논문 01-01-08

노면 종·횡단 요철 자동 측정 시스템 개발

Development of an Automatic Transverse and Longitudinal Road Profile Measurement System

嚴 正 鉉*, 徐 東 善*, 許 雄*, 柳 明 璨**, 金 峻 梵***
(Jung-Hyun Eom*, Dong-Sun Seo*, Woong Huh*, Myong-Chan Roo**, Joon-Bum Kim***)

요 약

도로 노면상태와 관련된 신뢰성 있는 데이터는 도로 유지 및 관리 당국과 운전자에게 도로 노면상태에 대한 정보를 제공하기 위해 그 중요성이 날로 증대하고 있다. 본 논문은 새로운 고속의 자동 노면 데이터 획득장치의 개발에 관한 것이다. 개발된 장치는 100km/h의 주행속도에서 도로노면 횡단 전체 폭에 대해 30cm 간격으로 종단 노면 데이터를 수집하고, 수집된 데이터로부터 국제평탄성지수(IRI)를 계산하여 노면요철 데이터와 함께 스크린상에 디스플레이한다. 이 같은 시스템의 구현을 위해 광학적 거리측정기, 계측차량의 진행거리 및 움직임 계측기, 데이터 처리 및 디스플레이 모듈을 고안하였다. 70km/h의 주행 속도로 측정한 결과, 개발된 시스템의 측정 정확도는 표준 노면에 대해 IRI에서 ± 0.1m/km 정도의 오차를 보이는 것으로 나타났다. 또한, 개발된 장비의 성능을 검증하기 위해 이미 포설된 노면에 대한 측정을 수행하여 기존 장비 및 육안 측정 결과와 비교하였다.

Abstarct

The reliable data relating to the condition of road surface is of increasing importance to deliver the road condition to driver and road management authority. This paper describes the development of a new high-speed, automatic, road data collection system, which collects the longitudinal road data with ~30cm interval covering full width of the road at 100km/h speed. The system calculates the international roughness index (IRI) from the collected data and displays the IRI and road profile data on the screen. To develope the system, we implement an optical range finder, advanced distance and motion detectors, and signal processing and display modules. The measurement accuracy of the system at 70km/h operation speed shows ± 0.1m/km in the IRI for the standard road. To confirm the performance of the developed system, we also measure the IRI of a deployed highway road and compare the results with a conventional system and human eye measurement results.

Key-words: road profiler, international roughness index, optical roughness measurement

* 明知大學敎 電子工學科
(Dept. of Electronics, Myong-Ji University)
** 明知專門大學 土木工學科
(Dept. of Civil Engineering, Myong-Ji College)
接受日: 2001年 3月15日, 修正完了日: 2001년 7月20日
*** 韓國道路工事 道路硏究所
(Highway Research Center, Korea Highway Cooperation)
* 본 연구는 2000년도 한국과학재단 산학협동연구(2000-1-30400-00201)결과의 일부로 수행되었음.

Ⅰ. 서 론

국가 대동맥인 국내 도로망은 2차선 기준으로 고속도로 4,500km, 국도 25,000km, 지방도 36,000km에 달하고 있으며, 꾸준한 신규건설이 지속되고 있다. 이 같은 거대 도로망을 효율적이고 체계적으로 관리를 위해서는 각 구간별 도로노면 상태에 대한 신뢰성 있는 계측 및 평가 데이터가 확보되어야한다. 해외의 경우 노면상태 계측장비의 개발과 더불어 이를 이용한 노면상태 계측에 대한 연구결과들이 발표된바 있다.[1-4] 그러나, 국내에서 이 같은 노면상태 계측장비가 개발된 바 없으며, 육안 및 승차감에 의해 노면상태를 조사하고 있는 실정이다. 이 같은 데이터는 신뢰성이 거의 없으며, 신뢰성 없는 데이터로 전국 도로망의 노면 정보를 제공하는 것은 그 의미가 크게 훼손된다. 해외의 도로 노면상태 계측장비로는 기계적인 계측에 근거한 프랑스 LCPC사의 APL 장비, 초음파를 이용한 캐나다 Roadware사의 ARAN 장비, 레이저 광파를 이용한 호주 ARRB의 Multilaser Profiler, 등이 개발된 바 있으나, 국내에서는 이 같은 장비가 개발된 바 없다. 이에, 본 논문에서는 국내에서 처음으로 산학연 협동으로 시험 개발한 도로노면 계측장비에 대해 논한다.

