



무선기반 7.6m 프로파일러 설계 및 구현

Design and implementation of a 7.6m profilograph based on WLAN

손수국* 김제원** 이수형*** 유인균****
 Shon, SuGoog Kim, JeWon Lee, SooHyung Yoo, InKyoon

1. 서론

도로 주행 시 노면의 요철로 생기는 진동이나 흔들림은 운전자들에게 불쾌감을 주며, 심한 경우에는 안전한 주행을 방해하기도 한다. 또한 노면의 요철은 자동차의 연료 소모를 증가시키며 요철로 인한 자동차와 타이어 사이의 충격은 도로 포장 및 자동차의 손상을 가속시킨다. 그러므로 평탄성이 우수한 도로를 지속적으로 양호한 상태로 관리하는 일은 중요하고, 효율적인 평탄성 관리를 위해 정확하고 간편한 평탄성 측정 장비의 사용 또한 중요하다.

도로의 프로파일 기반의 지수에 관한 Hassan 의 연구결과에 따르면, 트럭 운전자 패널에 의한 조사결과 도로 요철에 대한 주파수 성분이 4.8m-19.5m 경우에 평탄성 내용이 승차감 지수와 가장 잘 상호 연관되는 것으로 발표되었다. 그래서 이러한 주파수 대의 도로 요철이 도로 포장의 동적인 휠 부하에 주요 요인이 되는 것으로 고려된다[1]. 도로의 평탄성을 측정할 수 있는 많은 방법들이 있는데, 대부분은 휠의 경로에 따른 종단프로파일(종 방향으로 도로 표면의 수직적 프로파일)로부터 측정된다. ASTM 표준 E867-06 [2]에서는 평탄성을 실제 평탄한 표면으로부터 도로 표면의 벗어난 정도를 정의하고 있다. 이러한 평탄성은 차량의 동특성과 승차감, 동적 하중, 및 배수구역에 영향을 준다.

도로의 평탄성 측정은 1900년대 초반에 시작되었다. 가장 많이 사용되는 평탄성 측정장비로 두 그룹으로 분류된다. California, Rainhart, Ames 프로파일러와 같은 직접 도로 프로파일을 측정하는 방식과 Mayer, BPR 과 같은 도로의 평탄성에 기인한 차량의 응답 성능을 측정하는 방식이 있다. 캘리포니아 프로파일러에는 적게는 4 개의 휠을 갖는 것부터 많게는 16개의 휠을 갖는 것이 있다. 최근에 가장 공통적으로 많이 사용되는 12개 휠의 캘리포니아 프로파일러 그래프는 1961년도에 처음으로 제작되었다. 특히 7.6m 12 휠 캘리포니아 프로파일러 그래프는 단거리 도로 포장 결함을 찾고 검사하는데 적합한 것으로 인정되어 왔다. 실제 다리 상판의 평탄성을 측정하는데 매우 적합하기도 하다. 현재는 자동화된 것과 기계적인 프로파일러가 사용되고 있다.

도로의 평탄지수로서 PrI 는, 한국의 경우 특히, 도로건설에 대한 준공검사를 위한 평가지표로서 사용되고 있다. PrI는 도로포장의 종단프로파일로부터 계산이 된다. 물론 PrI는 측정 장비의 정확성에 크게 영향을 받으며, 바위, 텍스처, 오염 또는 흙 등에 의한 스파이크 또는 미세 왜곡 부분을 어떻게 제거하느냐에 따라 크게 영향을 받기도 한다. 따라서 도로포장의 평탄성을 측정하기 위한 정확한 프로파일러 운전 및 검사 방법이 ASTM 1274[3]에 추천되고 있다

기계식 7.6m 프로파일미터는 장비 특성상 기록지에 펜으로 그려진 데이터를 추출하는 과정에서 작업자의 주관성에 의한 해독 오차가 발생하고 측정구간에 대한 데이터 분석에 많은 시간이 소요된다. 캘리포니아 프로파일러의 최근

* 수원대학교 정보통신공학과 교수 · E-mail: sshon@suwon.ac.kr
 ** 한국건설기술연구원 도로연구부 연구원 · 공학석사 · E-mail: jewonkim@kict.re.kr
 *** 정희원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 연구원 · 공학석사·E-mail: shlee1@kict.re.kr
 **** 정희원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 수석연구원 · 공학박사 · E-mail: ikyoo@kict.re.kr

