

PSD선도를 이용한 국내노면의 민감도 분석에 관한 연구

The Study on Sensitivity Analysis of Domestic Road using PSD

배철용*·김찬중*·권성진*·이봉현*·김현철*

Chul-Yong Bae, Chan-Jung Kim, Seong-Jin Kwon, Bong-Hyun Lee, Hyun-Chul Kim

Key Words : PSD(파워 스펙트럼), Domestic Road(국내도로), Road Profile(노면 형상), Sensitivity(민감도)

ABSTRACT

The durability of recent motors is longer than the past one because there are the rapid technique development of the automobile industry and the vehicle maintenance of users. And then the importance of the durability test due to vibration is increased from day to day. So full vehicle and parts companies accomplish the durability test using various methods. The most public test method among them is the reliable field test but it bring on higher cost and period of the development process. The durability test using MAST(multi axis simulation table) is a solution in order to improve the development process of automobiles. Generally its excitation source uses the optimized road profiles that are obtained by the road test of belgian road, country road, cobbleston road and so on instead of a real field but the interrelations and influences accordingly vehicle damage are considered by a field test between specific roads and real fields in the first place. Therefore this study, in order to accomplish a basic research for the durability test using the MAST, performed on the real field driving test at various domestic roads and the results which are analyzed by PSD(power spectrum density) are compared with relative sensitivity among the roads. Consequently they can present a basic material for generation of road profiles which is applied to the durability test using MAST.

1. 서론

자동차 산업은 기술의 발전을 거듭하면서 다양한 최신기술과 미래기술이 접목되어 개발되어지고 있다. 이러한 자동차 기술의 발전은 자동차 운전자들의 기본적인 자동차 정비 상식의 대중화와 더불어 자동차의 수명을 연장시키는데 큰 기여를 하고 있다. 따라서 자동차의 수만 가지 부품들에 대한 각각의 단품 및 모듈화된 부품들의 진동내구평가의 중요도는 자동차기술의 발전과 더불어 그 중요도가 증가하고 있는 추세이다. 이러한 진동내구평가는 크게 실차주행을 통해 내구성을 평가하는 방법과 각종 내구평가장비를 통해 실주행을 대신하여 평가하는 방법으로 나눌 수 있다. 하지만 최근의 진동내구평가의 추세는 자동차 부품들의 개발비용 및 기간의 단축을 위하여 각종 내구평가 장비(단축가진기, 다

축가진기 등)를 통한 평가를 선호하고 있다.

자동차 부품들의 진동내구평가는 과거 단축가진기를 이용한 진동내구평가를 시작으로 근래에는 6축 가진기(MAST ; Multi Axis Simulation Table)를 이용하여 실제 주행조건에 부합하는 가진원을 통하여 진동내구평가를 수행하는 단계에 까지 왔다. 하지만 국내 완성차 및 부품업체의 경우 이러한 6축가진기를 이용한 내구평가는 시도단계에 있는 실정이며, 자동차 선진국들은 평가기준과 다양한 평가방법에 대한 내용에 대해 외부 공개를 꺼리고 있어 기술의 축적 및 표준화가 어려운 실정이다.

일반적으로 6축가진기의 가진원으로 작용하는 Input Source는 각종 특수로의 노면 가진특성을 이용한 노면 주행 Profile을 생성하여 적용되어지며 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있는데,^[1] 특수로에 의한 가진은 가혹한 조건에서 단기간내에 자동차 부품의 내구품질특성을 시험할 수 있는 좋은 장점을 지니고 있다. 하지만 고속도로, 국도, 지방도, 비포장로 등으로 구분되는 주행시험장의 노면과 실제 노면과의 상관관계 및 차체에 가해지는 Damage 측면에서 어떠한 영향도를 갖게 되는지에 대한 정량적인 상관관계가 명확

† 자동차부품연구원 에너지부품연구센터
E-mail : cybae@katech.re.kr
Tel : (041) 559-3339, Fax : (041) 559-3070

* 자동차부품연구원 에너지부품연구센터

하게 규명되어지고 있지 않다.