현재의 노면 계측장비의 개발 추세는 속도 및 분해능 면에서 우수한 광파를 이용한 노면상태 계측장비가 주종을 이루고 있다. 본 연구에서 논할 계측장비도 광파를 이용한다. 본 계측장비의 핵심은 광파를 이용한 소형의 근거리 계측모듈, 거리계측 시스템을 탑재한 차량의 진행거리에 따른 데이터 샘플시간을 결정하기 위한 거리계측 모듈, 차량 움직임을 보상하기 위한 가속도 센싱모듈, 국제평탄도지수(IRI) 계산 및 화면상에 데이터 디스플레이를 위한 데이터 처리 및 디스플레이 모듈로 구성된다. 도로노면 요철측정의 핵심모듈인 광파를 이용한 광학적 거리측정 모듈은 레이저 다이오드를 이용한 모듈들이 개발된 바 있으나, 본 연구에서는 가격이 싸고 온도 안정성이 우수한 발광다이오드를 이용함으로서 이미 보고된 모듈과[5] 유사하나 정확도 및 안정도를 보다 증진시켰다. 이 거리 측정기 모듈을 직선보다는 U자 형 바(bar)에 배열하여 횡단요철측정을 위해 여러 개의 거리계측모듈이 장착된 바가 도로를 이용하는 여타의 차량통행에 방해를 주지 않도록 했다. 그러나, U 자형 배열에 의해 횡단요철 측정폭은 도로노면의 전 폭에 해당하는 3.7m가 되도록 배열하였다. 한편, 측정모듈간의 광원간섭으로 인한 데이터 오류를 제거하기 위해서 각각의 모듈에 대해 일정간격으로 계측시간분할 방식을 취하였다. 종단요철은 모든 횡단 기준점에 대해서 측정차량이 최고속도(120km/h)일 때, 노면길이 30cm에 대해 7.5cm 간격으로 측정하여, 이를 4회 비교하고 이중 2회 이상의 일정한 값만을 추출하여 평균값을 데이터화하였다. 측정장비를 장착한 차량운행속도와 관계없는 측정을 위해서 전체 시스템을 거리계측장치(DMI) 펄스신호로 동기 시켜, 일정한 운행속도에서만 계측이 가능한 기존장비의 문제점을 해결했으며, 측정 구간(interval)도 임의로 설정할 수 있도록 했다. 거리측정모듈이 부착된 바에 가속도 센서를 부착시켜 측정 차량의 진동, 급 가속 및 제동, 커브도로에서의 차량 기울음 등에 의한 측정오차를 보상하였으며, 측정오차는 ± 1.5mm 이내, 최대 노면파고 측정범위는 ± 160mm 이고 최대 측정거리는 200km 이상으로 구현하였다. 각 측정모듈 및 가속도계에서 측정된 데이터는 인터페이스 모듈에 집계되어 주(main) 컴퓨터로 전송되며, 주 컴퓨터에서는 수집된 데이터를 분석하여 측정지점의 위치 및 가속도 정보는 물론, 비디오 카메라로부터 얻은 도로화면과 종 · 횡단 노면 데이터가 동시에 디스플레이 되도록 하였다.

2장에서는 개발된 노면 측정기기와 기존의 노면요철 측정장비와 측정방식에 대한 원리 및 비교 분석과 전체 시스템의 구성 및 오차보상을 다루고, 3장에서는 노면 종 · 횡단 요철측정 장비를 이용한 현장 측정결과 및 고찰에 대해서 설명하고, 4장에서는 결론을 맺는다.

Ⅱ. 노면 요철 측정원리

1. 노면의 요철 측정 방식

노면의 요철측정은 종 · 횡단 방향에 대해 근본적으로는 동일하나, 횡단요철의 경우 4m 내외의 노면폭에 대한 계측을 수행하나 종단요철은 수100 km의 도로 구간에 대한 계측이 수행되므로 횡단요철과 종단요철을 측정하는 방법은 다소 다를 수 있다. 그림 1은 기본적인 노면요철 측정방법들을 보여주고 있는데, 직선자로부터 요철까지의 거리를 재는 직선자방

식(b)과 본 연구에서 채택한 기준면에서 노면까지의 거리를 계측하여 노면요철 데이터를 뽑아내는 거리계측방식(a)이 있다. 거리계측 방식에서는 소프트웨어상에서 가상의 평면을 설정하고, 그 평면으로부터 노면까지의 깊이를 소성변형으로 정의한다. 직선자 방식에서는 직선자를 노면에 밀착시키고 그 틈새의 깊이를 측정하여 소성변형으로 정의한다. 횡단요철은 도로의 특성에 따라서 평균법 또는 피크법에 의한 소성변형량을 측정하게 되는데, 직선자의 경우 피크법을 적용하기에 부적합하고 평균법에 의한 측정도 하부층 침하로 인한 경우에는 소성변형을 측정하기에 부정확한 단점을 가진다. 따라서, 기준면에 대한 거리계측 방식이 주로 이용되고 있다.

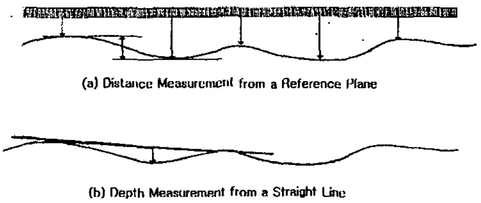

그림 1. 노면 요철 측정 방법

Fig. 1. Methods for road profile measurements.