기술동향은 1980년 중반 James Cox and Sons에 의해 소개된 컴퓨터로 측정하고 저장하는 것이다[4]. 이것은 컴퓨터 프로그램을 사용하여 데이터를 분석하고 PrI 지수를 생성하고 있다. 현장에서 측정이 이루어진 후 사무실에서 프로파일 데이터를 분석해야 할 필요성이 없어지게 되었다. 이러한 컴퓨터화된 장비의 도입으로 생산성이 크게 향상되었다.

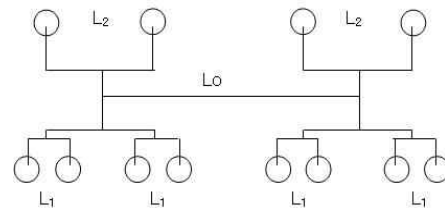
이전의 연구결과 [5]에 따르면, 캘리포니아 프로파일러는 도로의 어떤 파장대를 정확하게 측정해 낼수 있지만, 어떤 파장대는 본래의 값보다 증폭 또는 감소시켜 측정하는 것으로 분석되었다. 이러한 특성은 준공검사이 프로파일러 데이터를 사용하는 적합성에 대한 의문과 더불어 평가절차에 대한 보완의 필요성을 야기시킨다.

본 논문에서는 캘리포니아 프로파일러의 주파수 특성상의 문제뿐만 아니라 프로파일러의 구동휠이 비선형적으로 움직임에 따른 새롭게 발생하는 문제점을 기술한다. 이러한 문제가 보완되어야 함을 기술하고, 이를 해결할 수 있는 새로운 해석적 방법이 소개된다. 그리고 새로운 형태의 캘리포니아 프로파일러가 무선랜과 PDA를 기반으로 설계 및 구현된다. 기존의 컴퓨터화된 프로파일러 보다 안전성과, 휴대성이 증가하고, 측정데이터를 네트워크를 통하여 전달할 수 있는 기능을 갖는다. 논문의 후반부에서는 실험과 분석을 통하여 개발된 프로파일러의 성능을 분석한다.

2. 캘리포니아 프로파일러

2.1 프로파일러 모델

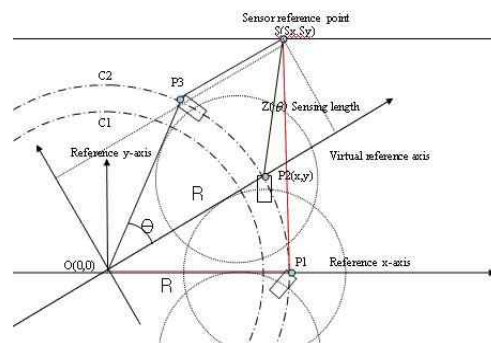
그림1은 본 논문에서 기술할 캘리포니아 형식의 프로파일러에 대한 구성도를 보여주고 있다. 프로파일러는 강빔과 양단에 부착된 지지 휠 그리고 중앙의 휠로 구성된다. 7.6m 긴 트러스 L0(7.6m)의 양단에 부착되어 있는 12개의 휠은 중앙 트러스의 양쪽 편에 L1(0.432m) 간격으로 4개의 휠과, 다른 한 쪽에는 L2(0.82m) 간격으로 2개의 휠이 부착된 것을 볼 수 있다. 강빔의 다른 한쪽에도 6 개의 휠이 동일한 모습으로 부착된 것을 볼 수 있다. 그리고 중앙에 위치한 구동휠에는 펜과 차트지가 연결되어 기준점으로부터 중앙의 구동휠이 움직임에 따라 프로파일 데이터를 종이 차트에 기록한다. 수평적 스케일로는 1 : 300 (1 in = 25 ft) 의 비율로 축소하여 프로파일 데이터를 기록하고, 수직 방향으로 1 : 1 비율로 프로파일 데이터를 기록한다.