이에 대한 기초연구로 김충완^[2]은 Field와 내구시험간의 Correlation을 위하여 Field 기준 노면을 선정하고 선정된 노면에 대한 Profile을 제작하여 Damage 비율을 조정함으로써, 실제 Field 사용 기준노면에 근거한 내구평가 방법을 제시한 바 있으며, 김효준^[3] 등은 레이저 변위센서 등을 이용하여 노면의 형상을 재현하는 알고리즘을 적용하여 차량 진행방향으로의 노면 종단면 형상을 측정하여 이를, 차량동역학 및 승차감 평가에 이용한 바 있다. 또한 정상화^[4] 등은 실제 노면의 Road Profile을 재현하는 소프트웨어를 개발하고 다양한 실제 노면의 입력신호를 구성하여 다축 로드 시뮬레이터에 적용한 바가 있다.

이에 본 연구에서는 6축 가진기를 이용한 진동내구평가를 수행하기 위한 기초연구로써, 실제 국내 각 노면의 실차 주행 시험을 통해 각 노면의 특성을 PSD분석을 통하여 분석하고, 이를 각 노면별 상호비교분석 기법을 통하여 노면에 따른 민감도 분석을 수행하였으며, 향후 6축 가진기를 이용한 진동내구평가의 노면 Profile 생성의 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 국내도로 주행시험

2.1 대상부품 및 신호측정 위치 선정

수많은 자동차 부품이 진동내구평가의 대상이 될 수 있겠지만, 본 연구에서는 자동차 운전자가 직접 피로도를 느끼기 쉽고, 진동 내구환경에 의해 피로 내구에 가장 큰 영향을 받으며 6축 가진기를 통해 진동내구시험을 수행하기 적합한 운전석 시트(seat)와 도어(door)를 시험평가 대상으로 선정하였다.

실차도로 주행 시험차량은 국내 2,500 cc 중대형 승용차를 선정하여 주행시험을 수행하였다. 신호 측정에는 3축 가속도계 8개(일반 ICP type 7개, seat 가속도계 1개)를 이용하여 주행 시의 진동신호를 측정하였다. 측정위치의 선정은 6축가진기를 이용한 진동내구 평가 시, 시뮬레이터의 한정된 자유도를 고려하여 가장 제어성이 우수한 위치를 선정하였다. 그림 Figure 1은 시트에 설치된 3축 가속도계의 위치를 보여주며, Figure 2는 도어에 설치된 3축 가속도계의 위치를 보여준다. Figure 1과 Figure 2에서 'R'은 Reference 입력신호를 의미하며 향후 PSD 분석 이후에 전달함수를 구하기 위해 측정된 신호를 의미한다. Figure 2에서 도어측 5, 6, 7번 가속도계의 응답위치는 도어에 Mounting 시키기가 어려운 관계로, 응답을 측정하려는 각 도어 위치와 맞닿아 있는 차체에 가속도계를 설치하였다.

일반적으로 차량 주행 중 발생하는 가속도 신호값은 1g 미만의 응답특성을 나타내기 때문에, Output의 단위 unit당 Resolution의 Range가 큰 ICP타입의 가속도계를 사용하여

다. 하지만 도어측에 설치된 가속도계의 경우 주행 중 발생할 수 있는 수분유입에 대비하기 위하여 방수성능이 ICP타입보다 상대적으로 우수한 Charge Type 가속도계를 설치한 후, Charge -> ICP 컨버터를 사용하여 가능한 작은 응답에서의 Output Range Resolution을 크게 만들었다.

시트 및 도어에서 총 8개 가속도계에서의 24채널 응답은 LMS Pimento와 Front-end^[5]를 이용하여 250 Hz의 Sampling Frequency로 데이터를 저장하였다. Figure 3은 시험을 위한 전체적인 장치도를 개략적으로 나타낸 것이다.

