

노면 상관도를 고려한 3차원 노면형상 생성에 관한 연구

김광석^{1*}

¹인하공업전문대학 자동차과

Generation of Three Dimensional Road Surface Profiles with Considering Coherence Relation

Kwang-Suk Kim^{1*}

¹Department of Automotive Engineering, Inha Technical College

요약 본 연구에서는 ISO, MIRA, 그리고 Wong에 의해 제안된 노면 PSD 함수를 기초로 3차원 노면의 생성 방법에 대해 연구하였다. 주어진 노면 거칠기 특성인 PSD 함수를 사용하여 2차원 노면을 생성한 뒤 상관도를 고려하여 횡방향으로 연속적으로 배치함으로써 실제 노면 특성에 유사한 3차원 노면을 생성하였다. 생성된 노면의 상관도를 평가한 결과 실제 노면의 상관도 특성값과도 잘 일치함을 확인하였다. 또한, 3차원 노면을 자동으로 생성하기 위하여 반복적으로 횡방향 노면을 생성시켜 주는 프로그램을 개발하였다.

Abstract This paper presents a technique to generate road surface profiles in a spatial domain using a power spectral density function. A single track power spectral density function is proposed to describe a road surface profile, which is also applicable for multi-track vehicle response analysis. The roads in lateral direction makes the relation between the coherence of the lateral tracks. The derived road surfaces are compared to ISO(International Organization for Standardization) standards. Generated road profiles are in good agreements with the target road PSD shape and measured coherence relation.

Key Words : PSD(Power Spectral Density), Road Surface Roughness, Vehicle Dynamics, Coherence

1. 서론

노면 불규칙성에 의한 차량의 동적응답 특성은 노면의 거칠기 정도에 따라 상당한 차이를 가지며 승차감 해석 측면에서 매우 중요하다. 제 1차 가진원으로서 차량이 운행되는 노면의 거칠기, 즉 노면형상의 진폭과 가진 주파수 대역의 설계에 따라 기본적으로 차량에 가해지는 가진 입력의 크기가 결정된다. 또한, 시뮬레이션을 통해 차량의 동적특성을 분석하는 경우 좌우바퀴의 노면특성은 실제와 유사한 특성이 입력되도록 구성되어야 한다. 자동차의 승차감 측면에서는 여러 주파수대의 진동 특성이 영향을 미칠 수 있는데 시미진동의 경우 좌우 노면의 차이 및 휠의 불균형 등으로 인해 휠의 좌우 진동이 발생되고 이는 조향 휠의 진동으로 이어져 승차감 및 조종안정성에 좋지 않은 영향을 미치게 된다. 때문에 승차감과 부

품의 피로수명 해석을 위한 차량의 동응답 해석시 정확한 도로의 모델링은 반드시 필요하다.

차량의 동적응답 특성을 구하기 위하여 등방성(isotropic) 노면굴곡 가정이 처음 적용된[1] 이래 많은 유용한 연구들이 행해져 왔다[2,3]. 하지만 실제 노면의 특성은 측면방향을 따라서는 고전적인 등방성 노면굴곡 모델로는 적절하게 묘사될 수 없기 때문에, 균일한(homogeneous) 노면이라는 가정과 함께 실험데이터와 비교될 수 있는 관계식들이 유도되었다[4]. 균일한 랜덤노면이란 좌표의 이동에 관계없이 통계적 내용이 일정한 것을 의미하며, 등방성 노면이란 좌표의 회전에 대해 통계치가 무관한 것을 의미한다.

노면의 가진력은 타이어와 현가장치를 통하여 차체에 전달된다. 이러한 노면 가진력은 각 차륜 궤도에서 노면 굴곡의 평균치, 상관관계(Auto-correlation)와 궤도간의 상

* 교신저자 : 김광석(kskim@inhac.ac.kr)

호상관관계(Cross-correlation)를 통해 정의될 수 있다. 모든 종류의 노면 거칠기를 모두 열거하기는 쉽지 않으므로, 대표적인 몇 종류의 노면굴곡 모델을 사용하여 노면을 분류하고 있다.