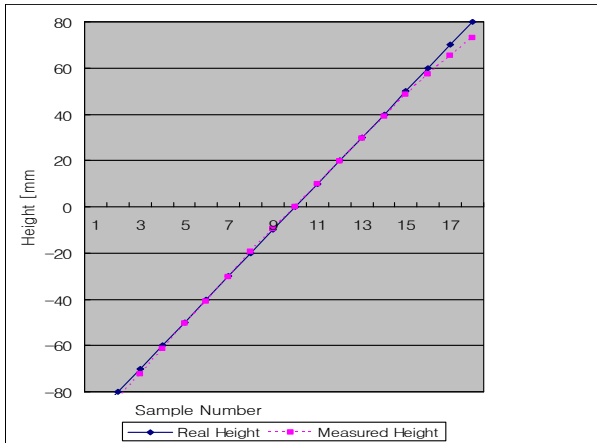
〈그림 1〉 프로파일러 구성도

그렇지만 프로파일러의 중앙에 있는 구동휠이 수직적 움직임을 하는 것이 아니라, 고정된 축을 중심으로 회전하는 것을 발견하였다. 그리고 도로의 프로파일은 지지 휠들에 의하여 만들어지는 도로 표면 접촉지점의 산술적 평균에 의하여 측정된다.

그림 2는 중앙 구동휠의 움직이는 궤도에 대한 모델을 보여주고 있다. 중앙 구동 휠은 반경 R(0.6m)에 고정축 O(0,0)인 원 C1 을 따라 회전한다. 기록계에서 시작한 스트립선은 휠의 상부에 있는 P2에 연결된다. 그리고 연결부 P2 는 중앙의 구동휠이 회전함에 따라 원 C2를 따라서 역시 회전운동을 한다. 프로파일러의 높이가 변화함에 따라 스트립 선의 길이가 상대적으로 변동한다. 스트립선의 길이 변화 Z(θ) 는 프로파일 높이의 변화에 대응한다.



〈그림 2〉 중앙 구동 휠의 움직이는 궤적 모델



(그림 3) 실제와 측정 값 간의 높이 차이

측정 프로파일과 실제 프로파일간의 차이를 조사하기 위하여 실험을 하였다. 휠을 절대적 높이에서 -80mm부터 +80mm 까지 10mm 마다 변화시켜 가면서 프로파일을 측정한다. 이때 기록지에 측정된 프로파일 값을 기록하였다. 그림 3은 실제의 절대적 프로파일 값과 기록지에 기록된 측정값을 비교한다. 실제 높이 값에 비하여 측정값은 중앙 구동휠이 기준점 부근에서는 정확하나, 기준점에서 멀어짐에 따라 차이가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 차이는 구동휠이 원을 따른 회전운동을 하기 때문에 발생한다. 기록지에 기록된 프로파일이 이러한 특성을 반영하여 보완되어야 함을 의미한다.

2.2 프로파일러 주파수 특성

캘리포니아 프로파일러에 대한 수학적 모델[6]이 수식 (1)에 의하여 주어진다.

$$\hat{P}(x) = P(x) - \sum_{i=1}^N C_i P(x - d_i) \tag{1}$$

여기서 $\hat{P}(x)$ = 측정된 도로 프로파일
 $P(x)$ = 실제 도로 프로파일

x = 종방향 좌표

N = 지지 휠의 개수

d_i = i 번째 휠과 구동휠 축간의 거리

C_i = 측정 결과에 대한 i 번째 휠의 영향을 나타내는 상수

구동 휠의 원 움직임을 고려하면, 보상된 $\hat{P}_\theta(x)$ 프로파일이 식 (2)처럼 변경된다.

$$\hat{P}_\theta(x) = \left\{ P(x) - \sum_{i=1}^N C_i P(x - d_i) \right\} Z(\theta) \tag{2}$$

여기서 보상비율이 $Z(\theta) = Z_m(\theta) / Z_r(\theta)$ 로 실제와 측정 높이간의 비율로 주어진다. 예를 들어 기준점에서 $Z(0)=1$ 이 된다. 실제 높이는 $Z_r(\theta) = P_3y - P_2y$ 로 주어지고, y 축 성분 P_2y, P_3y 는 P_2 와 P_3 지점에서 각각 실제 높이를 정의한다. 측정된 높이는 $Z_m(\theta) = \overline{SP}_3 - \overline{SP}_2$ 가 된다. 이는 \overline{SP}_2 와 \overline{SP}_3 사이의 길이 차이와 같다. R 은 원점 O 로부터 P_2 접속지점까지의 반경을 정의한다.