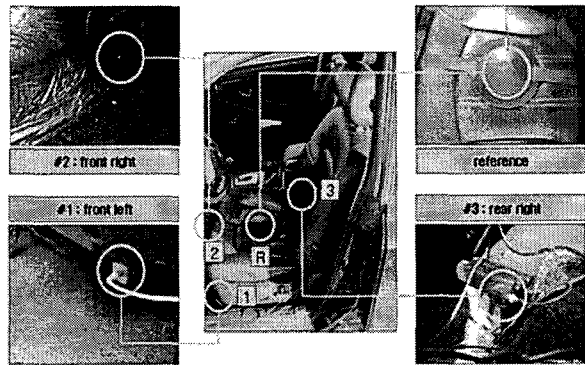


Figure 1 Position of accelerometers at the seat

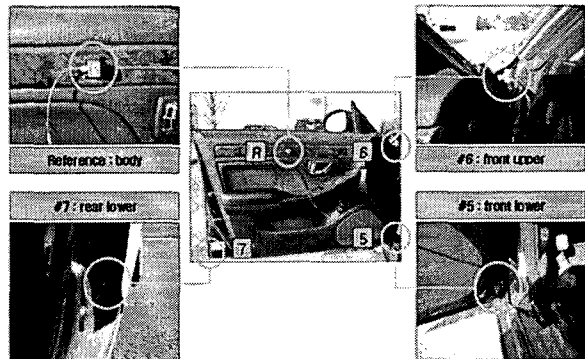


Figure 2 Position of accelerometers at the door

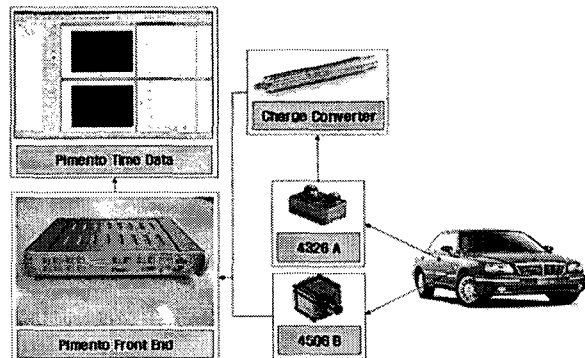


Figure 3 Schematic diagram of experimental setup

2.2 실차시험 주행모드

실차주행 시험모드는 국내에서 자동차를 주행하면서 접할 수 있는 다양한 종류의 노면을 선정하였다. Table 1에 도시한 바와 같이 고속도로(경부선 하행선 구간), 국도(7번), 지방도(421번), 비포장로, 서울시내 도로 등 다양한 노면의 조건을 선정하여 실차 주행을 수행하였다. 특히 시험용 차량의 주행모드는 교통흐름에 맞춰 규정속도 보다 조금 높게 혹은 조금 낮게 운전하는 방식의 실사용자 운전모드로 주행하였다. 특히 차량이 자동변속기 차량임을 감안하여 무리한 가속을 통한 변속충격이 발생하는 것을 최대한 배제하고, 실제 노면에서 올라오는 가진원만을 측정할 수 있도록 주행모드를 설정하였다. 또한 실차시험 시험자의 안전도를 고려하여 50분간 데이터 획득 후, 10분간의 휴식을 갖는 방식으로 주행시험을 수행하였다.

Figure 4는 천안에서 시작하여 다시 천안으로 돌아오는 주행코스 중, 계측이 진행된 구간을 나타낸 그림으로, 서울시내의 경우는 강북과 강남으로 나누어 시험을 진행하였다.

