

국내 도로면 거칠기 특성 분류 기준에 관한 연구

최 규 재^{*1)} · 허 승 진²⁾

군산대학교 기계공학부¹⁾ · 국민대학교 기계자동차공학과²⁾

Classification of the Korean Road Roughness

Gyoojae Choi^{*1)} · Seungjin Heo²⁾

¹⁾School of Mechanical Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk 573-701, Korea

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

(Received 2 February 2006 / Accepted 27 March 2006)

Abstract : A Korean Road Roughness Classification(KRC) method is proposed. Using a dynamic road profiling device equipped with the Accelerometer Established Inertial Profiling Reference(AEIPR) method, road profile measurement is performed on various types of public paved roads in Korea. The road profiling data are processed to classify the characteristics of Korean road roughness. The resultant Korean road roughness classification(KRC) is shown different characteristics compared to the road classification proposed by ISO, MIRA, and Wong. The proposed KRC is composed of 8 classes(A-H, very good-poor) based on the power spectral density and is in good agreements with the characteristics of Korean paved road roughness and can be used well in vehicle ride comfort simulation using domestic road profile.

Key words : Road roughness(노면 거칠기), Inertial road profiler(관성 노면 측정기), Korean road roughness classification(KRC, 한국 도로면 거칠기 특성 분류), Ride comfort simulation(승차감 해석), Vehicle dynamics(차량 동역학)

Nomenclature

- $S_g(\Omega)$: road roughness, PSD, $m^2/cycles/m$
- Ω : spatial frequency, cycles/m
- f : frequency, Hz
- v : vehicle velocity, m/s

1. 서론

자동차는 다양한 종류의 도로 위를 주행하면서 노면으로부터 각 노면 거칠기에 따른 수직방향 입력을 받게 된다. 이와 같은 도로 불규칙성에 의한 차

량의 수직 방향 응답 특성은 승객의 승차감에 커다란 영향을 미친다. 따라서 차량이 주행하는 노면에 대한 거칠기 정보는 차량 설계 시 승차감 해석 측면(ride performance)에서 중요한 자료로 노면 거칠기에 대한 측정과 표준화를 통한 분류 방법이 제안되고 있다.¹⁻³⁾

노면 거칠기를 측정하기 위해서 과거에는 dip-stick을 이용한 정적인 방법이 사용되었지만, 근래 고속으로 주행하는 차량에 레이저 센서 등을 장착하여 노면을 측정하는 방법이 시간 및 비용 측면에서의 장점으로 인하여 많이 사용되고 있으며 측정된 데이터를 토대로 여러가지 표준화된 분류지수가 제안되고 있다. 이와 같이 실험을 통하여 대표적인

*Corresponding author, E-mail: gjchoi@kunsan.ac.kr

노면을 측정된 후 이를 공간주파수에 대한 PSD (power spectral density) 함수로 표현하여 노면 형태에 따른 분류가 이루어지고 있으며 대표적인 것으로 ISO(International Organization for Standardization), MIRA(Motor Industry Research Association), Wong 등에 의해 제시되고 있다.¹⁻³⁾ 국내에서도 이들이 제안한 PSD 함수의 노면 거칠기 데이터를 주행거리에 대한 노면 거칠기 함수로 변환하여 차량 및 부품 설계 시 승차감 해석에 활용하고 있다.^{4,5)}

그러나 이들이 제안하고 있는 노면 거칠기 데이터는 비포장로에 대한 2차 근사화 기법을 제시한 일부 연구¹⁾ 이외에는 자국의 노면 형상을 계측하여 1차 근사화 기법을 사용하여 표준으로 제시하고 있는 것으로 국내 도로의 특성을 정확히 반영하고 있지 못하다. 이에 따라 국내 도로 특성에 기초한 노면 거칠기 분류 지수가 필요하지만 오늘날까지 국내도로 측정을 통한 분류 지수의 제시가 이루어지고 있지 않으며 국내도로 기반의 차량 승차감 해석이 미흡한 편이다.

따라서 본 연구에서는 국내도로 거칠기 측정을 통하여 국내도로 특성을 잘 반영할 수 있는 노면 거칠기 분류 지수를 제시하고자 한다.

