

표면 종단면 형상 감지 알고리즘을 이용한 노면 해석 시스템

김효준^{1*}

¹강원대학교 기계공학과

Road measuring system using surface profile sensing algorithm

Hyo-Jun Kim^{1*}

¹Department of Mechanical Engineering, Kangwon National University

요약 본 연구에서는 주행하는 차량에서 관심 도로면의 형상을 재현할 수 있는 시스템을 제안하였다. 차체에 부착된 센서로부터 측정된 신호에 혼입된 차량의 동적 거동 영향을 배제하고 형상 정보를 재현할 수 있는 멀티 센서 시스템을 적용하였고, Lab 실험을 수행하여 센서부에 인가되는 동적 외란에 대해서도 강건한 성능을 검증하였다. 실제 차량에 시스템을 구현하여 다양한 도로면에 대한 검증 실험을 수행하였으며 해석적 노면 모델과의 비교를 통하여 그 효용성을 제시하였다.

Abstract This paper presents the development of the surface profile sensing system (SPSS) and its application to analysis of road surface. The SPSS which can robustly reconstruct the road input profiles from the intermixed data with the vehicle's dynamic motion, is implemented using the multi-sensor system with the optimally shaped transfer function. The performance of this system is evaluated by a series of experimental works in the devised simulator. And a real car test equipped with the proposed system is performed in the proving ground over both deterministic and random road surfaces. Finally, a feasibility of the system is investigated considering the road model.

Key Words : Surface Profile Sensing System, Road Model

1. 서론

자동차의 동적 거동에 영향을 주는 주요 외란 입력 형태로는 노면의 불규칙성에 의한 것과 브레이크, 선회, 횡풍 등과 같은 관성력과 공기 역학적인 요인에 의한 것으로 나누어볼 수 있다. 이때 주행중인 자동차의 승차감과 관련된 동적 응답 특성은 주행하는 노면에 의해 크게 영향을 받게되며, 또한 특정 주파수 대역의 반복되는 노면 입력은 차체 및 현가계의 각 부품 등에 심각한 피로를 누적시키며, 누적된 피로응력은 부품의 수명 및 차량의 내구성에 영향을 미치게되므로 이는 주행환경의 주인자인 노면의 상태 즉, 노면의 불규칙성에 대한 정보를 필요로 하게 한다.

기존에는 실제의 노면을 측정하지 못하고 단순한 특정 형상이나 랜덤 형상으로 노면을 가정하므로써 주행 환경 변화에 적절히 대처하지 못하였으며, 특히 전산해석에 의

한 차량 특성 평가와 실차 실험에 의한 차량 특성을 비교 평가하는데 있어서 전산해석의 효용성을 저감시키는 요인이 되어왔다[1]. 따라서 설계 및 해석의 기본 입력 자료가 되는 노면 형상에 대한 정확한 데이터를 확보, 적용하는 것의 필요성이 제기되어왔다[2].

토목공학적 절대노면형상의 측정방법(profilemeter)은 많은 측정시간이 소요될 뿐 아니라, 실제 도로에서는 교통흐름에 방해가 되거나, 경우에 따라서는 교통을 차단할 필요가 있어 현실적으로 적용에 한계가 있다. 또한 주행하는 자동차에서 직접적으로 노면 정보를 측정하는 방식(look ahead sensor)이나 차량 바퀴의 응답 신호로부터 역산하는 방식에 있어서는 차량의 거동이 측정결과에 포함되어 노면 자체의 특성을 간접적으로 측정하게되므로 그 정확성이 저하되며, 측정 방식 자체가 차량에 종속적이므로 차량의 선형, 비선형 파라미터를 정확히 파악해야 하는 등 적용에 어려움이 있다[3,4].

