

좌우 바퀴 노면 거칠기 상관도가 차량 운동 특성에 미치는 영향

최규재¹⁾ · 장봉춘²⁾

군산대학교 기계공학부¹⁾ · 안동대학교 기계공학부²⁾

Vehicle Dynamic Characteristics according to the Coherence of Road Roughness between Left and Right Wheels

Gyoojae Choi^{*1)} · Bongchoon Jang²⁾

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

²⁾School of Mechanical Engineering, Andong National University, Gyeongbuk 760-749, Korea

(Received 29 March 2006 / Accepted 30 May 2006)

Abstract : Vehicle dynamic simulation has been carried out using the coherence of road roughness between left and right wheels. The generated twin tracks with the coherence of road roughness between left and right wheels are in good agreements with the measured coherence relation of left and right wheels. And these tracks reflect well on the roughness characteristics of real roads. Using the generated roads and multibody dynamic simulation program, vehicle dynamic simulation is performed. The vertical and roll motion analysis of a vehicle are carried out using the realistic road profiles with the coherence between left and right wheels and the results are in good agreements with the dynamic characteristics of a vehicle.

Key words : Coherence of road roughness(노면 거칠기 상관도), ISO, MIRA road classification(ISO, MIRA 도로 특성 분류), Ride comfort simulation(승차감 해석), Roll motion simulation(롤 운동 해석)

Nomenclature

$S_g(\Omega)$: road roughness, PSD, $m^2/cycles/m$

Ω : spatial frequency, cycles/m

f : frequency, Hz

1. 서론

도로를 주행하는 차량은 조향 입력, 도로 노면 거칠기, 횡풍 등 다양한 외란에 의해 영향을 받게 되며 차량 운동 특성의 변화를 일으킨다. 이들 입력 중 도로 노면의 거칠기는 차량의 수직방향에 영향을 주며, 좌우 바퀴의 노면 거칠기 차이는 차량의 횡방향,

롤방향 운동을 일으켜 운전자에게 커다란 영향을 주게 된다. 이에 따라 차량 설계 시 적절한 상하 방향 운동 특성과 롤 운동 특성을 가지도록 설계하며, 일반적으로 수직 방향과 롤 방향의 고유 진동수를 각각 1-1.5Hz, 1.5-2Hz 부근이 되도록 설정한다.¹⁾ 따라서 정확한 차량 운동 해석을 위해서는 실제 차량이 주행하는 도로 노면 거칠기 특성을 제대로 반영할 수 있는 노면 정보를 입력해야 하며, 이를 위해 도로 노면 거칠기 생성을 위한 다양한 연구가 진행되어 오고 있다.

ISO²⁾(International Organization for Standardization), MIRA³⁾(Motor Industry Research Association), Wong¹⁾ 등은 대표적 도로 노면을 측정하여 이를 공간 전력 밀도 함수(PSD, power spectral density

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

function)로 제안하고 있으며, 이 함수로부터 역으로 차량 주행 길이에 따른 도로 노면 거칠기를 생성하여 차량 운동 해석에 활용하고 있다.⁴⁾ 일반적으로 자동차의 운동 특성 해석을 위해서는 생성한 노면 거칠기를 좌우 바퀴에 동일하게 입력하거나 좌우바퀴 각각 독립적인 노면 거칠기를 입력하여 차량 운동 시뮬레이션을 수행하고 있다. 그러나 실험적 노면 측정 결과를 토대로 분석하여 보면 차량 주행 시 차량의 좌우 바퀴 노면 거칠기는 상호 밀접한 상관관계를 가지고 있음을 알 수 있으며⁵⁾ 이에 대한 고려가 이루어져야 하나 좌우 바퀴 상관도에 대한 고려가 미흡한 실정이다.

참고문헌⁶⁾에서는 좌우바퀴 상관도를 가지는 노면을 생성하기 위하여 컴퓨터 내에서 Gaussian 분포를 가진 random data를 생성한 후 ISO, MIRA, Wong 등이 제안하고 있는 전력밀도함수를 가지도록 필터를 이용하여 노면데이터를 생성한 후 저주파대역 필터와 고주파 대역 필터를 통과시켜 좌우바퀴 상관도를 만족시키는 노면을 생성하였다. 그러나 참고문헌에서는 좌우바퀴 노면 거칠기를 가진 노면만을 생성하는데 주력하였으며, 생성 노면의 체계적인 특성 분석이나 구체적인 차량 운동 시뮬레이션을 통해 좌우 바퀴 노면 거칠기 특성이 차량 운동 특성에 미치는 영향도에 대한 체계적인 연구가 수행되지 않았다.

