

도로면 측정 분석 시스템 개발 및 국내 도로면 특성평가 응용 연구

손 성 효¹⁾ · 허 승 진^{*2)}

국민대학교 자동차공학전문대학원¹⁾ · 국민대학교 기계자동차공학부^{*2)}

Development of the Road Profiling System and Evaluation of Korean Roads Roughness Characteristics

Sunghyo Son¹⁾ · Seung-Jin Heo^{*2)}

¹⁾Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

^{*2)}School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received 28 January 2002 / Accepted 27 March 2003)

Abstract : The 'AEIPR' (Accelerometer Established Inertial Profiling Reference) method has been applied to measure the road profile. The dynamic road profiling method using AEIPR has the advantages of cost effectiveness, measuring speed and relatively high reliability. However, it is required to improve the double integration algorithm to get the measurement results with the accuracy of higher level. In the first part of this paper, the effective double integration algorithm is suggested and the 'Road Profiler' software is developed on the basis of the algorithm. Road profiling tests are performed using the developed 'Road Profiler' system on the specially designed tracks for the durability tests and the various types of public roads. Test results are shown and evaluated by the international road evaluation indices and classification.

Key words : Road profile system(도로측정시스템), D.I filter(이중적분필터), IRI(International Roughness Index:국제거칠기규격), RN(Ride Number:승차감지수), DRI(Detailed Roughness Index:상세거칠기규격)

1. 서 론

도로면 측정에 관한 기술은 1960년대부터 도로의 성능 및 상황을 조사 분석하기 위해 개발되어 왔다. 개발 초기에는 토목이나 건설공사에서 이용되는 측량법에 의한 정적인 방법에 의하여 측정되어 왔으나, 시간과 인력 소요가 크며 고주파수 영역의 측정에 어려움이 제기되었다. 따라서 동적인 방법으로 고속의 노면 측정 방법들이 개발되었는데, 그 중의 대표적인 방법으로서 GM에서 개발된 AEIPR (Accelerometer Established Inertial Profiling

Reference)를 들 수 있다.¹⁾ 이 방법은 차량에 별개의 센서를 장착한 측정 보조바퀴를 부착하는 접촉식과 레이저 센서를 이용한 비접촉식 거리측정 방법으로 구별된다. 측정된 도로면의 특성평가를 위해서는 IRI (International Roughness Index), RN (Ride Number), ISO 도로면 특성 표기법 등과 같은 도로면 평가 지수가 적용되고 있다.^{1,2)} 본 연구에서는 도로면 측정 신호의 처리 및 체계적인 분석 평가를 위한 통합 프로그램인 'Road Profiler'를 AEIPR 측정 방식을 바탕으로 개발하고자 한다. 나아가서, 개발된 도로면 측정 시스템을 이용하여 국내의 다양한 도로면의 특성 평가 시험을 수행하며, 측정된 데이터 베이스를 체계적으로 구축하고자 한다.

*To whom correspondence should be addressed.
sjheo@kookmin.ac.kr

2. 도로면 측정 시스템 및 분석 소프트웨어 개발

2.1 도로면 측정시스템

Fig. 1은 차량에 별개의 휠을 장착하여 노면을 측정하는 방법을 도식적으로 나타내고 있다. 불규칙한 노면에 접촉하여 움직이는 작은 휠과 차체 운동 사이의 상대변위($z_s - z_r$)는 변위센서(LVDT)로 측정되며, 차체의 기준변위(z_s)는 변위 센서 윗 부분에 장착된 가속도 센서(accelerometer)에 의하여 측정된 차체 가속도 값의 이중 적분에 의하여 산출된다. 본 연구에서는 변위센서 대신 레이저 변위계에 의하여 차체 운동에 대한 도로면의 상대 변위가 측정된다. 측정된 값으로부터 최종적으로 절대적인 도로면의 불규칙 특성을 구하는 관계식은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 식 (1)과 같다.