횡단요철 측정의 경우, 종래의 간단한 방법으로서 그림 2에 보인 바와 같은 횡단 프로파일 메타가 이용되는데, 양쪽 지지대의 높이를 조절하여 설치한 후에 요철파형 기록계를 한쪽 지지대에서 다른쪽 지지대로 이동시키면서 연속적인 상하운동을 기록하는 방식이다. 그러나 이러한 방법들의 측정을 위해서는 교통차단이 불가피하며, 각 측정 지점마다 측정 장치를 다시 설치해야하는 번거로운 점이 존재하는 등, 여러가지 제약이 따르게 된다. 이러한 단점들을 극복하고 좀더 효율적으로 노면상태 측정을 위해서, 본 연구에서는 광파를 이용한 거리측정 모듈을 장착한 수평 바를 이용하여 모듈이 장착된 기준면에서 노면까지의 거리를 계측하고, 이 값의 최대 및 최소치 사이의 차를 소성변형으로 정의하였다.

종단요철을 측정하는 가장 친숙한 방법은 수준측량을 하는 것이나, 이러한 방법은 비효율적이고, 비교적 짧은 구간에서만 적용이 가능하다. 레벨을 이용하는 수준측량이 아닌 다른 종단요철 측정방법으로는 기계적인 압전판으로 평탄성을 측정하는 방식과 차량에 부착된 진자 또는 멀티 레이저를 이용한 방식등 다양한 측정방법들이 사용되고 있다.

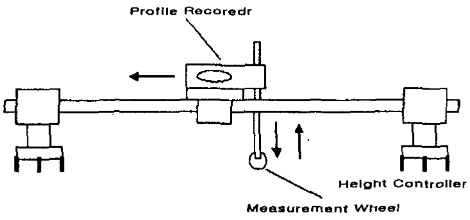

그림 2. 횡단 프로파일 메터

Fig. 2. Transverse road profile meter

본 연구에서는 고속의 거리측정 모듈들을 이용하여 횡단 및 종단요철을 주행중에 자동으로 동시에 측정하는 다기능 장비를 개발하고자한다. 본 개발장비에서는 빠른 시간 안에 요철측정이 가능하므로, 종단방향의 각 지점마다 횡단요철을 측정하고 각 지점별 측정 데이터를 종단 방향으로 나열하여, 횡단 및 종단요철을 동시에 계측할 수 있다. 즉, 각각의 횡단면 센서는 동시에 종단면 측정센서로 활용하는 것이 가능하다. 또한 측정시간이 매우 빠르기 때문에, 캐나다 Roadware사의 ARAN과 같은 초음파를 이용하는 장비와는 달리 종단요철 데이터를 수 cm간격으로 정밀측정하는 것이 가능하다.

2. 거리 측정 모듈

광파를 이용한 비대칭 삼각 측정에 의한 근거리 측정이론에 입각하여, 광원을 1.6kHz로 변조시켜 노면으로 조사시키고 반사된 광을 수신하기 위한 광학계 및 수신 신호처리부를 설계하였다.[5] 삼각거리 측정법은 인간의 두눈과 같이 광을 송.수신하는 기준점과 반사물체가 존재하는 물체점 사이에 이루는 각도를 계측하여 거리를 환산한다. 광원으로는 ~830nm의 발광다이오드(LED)를 사용하였으며, 검출기로는 반사광의 입사각 계측을 위해 PSD (position sensitive detector)를 이용하였다.[6] 참고문헌 [5]와 유사하게 반사면의 반사율과 무관한 검출을 위해 LED 구동회로에 자동전력조절기능을 추가하였으며, 태양광의 영향을 제거하기 위해 전기적인 배경잡음회로를 첨가하였다. 수신된 광은 전기신호로 전환된 후에 증폭, 필터링 및 샘플링된 후 A/D 변환되고, 변환된 데이터는 마이크로 콘트롤러에서 일정 평균연산을 거쳐서 PC로 전송되도록 하였다. 이러한 일련의 거리측정 모듈

의 구성도를 그림 3에 나타내었다. 그림 3의 회로에 사용된 각 블록의 역할은 참고문헌 [5]에 설명한 바와 유사한 기능을 수행한다. 거리측정 모듈은 2가지 종류로 제작되었는데, 3절에서 설명되는 바와 같이 측정 바에서 수직으로 거리를 측정하기 위한 기준거리 30cm 거리측정모듈과 측정바의 양 끝에서 사각으로 거리를 측정하기 위한 기준거리 90cm 거리측정모듈을 제작하였다. 30cm 거리 측정모듈의 광학계 구성은 참고문헌 [5]에 기술된 바와 동일하며, 90cm 측정모듈은 보다 많은 반사광을 수집하기 위해 구경 38mm 대신 50mm의 수광렌즈를 사용했으며, 송수광부 사이의 거리를 15cm에서 20cm로 증대시켜 측정오차를 줄이고자 하였다. 제작된 30cm 거리 측정기의 측정거리 분해능은 ± 0.2mm로서 노면요철 계측시스템에서 통상 요구하는 ± 1mm 보다 훨씬 우수하게 나타났으며, 90cm 거리측정기의 분해능은 수직측정에서 ± 0.5mm로 나타났으나 30° 사각측정에서는 반사체의 조건에 따라 ± 0.8 ~ ± 1mm으로 증가함을 보였다. 두 종류의 모듈 모두가 시스템의 요구조건은 만족하는 것으로 나타났으나, 90cm 모듈의 사각측정에서 반사체의 조건에 따라 자동전력조절 범위를 벗어나는 경우가 관측되어, 최소 수광전력을 벗어나면 측정불가로 판단하여 측정 데이터 샘플링에서 제외시켰다.