이에 따라 본 연구에서는 좌우바퀴 노면 거칠기 특성을 가지도록 생성한 도로 노면의 특성을 분석하였으며 좌우 바퀴 거칠기 상관도를 고려하지 않은 노면과 좌우 바퀴 거칠기 상관도를 고려한 노면을 각각 입력하여 차량 주행 시뮬레이션을 수행하고 노면 특성에 따라 차량 운동에 미치는 영향도를 분석하였다.

2. 좌우 바퀴 노면 거칠기 상관도

2.1 좌우 바퀴 노면 거칠기 상관도

차량이 주행하는 도로 노면은 다양한 형태의 노면 거칠기를 가지고 있다. 바퀴의 관점에서 볼 때 국부적으로 보면 바퀴의 구름 위치에 따라 서로 다른 노면 거칠기에 노출되어 있으나 언덕, 고개, 평지 등 긴 구간에서 보면 좌우 바퀴의 높낮이 입력이 거의

동일하다고 할 수 있다. 언덕을 주행하는 경우, 좌우 바퀴의 거시적인 높낮이 정보는 서로 일치하나 국부적인 노면 접촉 부위의 거칠기는 서로 다르다고 할 수 있다. 공간주파수에 따른 노면 거칠기의 좌우 바퀴 상관도 특성은 Fig. 1과 같다. Fig. 1은 city road와 minor road에 대하여 노면 거칠기를 측정하고 좌우 바퀴 상관도를 분석한 것으로 그림에서 보는 바와 같이 공간주파수가 낮은 영역에서는 좌우 바퀴 상관도가 1에 가깝고 공간주파수가 큰 부분에서는 0에 가깝게 나타난다. 이것은 언덕, 고개, 평지 등과 같이 거시적으로 변화하여 공간주파수가 낮은 구간에서는 좌우 바퀴가 같은 높낮이를 가지고 있으며 국부적으로 바퀴와 접촉하는 부위, 즉 공간주파수가 높은 부분에서의 노면 거칠기는 좌우 바퀴가 완전히 다를 수 있음을 의미한다. 따라서 실제 차량 주행 상황에 적합한 차량 운동 시뮬레이션을 위해서는 도로 노면의 거칠기 특성이 Fig. 1과 같은 특성을 가지도록 생성해야 한다.

2.2 좌우 바퀴 노면 거칠기 상관도를 갖는 노면 특성

Fig. 2에는 참고문헌⁶⁾에서 ISO, $S_g(\Omega_0) = 16$ 의 거칠기를 가진 전력밀도함수를 이용하여 생성한 노면을 도시한 것이다. 이것은 좌우 바퀴 노면 거칠기를 주행 길이에 대한 노면 높낮이로 도시한 것이며, 그림에서 보는 바와 같이 주기가 긴 변위는 좌우 바퀴