$$z_r = \int \int \ddot{z}_s = (z_s - z_r) \quad (1)$$

Fig. 2는 Fig. 1의 개념을 실제 차량에 적용한 모습을 보여주고 있다. 시스템 구성은 가속도계, 레이저 변위계(laser height sensor), 차량속도계(vehicle velocity sensor), 그리고 데이터 수집 장치로 구성되며, 식 (1)에 관련된 신호처리 과정을 거쳐 도로면 불

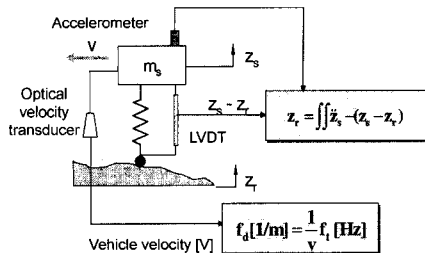


Fig. 1 Concept of the AEIPR



Fig. 2 Road profiling system based on the AEIPR concept

규칙 특성이 생성된다.

2.2 도로면 측정 및 평가 프로그램

AEIPR 방법에 있어 가속도 센서를 통해 얻어지는 차체의 수직 가속도 성분은 이중 적분을 통해 차체의 기준변위로 변환되는데, 적분기의 특성상 초기(initial condition)를 알지 못하면 적분 오차가 발생하며, 이중적분시 오차는 더욱 증폭되어 나타나게 된다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 저역통과필터 및 필터 위상문제를 해결하는 기법인 Mirroring 및 DC 오프셋(offset)을 처리하기 위한 Moving Average 기법과 같은 불규칙 신호처리(random data processing) 기술을 활용하여 이중적분 알고리즘을 개선하였으며, 결과적으로 D.I.Filter(double-integration filter)모듈을 개발하였다. 아울러서, 실제 도로면을 생성하는데 있어 적분오차 외에 변위센서의 노이즈 발생과 측정용 차량의 주행 속도의 불규칙성으로 인한 오차 등에 의한 문제점을 해결하기 위해 추가적인 필터가 설계되었다. 그리고 시간영역(time domain)에서 DAQ 시스템을 통하여 일정한 시간간격으로 측정된 데이터를 측정 주행 차량의 속도를 이용하여 거리영역(distance domain)으로 환산하는 과정에서 차량의 속도변화를 고려하여 일정한 거리간격으로 데이터를 산출해내는 보간(interpolation) 알고리즘을 추가하였다. Fig. 3에서는 D.I Filter 및 거리영역환산 알고리즘이 포함된 도로면 생성 알고리즘의 순서도를 개략적으로 나타내고 있다.³⁾

이상에서와 같이 개발된 도로면 생성 알고리즘을 바탕으로 도로면 측정 소프트웨어인 'Road Profiler'

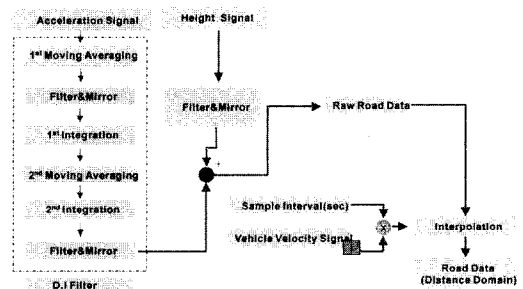
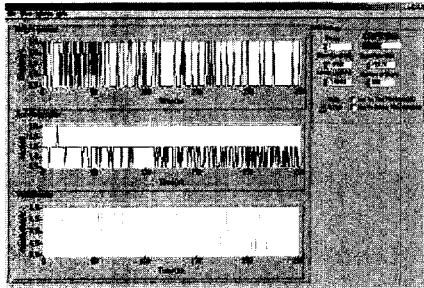