노면거칠기에 관련한 분류기준은 MIRA(Motor Industry Research Association)[1] 분류와 이를 근거로 제정된 ISO(International Organization for Standardization)[5] 분류 및 Wong[6]이 대표적인 몇 단계의 노면거칠기 기준에 대한 PSD 함수 형태로 제시한 분류기준 등이 주로 사용된다. 이들 기준은 주로 진행방향에 대한 2차원적인 데이터이며, Kim 등[7]은 이들 PSD 데이터를 활용하여 차량동역학 해석을 위한 2D 노면 생성 방법에 대해 제시하였다. Choi 등[8]은 이를 확장하여 시험과 유사한 상관도가 나오도록 필터를 설계하여 좌우바퀴의 노면을 각각 생성하는 연구를 진행하였다. 최근에는 Choi 등[9]에 의해 국내도로면에 대한 노면 거칠기 특성의 분류 기준이 제시되기도 하였다.

본 연구에서는 기존의 거칠기 특성을 사용하여 차량의 시뮬레이션에 직접 사용할 수 있는 횡방향을 포함한 3차원 노면 데이터를 쉽게 생성하는 연구를 진행하였다. 이를 통하여 사용자가 필요한 3차원 노면 데이터를 보다 편리하게 생성할 수 있는 노면 생성 전용 프로그램을 개발하였다. 생성된 노면데이터를 ISO 분류에 의한 노면 PSD와 비교함으로써 제시한 방법의 타당성을 검증하였다.

2. 노면의 분류 및 표현

노면의 형상을 결정하는 주요인자는 공간주파수와 진폭으로 구성된다. 변형이 되지 않는 노면형상의 기하학적 특징을 이러한 두 개의 인자에 의해 묘사할 수 있다. 노면의 형상을 스펙트럼으로 표시할 때, 노면의 거칠기는 거리에 대한 공간적인 가진이기 때문에 일반적인 시간주파수 f [cycle/s] 보다는 공간주파수(spatial frequency) Ω [cycle/m]로 정의된다. 차량에 대한 가진 입력주파수는 식 (1)과 같이 차량의 진행속도와 파형길이(wavelength)의 함수로 정의할 수 있다.

$$f(\text{Hz}) = \Omega[\text{cycles/m}] \cdot V[\text{m/s}] \quad (1)$$

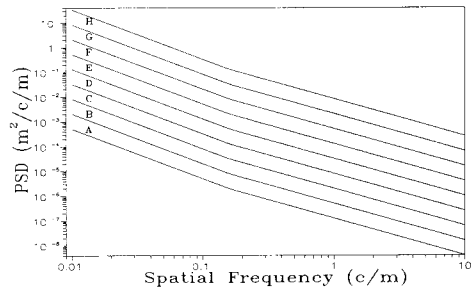
$$= \frac{1}{l_{\text{wm}}} \cdot V$$

그림 1은 ISO에 의해 제안된 노면의 분류기준을 나타낸다. ISO 분류에서 보면 전력밀도함수 $S(\Omega)$ 와 공간주파수 Ω 사이의 관계가 그림 1에서 보는 것과 같이 대수그래프(log-log scale)에서 노면의 거칠기 정도에 대하여 서

로 다른 직선으로 표현되어 짐을 알 수 있다. 이것을 수식으로 표시하면 식 (2)와 같이 정의된다.

$$S(\Omega) = S(\Omega_0) \left(\frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^{-N_1}, \Omega \leq \Omega_0 \quad (2)$$

$$S(\Omega) = S(\Omega_0) \left(\frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^{-N_2}, \Omega > \Omega_0$$