$Z(\theta)$ 는 각도 θ 에 대한 비선형 함수가 되고, 각도 θ 는 가상의 기준 축으로부터의 상대적 값이다. 예제로서, 가상의 기준 축에 대한 θ 는 0도가 된다.

다음, 수학적 모델이 식 (3)처럼 수정이 된다.



$$\begin{aligned}
\hat{P}_\theta(x) = & [P(x) - \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{2m} \sum_{l=1}^m [P(x + \delta_l) + P(x - \delta_l)] \right\}] \\
& + \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{2n} \sum_{r=1}^n [P(x + \delta_r) + P(x - \delta_r)] \right\} Z(\theta)
\end{aligned}
\tag{3}$$

여기서 12월 프로파일러에 대하여 m=4, 그리고 n=2 이다.

δ_l = x 방향(l= 1,2,3,4)으로 측정된 l 번째 휠과 중앙 가동휠 간의 간격
 δ_r = x 방향(r=1,2)으로 측정된 r 번째 휠과 중앙 가동휠 간의 간격.

본 논문에서는 프로파일러 전달함수의 크기에 대한 해석적 수식이 유도된다. 프로파일러 모델 식(2)에 대한 라플라스 변환을 취하면 식(4)와 같이 된다.

$$\hat{P}_\theta(s) = \{ P(s) - \sum_{i=1}^N C_i P(s) e^{-d_i s} \} Z(\theta)
\tag{4}$$

여기서 s는 복소수 변수이고, $\hat{P}_\theta(s)$ 와 P(s)는 $\hat{P}_\theta(x)$ 와 P(x)에 대한 각각의 라플라스 변환결과가 된다. 라플라스 변수 형태의 시스템 주파수 응답 전달함수는 지수함수로 식(5)와 같이 정의된다.

$$T(s) = \frac{\hat{P}_\theta(s)}{P(s)} = \{ 1 - \sum_{i=1}^N C_i e^{-d_i s} \} Z(\theta)
\tag{5}$$

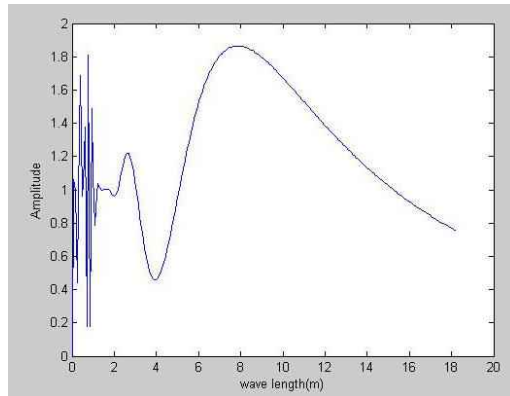
s = jw,로 대체하여, 주파수 응답 전달함수가 식(6)처럼 얻어진다.

$$T(jw) = \frac{\hat{P}_\theta(jw)}{P(jw)} = \{ 1 - \sum_{i=1}^N C_i e^{-d_i jw} \} Z(\theta)
\tag{6}$$

식 (6)이 MATLAB에 의해 시뮬레이션 된다. 주파수 응답의 크기가 각도에 의해 영향을 받는다. 그림 4는 Z(0)=1의 가정에서 시뮬레이션 된 주파수 응답 특성을 나타낸다. 어떤 주파수대에서는 올바르게 측정하고, 어떤 주파수대는 확대 그리고 어떤 주파수대는 거의 측정하지 못하고 있는 것을 관찰할 수 있다[7]. 특히, 4m 근처의 파장에 대하여 최소 측정치를 주고, 8m 근처의 파장에 대하여는 최대 응답 특성을 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 다른 θ 에 대하여서는 주파수 응답 패턴은 변화하지 않지만, 응답 특성의 크기는 변화하는 것을 예측할 수 있다.

Kulakowski [5]는 지지휠, 휠 간의 간격, 주 트러스 길, 구동휠 타이어의 마모상태, 및 구동휠의 이심률등 같은 설계 변수들이 프로파일러의 성능에 영향을 준다고 하였다.