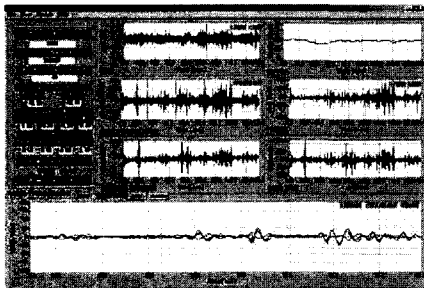
Fig. 3 Flow chart of road profiling code for the 'Road Profiler' S/W

를 Fig. 4와 같이 3개의 모듈로써 구분하여 완성하였다. 프로그램은 NI(National Instrument)사의 C 언어에 바탕을 둔 LabWindows 4.01로 작성하였다. 프로그램은 단일 및 양쪽 트랙을 측정 분석 할 수 있도록 하였고, 각각 데이터 수집모듈(DAQ module), 신호처리모듈(signal processing module), 평가모듈(evaluation module)로 크게 나누어져 있다. 데이터 수집모듈은 최대 5채널, 100kHz 까지 측정 가능한데 Fig. 4(a)에서와 같이 레이저센서, 가속도센서 및 차속센서로부터 들어오는 신호를 실시간으로 확인 할 수 있도록 하였다. Fig. 4(b)의 신호처리모듈은 측

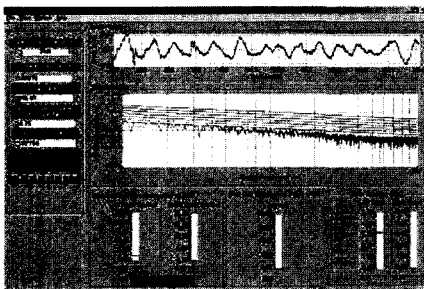
정된 가속도, 속도, 변위 데이터를 불러들여 D.I. Filter를 거쳐 도로면 형상 데이터를 생성하는 과정을 보이고 있다. 평가모듈에서는 생성된 도로면 데이터가 다양한 국제 도로면 평가 기준 및 연구에서 제안된 도로면 평가 기준에 의하여 평가 분석되는데 Fig. 4(c)의 상단의 그래프는 최종적으로 완성된 도로면의 형상을 나타내고 있으며, 중간부분의 그래프는 PSD(Power Spectral Density)를 활용하여 노면을 평가하는 국제분류기준인 ISO에 따른 결과를 보이고 있다. 그리고 하단부는 각종 국제평가 지수 및 본 연구에서 제안된 평가기준에 의해 산출되는 각 지수값들을 나타내고 있다.



(a) Window of the DAQ module



(b) Window of the signal processing module

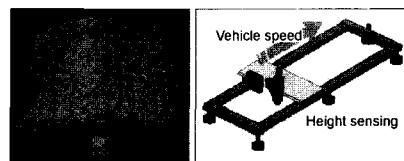


(c) Window of the evaluation module

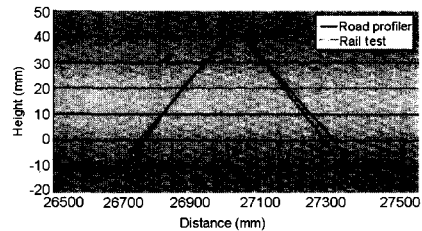
Fig. 4 Windows of the developed 'Road Profiler' S/W modules

2.3 도로면 측정 시스템의 검증

개발된 도로면 측정 시스템의 검증을 위해 여러 가지 특수로 주행 및 평탄로 반복주행을 통해 노면 형상 재현의 정확성 및 차량주행 상황변화에 따른 분석의 신뢰성을 평가하고자 한다. Fig. 5(a)와 같은 범프 형상의 노면을 개발된 'Road Profiler' 도로면 측정시스템과, 동시에 Fig. 5(b)와 같이 제작된 레일 측정시스템을 사용하여 범프노면형상을 측정하였다. Fig. 5(c)에서는 두 측정결과가 비교되고 있는데 Rail Test시 사람이 센서가 장착된 부위를 구동하였기 때문에 발생한 속도차에 의한 범프 뒷부분의 미세한 오차를 고려하더라도 'Road Profiler' 측정시스템에



(a) Bump road profile (b) Rail test system



(c) Comparison of 'Road Profiler' and rail test results

Fig. 5 Performance evaluation of developed road profiling algorithm

의해서 실제의 정확한 범프의 형상이 재현되고 있음을 확인할 수 있다.