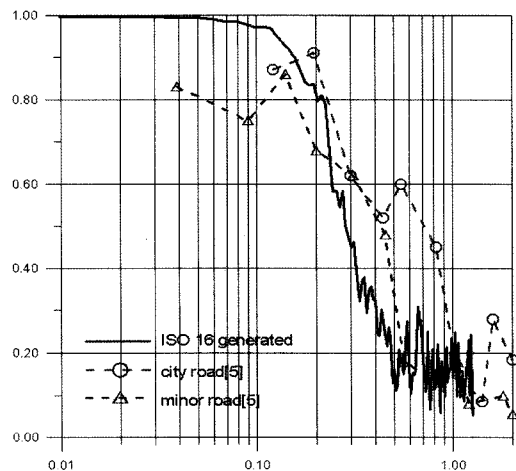


Fig. 1 Coherence between left and right wheels^{5,6)}

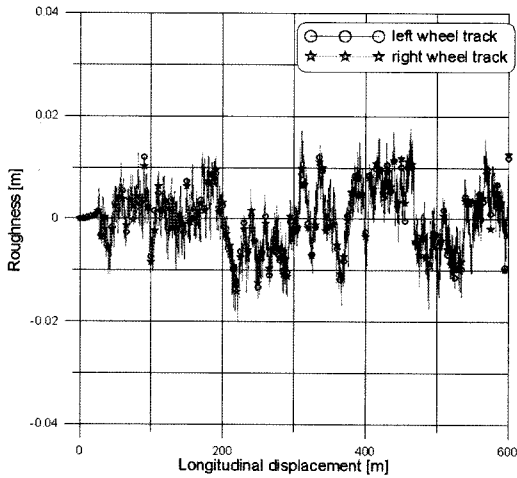


Fig. 2 Generated road roughness with coherence between left and right wheels

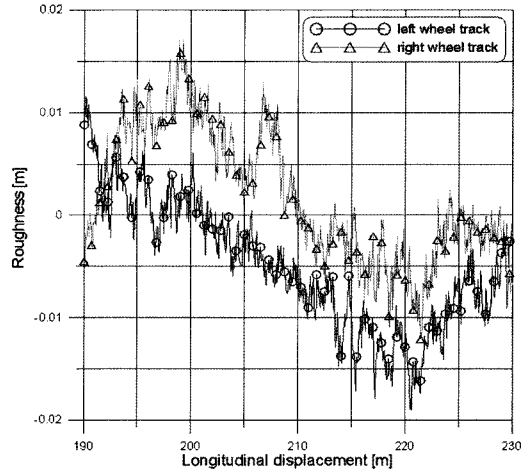


Fig. 4 Generated road roughness without coherence between left and right wheels

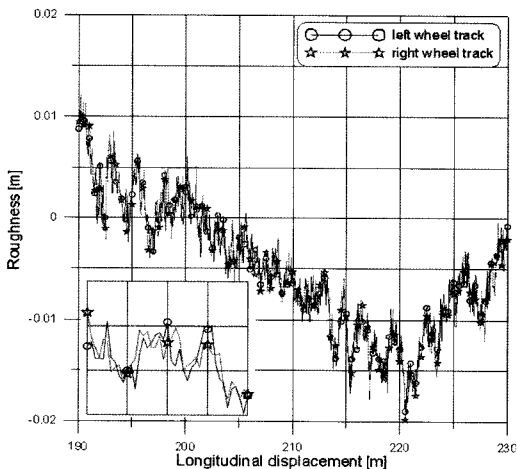


Fig. 3 Detailed plot of Fig. 2

높낮이가 동일하게 움직이지만 긴 주기 변동 상의 짧은 국부적인 높낮이는 서로 다름을 알 수 있다. Fig. 3에는 좌우 바퀴 노면 거칠기를 부분적으로 확대한 것으로 좌우 바퀴 높낮이가 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 낮은 공간주파수에서는 좌우 바퀴가 같이 움직이지만 국부적인 높은 공간주파수에서는 좌우 바퀴의 수직변위가 따로 움직이는 것을 의미하며 실제 차량 주행 노면 특성을 잘 반영한다고 할 수 있다.

Fig. 2에 도시한 좌우바퀴 노면에 대한 상관도를 계산하여 Fig. 1에 도시하였으며 참고문헌⁹⁾에서 실험적으로 도출한 상관도와 유사한 특성을 나타내고

있음을 알 수 있다.

Fig. 4에는 좌우바퀴에 따로따로 노면을 생성하여 도시한 것이다. 노면의 거칠기는 Fig. 2와 같은 ISO, $S_g(\Omega_0) = 16$ 의 거칠기를 가진 전력밀도함수를 이용하여 생성한 노면이지만 생성된 좌우 바퀴 노면 형상이 서로 완전히 독립적으로 움직임을 볼 수 있다. 즉 Fig. 3과 같이 낮은 공간주파수에서는 좌우 바퀴 높낮이가 같이 움직이고 높은 공간 주파수에서는 좌우 바퀴 높낮이가 서로 다른 특성을 보이지 않고 완전히 다른 높낮이 특성을 가짐을 알 수 있다. 이것은 일반적인 도로의 공간주파수 특성을 제대로 반영하지 못하고 있음을 의미하며 이와 같은 노면을 사용하여 차량 주행 특성을 해석하는 경우 실제 도로 주행 특성을 반영하기 어렵다.

