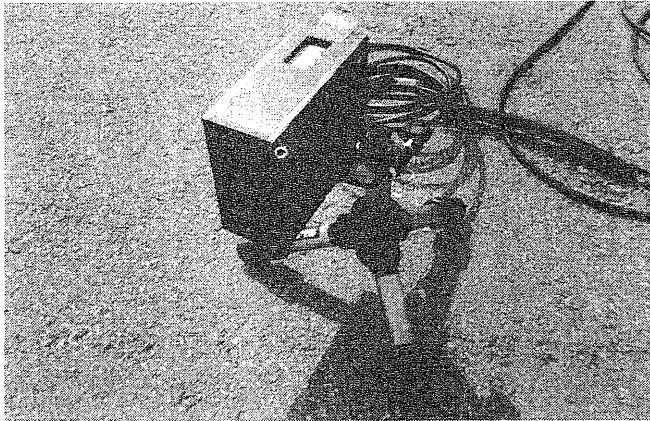
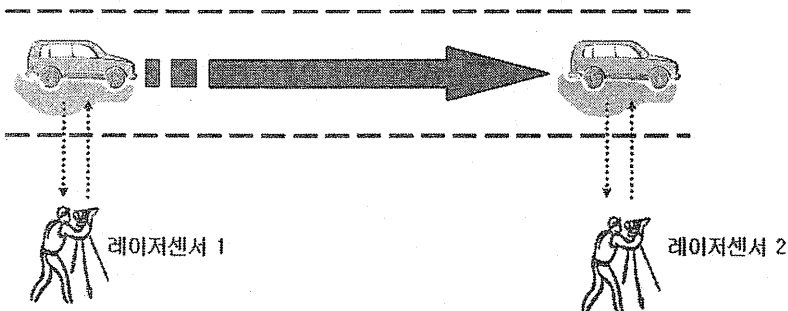


그림 2-4는 레이저 센서 측정방식의 개략도이다. 그림에서 알 수 있듯이 주행 차량이 레이저 1번 센서를 통과 하면 측정된 원더링과 통과 속도(앞 축과 중간축의 측정 간격을 통한 값)를 알 수 있으며 마찬가지로 레이저 2번 센서도 1번 센서와 같은 방법으로 측정이 된다. 원더링은 앞축(전륜)을 기준으로 측정하였다.

<그림 2-4> 레이저 센서 측정 개략도



### Ⅲ. 측정 방식별 검증

본 연구에서는 시험도로에서의 휴대용 원더링 시스템 적용에 앞서 수계측 원더링 측정방식과 각각의 휴대용 원더링 시스템을 비교 분석하여 현장 실무진들이 사용함에 있어 원더링 시스템을 최적하고자 하였다. 이를 위해 수계측 방식과 피에조 센서 방식의 비교는 2004년 8월에서 10월까지 이루어졌고, 레이저 센서 측정방식은 2005년 2월부터 4월까지 각각 2달간 비교분석 후 최적화 하였다.