내구 시험용 특수로의 대표적인 예라고 할 수 있는 빨래판(washboard) 노면과 벨지안(Belgian) 노면 그리고 자갈길(cobblestone)노면에서의 도로면 측정 시험을 수행하였다. 특수로 측정시에는 수집된 노면 데이터의 간격을 1mm로 설정하여 매우 정밀한 노면 형상을 구현하도록 하였다. Fig. 6에서는 측정 대상의 특수로 형상과 비교하여 개발된 도로면 측정 시스템 'Road Profiler'에 의한 측정 결과를 보여 주고 있다. 이로부터 내구시험용 특수로와 같은 매우 불규칙한 노면 형상을 본 연구에서 개발된 'Road Profiler' 시스템에 의하여 비교적 실제와 유사하게 재현시키고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 7에서는 평탄도를 여러 주행 상황에 따라 반복 시험 하였을 경우 측정된 노면 신호의 IRI (Inter-

national Roughness Index)와 RN (Ride Number) 지수를 측정 차량 주행 속도에 대하여 나타내고 있다.

국제 평가 지수인 IRI(International Roughness Index) 및 RN(Ride Number)은 'Golden Car'로 불리는 표준화된 1/4 차량필터를 적용하여 도로면의 특성이 차량의 운동특성에 미치는 지수로 표현한 것이다. IRI는 차량의 승차감(ride comfort)과 주행 안전성(driving safety)에 영향을 주는 도로면 특성을 평가하기 위하여 차체 및 현가장치의 고유진동수에 각각 해당되는 약 1Hz 및 10Hz 주파수 영역의 가중치를 고려한 도로면 특성 평가 지수이다. 반면에, RN은 주행중 승객의 승차감에 가장 민감한 4~8 Hz 주파수 영역에 대하여 필터링된 신호의 RMS (Root Mean Square)값을 지수화한 것이다.¹⁾

Fig. 7로부터 전반적으로 속도 변화에 따라 거의 일정한 지수값을 보이고 있음을 알 수 있는데 이는 본 연구에서 적용한 측정용 차량의 주행속도 변화에 따른 오차 보정 알고리즘에 기인되는 결과이다. 따라서, 차량의 다양한 주행 상황 변화에 적용 가능한 도로면 동적 측정 시스템의 요구 조건이 검증될 수 있었다.

3. 국내도로면 측정 및 특성 분석

국내도로의 데이터 베이스 구축 및 특성분석을 위해 고속국도, 일반국도, 지방로, 서울시내주요도로 및 비포장로를 측정하였다.⁴⁾ Table 1은 본 연구에서 측정된 다양한 종류의 도로를 나타내고 있다. 측정된 도로면 특성의 분석을 위해 고속 국도의 경우 1km의 측정 거리의 샘플링 함수(sampling function)