2. 도로모델 분류

불규칙한 노면 정보를 수식화 하기 위해서는 일반적으로 PSD 함수가 많이 활용되고 있다. 선진국에서는 다양한 노면에 대한 측정을 토대로 PSD 함수 기반의 노면 거칠기 분류 지수가 제안되고 있으며, ISO, MIRA, Wong 등에 의해 제안된 기준이 많이 활용되고 있다.

Fig. 1은 ISO에 의해 제안된 노면의 PSD 형태를 도시한 것으로 PSD 함수 $S_g(\Omega)$ 와 공간주파수 Ω 사이의 관계를 나타낸 것이며 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$S_g(\Omega) = S_g(\Omega_0) \left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^{-N_1}$$

for $\Omega \leq \Omega_0$ $N_1 = 2.0$

$$= S_g(\Omega_0) \left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^{-N_2}$$

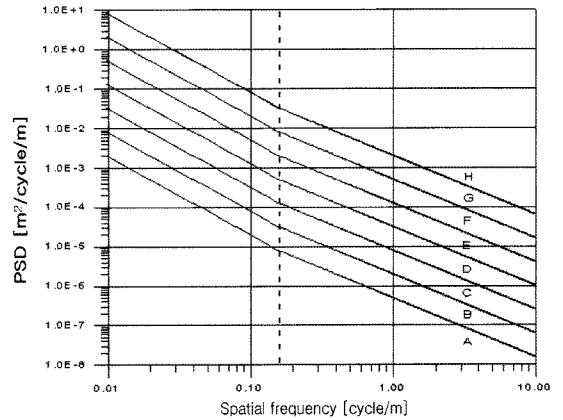


Fig. 1 Classification of road roughness proposed by ISO

Table 1 Classification coefficient of road roughness proposed by ISO

Road class	Degree of roughness $S_g(\Omega_0), 10^{-6} \text{ m}^2/\text{cycles/m}$	
	Range	Geometric mean
A (very good)	<8	4
B (good)	8-32	16
C (average)	32-128	64
D (poor)	128-512	256
E (very poor)	512-2048	1024
F	2048-8192	4096
G	8192-32768	16384
H	>32768	

$$\text{for } \Omega > \Omega_0 \quad N_2 = 1.5 \quad (1)$$

여기에서 $\Omega_0 = \frac{1}{2\pi}$ cycle/m를 나타내며, $S_g(\Omega_0)$ 는 Table 1에서 각 노면에 따라 정의된 범위내의 정수값을 의미한다.

ISO 분류 기준에 따르면 노면은 PSD를 기준으로 A등급에서 H등급까지 총 8단계로 분류하여 노면 거칠기를 표시하였으며, 포장로 뿐만 아니라 비포장로에 대한 거칠기 분류 지수를 제안하고 있다. 이와 유사한 형태의 노면 PSD가 MIRA에 의해 제안되었으며 수식은 식 (1)과 같고 여러 가지의 노면에 대한 각 계수는 Table 2와 같다. 또한, Wong은 실험으로부터 측정된 자료를 토대로 노면의 공간 주파수와 PSD 사이의 관계를 다음과 같은 형태의 수식을 제안하였다.

$$S_g(\Omega) = C_{SP}\Omega^{-N} \quad (2)$$

Table 2 Classification of road roughness proposed by MIRA

Road class	Range	N1		N2	
		Mean	Standard deviation	Mean	Standard deviation
Motorways		1.945	0.464	1.360	0.221
very good	2-8				
good	8-32				
Principal roads		2.05	0.487	1.440	0.266
very good	2-8				
good	8-32				
average	32-128				
poor	128-512				
Minor roads		2.28	0.534	1.428	0.263
average	32-128				
poor	128-512				
very poor	512-2048				

Table 3 Classification coefficient of road roughness proposed by Wong

Road class	N	C_{sp}
1. Smooth runway	3.8	4.3×10^{-11}
2. Rough runway	2.1	8.1×10^{-6}
3. Smooth highway	2.1	4.8×10^{-7}
4. Highway with gravel	2.1	4.4×10^{-6}
5. Pasture	1.6	3.0×10^{-4}
6. Plowed field	1.6	6.5×10^{-4}