Table 1 Driving mode of the Vehicle Test

도로 구분	세부구간	주행 거리
고속도로 (경부)	천안 - 금강 휴게소	104(km)
	금강 휴게소 - 김천 IC	
	김천 IC - 건천 휴게소	
국도 (7번)	경주 IC - 호계	278(km)
	호계 - 경주 IC	
	경주 IC - 포항시내	
	포항시내 - 국도 진입	
	포항 - 영해	
	영해 - 원덕	
국도 (38번)	삼척 - 태백	150(km)
	태백 - 사북	
지방로(421번)	사북 - 물운	150(km)
지방로(424번)	물운 - 정선읍	
국도(59번)	정선읍 - 정선군	21(km)
국도(42번)	정선군 - 평창시내	
비포장로	면은 - 금당계곡	21(km)
	금당계곡 - 도로 끝	
	도로 끝 - 면은	
서울시내	양재-수서-잠실-강남	40(km)
	반포-종로-한남대교	
비포장로	광덕사 - 산 중턱	4.6(km)
총 주행거리		739.6(km)

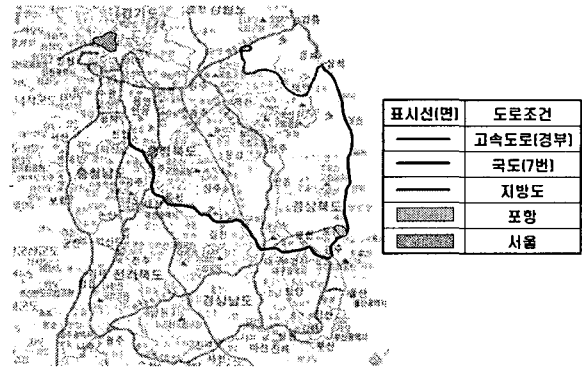


Figure 4 Driving course

3. 국내도로 실차시험 결과

3.1 시험노면의 분류

실제 주행모드를 선정하고 주행시험을 수행한 결과 동일한 종류의 노면이라 할지라도 구간에 따라 서로 다른 특성을 나타냄을 알 수 있었다. 경부고속도로 하행선의 경우는 횡그루브(Lateral Groove)를 갖는 콘크리트 노면과 거친 아스팔트, 신규 아스팔트 등으로 나누어 질 수 있었으며, 이외에 국도나 지방도 역시 노면의 Surface Density에 따라 각기 다른 특성을 나타내고 있다. 이를 육안으로 확인하기 위해 Figure 5에 Surface Density 확인을 위한 각 노면별 사진을 나타내었다.

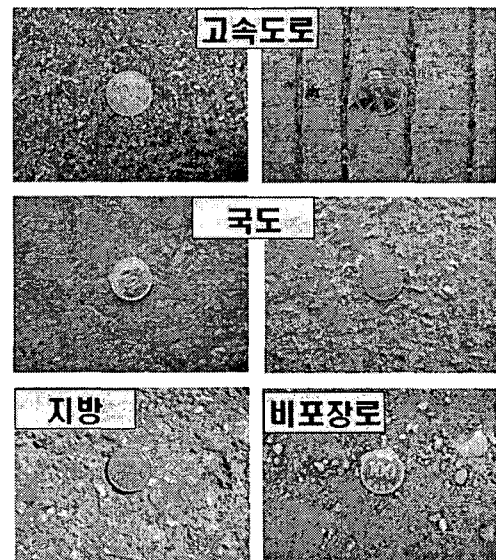


Figure 5 Surface density of roads

따라서 상기와 같이 동일한 노면에서도 노면의 Surface Density가 서로 다르게 나타나기 때문에 실차시험 결과분석을 위해서는 노면의 분류가 필요하게 된다. 이에 Table 2와

같이 노면의 Surface 특성에 따라 총 18개의 노면 카테고리를 분류하여 민감도 분석을 수행하였다. 고속도로는 콘크리트 노면과 아스팔트 노면으로 분류하였고, 국도는 Figure 5에 도시한 바와 같이 노면의 구분이 확연한 구간에 따라 두 종류로 나누었다. 특히 지방도의 경우는 일반적인 아스팔트 노면과 비포장로를 모두 포함하여 분류하였다. 각 노면 분류별 '상'으로 구분된 노면은 '하'로 구분된 노면보다 Surface의 상태가 양호함을 나타낸다. 특히 지방도의 경우 '상'은 아스팔트 노면을, '하'는 비포장로를 나타내며 '최하'로 구분한 지방도는 자갈로를 형성한 비포장로를 나타낸다. 또한 유사한 노면등급이라도 구간에 따라 'I', 'II'등으로 구분하였다. 각 카테고리별 분류되어진 노면의 특성은 서로 유사한 경향을 나타내며, 4절에서 논의 될 상호 노면간 상대적인 민감도 분석에 이용 되어진다.