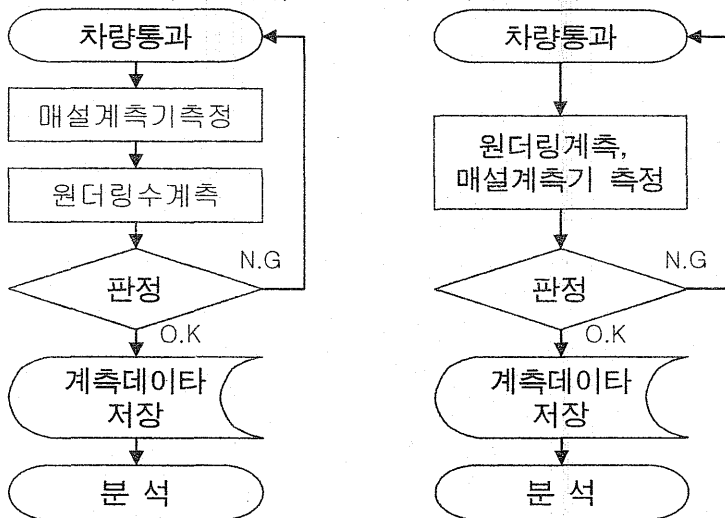
#### 1. 수계측 방식과 피에조 센서 방식

수계측 방식과 피에조 센서 방식의 비교는 같은 조건하에서 동시에 이루어졌다. 현장 계측 시험을 위하여 인원과 장비가 동원되었으며 원더링 측정 대상 차량은 차종분류표에 나온 6종(3축, 덤프트럭)을 사용하였다. 측정은 속도 구간별 각각 20회 총 40회가 이루어졌다. 그림 3-1은 측정방식에 따른 순서도이다. 위 그림에서 알 수 있듯이 수계측과 피에조 센서 방식에는 측정방법에 차이가 있다.

<그림 3-1> 원더링 측정 순서도

(좌 : 수계측,

우 : 피에조 센서)



수계측의 경우 실제 차량 통과 후 휠 패스를 직접 육안 측정하는 방식으로 계측자의 오류만 없다면 정확한 데이터를 얻을 수 있다. 그러나 매 회 차량 통과 시 마다

계측해야하는 단점이 있으며 이러한 것은 필연적으로 측정자의 오차를 유발한다. 또한 현장에서의 소음은 계측자의 오류를 증가시키는 역할을 한다. 그림 3-2에 나타나 있는 guide line은 주행하중이 지중에 매설되어 있는 계측기 기준으로 설정하였으며 그 선을 기준으로 원더링을 측정하였다.

<그림 3-2> 차량의 지점 통과



<그림 3-3> 피에조 센서 방식 측정



그림 3-3과 3-4는 피에조 센서 방식을 측정한 모습이며, 그림 3-5는 센서에서 측정된 값을 컴퓨터가 해석한 화면이다. 그림 3-3의 경우 차량이 센서를 통과하는 장면이며 센서에 붙어 있는 고무판은 수계측을 측정하기 위하여 설치한 것이다.

<그림 3-4> 피에조 센서 설치

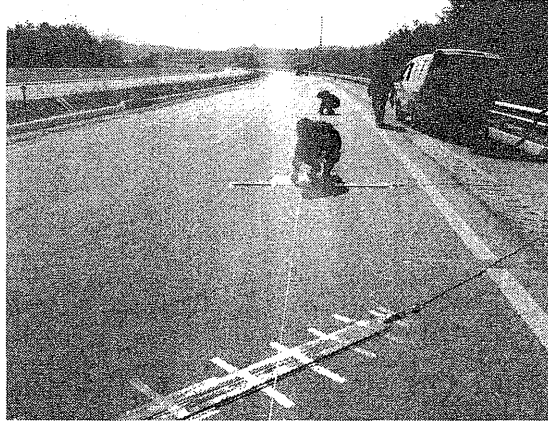
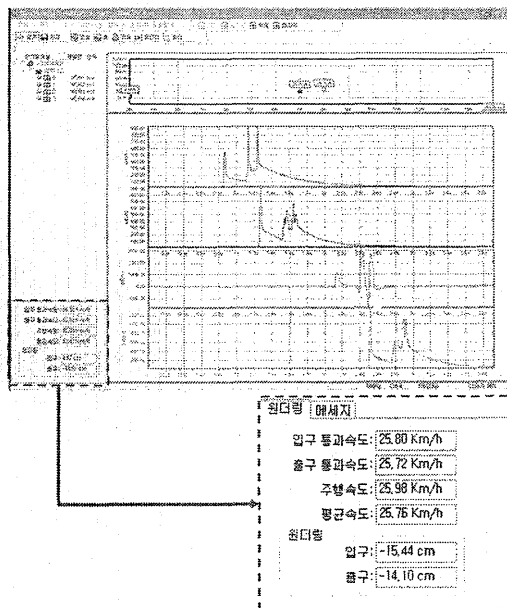


그림 3-5는 피에조 센서에 의한 컴퓨터 해석 화면이다. 그래프가 4개 구간으로 나와 있는데 이는 각각의 센서에서 읽어 들인 값을 나타낸 것이며 이를 통하여 속도에 따른 원더링 해석이 가능한 것이다.