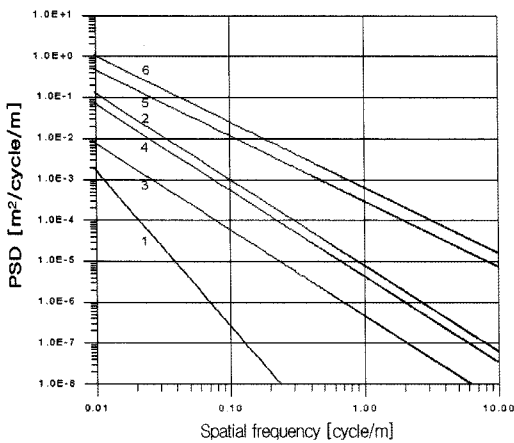


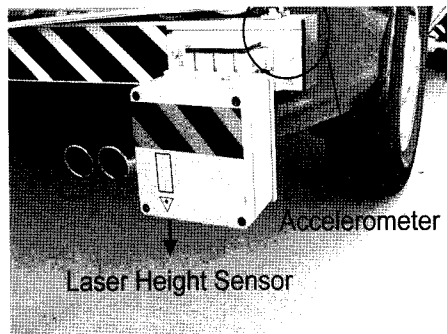
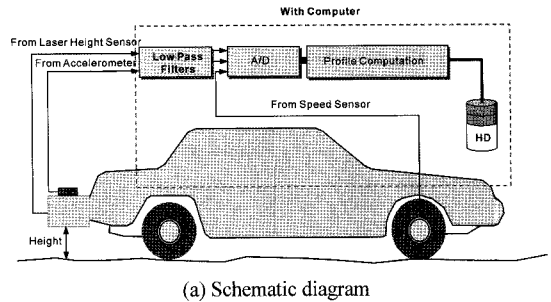
Fig. 2 Classification of road roughness proposed by Wong

식 (2)에 의한 노면의 PSD 함수는 Fig. 2에 도시하였으며 각 계수는 Table 3에 나타내었다.

이와 같이 외국기관에서 제시한 PSD 기반의 노면 거칠기 함수로부터 주행거리에 대한 노면 상하 거칠기 데이터를 추출하여 승차감 해석을 위한 차량 주행 시뮬레이션에 사용하고 있다.

3. 도로면 측정시스템

본 연구에서는 고속으로 주행하는 차량에서 노면 측정 센서를 이용 노면을 측정할 수 있는 장비를 개발하였으며 노면 측정에 활용하였다.⁶⁾ 노면 측정 장비의 주요 시스템 구성은 Fig. 3과 같다. 시스템 구성은 가속도계, 레이저 변위계(laser height sensor) 그리고 속도계(vehicle velocity sensor)로 구성되며, 컴퓨터의 신호처리 과정을 거쳐 도로면 거칠기 정보를 생성한다. 레이저 변위계를 이용하여 차량과 노면 사이의 상대변위를 측정하고 기준변위는 변위 센서 윗부분에 장착된 가속도 센서(accelerometer)를 이용하여 측정한다. 노면의 거칠기는 레이저 변위계에서 측정된 차량과 노면사이의 상대변위와 속도계에서 측정된 가속도 신호를 두번 적분한 기준 변위를 이용하여 계산한다. Fig. 3(a)는 시스템 구성의 개념도를 도시한 것이며, Fig. 3(b)는 실제 차량에 장착한 모습을 도시한 것이다.



(b) Test vehicle
Fig. 3 Road roughness measuring system

4. 국내도로 측정

국내 도로의 노면 거칠기를 측정하고 분석하기

위하여 국내의 대표적인 도로를 선정하였다. 고속국도, 일반국도, 지방도, 서울 시내 주요도로 등에 대하여 측정을 실시하였으며, Table 1에 측정 한 도로를 기술하였다. 도로면 측정 간격은 최대 50 cycles/m까지 분석하기 위해 10mm로 설정하였으며 오차를 줄이기 위해 차량이 등속주행 상태에서 측정을 실시하였다.