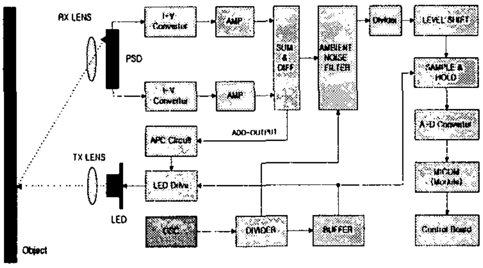

그림 3. 거리측정기 모듈의 블록도

Fig. 3. Bock diagram of the distance measurement module.

3. 횡단 요철 측정 바

앞서 언급한 거리측정 모듈을 기준면을 이루는 바에 장착시켜 각 모듈로부터 노면까지의 거리를 측정하여 노면의 횡단요철을 측정한다. 주행중인 여타의 차량에 영향을 미치지 않고 노면 횡단요철 계측이 가능하도록 그림 4에 보인 바와 같이 U자형 바에 거리측정모듈을 배치하였다. 차량 통행으로 인한 주된 노면 파손지점인 대형차량의 양 바퀴지점에 거리측정모듈을 조밀하게 배치하였고, 그 외 지점에서는 넓은 간격으로 배치하였다. 1 ~ 9번 모듈은 수직방향으로 특정지점의 거리를 계측하나, 양측면의 10 ~ 13번 모듈은 사각방향에서 거리를 계측한다. 광파를 이용한 방식은 음파를 이용한 방식에 비해 이 같이 사각에서 거리를 계측할 수 있기 때문에 측정 바의 길이를 줄일 수 있어서, 측정 바를 장착한 차량이 주변 차량의 교통 흐름에 영향을 주지 않고 노면상태계측이 가능하다. 한편, 종단요철은 측정 바를 장착한 차량이 일정한 거리를 진행한 후에 각 모듈에서 계측된 깊이 데이터를 종합하면 종단요철 계측 값이 된다. 통상, 종단요철은 차량바퀴 근처인 2번 및 8번 모듈의 데이터 값을 취한다. 종단방향의 요철변화는 횡단방향보다 변화주기가 훨씬 큰 편이어서, 통상 30cm 간격으로 데이터를 취한다. 최대 120km/h 의 속도로 진행한다해도 30cm의 분해능은 최대 샘플링 펄스 주파수 100Hz(pulse/sec) 정도면 가능하지만, 펄스 1개에 의존해서 데이터를 획득한다는 것은 오차의 원인이 될 수 있다. 따라서 오차를 줄이기 위해 4회 평균한 값을 데이터로 간주하여 실제 진행거리 측정주파수는 400Hz(pulse/sec)로 하였으며, 이는 7.5cm 간격으로 데이터 획득이 가능함을 의미한다.

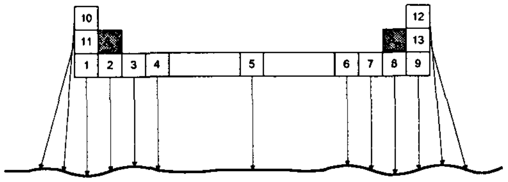

그림 4. 횡단 노면 계측을 위한 거리측정 모듈 배치도

Fig. 4. Arrangement of range finder modules for transverse road profile measurement.

4. 측정 차량 움직임 보정

2절에서 언급한 거리측정모듈에 의해서 거리를 정확히 측정하였더라도, 차량이 기울어지거나 측정중에 차량이 흔들리면 이로 인한 측정값의 오차가 발생할 수 있다. 따라서, 거리측정장치로부터 출력된 데이터를 측정차량의 움직임만큼 보상해 주어야 한다. 횡단요철의 경우 개발된 시스템이 특정 지점에서 13개 모듈 모두가 거의 순간적으로 거리를 계측하기 때문에,

차량 움직임에 대한 보상은 차량자체의 기울어짐에 의한 오차만을 고려하면 된다.

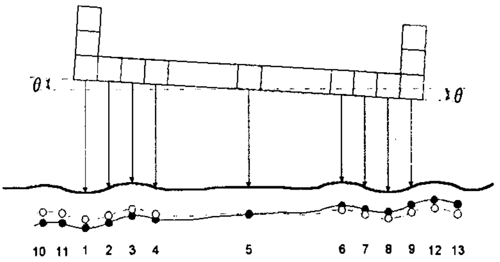

그림 5. 노면 횡단요철 계측에서 측정시스템의 기울어짐 영향

Fig. 5. Effect of measurement system tilt in the transverse road profile measurement.