Table 2 Classification according to road surface

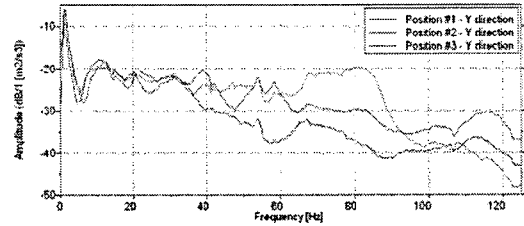
도로 구분	세부구간	주행 거리
고속도로(상)	천안 - 금강 휴게소	74(km)
고속도로(하) I	금강 휴게소 - 김천 IC	68(km)
고속도로(하) II	김천 IC - 건천 휴게소	104(km)
국도(상) I	경주 IC - 호계	30(km)
국도(상) I	호계 - 경주 IC	30(km)
국도(상) III	경주 IC - 포항시내	27(km)
포항시내	포항시내 - 국도 진입	6(km)
국도(하) I	삼척 - 태백	46(km)
국도(하) II	태백 - 사북	30(km)
지방(상) I	사북 - 울운	10(km)
지방(상) II	울운 - 정선읍	18(km)
지방(하) I	면온 - 금당계곡	8(km)
지방(하) II	금당계곡 - 도로 끝	6(km)
지방(하) III	도로 끝 - 면온	7(km)
서울시내 I	양재-수서-장성-강남	20(km)
서울시내 II	반포-시청-중로-한남대교	20(km)
지방(최하) I	광덕사 - 산 중턱	4.6(km)
지방(최하) II	산 중턱 - 광덕사	4.6(km)

3.2 PSD를 이용한 시험결과 분석

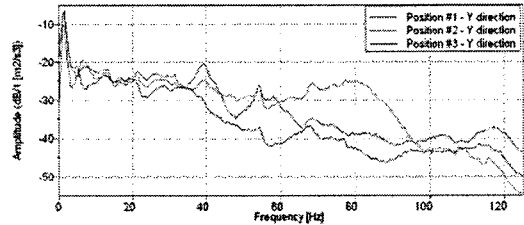
Figure 6과 Figure 7은 각 노면의 실차주행 시험에서 측정되어진 시간영역의 가속도 응답에 대해서 PSD(Power Spectrum Density)로 분석한 결과를 도시한 그림이다. 지면의 한계상 3축 가속도계의 응답 중, 고속도로/국도/지방도에서 차량의 Vertical Motion만을 도시하였다.

Figure 6은 시트에서의 측정된 결과를 도시하고 있으며, 주파수 전영역에서 2번 위치(Figure 1참조)의 에너지 밀도가 다른 위치의 응답보다 크게 발생하고 있는 것을 확인할

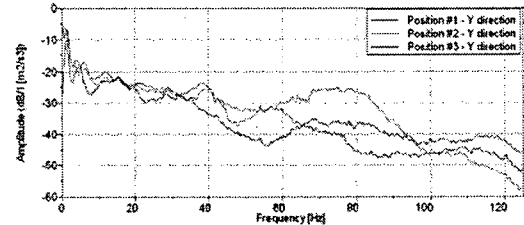
수 있다. 이는 노면가진에 의한 전달경로 상에서 휠과 가장 근접한 위치에 있기 때문에 가장 많은 Damage, 즉 에너지를 받고 있는 것을 확인할 수 있다. 이와 반대로 3번 위치의 경우는 Wheel Force 가진의 영향을 가장 덜 받고 있는 위치이기 때문에 전 주파수 영역에서 가장 적은 에너지 밀도 레벨을 보이고 있음을 확인할 수 있다.