Fig. 4에는 본 연구에서 측정한 국내 주요 고속국도, 일반국도의 루트를 도시한 것으로 많은 양의 측정 데이터베이스를 구축하였다.

Table 4 List of measured roads

도로종류	명칭
고속국도	88올림픽, 경부, 경인 남해, 대전통영, 서해안, 영동, 인천공항, 중부2, 중부, 중부 내륙, 중앙, 호남, 서울 외곽순환
일반국도	1번, 2번, 3번, 5번, 7번, 44번, 46번
지방도	23번, 88번, 98번, 310번, 347번, 349번, 363번, 390번
서울인근 도로	강변북로, 내부순환로, 올림픽대로, 시내 도로

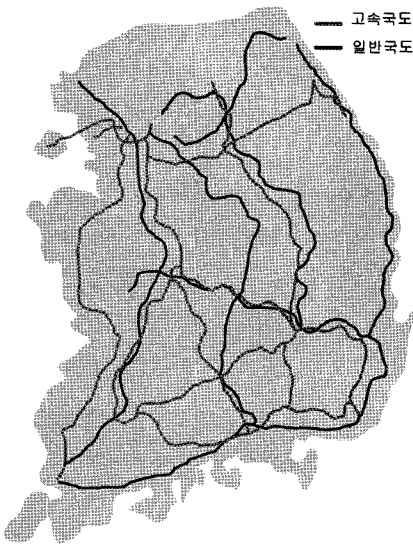


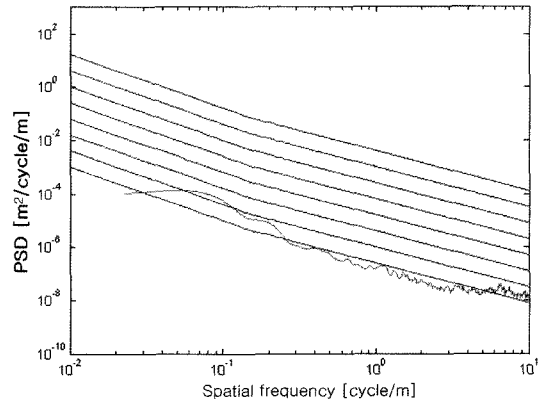
Fig. 4 Measured road map in Korea

5. 국내도로 분석

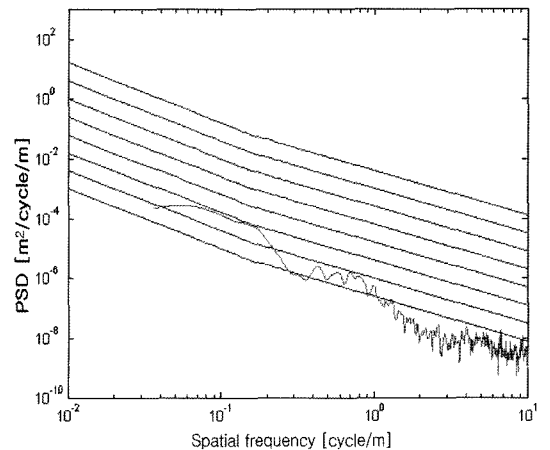
본 연구에서 측정한 국내도로 노면 거칠기 데이터 분석을 실시하였다. 분석 방법은 ISO, MIRA, Wong 등이 실시한 방법과 같이 측정된 노면을 공간

주파수에 대한 PSD 함수로 나타내었다. 이 방법은 사람과 차량의 영향을 고려하지 않고 도로 노면만의 특성을 볼 수 있는 장점을 갖는 분류 방법이라고 할 수 있다.

측정 데이터를 토대로 국내 도로에 대한 PSD 함수를 계산하여 ISO 분류방법에 대입하여 분석하였을 때 국내도로 특성이 전반적으로 ISO 분류기준에 적합하지 않음을 발견할 수 있다. Fig. 5는 국내 대표적 도로인 고속국도(경부고속도로)와 일반국도(2번 국도)의 특성을 도시한 것으로 ISO 분류방법으로 평가할 경우 1 cycle/m 미만의 영역에서는 국내 노면 거칠기가 높고, 1 cycle/m 이상의 영역에서는 노면 거칠기가 낮은 특성을 보이고 있어 국내 도로의 특성을 충분히 반영할 수 없음을 알 수 있다. 이와