즉, 본 개발 시스템이 1.6kHz의 클럭에 의해 거리계측모듈이 작동하므로, 횡단요철 데이터를 획득하는 동안의 차량 움직임은 무시할 수 있기 때문에, 그림 5에 보인 바와 같은 계측하는 순간의 계측차량의 자세만을 보상하면 된다. 정상적인 상태에서는 주어진 노면에 대한 횡단요철은 점선과 같이 나타나나, 그림에 보인 바와 같이 계측기 탑재차량이 θ 의 각도로 기울면 실선으로 보인 바와 같이 왼쪽으로 경사진 것으로 잘못 나타나게 된다. 이를 보정하기 위해 횡단요철 데이터의 직선 평균값과 가속도계의 출력을 이용하였다.

한편, 종단요철 측정은 특정 지점의 횡단요철 측정 후 다음 지점의 횡단요철 측정에 의해 이루어지기 때문에, 이 두 측정점 사이에서 차량의 흔들림에 의한 오차를 보상하여야한다. 차량자체 기울음으로 인한 횡단요철 오차는 소프트웨어적으로 보상할 수 있지만, 종단요철 계측점 중간에 나타나는 차량의 흔들림, 순간 가속도, 등으로 인한 오차는 별도의 가속도 센서를 이용하여 하드웨어적으로 직접 계측한 값으로 보정 해야한다. 그림 4에 보인 바와 같이 요철 측정바의 좌우(A_L, A_R)에 가속도 센서를 부착하여 차량 운행에서 오는 흔들림과 급제동 및 급출발 등을 보상하였다. 가속도 센서에서 출력되는 전압의 변화를 디지털 데이터로 변환하여 거리측정 데이터에서 감산 연산을 통해 차량움직임을 보상하였다. 가속도계를 이용하여 변위 정보를 얻기 위해서는 시간에 대한 2중 적분법이 필요하다. 적분방법은 여러 가지가 있으나 비교적 오차가 적고 구현하기 쉬운 사다리꼴 적분법을 택하였다. 적분에 의한 직류성 기준준위 누적오차는 노면변화파장 50m 이상의 주파수에 대한 고주파 필터링에 의해 제거되도록 하였다.

III. 전체 계측 시스템

1. 시스템 구성

전체 시스템의 구성도는 그림 6에 보인바와 같다. 각각의 거리측정모듈 및 가속도계에서는 측정된 데이터를 A/D 변환하여 데이터를 평균할 수 있도록 하였으며, 처리된 데이터는 모니터상에 디스플레이 되도록 하였다. 즉, 종속(slave) 모듈(거리측정모듈, 가속도계)은 측정모듈에서의 데이터 획득 및 처리를 제어하는 마이크로 콘트롤러가 내장되어 있어서, 주(master) 모듈과의 데이터 송수신은 물론 간단한 연산을 수행하여 주 모듈로 측정데이터를 전송하며, 주 모듈은 DMI 정보에 따라서 각각의 종속모듈로부터 읽어들인 데이터를 순차적으로 메모리에 저장하며, 저장된 데이터를 제어 PC로 전송하도록 프로그램하였다. 제어 PC에서는 최종적으로 이들 데이터를 읽어 파일을 생성하고, IRI 계산을 위한 신호처리를 수행한 후에 노면상태에 대한 주요정보를 노트북 PC의 모니터에 디스플레이 하도록 하였다. 노트북 PC에서는 전방 카메라로부터 들어는 실제 영상과 더불어 각종 노면정보, 차량의 자세, 등을 계측자가 보기 쉽게 디스플레이한다.

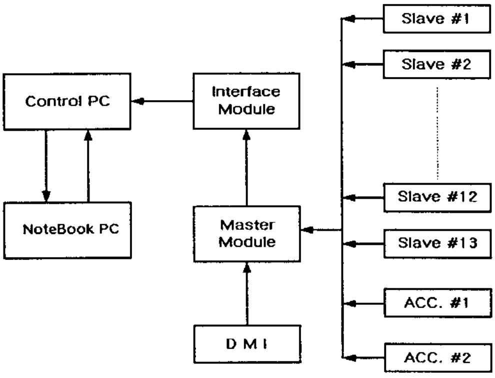

그림 6. 시스템 구성도

Fig. 6. System Configuration

그림 7은 개발된 노면 측정 시스템의 전면부와 소프트웨어에 의한 측정 데이터의 디스플레이 화면을 보여주고 있다. 계측기 부착 차량이 교통흐름을 방해하지 않도록 U 자형의 측정 모듈 바를 볼수 있으며, 디스플레이 화면에서는 횡단요철을 나타내는 막대 그래프와 선택된 번호의 모듈에서 계측된 종단요철, 차량 자세 및 CCD로 입수한 차량 전방 화면을 동시에 볼 수 있다.