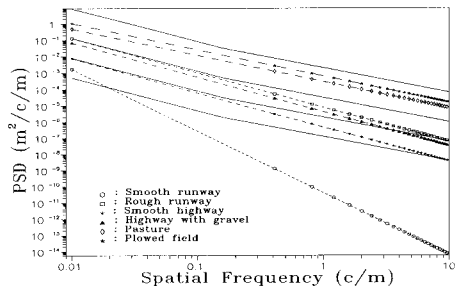


[그림 1] ISO 분류에 의한 노면 PSD

여기서, $\Omega_0 = \frac{1}{2\pi}$ cycle/m를 의미하고 노면의 거칠기 정도를 $S(\Omega_0)$ 에 따라 A등급에서 H등급까지 8단계로 분류하며, 이를 표 1에 표시하였다. Wong은 시험으로부터 측정된 자료를 기본으로 전력밀도함수 $S(\Omega)$ 와 공간주파수 Ω 사이의 관계를 식 (3)과 같은 지수함수 형태의 PSD 함수로 제안하였다.

$$S(\Omega) = C_{sp} \Omega^{-N} \quad (3)$$

여기서 C_{sp} 와 N 은 상수이며, 다양한 노면에 대한 C_{sp} 와 N 의 값들은 표 2에 표시하였다. 그림 2는 Wong에 의해 제안된 노면 PSD를 ISO 분류 노면 PSD와 비교한 그림이다. 표 3은 MIRA에 의해 제안된 노면분류 방법을 표시한 것으로, ISO의 근거였던 만큼 기본적으로 ISO 분류와 유사하며 표현 수식도 동일하다.



[그림 2] ISO와 Wong 분류에 의한 노면 PSD 비교

【표 1】 ISO 분류에 의한 노면 거칠기 분류표

노면 분류	노면 거칠기 정도 $S(\Omega_0), 10^{-6}$ [m ² /cycles/m]		N_1	N_2
	범위	평균		
A(Very Good)	< 8	4	2.0	1.5
B(Good)	8 - 32	16	2.0	1.5
C(Average)	32 - 128	64	2.0	1.5
D(Poor)	128 - 512	256	2.0	1.5
E(Very Poor)	512 - 2048	1024	2.0	1.5
F	2048 - 8192	4096	2.0	1.5
G	8192 - 32768	16384	2.0	1.5
H	> 32768		2.0	1.5

【표 2】 Wong 분류에 의한 노면 거칠기 분류표

노면분류	N	C_{sp} $S(\Omega)$ [m ² /cycles/m]
Smooth runway	3.8	4.3×10^{-11}
Rough runway	2.1	8.1×10^{-6}
Smooth highway	2.1	4.8×10^{-7}
Highway with gravel	2.1	4.4×10^{-6}
Pasture	1.6	3.0×10^{-4}
Plowed field	1.6	6.5×10^{-1}

【표 3】 MIRA 분류에 의한 노면 거칠기 분류표

노면 분류	노면거칠기 정도 $S(\Omega_0), 10^{-6}$ [m ² /cycles/m]		N_1 평균 (표준편차)	N_2 평균 (표준편차)
	범위	평균		
고속도로	Very Good	2-8	4	
	Good	8-32	16	1.945 (0.464)
일반도로	Very Good	2-8	4	
	Good	8-32	16	2.050 (0.487)
	Average	32-128	64	1.440 (0.266)
	Poor	128-512	256	
비포장로	Average	32-128	64	2.280 (0.534)
	Poor	128-512	256	1.428 (0.263)
	Very Poor	512-2048	1024	

3. 노면형상의 생성

3.1 2차원 노면 생성

앞에서 언급한 노면 분류 방법은 길이방향에 대한 노면거칠기의 분류에 대한 표현이므로 2차원적인 표현이

다. 즉 하나의 트랙에 대한 표현을 의미한다. 노면형상을 랜덤함수로 가정할 수 있다면 전력밀도함수에 의해 그 특징을 파악할 수 있다. 즉 랜덤가진에서 각 주파수가 가지는 평균에너지를 사용하여 노면형상을 표현할 수 있다. 진폭 Z_n , 파형길이(wavelength) l_{wn} 을 가지는 조화운동 $z_n(x)$ 는 다음과 같다.

$$z_n(x) = Z_n \sin\left(\frac{2\pi x}{l_{wn}}\right) = Z_n \sin \Omega_n x \quad (4)$$

여기서 $\Omega_n = \frac{2\pi}{l_{wn}}$ 는 조화운동의 각 공간 주파수(circular spatial frequency)를 의미한다.