(a) Gyeongbu expressway



(b) National highway No.2

Fig. 5 Domestic road evaluation using ISO classification

같은 특성은 국내 도로 포장 특성이 ISO 기준이 되는 외국과 다른 특성을 보이고 있음을 의미한다. 이것은 짧은 구간 내에서의 포장 평탄도가 우수하여 노면 거칠기가 낮음을 의미하며, 긴 구간에서의 포장 평탄도는 떨어져 노면 거칠기가 높은 특성을 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 도로 특성을 잘 반영할 수 있도록 분류지수를 도출하기 위하여 ISO 규격과 유사하지만 새로운 분류 기준인 KRC(Korean Road Classification)을 제안하였다.

본 연구에서는 측정 주행 속도를 40km/h (11.1m/s) ~ 110km/h (30.5m/s)로 정하고, 차량운동 해석 시 주 관심 영역인 0.5~35Hz 범위의 신호를 획득하고 분석하기 위하여 공간주파수 영역을 0.06 ~ 3 cycles/m의 범위로 결정하였다. 이 범위는 공간주파수와 주파수 그리고 차량속도와의 관계를 나타내는 식 (3)을 이용하여 정하였다.

$$f = \Omega v \tag{3}$$

여기에서 Ω : 공간주파수 [cycle/m]

f : 주파수 [Hz]

v : 차량속도 [m/s]

를 의미한다.

본 연구에서는 포장 도로면에 대하여 1차 근사화 개념에서 기울기를 결정하였던 기존의 분류방법들과 달리 국내 포장 도로면의 특성을 반영하기 위하여 2차 근사화 개념을 적용하였다. 식 (4)는 새로 제안한 노면 특성식을 기술한 곡선 형상 기울기와 곡선의 수평위치를 결정하는 값인 A, B값과 곡선의 높이(Level)를 결정하는 변수인 C값으로 구성되어 있다. A, B값은 국내 도로 분석 결과 95%의 신뢰도를 갖는 평균값으로 선정하였다.

$$S(\Omega) = 10^{-C} \cdot \Omega^{\log \Omega^4 \cdot 10^B} \tag{4}$$

for $0.06 \text{ cycle/m} \leq \Omega \leq 3 \text{ cycle/m}$

Fig. 6에는 국내도로면 거칠기 분류 기준으로 제안하는 PSD 함수를 도시한 것이며, Table 5에는 각 계수를 도시하였다. Fig. 7은 Fig. 5에서 ISO 분류기준으로 도시하였던 국내 도로 노면에 대해 본 연구에서 제안한 KRC로 분류한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 국내 도로 노면에 대하여

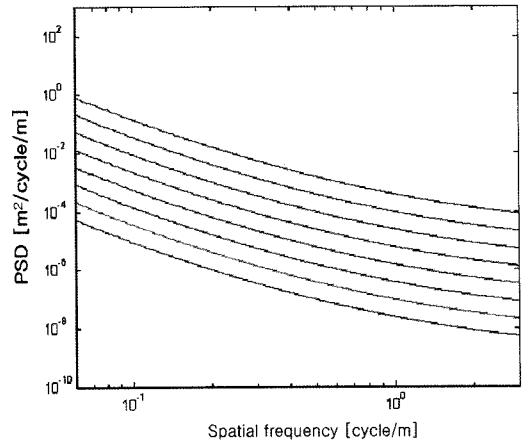


Fig. 6 KRC-classification of the Korean road roughness

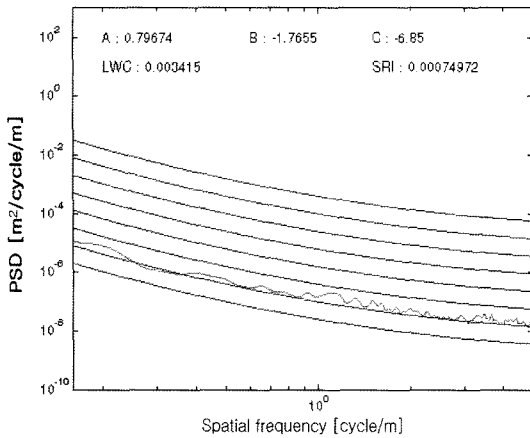
Table 4 KRC - Classification coefficient