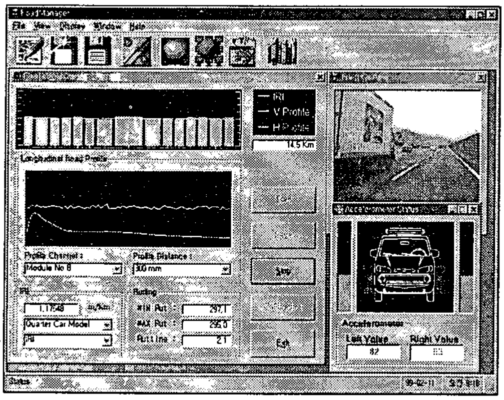

그림 7. 개발된 노면요철측정 시스템(상) 및 측정 데이터 디스플레이 화면 (하)
Fig. 7. Developed measurement system (upper) and its display screen (lower)

그림 8은 시스템을 저속으로 운행하면서 2번 모듈에서 시험면에 대한 기준점 까지의 거리를 계측한 결과이다. 차량의 흔들림으로 인해 측정오차는 ± 1.5mm 이고 표준오차는 ± 1mm 이하로 나타났다. 30cm가 기준면이므로 기준 면 근처에서의 측정 오차는 ± 1mm 이내임을 보인다. 한편, 사각에서 측정되는 모듈들의 출력은 엔진 구동 등으로 인한 차량의 떨림에 대해 매우 크게 영향을 받는 것으로 나타나서 계측 불가능한 경우가 나타났으며, ± 3mm 이상의 커다란 오차를 보여서 신빙성이 크게 뒤지는 것으로 나타났다. 이는 발광다이오드 출력 송신광의 퍼짐과 사각 주사에 의해 차체의 상하 움직임이 송신광원의 움직임으로 환산된 때문으로 예측된다. 이에 따라 실제 노면에 대한 고속 측정에서는 10 ~ 13번 모듈의 측정 데이터를 노면 데이터로서 고려하지 않았다.

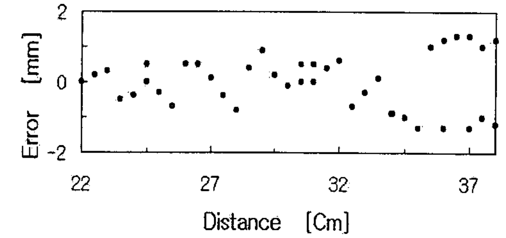

그림 8. 측정거리에 대한 오차
Fig. 8. Measurement error as a function of the distance

2. 국제 평탄성 지수 (IRI)

각 국의 노면 평탄성 데이터가 서로 혼용되지 못하고 동일한 국가에서 얻어진 데이터라고 할지라도 측정 방법, 시기, 조건, 등에 따라 결과가 달리 나타나는 단점을 보완하기 위해 국제 평탄성지수 (IRI)라는 표준규격을 도출하게 되었으며, 다음의 사항이 고려되었다.[7,8]

* 개발된 지수는 차량의 거동특성과 관련되어야함.
* 개발된 지수는 노면의 프로파일(profile)과 관련되어야함.
* 다양한 종류의 측정장비(프로파일 계측, 반응계측, 등)로 측정 가능해야함.

평탄성을 측정하는 장비는 크게 노면의 요철을 직접재거나 노면 요철에 대한 차량의 반응을 측정하는 방법이 있는데, 전자의 경우에는 포장면의 요철 정도를 대표 할수 있는 값을 얻기위해 측정된 데이터를 통계적으로 처리하는 과정이 필요하며, 후자의 경우는 서로 다른 장비로 측정한 값을 통일된 지수로 표현하기 위한 검증과정이 요구된다. 본 연구에서 개발된 장비는 노면요철을 직접재는 전자에 해당하는 장비이다. 그러므로 통일된 IRI를 얻기 위해서는 차량의

거동특성에 관련된 데이터를 얻기 위한 통계적인 처리가 필요하다. 본 연구에서는 그림 9와 같은 계산과정을 거쳐서 IRI를 계산하였으며, 구해진 IRI는 m/km의 단위를 갖는다. 이동평균 필터링은 30cm 구간의 샘플링 데이터에 대해 노면 프로파일 변화파장 5m ~ 50m에 대한 대역통과 필터로 수행하였으며, QCS(Quarter Car Simulation)은 필터링된 노면을 하나의 바퀴가 달린 차량으로 시속 80km로 주행할 때, 차량의 반응을 계산하는 알고리즘인데 참고문헌 [7]과 [8]에 제시된 모델을 이용하였다. 한편, 계산 프로그램은 참고문헌 [7]의 코드를 개량하여 이용하였다.

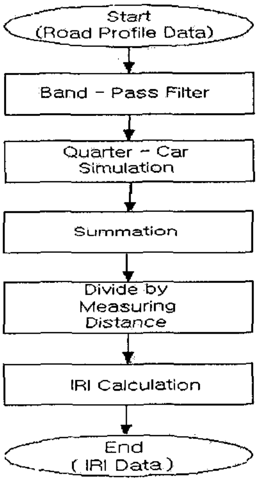

그림 9. IRI 계산과정

Fig. 9. Folwchart for IRI calculation

IV. 노면 요철 계측 결과 및 고찰

개발된 장비의 성능을 객관적으로 검증하기 위해서 현장시험을 실시하였다. 현장 검증 시험은 (1) 수준측량 데이터와의 비교평가, (2) 측정의 반복성 조사, (3) 기존 장비와의 비교 평가 등의 방법으로 이루어졌다. 이와 같은 현장시험은 영동고속도로 상에 있는 덕평폐도, 경부 고속도로(상행 63km~38km), 38번 국도(경기도 안성) 등에서 실시하였다.