함수의 평균제곱값 $\overline{z_n^2}$ 은

$$\overline{z_n^2} = \frac{1}{l_{wn}} \int_0^{l_{wn}} \left[Z_n \sin\left(\frac{2\pi x}{l_{wn}}\right) \right]^2 dx = \frac{Z_n^2}{2} \quad (5)$$

많은 이산화된 주파수를 가지는 함수에 대해 각 주파수에 대한 전력밀도함수는 함수의 평균제곱값으로 표시할 수 있다. 주파수 $n\Omega_0$ 에서의 각격 $\Delta\Omega$ 에서 평균제곱값의 전력밀도함수를 $S(n\Omega_0)$ 라 두면 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$S(n\Omega_0)\Delta\Omega = \frac{Z_n^2}{2} = \overline{z_n^2} \quad (6)$$

따라서, 이산화된 전력밀도함수는 다음과 같이 표시된다.

$$S(n\Omega_0) = \frac{Z_n^2}{2\Delta\Omega} = \frac{\overline{z_n^2}\Delta\Omega}{2\Delta\Omega} \quad (7)$$

만약 함수가 넓은 대역의 주파수를 가지고 있다면 이산적인 전력밀도함수 $S(n\Omega_0)$ 는 연속적인 전력밀도함수 $S(\Omega)$ 가 될 수 있다. 모든 주파수 대역을 통해 전력밀도함수의 총면적은 함수 $z(x)$ 의 평균제곱값과 같으므로, 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\overline{z^2} = \int_0^\infty S(\Omega) d\Omega \quad (8)$$

공간 주파수 $\Omega_1 - \Omega_2$ 영역과 같이 관심있는 어떤 주파수 대역에서 전력밀도함수의 부분면적은 그 주파수 범위에서의 함수의 평균에너지로 표시되며, 이는 함수의 평균제곱값과 같다.

$$\overline{z_{\Omega_1 - \Omega_2}^2} = \int_{\Omega_1}^{\Omega_2} S(\Omega) d\Omega \quad (9)$$

따라서 주어진 주파수 대역에서 노면의 평균값은 다음 식에 의해 표현될 수 있다.

$$\overline{z_{\Omega_1 - \Omega_2}} = \sqrt{S(\Omega_i) \Delta\Omega} \quad (10)$$

여기서 $\Omega_i = \frac{\Omega_1 + \Omega_2}{2}$ 이고, $\Delta\Omega = \Omega_2 - \Omega_1$ 를 의미한다.

그러므로 진폭이 평균제곱근 $\overline{z_i}$ 를 가지고 주파수 Ω_i 인 정현파의 형태로 노면의 방정식을 표현하면 다음 식과 같다.

$$z_i(x) = \sqrt{2} \overline{z_i} \sin 2\pi \Omega_i (x - \phi_i) \quad (11)$$

여기서 $\sqrt{2} \overline{z_i}$ 는 진폭, Ω_i 와 ϕ_i 는 각각 공간주파수와 위상지연을 의미한다.

따라서 거리 x 에서의 노면의 높이는 각 주파수에 대하여 각각의 높이를 모두 계산한 다음 이를 산술적으로 더하여 구할 수 있다.

$$z(x) = \sum_{i=1}^n \sqrt{2} \overline{z_i} \sin 2\pi \Omega_i (x - \phi_i) \quad (12)$$

여기서, 위상 지연 ϕ_i 는 가우스 랜덤함수(Gaussian random function)를 발생시켜 사용하였다.

3.2 3차원 노면 생성

앞의 2차원 노면을 기반으로 횡방향에 대한 노면거칠기를 고려한 실제 노면에 근접한 3차원 노면을 생성할 수 있다. 실제 노면의 특성은 측면방향을 따라서는 고전적인 등방성 노면골곡 모델로는 적절하게 묘사될 수 없다. 따라서, 균일한(homogeneous) 노면이라고 가정하여 랜덤 변수를 발생시켜 공간주파수역에서는 동일한 PSD 특성을 가지지만, 공간역에서는 서로 독립적인 노면을 생성할 수 있다.