그림 3-5의 하단에 보면 원더링 해석결과를 볼 수 있다. 센서별 속도가 분석되면서 앞서 설명한 방식으로 원더링의 값을 알 수 있는 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 입구와 출구 속도, 평균속도, 입구 원더링과 출구 원더링이 나와 있다.

<그림 3-5> PC 화면 (30km/h)





## 2. 레이저 센서 측정방식

레이저 센서 측정방식은 레이저 거리 측정기를 일정한 거리구간에 설치하여 원더링을 측정하는 방식이다. 이 측정방식은 앞서 설명한 수계측 방식과 피에조 센서 방식의 단점을 개량한 방식이다. 이 측정방식의 장점은 초기 설치가 간편하며 교정된 레이저 거리 측정기 사용을 하기 때문에 별도의 보정작업이 필요가 없다. 다만, 컴퓨터와 레이저간의 통신장애, 온도 및 빛의 강약으로 인한 레이저의 왜곡현상이 이 시스템의 단점이다.

피에조 센서 측정방식과 비교해서 초기 설치 시의 오차발생이 레이저 센서 측정방식에서는 상당히 감소되었다. 이는 피에조 센서의 경우 센서자체의 오류문제가 아닌, 설치의 복잡성 및 통신망 구축의 차이로 인해 발생하였기 때문이다. 실제로 피에조 센서의 경우 데이터 획득 시 데이터 값의 차가 레이저 센서와 차이가 많이 나는 것을 알 수 있었다. 그러나 레이저 센서의 경우는 레이저의 왜곡현상으로 인하여 정확성에 비해 적용성이 떨어지며 이로 인해 시험도로가 아닌 일반 도로에서 사용되어질 때는 피에조 센서가 유리한 것으로 판단된다.

<그림 3-6> 레이저 센서 설치

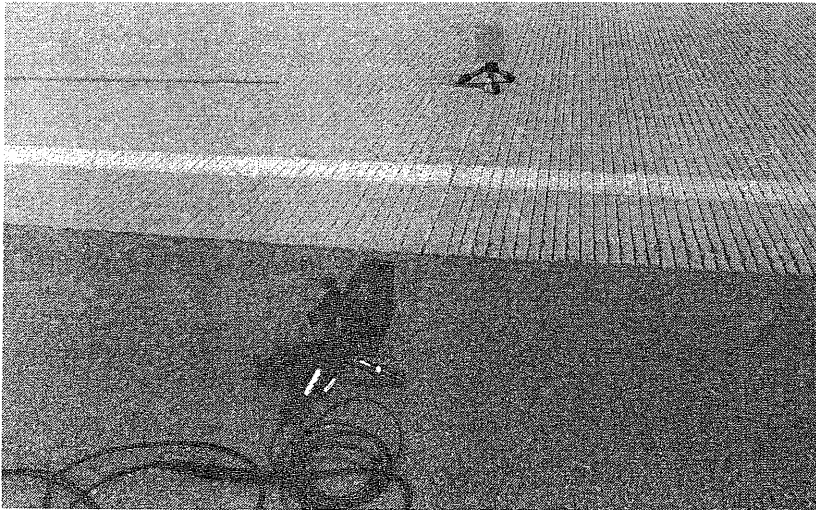


그림 3-7은 레이저 센서의 설치를 위하여 시험 차량 주행로에 반사판을 이용하여 레이저 센서의 영점 조정을 하는 것이다. 레이저 센서의 경우 1mm 단위까지 측정이 가능하다.