그림 10은 덕평폐도 중 일부구간에 100m 거리를 선정하여 정밀도 1mm의 수준 측량을 한 후 계산된 IRI와 같은 장소에서 개발된 장비를 이용하여 시속 70km로 주행하며 종횡단요철을 반복 측정하여 IRI를 계산한 결과를 보여주고 있다. 수준 측량의 간격은 30cm 였으며, 개발된 장비를 이용하여 10회 반복 측정한 결과를 보여준다. 수준측량에 의한 IRI는 2.26m/km(수평실선)으로 계산되었으며 측정값에 의한 IRI(네모)는 2.21 ~ 2.35m/km 사이의 값을 나타냈다. 10회의 측정에 의한 IRI값은 모두 수준측량으로 구한 IRI의 ± 5% 이내에 분포하여 정확성과 반복성은 신뢰할만한 수준으로 평가되었다. 매회 측정된 IRI 값이 조금씩 변하는 이유는 시스템의 계측오차 뿐만아니라 측정할 때마다 종단 주행선을 정확히 일치시킬 수 없었기 때문인 것으로 여겨진다.

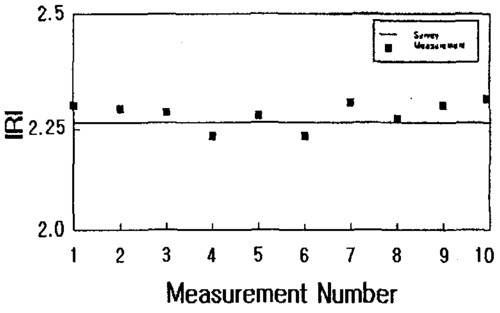

그림 10 계측횟수에 따른 덕평폐도 구간의 IRI 계측 결과

Fig. 10. Measured IRI for the closed road at Duckpyong as a fuction of the measurement number.

개발된 장비와 프랑스 LCPC사의 APL과의 비교를 위하여, 각각의 장비로 안성 인근의 38번 국도에서 시속 60km로 주행하며 측정한 결과를 그림 11에 나타내었다. APL에 의한 측정값은 QI(Quartercar Index)로 표시되기 때문에, 그림에서 APL 측정치의 단위는 오른쪽에 나타내었다. 노면 평탄도를 나타내는 단위로서 두 장비가 서로 다른 체계를 사용하고 있어서 직접적인 비교는 불가능하지만, 전반적인 경향에서 일치하는 것을 알 수 있다.

다음으로, 경부 고속도로 안성에서 신갈 사이의 상행선에서 63km부터 38km 사이의 구간에서 시속 90km의 속도로 주행중에 노면 요철을 측정하여 계산한 IRI와 5명의 조사원의 승차감이나 느낌 또는 육안 관찰에 의한 Panel Rating에 의해 조사된 IRI를 비교

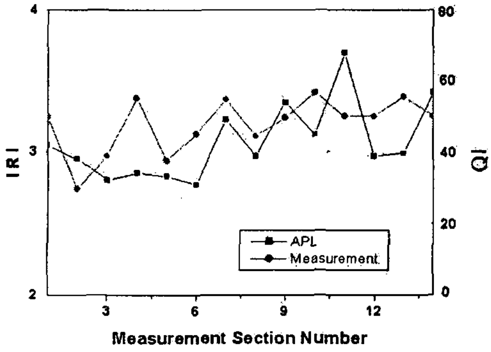

그림 11 안성 38번 국도에서의 IRI 측정값(타원)과 APL에 의한 측정값(네모)의 비교
Fig. 11. IRI comparison of the developed system (ellipses) with the APL (squares) for road no. 38 near Ansung.

한 것을 그림 12에 나타내었다. 인간의 주관이 다르고 계측오차가 있을 수 있어서 정확히 일치하지는 않지만 전반적인 경향은 일치하고 있는 것을 보여준다.

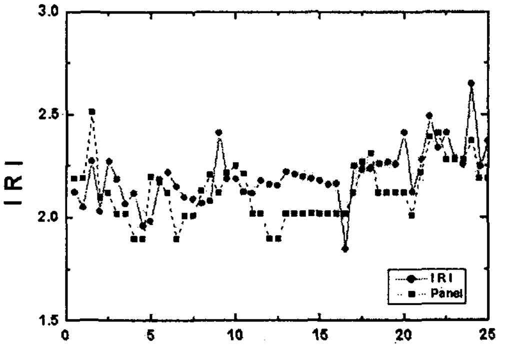

그림 12 경부고속도로 상행선 안성과 신갈사이의 IRI 측정값(타원)과 조사요원에 의한 측정값(네모)의 비교
Fig. 12. IRI comparison of the developed system (ellipses) with panel rating (squares) for the Kyogboo highway road between Ansung and Shingal.