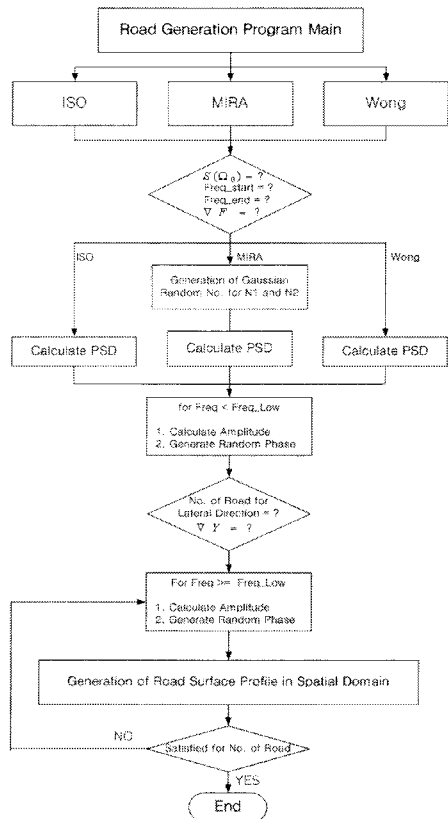
횡방향 노면의 주요한 특성은 2차원 노면과 달리 상관도(coherence)를 고려하여 표현할 수 있다. 즉, 낮은 공간주파수 영역에서는 횡방향 노면의 특성은 거의 같아서 상관도가 1에 가까우며, 높은 공간주파수 영역에서는 상호관련성이 거의 없어 상관도가 0에 가까운 특성을 가지고 있다. 상관도 함수는 식(13)과 같이 표시할 수 있다.

$$\gamma_{12}(f) = \frac{|G_{12}(f)|^2}{G_{11}(f) \cdot G_{22}(f)} \quad (13)$$

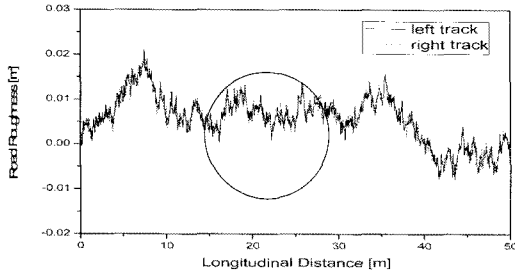
여기서, $G_{11}(f)$ 과 $G_{22}(f)$ 는 각각 한 개의 노면에 대한 자기밀도함수(auto-spectral density function)를 표시하고, $G_{12}(f)$ 는 두 노면에 대한 상호밀도함수(cross-spectral density function)를 표시한다.

따라서, 낮은 공간주파수 영역에 대해서는 횡방향으로 동일한 데이터를 공유하고 높은 공간주파수 영역에 대해서는 주어진 노면에 대해 동일한 진폭특성을 가지면서도 위상차를 달리하여 상관도를 낮도록 노면을 구성한다면 실제 노면 특성에 유사한 3차원 노면을 구성할 수 있다. 구성된 프로그램의 순서도를 그림 3에 표시하였다.

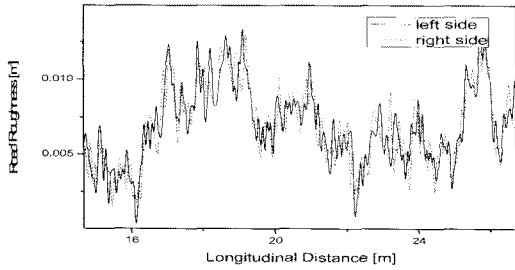
그림 4 (a)는 노면 생성 프로그램을 통해 생성한 2개의 횡방향 노면을 공간역에서 표시한 그림이고 (b)는 중간부분을 확대한 그림이다. 그림에서 보면 두 개의 횡방향 노면이 저주파 거칠기 특성은 일치하면서도 고주파 거칠기 특성이 서로 상이하게 구성되어 있음을 확인할 수 있다.