<그림 3-8> 타이어 도색 작업



그림 3-8은 레이저의 난반사를 막기 위하여 레이저 센서가 감지하는 타이어 측면에 흰색 페인트로 도색을 하는 것이다.

<그림 3-9> 레이저 센서 측정

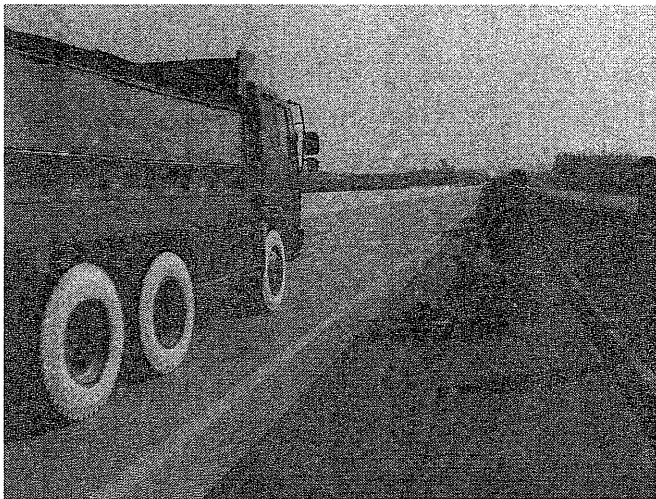


그림 3-9는 시험 차량이 센서를 통과 하는 모습이며, 시험차량은 측정을 위한 도색이 완료된 모습이다.

## IV. 통계적 분석

### 1. 원더링 검정

휴대용 원더링 시스템의 현장 적용 전에 수계측 치와 휴대용 원더링 시스템을 검정이 필요한데 이를 위해 통계적 분석을 실시하였다. 통계적 분석에는 다양한 분석방법이 있는데 본 연구에서는 검정을 위해 두 모집단의 평균 차에 대한 추론을 하였으며, 검정방법은 다음과 같다. 수계측과 피에조 센서, 수계측과 레이저 센서의 평균 차에 대한 추론을 위해서는 두 모집단으로부터 독립적으로 추출된 표본을 이용하는 방법(김두섭 등, 2000; 박범조, 2004)을 사용하였다. 그 방법은 다음과 같다.

#### 1) $\mu_1 - \mu_2$ 에 대한 $100(1-\alpha)\%$ 신뢰구간

$$(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) \pm z_{\alpha/2} S \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}$$

#### 2) $\mu_1 - \mu_2$ 에 대한 가설 검정

- 가설설정 :  $H_0 : \mu_1 - \mu_2 = 0$

$$H_1 : \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

$$\text{검정통계량} = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)_0}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

결정규칙-검정통계량이 임계값  $z_{\alpha/2}$  보다 크거나  $-z_{\alpha/2}$  보다 작으면  $H_0$ 는 기각이다. 기각이 되면 가설이 틀렸다고 보는 것이기 때문에 같지 않다라고 해석이 된다.

### 2. 통계적 검정(피에조 센서)

가설설정은  $H_0: \mu_1 = \mu_2$  로 검정을 하면

$$Z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)_0}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

$$Z = \frac{(-1.98 - (-5.69))}{\sqrt{\frac{147.30}{40} + \frac{138.30}{40}}} = 0.5196$$

이며 유의수준=0.05 에서 임계값  $z_{0.025}=1.96$  보다 작고  $-z_{0.025}=-1.96$ 보다 크므로 기각되지 않음을 알 수 있다. 위의 증명과 같이 수계측을 통한 통계적 분석을 통한 피에조 센서 측정방식은 오차범위이내의 값을 보이므로 현장적용성에 있어 문제가 없을 것으로 사료된다.