본 논문에서는 중앙 구동휠의 움직임 궤적이 원형을 이룸으로 프로파일 값에 영향을 주기 때문에 보완되어야 한다고 주장한다. 그래서 [5]에서 주장된 변수에 한가지 변수가 더 고려되어야 한다고 주장한다.



〈그림 4〉 캘리포니아 프로파일러의 주파수 응답특성 (Z(0)=1 이라는 가정)

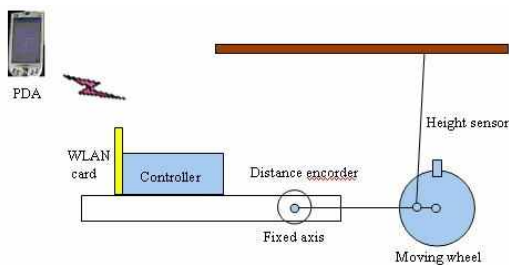


3. 무선랜 기반의 프로파일러

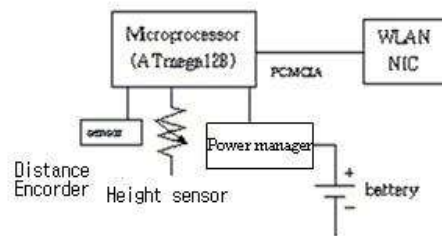
새로운 형태의 캘리포니아 프로파일러가 제안된다[8]. 제안된 프로파일러는 전자기술을 추가하여 성능의 향상을 목표로 한다. 특히 최초로 무선랜 기술을 적용하는 기술이다. 무선랜(WLAN) 기술의 도입으로 프로파일러는 데이터를 원격으로 전송할 수 있을뿐더러 원격제어가 가능하다. 데이터 관리가 쉬어지고, 측정에 소요되는 시간도 절약할 수 있다. 또한 운전 및 훈련 비용도 크게 절약 할 수 있을 것으로 기대된다.

그림 5는 제안된 무선랜 기반의 프로파일러 시스템을 보여준다. 프로파일러는 높이 센서, 거리 인코더, 제어기, 무선랜 모듈, 및 PDA로 구성된다.

그림 6은 제어기의 구성을 보여주는데, 주요 구성요소로서 8비트 마이크로프로세서(ATmega128)는 거리 인코더, 높이 센서, 전력관리부, 무선랜 카드 같은 주변장치를 제어하여 측정 데이터의 입출력 처리를 한다. 제어기는 운전자가 측정을 시작함에 따라 높이 측정을 한다. 데이터의 수집과 처리를 향상시키기 위하여, 마이크로프로세서 기반의 데이터 획득시스템이 사용된다. 포텐션미터는 높이의 측정을 위하여 프로파일러의 기록 펜의 위치를 표시하는 전기적 신호를 발생한다. 높이에 대한 아날로그 전기 신호는 샘플링되고 1mm 정밀도를 갖는 10 비트 A/D 컨버터를 통하여 디지털화 된다. 거리 측정에 대하여서는 펄스 인코더가 사용된다. 펄스 인코더는 프로파일러가 이동함에 따라 주기적 간격(1cm) 마다 펄스의 신호를 발생한다. 도로의 프로파일에 대한 계산은 시간 대신에 거리의 함수로 계산된다. 이는 프로파일러의 속도에 독립되게 하는 것으로 역시 다루기도 쉬운 특징이 있다. PDA의 메모리 제한으로 프로파일러를 통한 측정 가능한 최대 거리는 10km이다.