3. ISO 노면 차량운동 시뮬레이션 수행

3.1 차량모델

본 연구에서 차량운동 시뮬레이션을 위해 사용한 차량 모델은 다물체 차량 모델로 차량의 운동특성을 정확하게 재현할 수 있다.⁷⁾ 차량 주행 시뮬레이션 조건은 국내에서 생산하는 중형 승용차를 대상으로 하였으며 차속은 80km/h, 노면 거칠기는 ISO $S_g(\Omega_0) = 16$, MIRA class 1, range 16 을 기준으로 생성한 랜덤 노면을 사용하였다. 시뮬레이션에 사용된 차량의 전륜에는 MacPherson strut 현가장치를 장착하고

있으며, 후륜에는 quadra link 현가장치를 장착한 차량으로 Table 1에 차량의 주요 제원을 기술하였다. 노면과 타이어의 접촉은 타이어가 생성된 좌우 트랙을 굴러감에 따라 접촉점에서 상하방향, 전후방향, 횡방향으로 힘을 발생시키는 point following method를 사용하였으며 해석적 타이어모델⁸⁾을 이용하였다. 이 차량에 대하여 좌우바퀴 거칠기 상관도를 고려하지 않은 노면을 입력한 시뮬레이션과 좌우바퀴 거칠기 상관도를 고려하여 생성한 노면을 입력한 시뮬레이션을 수행하고 결과를 분석하였다.

Table 1 Vehicle parameters

Description	Value	Units
Sprung mass	1318.2	kg
Unsprung mass(front/rear)	45.0/39.52	kg
Moment of inertia of sprung mass about longitudinal/lateral/vertical axis	485/2300/2250	kg · m ²
Wheel base	2.665	m
Wheel track(front/rear)	1.505/1.510	m
Suspension spring rate(front/rear)	23000/21000	N/m
Tire rate(front/rear) (195/65R14)	184200	N/m

3.2 차량운동 시뮬레이션

좌우바퀴 거칠기 상관도를 고려하지 않은 노면을 입력한 차량운동 시뮬레이션을 위해 일반적으로 사용하는 방법은 생성한 불규칙 노면을 좌우 바퀴에 동일하게 입력하는 방법과 같은 크기의 전력밀도함수를 가지는 불규칙 노면을 좌우 각각 따로 생성하여 입력하는 방법이 사용되고 있다. 이와 같이 좌우 바퀴 거칠기 상관도를 고려하지 않은 노면을 입력한 차량운동 시뮬레이션 결과와 비교를 위하여 Fig. 1에 나타낸 바와 같은 좌우바퀴 상관도를 가지는 노면을 입력하여 차량 운동 시뮬레이션을 수행하고 결과를 분석하였다.

Fig. 5는 상기의 세 가지 시뮬레이션에 대하여 차체 CG점에서의 수직방향 가속도에 대한 주파수 분석 결과를 도시한 것이다. 시뮬레이션을 위해 좌우 바퀴 상관도를 고려하여 생성한 노면 중 하나의 노면을 좌우바퀴에 동일하게 입력한 경우와 한쪽 노면은 상기의 노면중 하나의 노면을 입력하고 다른 쪽 노면은 별도로 다시 생성한 노면을 입력한 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림에는 좌

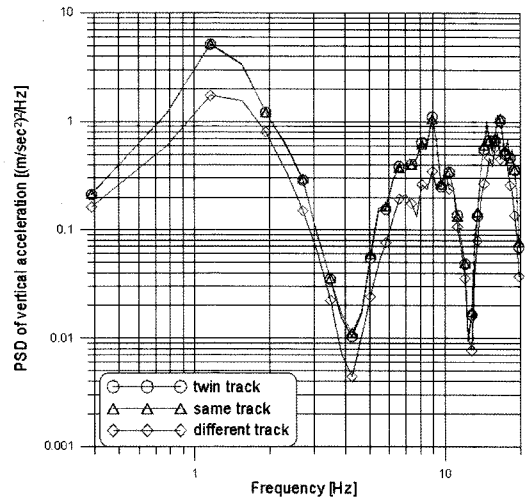


Fig. 5 Comparison of PSD function of vertical acceleration of chassis CG point for three simulation cases

우 동일하게 입력한 경우(그림에서 △ 표시), 상호 독립적인 노면을 입력한 경우(그림에서 ◇ 표시)와 좌우바퀴 노면 상관도를 가지는 노면을 입력한 경우(그림에서 ○ 표시)의 결과를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 좌우바퀴 상관도를 고려하지 않은 노면 주행시뮬레이션을 수행하는 경우 좌우 동일하게 입력한 경우(그림에서 △ 표시)와 상호 독립적인 노면을 입력한 경우(그림에서 ◇ 표시)는 결과에 커다란 차이가 있음을 알 수 있다.