*교신저자 : 김효준(hjkimm@kangwon.ac.kr)

접수일 11년 01월 28일

수정일 11년 03월 09일

게재확정일 11년 03월 10일

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 관심 도로면을 주행하는 차량에서 센서로부터 차량과 노면간의 상대 노면 거리를 측정하고, 차체거동이 혼입된 측정 데이터로부터 절대 노면 형상을 재현하는 알고리즘을 적용하여 차량 진행 방향으로의 노면 종단면 형상을 재현함으로써, 차량 동역학 시뮬레이션, 승차감 평가, 그리고 각종 차량 해석에 대한 입력데이터로써 활용할 수 있도록 하였다. 제안한 알고리즘을 포함하는 노면 해석 시스템을 구성하여 Lab. 실험을 수행하여 검증하였고, 실제 차량에 시스템을 구현하여 다양한 도로면에 대해 실험을 수행하였으며, 그 결과를 노면 모델과 비교분석하였다.

2. 표면형상 감지 알고리즘

대상 시스템에 작용하는 외란에 대하여 구체적 정보를 얻는 것은 시스템해석에 매우 유용하다. 일반적으로 주행 중인 차량의 차체에서 센서를 이용하여 도로면의 형상을 측정하는 경우에는 측정 신호에 차량의 동적 응답이 포함되므로 이 신호를 노면정보로 직접적으로 적용하는 것은 불가능하다. 따라서 대상 도로면의 형상 정보를 얻기 위해서는 혼입된 동적 거동 신호의 영향을 배제하고 주행 노면에 대한 형상을 재현하기 위한 알고리즘의 적용이 필요하다.

측정하고자 하는 대상 노면의 형상을 거리 x 에 대한 높이의 함수 $z(x)$ 로 나타내고, L 만큼의 간격으로 차체에 부착된 두 개의 센서를 이용하여 측정된 차체와 노면간의 상대 거리를 각각 h_1, h_2 그리고 차체의 기울어짐 각도를 θ 로 나타내면, 각각의 측정 변위와 노면 형상간의 기하학적 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[5].

$$h_1 + z(x) = h_2 + z(x + L) - L \theta \quad (1)$$

여기서 새로운 함수 $m(x)$ 를 식(2)과 같이 정의하면, 식(1)를 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$m(x) = h_1 - h_2 + L \theta \quad (2)$$

$$m(x) = -z(x) + z(x + L) \quad (3)$$

식(3)을 Fourier변환하여 공간 주파수 영역에서 나타내면 식(4)와 같으며,

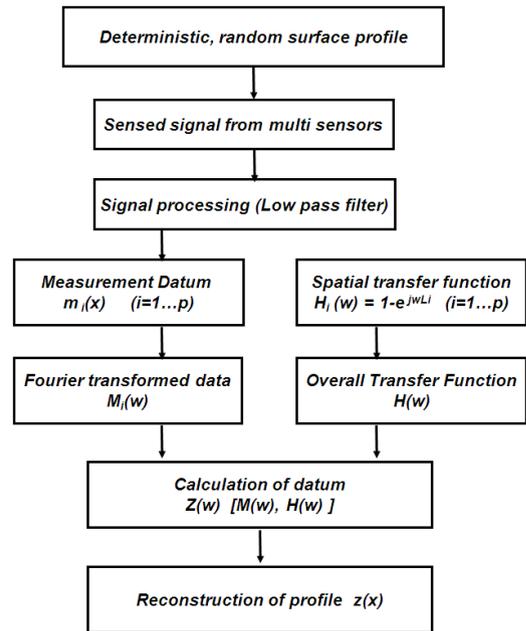
$$M(w) = Z(w)H(w) \quad (4)$$

여기서 $H(w)$ 는 식(5)로 나타내어지는 시스템의 전달 함수로 정의된다.

$$H(w) = 1 - e^{jwL} \quad (5)$$

따라서 각각의 측정값들로부터 식(4)의 관계에 의해 주파수 영역에서의 노면형상 $Z(w)$ 를 구할 수 있고, 이를 역후리에변환 (Inverse Fourier Transformation)함으로써 절대 노면형상의 주행 방향 좌표 x 에 대한 함수 $z(x)$ 를 구할 수 있다.