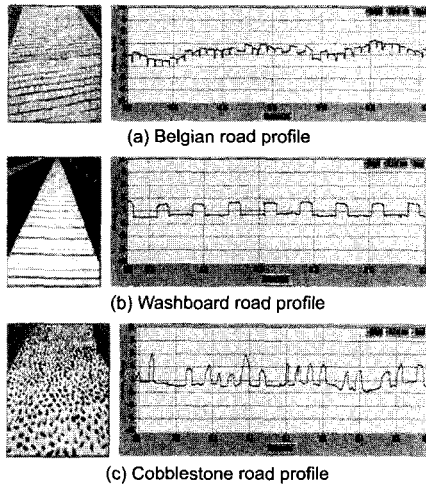


Fig. 6 Durability test tracks and measured road profiles

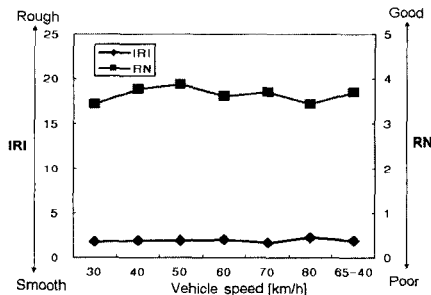


Fig. 7 IRI and RN-index according to the vehicle speed variation

Table 1 List of measured roads

도로종류	명칭
고속국도	88올림픽, 경부, 경인 남해, 대전통영, 서해안, 영동, 인천공항, 중부2, 중부, 중부내륙, 중앙, 호남, 서울 외곽순환
일반국도	1번, 2번, 3번, 5번, 7번, 44번, 46번
지방로	23번, 88번, 98번, 310번, 347번, 349번, 363번, 390번
서울인근도로	강변북로, 내부순환로, 올림픽대로, 시내 도로
내구시험 주행로	단차로, 벨지안로, 자갈길로, 표준악로, 빨래판로, 보수로

를 채택하였으며, 국도와 지방로의 경우에는 차량 정체 등 복잡한 주행 상황을 고려하여 100m 측정거리의 샘플링 측정함수를 이용하였다. 측정 데이터의 샘플링 간격은 최대 50 cycles/m의 공간 주파수(spatial frequency)를 갖는 도로면 특성을 분석하기 위해 10mm로 설정하였으며, 측정 주행속도 변화에 의한 오차를 최소화하기 위해 가능한 등속 주행 시험을 수행하였다.

3.1 IRI 및 RN 지수 이용 도로면 특성분석

국내의 다양한 도로면에 대한 측정 데이터를 IRI와 RN 지수로 계산한 결과를 비교하여 나타내어보면 Fig. 8과 같다. 여기에서 도로면 거칠기와 차량의 운동 특성간의 상호 관계를 나타내는 IRI 및 RN 지수는 예측 할 수 있는 바와 같이 고속도, 국도, 지방도, 시내도, 비포장도 순으로 차량의 승차감 및 주행 안전성에 상대적으로 나쁜 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

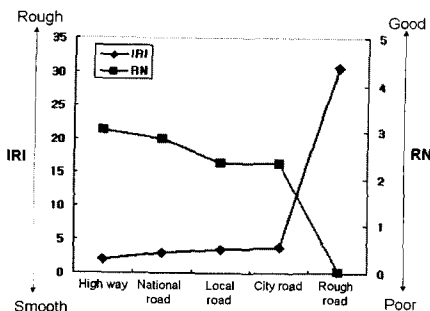


Fig. 8 IRI & RN evaluation of domestic roads

3.2 DRI지수 이용 도로면 특성분석

앞 절에서 사용된 IRI 및 RN지수는 차량의 저주파 운동특성과 관련되어 3 cycle/m 이하의 도로면 특성만이 주로 고려되었다. 그러나 주행중에 나타나는 차량의 NVH 관점에서는 10 cycle/m 이상의 도로면 거칠기 특성이 반드시 고려되어야 한다. 따라서, 도로면의 세부적인 거칠기와 도로 포장 상태가 차량의 NVH 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해서 본 논문에서는 DRI(Detailed Roughness Index) 도로면 평가지수를 제안 하고자 한다.

최대 50 cycle/m까지 분석 가능하도록 10mm 간격

의 노면 측정신호를 Fig. 9에서와 같이 3 cycle/m 고역통과필터(high pass filter)를 통과 시킨후 RMS (root mean square)값을 계산한다. 계산된 RMS 값을 다음 식 (2)에 대입함으로써 새로운 도로 노면 평가 지수인 DRI (Detailed Roughness Index)를 구할 수 있다.