좌우바퀴 노면 상관도를 가지는 노면 중 하나를 좌우바퀴에 동시에 입력하는 경우와 상관도를 가진 좌우 바퀴 노면을 각각 좌측과 우측 바퀴에 입력한 경우의 결과를 비교해 보면 차체 CG점에서의 수직방향 가속도에 대한 두 가지 시뮬레이션 결과가 거의 차이가 발생하지 않음을 알 수 있다. 이것은 동일한 정도의 상하방향 거칠기 특성을 가지는 노면에서 좌우 바퀴 노면 상관도 차이에 의한 거칠기 차이는 차량의 상하방향 응답 특성에 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그러나 한쪽 바퀴는 상기의 한쪽 노면을 입력하고 다른 쪽 바퀴는 동일한 크기의 전력밀도함수를 가지지만 별도로 생성한 노면을 입력한 결과와 비교하여 보면 수직방향 가속도의 주파수 응답특성이 완전히 다를 수 있다. 이것은 좌우 동일 노면을 입력한 경우와 좌우바퀴 상관도를 가지고 움직이는 노면을 입력한 경우는 수직

방향의 에너지가 크게 전달되는 반면 좌우 독립노면을 입력한 경우는 수직방향 뿐만 아니라 횡방향 운동을 발생시켜 수직방향의 가속도 전력밀도함수 값이 작게 나타난 것이다. 따라서 실제 도로 특성과 유사한 좌우바퀴 상관도를 고려한 노면을 사용하지 않은 경우 결과에 많은 차이가 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 상기의 세 가지 시물레이션에 대하여 차체 CG점에서의 횡 가속도의 시간에 대한 응답 결과를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 좌우 동일하게 입력한 경우(그림에서 Δ 표시)는 노면의 높이가 좌우 동일하여 횡방향 운동이 발생하지 않음을 알 수 있으나 상호 독립적인 노면을 입력한 경우(그림에서 \diamond 표시)는 횡방향 운동이 격렬하게 일어나함을 알 수 있어 커다란 차이가 있음을 알 수 있다. 마찬가지로 횡가속도 크기는 상호 독립적인 노면을 입력한 경우(그림에서 \diamond 표시)가 좌우바퀴 노면 상관도를 가지는 노면을 입력한 경우(그림에서 \circ 표시)에 비하여 상당히 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 7은 상기의 세 가지 시물레이션에 대하여 차체 CG점에서의 롤 속도의 시간에 대한 응답 결과를 도시한 것으로 Fig. 6의 횡가속도와 같은 경향을 보이고 있다.

이와 같이 같은 크기의 전력밀도함수를 가지도록 생성한 노면에 대해서 좌우바퀴 노면을 어떻게 입력하느냐에 따라 자동차의 주행 특성에는 커다란 차이를 보이고 있음을 알 수 있으며 잘못된 노면 프