식(5)에서와 같이 시스템 전달함수의 주파수특성은 센서 사이 거리의 함수로 결정되므로 1조의 센서들만을 적용하는 경우 이러한 특성 개선에 한계가 있다. 이러한 주파수 특성을 향상시키기 위해서는 복수의 센서를 조합하여 전체 측정시스템 전달함수의 주파수특성을 개선시킬 수 있다.

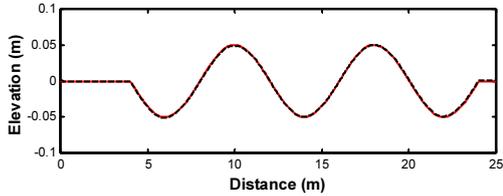


[그림 1] 형상 재현 알고리즘

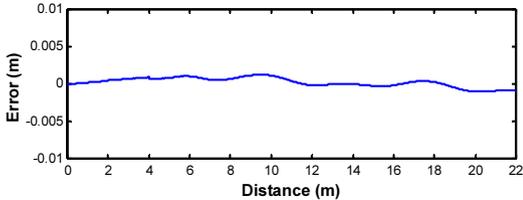
따라서 본 연구에서는 주파수영역에서의 각각의 전달 함수의 응답특성으로부터 전체 측정시스템 전달함수의 주파수특성을 향상시킬 수 있도록 다수의 센서 set를 이용하는 멀티센서 시스템을 제안하였다. 2개의 센서를 한 조로 하는 p 조의 센서 조합을 적용하므로써 각각의 전달 함수 $H_i(w)$ ($i=1..p$)로부터 특성을 개선할 수 있는데, 즉, 4개의 센서를 이용하는 멀티센서 시스템에서 각각의 전

달함수 $H_1(w)$, $H_2(w)$, $H_3(w)$ 에 대하여 관심 주파수 영역 w_s - w_e 에서 전달함수 크기의 분산(variance)이 최소가 되도록 각각의 센서 위치를 결정할 수 있으며, 멀티센서 시스템을 이용하여 형상 정보를 구현하는 알고리즘을 정리하면 그림 1과 같다.

$$\min_{w \in [w_s, w_e]} \max [H_1(w), H_2(w), H_3(w)] \quad (6)$$



(a) 형상비교 (직선: 원형상, 점선: 재현형상)



(b) 오차

[그림 2] 시뮬레이션 결과

센서 s_i ($i=1..4$)에서 s_1 을 기준으로 각 센서간의 거리를 L_j ($j=1..3$)로 나타내고 초기 거리 L_{0j} 는 0.5m 등간격으로 선정하였다. 식(6)의 목적함수에 대하여 센서위치를 최적화하는 알고리즘으로 비선형 최소자승법(nonlinear least square method)을 적용하여 구한 최적화된 센서위치 L_{fj} ($j=1..3$)는 각각 0.6, 1.1, 1.4m 로 결정하였다.

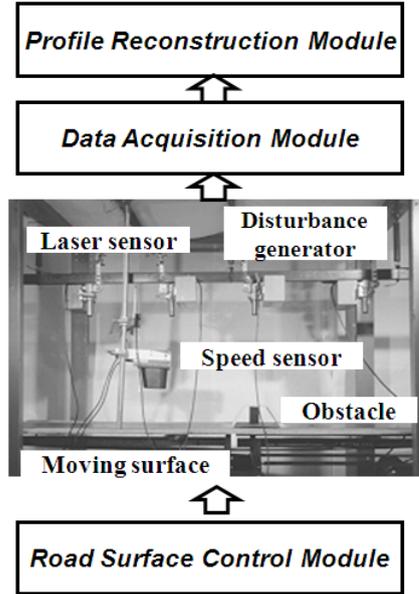
정현파 형태의 형상을 가지는 대상 노면에 대하여 그림 1의 표면형상 감지 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션 할 결과를 그림 2(a)에 재현한 절대 노면형상을 입력으로 가한 실제 노면 형상과 비교하여 도시하였으며, 이때 재현시의 오차를 그림 2(b)에 나타내었는데, 결과에서처럼 형상 재현이 잘 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