Classification	Roughness C, 10 ^C [m ² /cycles/m]		A	B
	Range	Geometric mean	Average (Standard deviation)	Average (Standard deviation)
A (Very Good)	7.9 <	7.6	0.78075 (0.45539)	-1.75895 (0.37129)
B	7.3 - 6.7	7.0		
C (Good)	6.7 - 6.1	6.4		
D	6.1 - 5.5	5.8		
E (Average)	5.5 - 4.9	5.2		
F	4.9 - 4.3	4.6		
G (Poor)	4.3 - 3.7	4.0		
H	3.7 >	3.4		

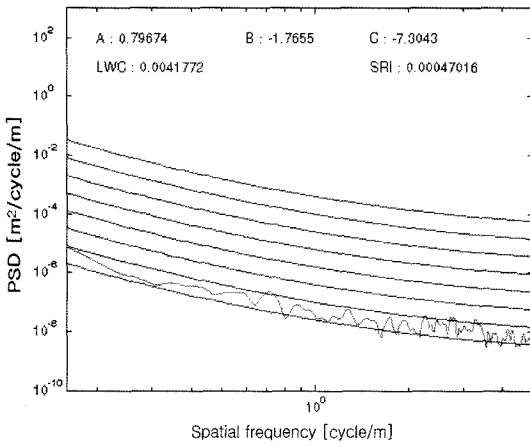
KRC 분류 기준이 국내 도로의 특성을 잘 표현하고 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 국내 도로 노면 거칠기 특성을 잘 반영할 수 있는 분류 방법을 제안하였다. 고속으로 주행하면서 도로 노면 거칠기를 측정할 수 있는 측정장치를 이용하여 국내의 대표적 포장도로 노면을 측정하였으며 측정된 노면 거칠기 데이터를 분석하였다. 측정된 데이터 분석을 통하여 ISO, MIRA, Wong 등 외국에서 제안하고 있는 노면 분류 기준에 비하여 국내도로 노면 거칠기 특성을 잘 반영할 수 있는 분류 방법인 KRC(Korean Road Roughness Classification) 분류 방법을 제안하였다. 제안한 KRC는 국내 포장 도로면 거칠기 특성을 A-H(very



(a) Gyeongbu expressway



(b) National highway No.2

Fig. 7 Domestic road evaluation using KRC

good-poor) 8단계로 표시하였으며 공간주파수에 대한 PSD 함수로 나타내었다. 이 분류 방법은 국내 도로 특성을 잘 반영할 수 있어 국내 도로에 기반한 차

량 승차감 해석에 잘 활용될 수 있을 것이다. 또한 향후 더 많은 측정 데이터를 이용하여 분류 방법 보완과 비포장 노면에 대한 추가적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

References

- 1) J. Y. Wong, The Theory of Ground Vehicles, Second edition, John Wiley & Sons, New York, 1993.
- 2) ISO 8608 Mechanical Vibration - Road Surface Profiles - Reporting of Measured Data, ISO, 1991.
- 3) M. Sayers, "Characteristic Power Spectral Density Functions for Vertical and Roll Components of Road Roughness," AMD-Vol.80 DSC-Vol.2 Symposium on Simulation and Control of Ground Vehicles and Transportation Systems, pp.114-129, 1986.
- 4) G. J. Choi, Y. M. Yoo, Y. G. Cho, K. P. Lee and Y. S. Yoon, "Generation of a Double Track Random Road Profile for Vehicle Ride Comfort Simulation," Transactions of KSAE, Vol.7, No.1, pp.305-311, 1999.
- 5) K. S. Kim and W. S. Yoo, "Generation of Road Surface Profiles with a Power Spectral Density Function," Transactions of KSAE, Vol.5, No.1, pp.136-145, 1997.
- 6) J. Y. Kim, S. J. Heo, K. H. Noh, G. J. Choi and J. S. Im, "Development of the Road Profiling and Evaluation Program," Autumn Conference of Proceedings, KSAE, pp.842-847, 2001.