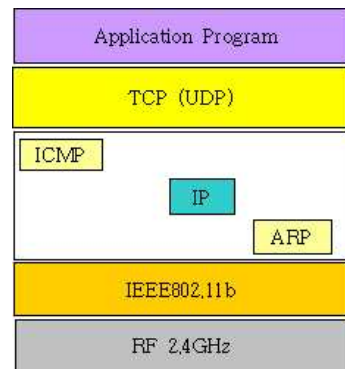
〈그림 5〉 제안된 프로파일러 구조



〈그림 6〉 제어기 구성

프로파일러에서 측정된 높이와 거리에 대한 데이터는 TCP/IP 프로토콜을 사용하는 소켓 프로그램을 통하여 PDA로 전송되고, PDA 내부 메모리에 저장된다. 그림 7은 PDA와 프로파일러 사이에 통신을 지원하기 위한 프로토콜 스택을 보여준다. 임베디드 장비로 프로파일러가 제한된 메모리를 사용하므로 full TCP/IP 스택 대신에 간략화된 TCP/IP 스택 [9][10]을 사용한다. 간략화된 프로토콜 스택 뿐만이 아니라 802.11b 무선랜 드라이버 역시 8비트 마이크로프로세서에서 구현되었다. 무선랜 칩셋은 Intersil의 프리즘 칩셋이 사용되었다. 다른 응용프로그램을 포함하여 전체 코드가 128KB 플래시 메모리에 저장된다.

PDA에는 Windows CE 운영체제에서 동작되는 응용프로그램이 개발되어 동작하며, 데이터의 측정을 위하여 프로파일러를 제어하며 PrI를 계산하기도 한다. 평탄성 지수의 계산을 위한 데이터 획득 및 처리에 대한 전체 과정이 자동으로 진행된다.



〈그림 7〉 간략화된 TCP/IP 스택



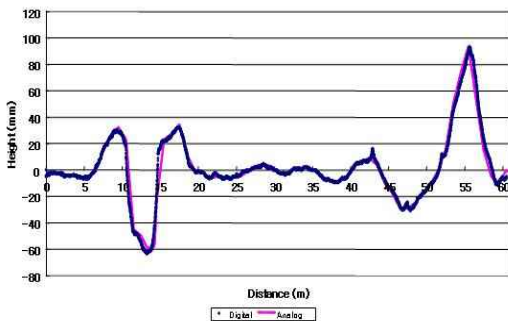
4. 실험

개발된 프로파일러는 정확한 측정을 위하여 적합하게 수평적 또는 수직적으로 조정작업이 이루어져야 한다. 수평적 거리에 대한 조정을 위하여 프로파일러를 미리 알려진 거리에 대하여 이동함에 따라 측정한다. 미리 측정된 약 100m의 거리 데이터와 비교하여 센서에 대한 교정을 한다. 수직적인 높이에 대하여서는 미리 알려진 두께의 시료를 사용하여 실제 구동휠의 높이와 프로파일러로 측정된 높이 데이터를 비교하여 교정한다. 그리고 실제 테스트 장소로 한국건설기술연구원에서 반복 측정 실험을 수행하였는데 테스트 장소가 좁은 범위의 표면 텍스처와 평탄성 범위를 갖고 있어 주파수 범위에 있어 제약이 있었다.

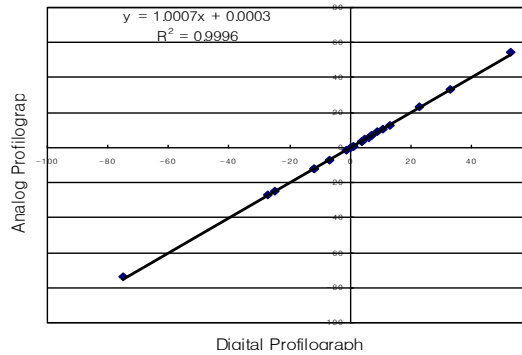
3 번의 반복적 측정이 이루어졌고, 개별 측정은 도보의 속도로 이루어졌다. 종단 프로파일은 거리 인코더로 매 1cm 마다 측정되었다. 측정 전체 길이는 65.48m 이다. 측정 데이터는 동일한 경로에 대하여 기존의 아날로그 방식과 개발된 디지털 방식으로 동시에 측정 기록 되었다. 프로파일은 cross correlation 에 대하여 조사되어 상호 비교되었k. 그림 8은 측정에 대한 결과를 비교한다. 개별 그래프는 3회의 반복 실험에 대한 평균치를 나타내고 있다. 그들 사이에 매우 정확한 유사성이 있음을 발견한다.

실험에서 사용된 개발된 프로파일러가 기존의 아날로그식 프로파일러와 매우 유사함을 발견한다. 그림9의 상호 상호 연관성 비교에서 두 방식이 매우 유사함을 발견한다.