3. 시스템 구현 및 실험

3.1 Lab 실험

불규칙한 도로위를 주행하며 측정하는 실제 차량 실험의 전단계로 제안한 알고리즘을 포함한 계측시스템의 특성을 파악하기위하여 다양한 도로면 형상의 적용과 외란

인가가 용이하도록 그림 3과 같이 시뮬레이터를 구성하여 실험을 수행하였다.



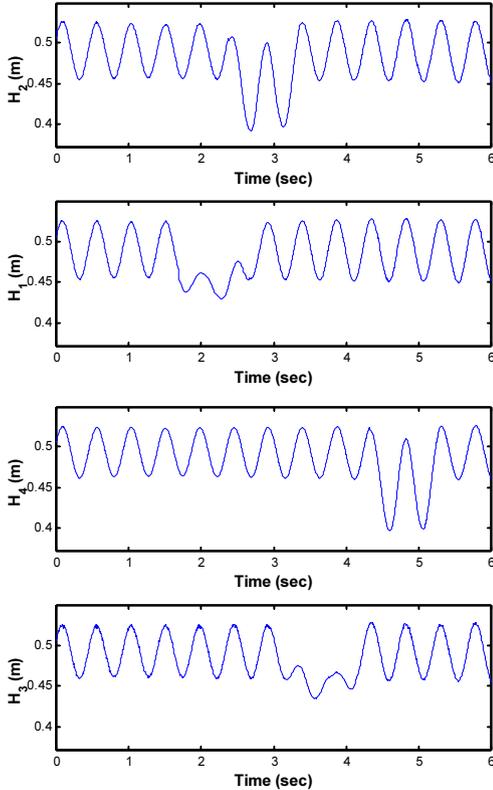
[그림 3] 실험장치

실험장치는 스프링으로 지지된 4개의 레이저 변위계, 가속도계, 속도계를 포함한 센서부와 일정 형상과 크기를 갖는 도로면 모형 및 주행 조건을 나타낼 수 있는 도로면 모사부 그리고 신호처리 및 알고리즘 계산 모듈로 구성하였다. 또한 불규칙한 도로 주행시 발생하는 차체의 동적 거동 영향을 고려하여 센서부착부분에 외란 인가부를 적용하였다.

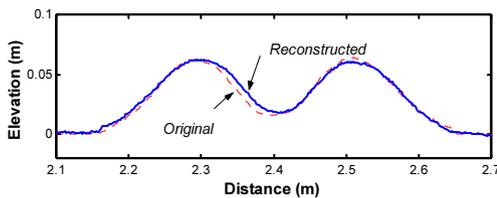
그림 5와 같은 형상을 가지는 도로면 모형에 대하여 노면 재현 실험을 수행하였으며, 그 결과를 그림4-그림5에 나타내었다. 차량이 이러한 도로면상을 주행하는 경우 발생할 수 있는 차체 거동을 고려하여 센서 부착부에 수직 및 회전운동에 해당하는 외란을 작용시켜 실험을 진행하였다. 각 센서로부터 측정된, 센서와 모형 노면간의 상대 변위를 그림 4에 각각 도시하였는데, 결과에서처럼 측정된 신호에는 가해진 외란의 영향이 혼입되어 나타나게 됨을 알 수 있다. 만약 도로면을 주행하는 측정 차량의 차체 혹은 센서 부착부를 완전히 진동절연시켜 외란 영향을 배제할 수 있다면 센서 측정 신호로부터 간단히 형상 정보를 얻을 수 있지만 이는 실제로 매우 어려운 일이다.