(a) Highway road

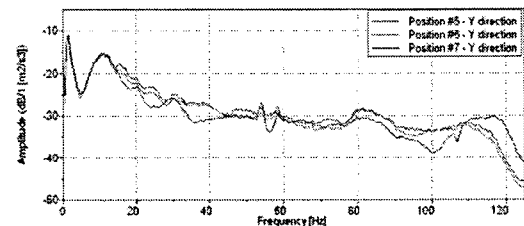


(b) National road

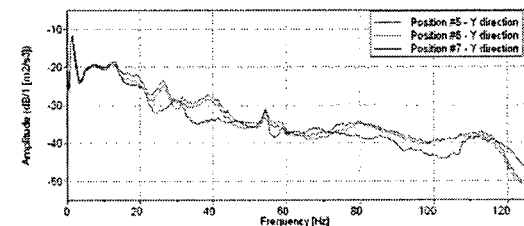


(c) Local road

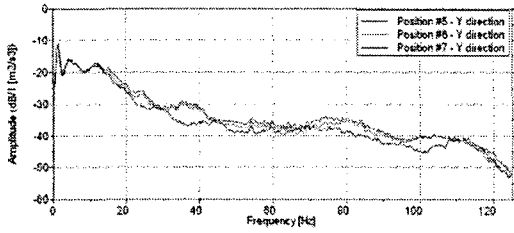
Fig. 6 PSD result of seat



(a) Highway road



(b) National road



(c) Local road
Figure 7 PSD result of door

Figure 7은 도어의 분석결과를 나타낸 그림으로, Figure 6의 결과와는 다르게 주파수 전역역에서 각 위치별 유사한 에너지 분포를 보이고 있다. 또한 5번, 6번의 응답위치에서는 거의 동일한 에너지 밀도 분포를 나타내고 있으며 7번 위치는 5, 6번에 비하여 다소 낮은 에너지 분포를 나타내고 있다. 이는 7번 위치의 응답이 차량의 중심방향에 있기 때문에 노면에서 올라오는 가진의 영향을 가장 적게 받고 있음을 의미한다. 즉, 도어의 경우 Wheel Force의 영향을 가장 직접적으로 받을 수 있는 도어의 경첩부위에서 가장 큰 Damage를 입고 있음을 예측할 수 있다.

4. 주행 노면별 민감도 분석

4.1 노면별 민감도 분석방법 선정

PSD 선도는 측정된 위치에서의 에너지 값을 나타내어주며 주파수 변환 과정에서 윈도우의 크기에 상관없이 동일한 레벨 값을 나타내주기 때문에 노면 사이의 상관성에 대한 민감도를 분석하는데 적절한 데이터로 활용 가능하다.

이러한 PSD 선도를 통해 노면 사이의 상관성을 나타내는 민감도 분석 방법으로는 기여도함수(coherence function)을 이용하는 방법과 각 주파수대역에서 발생한 에너지 레벨 값을 벡터와 시켜 분석하는 방법 등으로 나누어질 수 있다. 전자의 경우는 주요 주파수 성분을 제외한 나머지 영역에서는 낮은 상관성을 나타낼 수 있기 때문에 전주파수 영역에서의 민감도 분석에는 적절치 못한 방법이다. 따라서 본 연구에서는 후자의 에너지 레벨 값을 벡터화 시켜 각 노면별 상관성에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

후자의 분석방법에서 분석을 요하는 두 노면의 PSD 선도에서 계산되어진 벡터 값이 P_A 와 P_B 라고 가정할 때 두 벡터 사이의 상관성은 아래의 식 4.1을 통하여 원하는 Index 값을 얻을 수 있으며, 얻어진 Index 값은 비교되어진 두 노면의 상관성에 기인한 노면의 민감도를 나타내게 된다.

$$I_{AB} = \frac{P_A \cdot P_B}{\text{norm}(P_A) \times \text{norm}(P_B)} \quad (1)$$

4.2 노면별 민감도 분석결과

식 (1)을 통하여 Table 2에서 나타난 각 노면별 카테고리를 이용하여 노면간 상관성에 대한 상대적인 민감도 분석을 수행하였다. 지면관계상 모든 민감도 분석결과를 도시하지는 못하고 대표적인 몇 가지 결과만을 도시하였다.