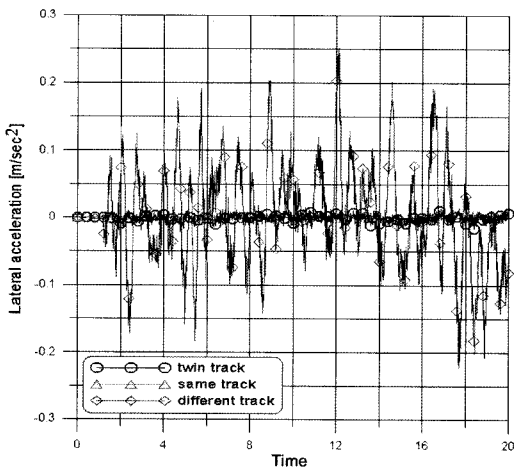


Fig. 6 Comparison of lateral acceleration of chassis for three simulation cases

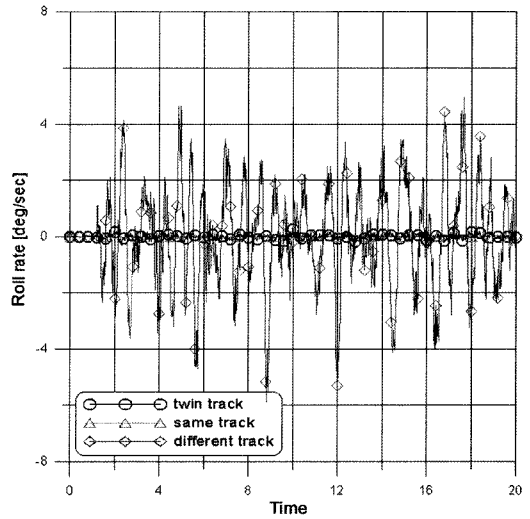


Fig. 7 Comparison of roll rate of chassis for three simulation cases

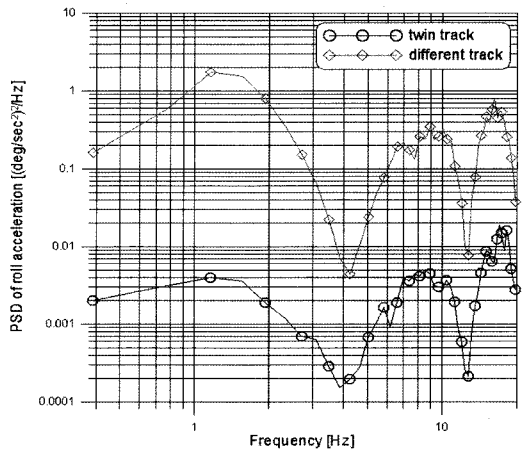


Fig. 8 PSD function of roll acceleration of chassis for double track input

로파일 입력에 의해 예상치 않은 차량운동 시물레이션 결과가 나옴을 알 수 있다.

Fig. 8은 상기의 두 가지 시물레이션에 대하여 차체 CG점에서의 롤 가속도의 주파수 응답 결과를 도시한 것으로 상호 독립적인 노면을 입력한 경우(그림에서 \diamond 표시)가 좌우바퀴 노면 상관도를 가지는 노면을 입력한 경우(그림에서 \circ 표시)에 비하여 상당히 크게 나타남을 알 수 있다. 좌우바퀴에 동일한 랜덤 노면을 입력한 경우에는 Fig. 6, 7에서 보는 바와 같이 횡방향 운동이 전혀 발생하지 않음을 알 수 있으며 롤운동이 발생하지 않아 롤 가속도 주파수

응답이 0으로 나타났다. 이것은 노면 거칠기에 대한 전력밀도함수 형상은 같지만 좌우바퀴 상관도를 고려하지 않고 생성한 두 개의 임의의 노면을 입력한 경우 좌우바퀴 높낮이 차가 크게 발생하여 롤 각속도와 횡가속도가 크게 나온 것이다.

이와 같은 결과를 보면 동일한 정도의 전력밀도함수를 가지는 랜덤 노면을 이용하여 차량 주행 시뮬레이션을 수행할 지라도 좌우바퀴 노면을 어떻게 입력하느냐에 따라 자동차의 주행 특성에는 커다란 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이에 따라 실제 노면 형상에 잘 부합하는 좌우바퀴 거칠기 상관도를 가지는 노면을 주행 시뮬레이션에 사용하는 것이 좌우바퀴 상관도를 고려하지 않은 노면에 비하여 상하방향과 횡방향의 정확한 차량 주행 특성을 해석할 수 있음을 알 수 있다.

4. MIRA 노면 차량운동 시뮬레이션 수행

Fig. 9에는 MIRA에서 제안하고 있는 전력밀도함수를 가지는 노면에 대하여 앞 장에 기술한 바와 같이 좌우바퀴 거칠기 상관도를 고려하지 않은 경우와 고려한 경우에 대한 주행 시뮬레이션 결과의 예를 도시한 것이다. 시뮬레이션 조건은 노면이 MIRA class 1(motorways), range 16(good)이며 차량 모델, 주행 속도 등은 ISO 노면을 이용한 주행시뮬레이션 조건과 같다. 시뮬레이션 결과 그림에서 보는 바와