이러한 결과는 전술한바와 같이 차체에 부착된 센서만으로는 관심 도로면의 형상 정보를 정확히 파악할 수 없음을 의미한다. 차체 거동과 같이 동적 외란 신호가 혼입

된 측정 범위로부터 제안한 알고리즘을 이용하여 노면을 재현하여 실제의 모형 노면 형상과 비교하여 그림 5에 도시하였는데, 차체 거동과 관련된 외란에 대해서도 형상 재현이 강건하게 이루어짐을 확인할 수 있다.



[그림 4] 측정 센서 신호



[그림 5] 형상비교

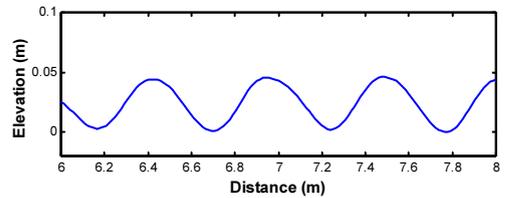
3.2 실차 실험

Lab 실험을 통해 검증된 노면 형상 재현 알고리즘과 측정 시스템을 적용하여 관심 도로면을 측정·해석하기 위하여 실제로 대상 차량에 시스템을 구성하여 실험을 수행하였다. 구현된 시스템을 탑재한 차량으로 실제 노면 위를 주행시키면서 센서로부터 측정된 노면에 대한 상대 정보로부터 대상 노면에 대한 절대 노면 형상을 재현하도록 하였다. 특정 형상 및 일반적인 여러 형태 도로의

노면에 대하여 실제 차량에 구현된 시스템을 적용하여 주행속도는 10-80 km/h로서 노면 상태에 따라 속도를 결정하였고, 각 센서의 샘플링 시간은 1msec로 하였다.



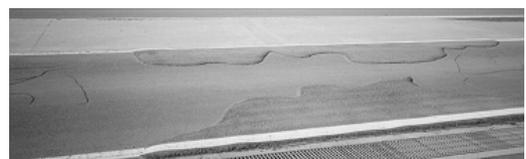
[그림 6] 측정도로면 사진



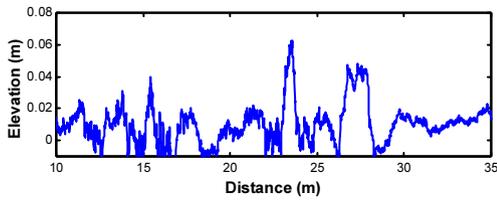
[그림 7] 재현 결과

그림 6에 도시한 확정적 형상의 도로면에 대하여 실험 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 6의 대상 도로면은 연속적인 정현파 형상으로 주기는 539mm이며 진폭은 44mm를 가지며 측정시 주행속도는 10km/h 를 적용하였다. 3.1절에서 기술한바와 같이 주행 차량의 동적 거동이 혼입된 측정 신호들로부터 제안한 알고리즘을 통하여 재현한 대상 도로면의 종단면 형상은 그림 7과 같이 구할 수 있다. 그림 6을 포함하여 과속 방지턱이나 맨홀과 같은 특정 형상의 도로면은 자동차의 동특성 해석 및 차량 제어 시스템의 성능 해석에 빈번히 사용하는 경우로, 제안한 시스템을 이용하여 생성한 도로면 정보를 활용하는 경우 실제 차량의 응답과 컴퓨터 모델을 이용한 해석 결과의 상관관계(correlation)로부터 그 결과의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

그림 6, 그림 7의 경우뿐 아니라 차량 동특성 해석을 위해서는 다양한 도로면을 적용하게 되는데, 차량이 주행하게 되는 불규칙한 형상의 도로면을 적용하는 경우에는 차체 거동을 유발하는 정확한 도로면 형상 정보를 확보하는 것은 매우 유용한 일이다. 본 절에서는 이러한 배경으로 다양한 형태의 불규칙 도로면(random roadway surface)을 대상으로 측정 및 재현 실험을 수행하여 그 결과를 그림 8 - 그림 13에 각각 나타내었다.