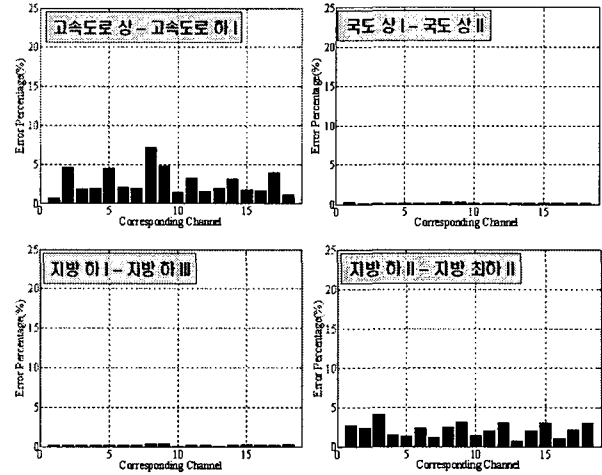


Figure 8 The relative sensitivity of similar roads

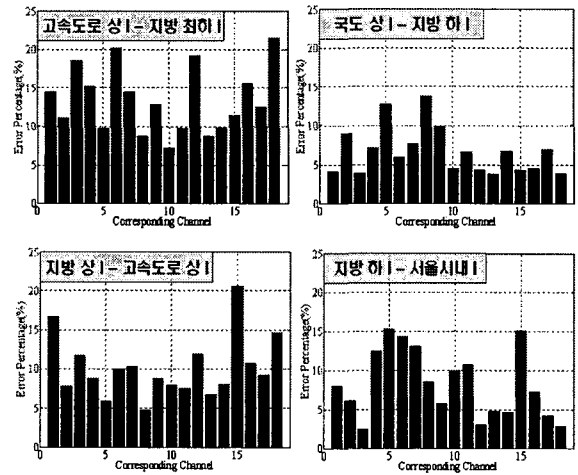


Figure 9 The relative sensitivity of different roads

Figure 8은 동일노면, 즉 3.1절에서 기술한 동일한 노면에 대하여 Table 2의 각 카테고리에 따라 비교분석한 결과를 나타내고 있다. Y축은 상대적인 민감도 Index를 나타내며 X축은 Reference 채널을 제외한 6개 채널의 X, Y, Z축으로의 응답위치를 나타낸 것이다. 국도와 지방도의 경우는 두 노면에서의 상관성에 대한 민감도는 상당히 낮은 수치를 나타내고 있다. 즉, 육안으로 관찰 및 서로 다른 주행구간 일지라도 동일한 노면에서는 상호 유사한 노면특성을 지니고 있다는 것을 확인할 수 있다. 하지만 고속도로와 지방도

해II-지방 최하 II의 경우는 두 노면의 상대적인 민감도가 비교적 높게 나타나고 있다. 이는 고속도로의 경우 아스팔트와 콘크리트 노면의 차이에서 발생하는 수치이며, 지방 해II-지방 최하 II의 경우는 각기 다른 비포장로로써 노면의 상태가 상당히 다르게 나타나기 때문이다.

Figure 9는 서로 다른 두 노면에 대하여 상대적인 민감도를 분석한 결과를 도시한다. 동일한 노면과 비교한 Figure 8과는 달리 높은 민감도 수치를 나타내고 있다. 이는 두 노면의 Surface Density의 차이에 기인한 지면의 가진원이 각 측정된 채널에 상이하게 에너지를 전달하고 있기 때문이다.