### 3. 통계적 검정(레이저 센서)

레이저 센서 1번과 수계측 방식의 검정  
가설설정  $H_0: \mu_1 = \mu_2$  로 검정을 하면

$$Z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)_0}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

$$Z = \frac{(40.9 - 40.7)}{\sqrt{\frac{32.8}{29} + \frac{33.9}{29}}} = 0.0809$$

레이저 센서 2번과 수계측 방식의 검정  
가설설정  $H_0: \mu_1 = \mu_2$  로 검정을 하면

$$Z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)_0}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

$$Z = \frac{(39.6 - 40.5)}{\sqrt{\frac{50.0}{29} + \frac{53.6}{29}}} = -0.2407$$

위의 검정결과 1번 2번 모두 유의수준 0.05일 때 임계값  $z_{0.025}=1.96$  보다 작고 -  $z_{0.025}=-1.96$ 보다 크므로 기각되지 않음을 알 수 있다. 따라서 레이저 센서는 위 검정 에서 알 수 있듯이 현장 적용성에 있어 문제가 없을 것으로 사료된다. 표 1은 각각의 센서의 검정결과를 정리하였다.

표 4-1. 센서의 검정결과

속 도	30km/h	비 고
피에조	0.5196	$z_{0.025}=1.96$
레이저1번	0.0809	$z_{0.025}=1.96$
레이저2번	-0.2407	$z_{0.025}=1.96$

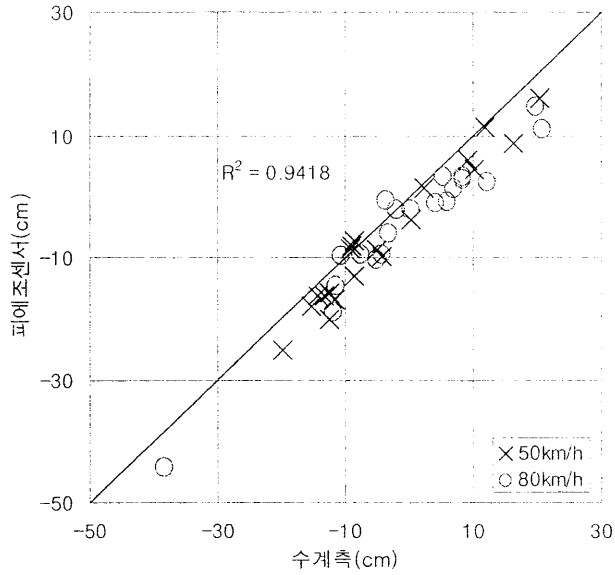
위의 표 1 에서와 같이 수계측을 통한 검정결과에서 레이저 센서 측정방식은 오차 범위이내의 값을 보이므로 현장적용성에 있어 문제가 없을 것으로 사료된다.

#### 4. 적합도 검정( $R^2$ )

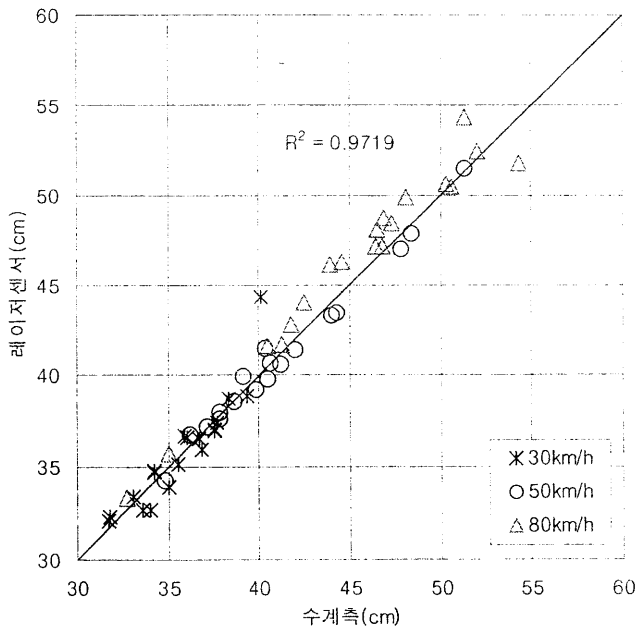
통계적 분석으로는 수계측과 각각의 센서 데이터가 유사하다는 것을 알 수 있었지만 보다 정확한 판단을 위하여 적합도 검정을 하였다. 적합도 검정을 함으로서 획득한 데이터가 이론적으로 적합한지를 증명하고자 한 것이다. 아래 그림은 수계측 대 피에조 센서, 수계측 대 레이저 센서의 적합성을 검정하였다.