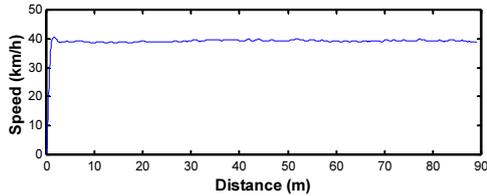
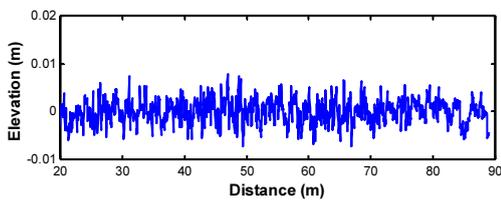
[그림 8] 측정도로면 사진 (case I)



[그림 9] 재현 결과 (case I)



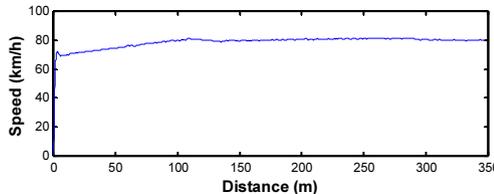
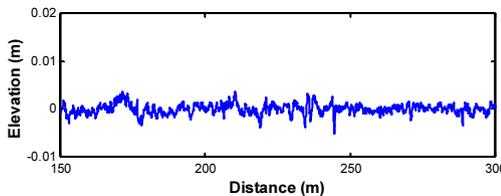
[그림 10] 측정도로면 사진 (case II)



[그림 11] 재현 결과 (case II)



[그림 12] 측정도로면 사진 (case III)



[그림 13] 재현 결과 (case III)

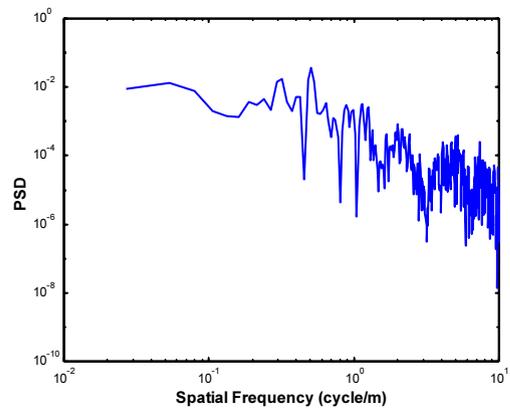
4. 측정 노면 해석

불규칙 도로 입력에 대한 차량의 수직방향 응답 특성은 승차감에 큰 영향을 주게되며, 정확한 대상 차량의 응답특성을 해석하기 위해서는 노면 정보의 확보가 필수적이다. 이러한 노면 입력 데이터는 랜덤 신호를 기초로 가상적으로 생성하여 적용할 수 있으나, 실차 실험에서의 데이터를 기초로 해석 결과와의 비교, 분석을 위해서는 대상 노면에 대한 측정 신호를 적용하는 것이 해석 정밀도 및 전산해석의 유용성을 향상 시킬 수 있다.

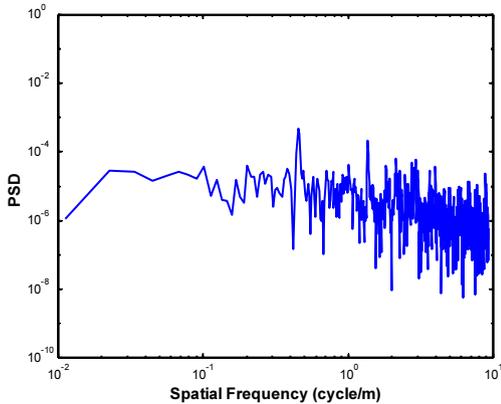
전술한 확정 형상 노면과는 달리 일반 도로의 불규칙성은 랜덤 신호로 취급되는데 도로면의 상태에 따라 주파수 특성이 달라지므로 이를 수식화하기 위하여 PSD(Power spectral density) 함수를 적용한다. 일반적인 도로에 대하여 PSD 함수를 이용한 분류 방식이 ISO, MIRA 등에 의해 제시되고 있는데, ISO의 분류 기준을 나타내면 표 1와 같으며, 노면을 PSD를 기준으로 A-H 등급까지 8단계로 나누어 노면의 거칠기 정도를 나타내고 있다.