[그림 3] 3차원 노면 생성 프로그램의 흐름도



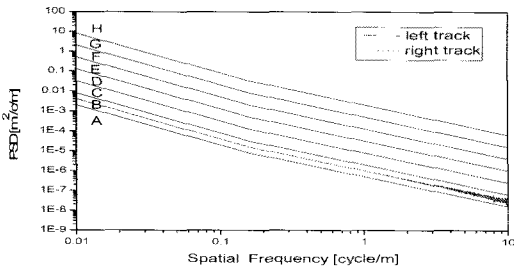
(a) 횡방향으로 생성된 두 노면 비교



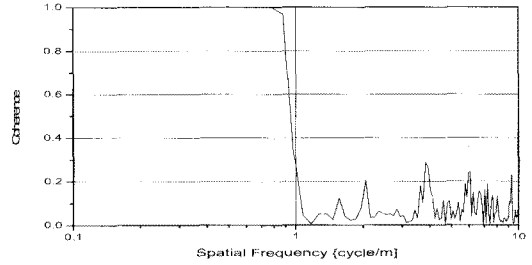
(b) 확대된 두 노면 비교

[그림 4] 횡방향으로 생성된 두 노면 비교

그림 5는 두 개의 노면을 주파수 영역에서 표시한 그림이다. 두 개의 노면에 대한 PSD 특성이 정확히 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 앞에서 언급했듯이 두 개의 노면을 생성할 때 저주파 영역은 진폭과 위상을 공유하였고, 고주파 영역의 데이터 생성시 동일한 진폭데이터에 위상은 서로 다른 랜덤 함수를 사용하였으므로 PSD 특성은 잘 일치하여야 한다. 그림 6은 두 노면에 대한 상관도 함수를 표시한 그림이다. 언급한 대로 1cycle/m의 저주파 영역에서는 상관도가 1에 가까우며, 높은 공간주파수 영역에서는 상호관련성이 거의 없어 상관도가 0에 가까운 특성을 가지고 있음을 볼 수 있으며, 이는 참고문헌 [9]에서 언급한 실제 노면의 상관도 특성 과도 잘 일치함을 확인할 수 있다.

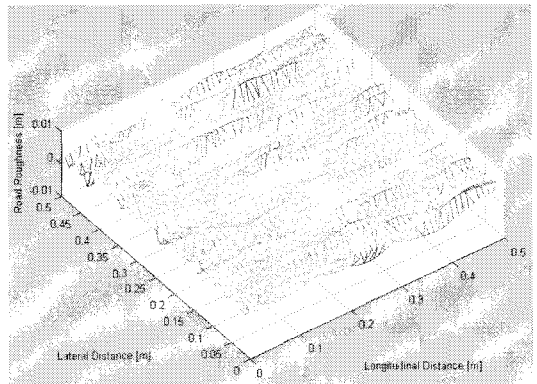


[그림 5] 공간 주파수 영역에서 횡방향으로 생성된 두 노면과 ISO 분류와의 비교

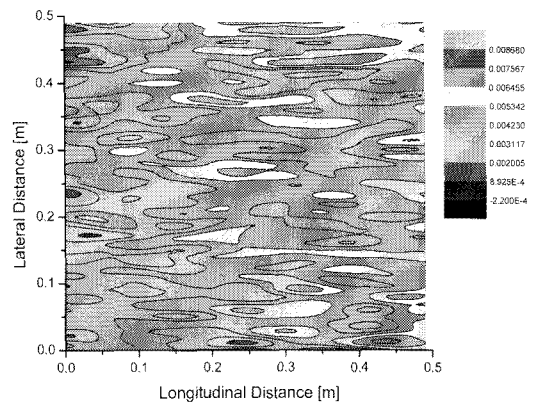


[그림 6] 두 노면 사이의 상관도

그림 7 (a)는 횡방향에 대해 일정간격으로 생성한 노면을 3D 그래프로 표시한 그림이다. 길이방향을 X, 횡방향을 Y, 높이방향을 Z로 하여 실제노면에 근접하게 구성하였다. 그림 7 (b)는 구성된 3차원 노면의 높이방향 윤곽을 그래프로 표시한 그림이다. 횡방향으로 높이차가 약간씩 있음을 확인할 수 있다.