다음은 상기의 측정데이터에 대하여 PrI 값이 계산된다. 결과가 표 1에 표시한다. PrI는 전체 측정 구간에 대하여 null band($\pm 2.5\text{mm}$ band)를 사용하여 얻어진 데이터에 대하여 절대값을 취한 후 결과를 합하는 형식으로 계산된다. 개발된 프로파일러에서는 PDA의 Windows CE에서 동작하는 PrI 계산 프로그램으로 계산된다.



〈그림 8〉 기존과 새로 개발된 방식간의 비교실험



〈그림 9〉 기존과 개발제품간의 상호 연관성 비교

〈표 1〉 PrI 계산

	#1	#2	#3
PrI(cm/km)	479.54	478.77	485.64

그림 10은 PDA에서 동작하는 테스트 프로그램을 보여준다. 측정된 데이터가 320 x 240 픽셀의 화면에 표현되고 스크롤 기능도 구현되었다. PrI는 자동으로 계산되며 화면의 바탕에 값이 나타난다.



<그림 10> 운전프로그램



<그림 11> 테스트 사이트 전경

그림 11은 한국건설기술연구원에 있는 실증실험을 위한 테스트 사이트 및 실험 모습을 보여준다. 운전자는 측정 중에 교통 상황을 감시하면서 측정을 할 수 있는 편리함이 있다.

5. 결론

본 논문에서는 기존의 12휠 프로파일러의 측정시스템이 갖고 있는 문제점을 분석하고, 이를 보상하기 위한 새로운 해석학적 모델을 수립하였다. 그리고 새로운 무선랜 방식의 프로파일러가 제안되었고 구현되었다.

디지털 방식의 프로파일러의 정밀성을 평가한 후 테스트 사이트로부터 PrI를 얻어 그 가능성을 얻었다. 새롭게 개발된 프로파일러는 정밀성과 반복성에서 좋은 결과를 보여주었다. 현재까지의 디지털 프로파일러 개발을 통하여 측정 데이터 해독에서 야기되는 오류를 줄일 수 있으며, 해독시간 또한 크게 줄일 수 있음을 예상된다.

본 연구를 통해 개발된 디지털 노면 평탄성 측정 장비는 7.6m 프로파일미터의 아날로그 방식으로 얻어진 데이터를 디지털화하는 것을 목표로 개발되었으며, 현장 실측 데이터의 관계분석을 통해 장비의 유용성을 확인하였다. 본 장비는 IEEE802.11b 무선 랜을 사용한 데이터 획득 기술 방식으로 이를 디지털 프로파일미터에 활용한 것은 세계최초이다. 본 장비의 개발을 통해 다음의 세 가지 사항을 개선시킬 수 있었다.

앞으로는 중앙 구동휠의 회전 움직임으로부터 야기된 프로파일 측정의 비선형적 특성을 보완하는 필터링 기술 개발이 고려되고 있다. 아울러 이러한 비선형적 특성이 PrI 및 파장별 응답 특성에 어떻게 영향을 주는지에 대한 연구를 계속할 계획이다.

참고문헌

R. Hassan, K. McManus, “Estimating dynamic loading of pavements from surface profile properties”, Road & Transport Research Journal, Vol. 10, no. 3, pp. 3-18. Sept. 2001

American Society of Testing and Materials, “Terminology Relating to Vehicle-Pavement Sections” ASTM E 867, Annual Book of ASTM Standards, Vol4, 03, 2000

American Society of Testing and Materials, “Test method for measuring pavement roughness using a profilograph” ASTM-E 1274,
<http://www.jamescoaxandsons.com/>

B. T. Kulakowski and J. C. Wambold, “Development of Procedures for the Calibration of Profilographs”, Publication No. FHWA-RD-89-110, Aug. 1989.



Bohdan T. Kulakowski and James C. Wambold, “ Development of Procedures for the calibration of profilograph” , FHWA-RD-89-110, 1989

R. W. Perera, S. D. Kohn, “Issues in Pavement Smoothness: A Summary Report” , NCHRP Web Document 42 (Project 20-51[1]): Contractor.s Final Report, 2002

S. Shon, I.Yoo, “Development of Digital Profilograph” ,KICTresearch report, 2004

Behrouz A. Forouzan, “TCP/IP protocol suite” , McGraw-Hill, 2000

Jeremy Bentham, “TCP/IP Lean” , CMP, 2002

Intersil “Prism Driver Programmers Manual” , 2002