Table 3 Averaged sensitivity value(similar roads)

도로 구분	오차(%)
국도(하) I - 국도(하) II	1.2
지방(상) I - 지방(상) II	1.4
국도(하) I - 지방(상) I	2.3
국도(하) I - 지방(상) II	0.8
국도(상) I - 국도(상) II	0.2
국도(상) II - 국도(상) III	2.9
국도(상) I - 포항시내	0.4
국도(상) III - 포항시내	1.9
고속도로(상) - 고속도로(하) II	1.8
고속도로(하) II - 고속도로(하) III	0.9
지방(하) I - 지방(하) III	0.2
지방(최하) I - 지방(최하) II	0.4
지방(하) I - 지방(하) II	3.2

Table 4 Averaged sensitivity value(different roads)

도로 구분	오차(%)
지방(상) I - 고속도로(상) I	10.1
지방(상) I - 지방(하) I	7.7
국도(상) I - 고속도로(상) I	5.5
국도(상) I - 지방(하) I	6.6
국도(상) I - 지방(최하) I	5.9
고속도로(상) I - 지방(하) I	13.1
고속도로(상) I - 지방(최하) I	13.4
고속도로(상) I - 서울시내 I	12.2
지방(하) I - 지방(최하) I	4.9

Table 3과 Table 4는 Figure 8과 Figure 9에서 도시한 두 노면간의 상대적인 민감도 값을 전 채널에 대하여 평균화 시켜 하나의 수치로 나타낸 것이다. 두 Table의 수치비교에서도 알 수 있듯이, 동일노면간의 평균화된 민감도는 낮은 수치를 나타내지만, 서로 다른 노면간의 상대적인 민감도의 평균치는 높은 값을 나타내고 있다. 즉, 본 연구에

서 적용되어진 민감도 분석방법을 통해 두 노면간 상대적인 민감도 분석이 가능함을 알 수 있다.

이러한 분석결과와 분석방법을 이용하여 자동차 부품 진동내구평가를 위한 6축 가진기 시험 시, 각 노면의 Profile을 생성하고, 특수로와 일반로의 상호비교검증과 민감도 분석을 통하여 차체에 영향을 미치는 가진 에너지를 가능해오는 기초적인 자료를 제공할 수 있을 것이다.

5. 결론

국내 각 노면에 대한 실차시험과 분석된 결과를 통하여 본 연구에서는 아래와 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 국내 대표적인 노면별 도어와 시트부에서의 진동가속도 데이터에 대한 DB를 구축할 수 있었다.
- 2) 측정된 가속도 응답의 PSD 분석을 통하여 도어와 시트의 위치별 Damage 예상 지점을 예측할 수 있었다.
- 3) PSD 분석을 통하여 각각 임의의 두 노면에 대한 상대적인 민감도 분석을 통하여 두 노면간 특성차이의 정량적인 판단의 근거를 제시할 수 있었다.
- 4) 본 시험결과를 토대로 자동차 부품 진동내구평가를 위한 6축가진기 시험 시, 각 노면의 Profile을 생성하고, 특수로와 일반로의 상호비교검증과 민감도 분석을 통하여 차체에 영향을 미치는 가진 에너지를 가능해오는 기초적인 자료를 제시 할 수 있었다.

후 기

본 논문은 산업자원부에서 주관하는 표준화기술개발사업의 성과 내용으로 관계자분들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 김찬중, 이봉현, 김기훈, 2005, "자동차부품(시트,도어) 6축 진동 재현을 위한 가진 프로파일 생성기법", 한국소음진동공학회 논문집, 15권 9호, pp 1070~1076
- (2) 김충완, 2005, "Field 기준노면을 이용한 버스 내구시험 기간 단축기법 개발", 춘계학술대회 논문집, 한국자동차공학회, pp.650~655
- (3) 김효준, 윤재호, 남관현, 임종훈, 손한규, 백윤수, 박영필, 1997, "자동차의 동적특성 해석을 위한 노면형상의 측정", 추계학술대회 논문집, 대한기계학회, pp. 529~534
- (4) 정상화, 류신호, 김우영, 양성모, 김택현, 2003, "다축 로드 시뮬레이터의 노면 프로파일 재현 소프트웨어 개발", 한국자동차공학회 논문집, 제10권, 제5호, pp.190~198
- (5) LMS, 2004, "Pimento Training Manual"