(a) 생성된 3차원 노면



(b) 노면거칠기에 대한 높이방향 윤곽

[그림 7] 생성된 3차원 노면 거칠기

4. 결론

본 연구에서는 길이방향에 대한 거칠기 특성뿐만 아니라 횡방향 특성을 포함한 3차원 노면 데이터를 생성하는 연구를 진행하였다. 2차원 노면을 상관도 함수를 고려하여 횡방향으로 연속적으로 배치하는 방법을 통해 3차원 노면을 생성하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- 1) ISO, MIRA, 그리고 Wong에 의해 제안된 정량화된 노면의 PSD 함수를 사용하여 차량의 시뮬레이션에 직접 활용할 수 있는 3차원 노면 데이터의 생성방법을 제시하였다. 생성된 횡방향 노면의 상관도를 비교한 결과 실제 노면의 상관도 특성과 잘 일치함을 확인하였다.
- 2) 사용자가 필요한 3차원 노면 데이터를 보다 편리하게 생성할 수 있는 노면 생성 전용 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램을 통하여 원하는 차량 시뮬레이션에 적합한 3차원 노면 형상을 자동으로 생성시켜 줄 수 있으므로 많은 활용이 기대된다.

향후 타이어의 폭을 고려하여 타이어와 노면의 접촉면에 대한 힘을 고려할 수 있는 3차원 타이어모델의 개발 및 이를 이용한 승차감 및 피로수명 해석의 연구를 진행할 계획이다.

참고문헌

- [1] C.J.Dodds and J.D.Robson, "The Description of Road Surface Roughness", J. of Sound and Vibration, Vol.31, No.2, pp.175-183, 1973.
- [2] A.N.Heath, "Modelling and Simulation of Road Roughness", Proceedings of 11th IAVSD Symp. The Dynamics of Vehicles on Roads and on Tracks, pp.275-284, August 21-25, 1989.
- [3] A.N.Heath, "Application of the Isotropic Road Roughness Assumption", J. of Sound and Vibration, Vol.115, No.1, pp.131-144, 1987.
- [4] Dieter Ammon, "Problems in Road Surface Modelling", Proceedings of 12th IAVSD Symp. The Dynamics of Vehicles on Roads and on Tracks, pp.28-41, August 26-30, 1991.
- [5] ISO/TC108/SC2/WG4 N57, Reporting Vehicle Road Surface Irregularities, 1982.
- [6] J.Y.Wong, "The Theory of Ground Vehicles", John Wiley & Sons, 2nd Edition, 1993.
- [7] K.S.Kim, W.S.Yoo, "Generation of Road Surface

- Profiles with a Power Spectral Density Function", Transaction of KSAE, Vol.5, No.1, pp.136-145, 1997.
- [8] G.J.Choi, S.J.Heo, "Classification of the Korea Road Roughness", Transaction of KSAE, Vol.14, No.5, pp.115-120, 2006.
 - [9] G.J.Choi, Y.M.Yoo, Y.G.Cho, K.P.Lee, Y.S.Yoon, "Generation of a Double Track Random Road Profile for Vehicle Ride Comfort Simulation", Transaction of KSAE, Vol.7, No.1, pp.305-311, 1999.
 - [10] J.S.Bendat and A.G.Piersol, "Random Data : Analysis and Measurement Procedures", John Wiley & Sons, New York, 1986.
 - [11] Thomas D. Gillespie, "Fundamentals of Vehicle Dynamics", Society of Automotive Engineers, 1992.

김 광 석(Kwang-Suk Kim)

[정회원]



- 1990년 2월 : 부산대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1990년 7월 ~ 1993년 7월 : 육군사관학교 기계공학과 전임강사
- 1998년 2월 : 부산대학교 기계설계학과 (공학박사)
- 1999년 3월 ~ 현재 : 인하공업전문대학 자동차과 부교수

<관심분야>

탄성다물체동역학, 차량동역학