IV. 결론

본 논문에서는 도로노면의 종횡단 요철을 고속으로 자동 측정하는 시스템의 개발에 관하여 논하였다. 시스템의 개발을 위해서 배경잡음제거회로와 반사율에 따른 자동 전력조절회로가 포함된 광학적인 거리 측정모듈을 개발하였으며, 개발된 측정모듈을 차량 전면에 U 자형 바에 장착하여 차량 흐름에 영향을 주지 않고 고속 계측이 가능하도록 하였다. 또한, DMI의 작용으로 주행속도에 관계없이 동일한 간격으로 노면상태를 측정할 수 있는 시스템을 구성하였으며, 차량의 진동에도 측정값이 변하지 않도록 가속도계를 차량의 안쪽에 설치하여 흔들림 및 기울기에 대한 보정을 실시하였다. 차량의 전면에 CCD 카메라를 설치하여 전방상황을 녹화할 수 있도록 하였으며, 측정과 동시에 실시간으로 종횡단 요철과 IRI 값을 화면상에 보여주도록 소프트웨어를 구성하였다. 시스템의 성능을 검증하기 위하여, 표준 노면에 대한 수준측량 데이터와 개발된 장비를 이용하여 70km/h의 주행 속도로 주행하면서 노면상태를 측정한 데이터를 비교 평가한 결과, 개발된 시스템의 측정 정확도는 표준 노면에 대해 IRI에서 ± 0.1m/km 정도의 오차를 보이는 것으로 나타났다. 또한, 기존의 도로노면에 대한 측정 데이터를 외국산 장비 및 조사 요원에 의한 승차감 및 육안 측정 데이터들과 비교 평가한 결과 개발된 장비는 기존 장비와 유사한 성능을 보이는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

[1] J. Hallett and R Wix, "Trial of high speed data capture vehicle for New Zealand state highways", Proc Roads 96 Conf., Part 4, pp. 289-350, 1996.
[2] H. Prem, "NAASRA roughness meter calibration via the road-profile-based International Roughness Index (IRI)", Australian Road Research Board Report ARRB 164, Oct. 1989.
[3] K. Ksaibati, "Comparison of rut-depth measurements obtained with four different techniques", Road & Transport Research, Vol. 5 No. 2, pp. 80-91, Jun. 1996.
[4] E. Diaz, C. Koniditsiots, R. Wix, and F. Clerk,

"Development and application of a high speed road data collection vehicle for enhanced asset management", Proc. 17th ARRB Conf, Part 4, pp, 271-289, 1994.
[5] 엄정현, 박현희, 서동선, 허웅, 김준범, 김용곤, "표면 요철 측정을 위한 광학적 거리 측정기 개발", 한국전기전자학회 논문지, 제 2권 1호, pp. 53-60, 1998년 7월.
[6] Optoelectronic Components Catalog, UDT Sensors Inc, pp. 8-9, 1990.
[7] M. W. Sayers, T. D. Gillespie, and W. D. O. Paterson, "Guideline for conduction and calibrating road roughness measurements", Word Bank Technical Report No. 46, Washington, D. C., Jan. 1986.
[8] M. W. Sayers, "Two quater-car models for defining road roughness: *IRI and HRI*", Transportation Research Report 1215, National Research Council, Washington, D. C., Jan. 1989. pp. 165-172.

저 자 소 개

嚴 正 鉉 (正會員)

1963년 2월 11일생. 1991년 2월 명지대학교 전자공학과(공학사).
1993년 2월 명지대학교 대학원 전자공학과(석사).
1993년 - 1997년 (주)신호전자통신 재직.
1998년 1월 - 현재 (주)뮤렉스 부설연구소 소장.
연구관심분야는 광계측, Video 신호처리, 등임

徐 東 善 (正會員)

1958년 2월 28일생. 1980년 2월 연세대학교 전자공학과(공학사).
1985년 8월 연세대학교 대학원 전자공학과(석사).
1989년 12월 University of New Mexico 전기공학과(박사).
1994년 7월 - 1995년 7월 호주 멜버른대학 광자공학연구실 객원연구원.
1990년 3월 - 현재 명지대학교 전자공학과 교수.
연구관심분야는 광통신, 광자기술, 광계측, 등임.

許 雄 (正會員)

1951년 2월 8일생 1973년 2월 인하대학교 전자공학과(공학사)
1975년 2원 인하대학교 대학원 전자공학과(석사)
1985년 2월 인하대학교 대학원 전자공학과(박사)
1989년 8월 -1990년 7월 일본 동경대학 객원조교수
1979년 3월 청주대학교 전자과 전임강사
1980년 9월 - 현재 명지대학교 전자과 교수
연구 관심분야는 의용계측, 의용신호처리

柳 明 璨 (正會員)

1958년 9월 7일생. 1984년 2월 연세대학교 토목공학과(공학사).
1990년 12월 University of New Mexico 토목공학과(석사).
1994년 12월 University of New Mexico 토목공학과(박사).
1983년 12월 - 1997년 8월 한국도로공사 근무.
1997년 9월 - 현재 명지전문대학 토목과 교수.
연구관심분야는 도로분야, 지반분야 등임.

金 峻 梵 (正會員)

1967년 1월 25일생.
1993년 8월 성균관대학교 토목공학과(공학사)
1995년 2월 성균관대학교 대학원 토목공학과(석사)
1996년 3월 - 현재 한국도로공사 도로연구소 연구원
연구관심분야는 포장유지관리 시스템, 도로포장성능평가 등임