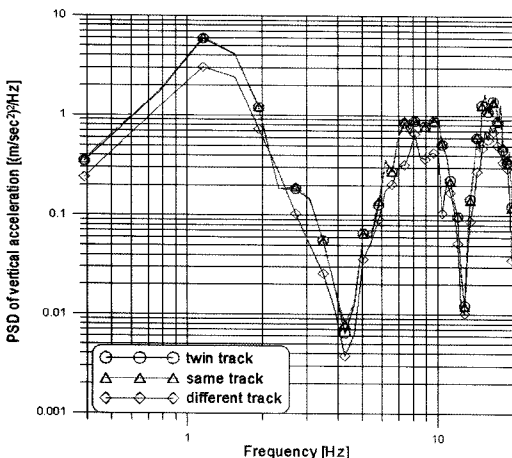


Fig. 9 Comparison of PSD function of vertical acceleration of chassis CG point for three simulation cases(MIRA class 1 range 16)

같이 MIRA 노면을 이용하는 경우에도 ISO 노면 주행 시뮬레이션 결과와 같은 경향의 특징을 나타낼 수 있다.

이와 같이 다양하게 제안된 노면에 대하여 좌우 바퀴 거칠기 상관도를 고려한 노면은 실제 주행도로의 특성을 잘 반영할 수 있는 노면으로 좀 더 실제에 근접한 차량주행 시뮬레이션에 잘 활용될 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 좌우 바퀴 노면 거칠기 상관도를 고려하여 생성한 도로노면의 특성을 분석하였으며 좌우 바퀴 거칠기 상관도를 고려하지 않은 노면과 좌우 바퀴 거칠기 상관도를 고려한 노면을 각각 입력하여 차량 주행 시뮬레이션을 수행하고 노면 특성에 따라 차량 운동에 미치는 영향도를 분석하였다. ISO와 MIRA에서 제안한 노면을 토대로 공간 주파수에 따른 좌우 바퀴 상관도를 고려한 노면을 생성한 후, 다물체 차량 모델을 이용하여 차량 운동을 해석하였다.

자동차가 주행 중에 언덕, 구릉, 평지 등 긴 주기를 가지는 노면을 나타내는 낮은 공간 주파수 영역에서는 좌우 바퀴가 동일한 높낮이 입력을 받고 타이어가 접촉하는 순간 순간의 노면 거칠기를 나타내는 높은 공간 주파수 영역에서는 좌우 바퀴가 다른 높낮이 입력을 받는 특성을 고려하였으며 이것은 자동차가 주행하면서 받는 노면 입력을 실제와 근접하게 반영할 수 있다. 다양한 주행시뮬레이션 결과 실제 차량 주행 환경에 비교적 잘 일치하는 좌우 바퀴 상관도를 가지는 노면을 입력함으로써 자동차의 수직 방향 특성 뿐만 아니라 횡 방향, 롤 방향 운동 특성을 정확히 파악할 수 있었다.

이와 같이 좌우 바퀴 노면 거칠기 상관도를 고려한 차량운동 시뮬레이션은 자동차가 주행하는 노면 특성을 좀 더 잘 반영할 수 있기 때문에 차량운동 시뮬레이션에 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2005년도 군산대학교 신입교수 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- 1) J. Y. Wong, The Theory of Ground Vehicles, Second Edition, John Wiley & Sons, 1993.
- 2) ISO 8608 Mechanical Vibration - Road Surface Profiles - Reporting of Measured Data, ISO, 1991.
- 3) C. J. Doods and J. D. Robson, "The Description of Road Surface Roughness," Journal of Sound and Vibration, Vol.31, No.2, pp.175-183, 1973.
- 4) 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.
- 5) K. M. A. Kamash and J. D. Robson, "The Application of Isotropy in Road surface Modeling," Journal of Sound and Vibration, Vol.57, No.1, pp.89-100, 1978.
- 6) 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.
- 7) G. J. Choi, Y. M. Yoo, K. P. Lee and Y. S. Yoon, "A Real-time Multibody Vehicle Dynamic Analysis Method Using Suspension Composite Joints," International Journal of Vehicle Design, Vol.24, Nos.2/3, pp.259-273, 2000.
- 8) G. Gim and P. E. Nikravesh, "An Analytical Model of Pneumatic Tyres for Vehicle Dynamic Simulations. Part 2: Comprehensive Slips," International Journal of Vehicle Design, Vol.12, No.1, pp.19-39, 1991.