[표 1] 도로면 거칠기 등급 ISO

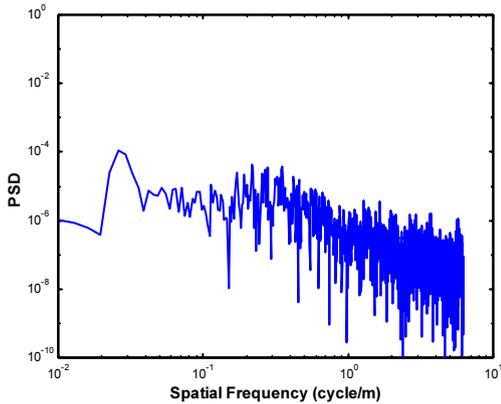
Grade	Roughness $10^{-6} (m^2 / cyc/m)$	
	Range	Average
A (Very Good)	< 8	4
B (Good)	8 - 32	16
C (Average)	32 - 128	64
D (Poor)	128 - 512	256
E (Very Poor)	512 - 2048	1024
F	2048 - 8192	4096
G	8192 - 32768	16384
H	> 32768	



(a) Case I



(b) Case II



(c) Case III

[그림 14] 측정 도로면의 PSD

3.2절의 랜덤 노면에 대한 실험 결과에서 3가지 도로 유형에 대한 PSD 선도를 그림 14에 나타내었다. 표 1의 ISO 분류 기준에 따르면 측정된 도로면에 대한 등급은 case I-case III 는 각각 A, B, D grade에 해당된다.

그림 14과 표 1과 같은 노면의 등급 분류만으로는 노면 가진에 의한 차량 진동 특성을 해석하기 위해서는 부족하다. 따라서 해석적 노면 모델이 사용되는데, 노면 굴곡(road elevation)에 대한 PSD 함수를 식(7)과 같이 모델링하는 것이 간단한 방법이다[6].

$$S(w) = C_{sp} w^{\alpha} \quad (7)$$

여기서, C_{sp} : 거칠기 계수
 α : 지수

그러나 그림 14에 도시한바와 같이 실제 노면 측정 결과는 log-log graph상에서 직선으로 나타나지 않는다. 즉, 주요 관심 주파수 대역인 저주파를 기준으로 근사화

(fitting)하면, 고주파에서 오차가 발생하게 된다. 따라서 식(7)과 같은 간단한 노면 모델에는 적용의 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 해석에 필요한 불규칙 노면 입력을 백색 잡음으로부터 구하기 위하여 식(8)와 같은 형태의 PSD 함수로 수식화한 노면 모델이 제시되고 있다 [7].

$$S(w) = \left(\frac{\sigma^2}{\pi} \right) \left(\frac{aV}{w^2 + a^2V^2} \right) \quad (8)$$

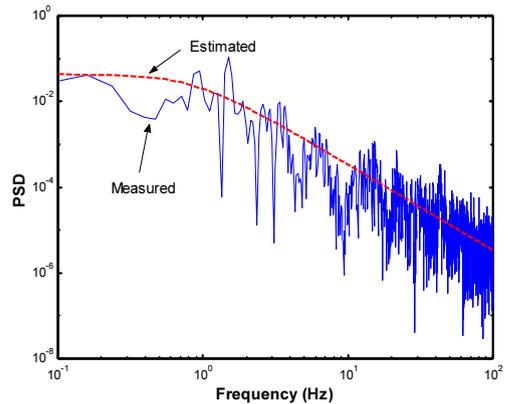
여기서, σ^2 : 분산도

V : 주행속도 (m/sec)