$$DRI = 2777.8(RMS - 10^{-4}) \quad (2)$$

적용된 식 (2)는 고역통과필터를 통과하여 얻은 RMS 값을 0부터 5까지의 구간으로 변환하는 식으로써 여기에 사용된 계수 값은 측정된 국내 도로면 데이터의 통계 처리에 의해 얻어진 결과이다. 이 때 DRI 값이 클수록 도로의 세부 거칠기 특성이 거칠어짐을 의미한다. Fig. 10에서는 DRI를 이용하여 국내 도로 노면을 분석한 결과로서 각 도로의 평균값을 나타내고 있다. 최근에 새로 포장된 국도가 차량의 고주파수 영역 즉, 차량의 NVH 특성에 영향을 미치는 도로면 세부 거칠기 측면에서 가장 우수한 성능을 보이고 있음을 알 수 있다. 아울러서, 비교적 오래된 지방로의 상태가 비포장로를 제외한 모든 도로에 비해 열악함을 알 수 있다.

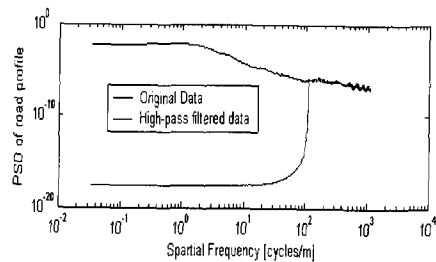


Fig. 9 High pass filtered road profile data for DRI evaluation

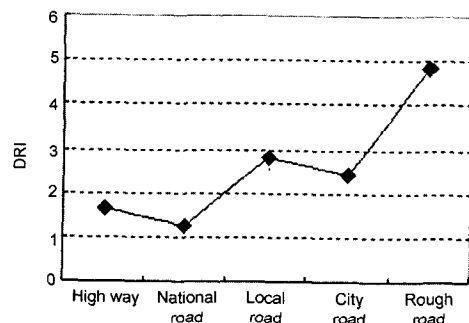


Fig. 10 DRI evaluation of domestic roads

4. 결 론

본 연구에서는 도로면 측정 및 평가 프로그램인 'Road Profiler'를 개발하였으며, 이를 이용하여 국내 주요 도로면의 특성을 측정하였다. 아울러서, 측정된 도로면을 다양한 도로면 특성 평가 방법에 의하여 분석하였다. 주요 연구결과를 요약하여 보면 다음과 같다.

1) AEIPR의 핵심 기술인 이중적분 문제를 효과적으로 해결하기 위하여 불규칙신호처리기술을 적용한 적분오차 최소화 알고리즘을 개발하였다.

2) 동적 도로면 측정 시스템 'Road Profiler'의 적용 타당성을 대표적인 특수로 주행시험을 통하여 검증하였다.

3) 개발된 도로면 측정시스템 'Road Profiler'를 사용하여 국내 대표적인 도로면 특성을 측정하여 데이터 베이스를 구축하고 다양한 평가모듈을 사용하여 분석하였다.

4) 기존의 승차감 및 주행 안전성과 관련된 IRI 및 RN 평가 지수와 함께 차량의 NVH 성능에 관련되는 새로운 도로면 평가지수인 DRI를 제시하여 적용 타당성을 검토하였다.

후 기

본 연구는 G7 차세대 자동차 기술개발사업 및 BK21 자동차분야 특화 기술개발사업의 지원에 의하여 수행되었습니다.

Reference

- 1) M. W. Sayers, S. M. Karamihas, "The Little Book of Profiling," pp.1-61, 1997.
- 2) ISO 8608 Mechanical Vibration - Road Surface Profiles - Reporting of Measured Data, ISO, 1991.
- 3) J. Y. Kim, S. J. Heo, K. H. Noh, G. J. Choi, J. S. Im, "Development of the Road Profiling and Evaluation Program," Autumn Conference of KSAE, pp.842 -847, 2001.
- 4) J. H. Choi, S. H. Son, S. J. Heo, K. H. Noh, G. J. Choi, J. S. Im, "Development of the Classification Method and Performance Index for Roughness Characteristics Evaluation of Domestic Roads," Autumn Conference of KSAE, pp.818-823, 2002.