그림 4-1에서 수계측과 피에조 센서는  $R^2=0.9418$  로서 적합도가 크다는 것을 알 수 있다. 그림 4-2는 수계측과 레이저 센서를 비교한 것이다. 검정 결과  $R^2= 0.9719$  로서 이것 또한 적합도가 크다는 것을 알 수 있다. 결정계수  $R^2$ 는 피에조 센서의 경우 보다 레이저 센서가 큰 것을 알 수 있는데, 이는 피에조 센서보다 레이저 센서가 본 연구의 포장 거동 분석 시 정확한 데이터를 얻기 위한 적합성이 우수할 것으로 판단 된다.

<그림 4-1> 원더링  
(수계측 : 피에조 센서)



<그림 4-2> 원더링  
(수계측 : 레이저 센서)



## V. 결 론

본 원더링 장비 적용을 통한 도로포장 거동특성 연구는 원더링 장비 개발뿐만 아니라 이를 통해 아스팔트 포장의 거동특성을 파악하는데 있으며, 그 결론은 아래와 같다.

1. 원더링을 측정하기 위한 방법 중 레이저 측정방식의 우수함이 증명되었다. 이는 수계측과 피에조 센서, 수계측과 레이저 센서의 통계적 분석을 통하여 알 수 있는데 검정통계량의 결과로는 피에조 센서 측정방식과 레이저 센서 측정방식 모두 기각되지 않았지만, 적합도 검정에서 레이저 센서 측정방식이 우수한 것으로 나타났다.
2. 원더링 측정방식의 기준이 되었던 수계측의 경우 레이저 센서 측정방식으로 인해 오차가 있다는 것을 알 수 있었다. 수계측 데이터 획득 시 측정자가 센서별로 각각 1 인이었는데 데이터 해석 시 측정자 별로 레이저 측정값보다 크거나 작게 계측한 것으로 나타났다. 이것은 수계측의 경우 측정자의 습성이 계측에 큰 영향이 미치는 것으로 판단된다.
3. 본 연구를 통해 기존 방식을 개선한 레이저 측정 방식을 개발하게 되었다. 이는 포장의 장기 공용성을 연구하는 실무진들에게 보다 효율적인 예측을 할 수 있을 거라고 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 강민수(2001). 차량 Wandering의 포장손상 저감 정량화 연구. 석사학위논문, 한양대학교
2. 김두섭, 강남준(2000). 회귀분석 기초와 응용. 나남출판사
3. 박범조(2004). 현대통계학 이론과 활용. 시그마프레스
4. 박창우(2005.8). “원더링 장비 적용을 통한 도로 포장 거동 특성 연구” 경기대학교 석사학위논문.
5. 한국 건설교통부(2001) 도로교통량 통계연보
6. Alavi, S., Mactutis, J., Ott, W., and Ashmore, C.(2000) Evaluation of Wheel Wander on Accumulation of Pavement Distress, *14th Engineering Mechanics Conference.*, The University of Texas at Austin.
7. Buiters, R., W.M.H. Cortenraad, A.C. Van Eck and H. van Rij(1993) Effects of Transverse Distribution of Heavy Vehicles on Thickness Design of Full-Depth Asphalt, *Transportation Research Record* 122, pp. 66-74.
8. Metcalf, C., Coetzee, N. F., , Nokes, W., Monismith, J., and Mahoney, J.(2000) Full-Scale Accelerated Pavement Testing : Current Status and Future Directions, *Transportation in the New Millennium.*

논문접수일 : 2007년 4월 20일

심사의뢰일 : 2007년 4월 27일

심사완료일 : 2007년 6월 4일