a : 도로형태계수

그림 14의 case I 의 측정 결과에 대하여 식(8)의 노면 모델을 적용한 것을 그림 15에 비교하여 나타내었다. 결과에서처럼 직선으로 모델링하는 경우보다는 실측치에 근접한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그러나 식(8)의 간단한 노면 모델만으로는 다양한 형태의 도로면을 기술하는데 부족하므로 보다 복잡한 형태의 노면 모델들이 제시되고 있다[8]. 그러나 일반 노면에 대하여 이러한 모델의 모든 계수 값을 동정하여 사용하는 데에는 어려움이 있다. 따라서 노면 모델의 적용 이유는 실제 도로면에 대한 정보를 얻을 수 없을 때의 차선택이므로 개발 차량에 대한 특성 실험시 차량의 동적 거동 계측과 더불어 제안한 노면 계측 시스템을 통한 노면 외란에 대한 정확한 데이터를 적용한다면 해석 정밀도를 보다 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.



[그림 15] 노면모델과의 비교

5. 결론

불규칙한 도로를 주행하는 자동차와 같이 센서 부착 위치에 인가되는 동적인 외란의 영향을 받는 조건에서 관심 도로면의 종단면 형상을 강건하게 재현할 수 있는 멀티 센서를 이용한 알고리즘을 포함한 노면 계측 시스템을 개발하였다. Lab 실험을 통해 검증된 시스템을 실제 차량에 구현하였으며, 다양한 관심 도로면에 대한 실험을 수행하여 관련 데이터베이스를 구축하였다. 해석적 노면 모델과 성형 필터를 통해 생성한 노면 입력 데이터에 비하여 개발 차량에 대한 동역학 시뮬레이션, 승차감 및 부품 내구성 평가, 그리고 각종 차량 응답 해석 등에 보다 정확한 노면 외란 데이터로 적용할 때 해석 정밀도 및 신뢰성을 향상 시킬 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] W. Jeong, K. Yoshida and H. Kobayashi, "State estimation of road surface and vehicle system using a kalman filter". JSME International Journal Series III, Vol.33, No.4, pp.528-534, 1990 .
- [2] A. J. Healey, E. Nathman and C. C. Smith, "An analytical and experimental study of automobile dynamics with random roadway inputs", J. of Dynamic Systems. Measurements and Control Tran. of the ASME. pp. 284-292, 1977.
- [3] T. Morita, T. Tanaka and N. Kishimoto, "Ride comfort improvement using preview sensor", International Symposium on Advanced Vehicle Control. 1992.
- [4] G. Prokop, R. S. Sharp, "Performance enhancement of limited-bandwidth active automotive suspensions by road preview", IEE Proc. -Control Theory Appl. Vol. 142, No. 2, pp.140-148, 1995.
- [5] H. J. Kim, H. S. Yang, Y. P. Park, "Roadway profile measurement by road-sensing algorithm and its application to preview control of active suspension", Proceedings of Asian Pacific Vibration Conference. pp. 945-950, 1999.
- [6] J.S. Bendat and A.G. Piersol, "Random Data, Analysis and Measurement Procedures," John Wiley & Sons, New York, 1986.
- [7] Y.M. Heath, "Application of the Isotropic Road Roughness Assumption," Journal of Sound and Vibration, Vol. 115, No. 1, pp. 131-144, 1987.
- [8] A. Hac. "Adaptive control of vehicle suspension", Vehicle System Dynamics. Vol. 16, pp. 57-74, 1987.

김 호 준(Hyo-Jun Kim)

[정회원]



- 1988년 2월 : 연세대학교 기계공학과 학사
- 1996년 8월 : 연세대학교 기계공학과 석사
- 2000년 2월 : 연세대학교 기계공학과 박사
- 1988년 ~ 1993년 : 대우중공업 중앙연구소
- 2001년 3월 ~ 현재 : 강원대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

동역학 시스템의 강건제어, 고충격 시스템 진동절연, 정밀 계측 및 제어