

PSD선도를 이용한 국내노면의 상관성 분석에 관한 연구

The Study on Interrelationship Analysis of Domestic Road Using PSD

배철용† · 김찬중* · 권성진* · 이봉현* · 김현철**

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

(2006년 4월 6일 접수 ; 2006년 6월 29일 심사완료)

Key Words : PSD(파워 스펙트럼 밀도), Interrelationship Index(상관성 지수), Multi Axial Simulation Table
(6축가진기)

ABSTRACT

An important factor of vibration test using MAST(multi axial simulation table) system is the reliance of input excitation source. Generally the generation of input excitation source is obtained by the measured data on special road in proving ground. The measured data on special road have more exciting energy than the data of real fields, therefore the time and expense for test can be reduced. But the magnitude of input excitation source must be defined by comparison with the excited energy on real field. The object of this paper makes the data base of domestic roads for the definition of input excitation source which is obtained by the measured data on special road in proving ground. These real field data on domestic roads are analyzed by the power spectral density and interrelationship index.

1. 서 론

현재의 자동차 산업은 기술의 발전을 거듭하면서 다양한 최첨단기술과 미래기술이 접목되어 자동차가 개발되어지고 있다. 이러한 자동차 기술의 발전은 자동차 운전자들의 기본적인 자동차 정비 상식의 대중화와 더불어 자동차의 수명을 연장시키는데 큰 기여를 하고 있다. 따라서 자동차의 수많은 부품들에 대한 각각의 단품 및 모듈화된 부품들의 진동내구 평가는 자동차기술의 발전과 더불어 그 중요도가 증가하고 있는 추세이다. 이러한 진동내구평가의 방법으로는 S-N 선도를 이용한 손상도 계산방법과

PSD(power spectral density; 파워 스펙트럼 밀도) 카운팅 방법, PSD를 이용한 에너지 방법 등을 들 수 있다. 평가 대상물이 모듈화된 부품과 같이 복합적인 요소로 이루어져 있는 경우, 시스템 자체는 미지수로 두고, 입력 가진력만을 고려하여 측정 한 후, 이를 에너지로 변환하여 평가 대상물에 입력된 에너지 크기를 고려하여 대상물에서 발생하는 파손이나 응답을 통하여 진동내구를 평가하는 에너지 방법을 사용하는 것이 장점을 갖기 때문에 많은 자동차 관련 업체에서 활용하고 있는 방법이다^(1,2). 이러한 에너지 방법을 통한 진동내구평가는 단축 및 다축 진동시험을 통하여 평가를 수행하게 되며, 근래에는 6축가진기(multi axis simulation table)를 이용하여 진동내구평가를 선호하는 추세이다. 하지만 국내의 경우 국내 완성차 및 부품업체의 경우 이러한 6축가진기를 이용한 내구평가는 각 업체별 개별 평가기준에 따라 각각의 부품에 대해 대응해가고

† 책임저자; 정회원, 자동차부품연구원 에너지부품연구센터
E-mail : cybae@katech.re.kr

Tel : (041) 559-3339, Fax : (041) 559-3070

* 정회원, 자동차부품연구원 에너지부품연구센터

** 자동차부품연구원 에너지부품연구센터

있는 실정이며⁽³⁾, 국외와는 달리 일정한 시험표준이나 관련법규가 표준화 되어 있지 못하다.

이러한 6축가진기를 이용한 진동내구평가에서 가장 중요한 요소는 6축가진기에 가진원으로 적용되는 입력 프로파일을 신뢰성 있게 생성하는 것이다. 일반적으로 6축가진기에 가진원으로 작용하는 입력 프로파일의 생성은 주행 시험장 내의 각종 특수로의 노면 가진을 측정하여, 이를 반복적으로 6축가진기에 입력하는 방법이 사용되어지고 있다^(3,4). 주행 시험장의 특수로를 이용하여 입력 프로파일을 생성하는 방법은 다양한 노면의 조건을 통하여 일반도로에서 발생하는 노면 가진원에 대한 수십 배의 가속도를 생성하여 진동내구평가 시간을 단축할 수 있는 장점을 지니고 있다. 하지만 어느 정도의 가속도로 입력 프로파일을 생성해야 실제 국내의 다양한 노면으로 구분되는 국내도로 사정에 맞게 노면 가진원을 생성할 수 있는지는 해결할 과제로 남아 있다. 이에 이 연구에서는 6축가진기를 이용한 진동내구평가의 입력 프로파일 생성을 위한 기초 연구로써, 국내 각 노면의 실차주행 시험을 통하여 각 노면 특성에 대하여 에너지 방법 적용을 위한 PSD 선도를 통하여 분석을 수행하고, 각 노면간의 상관성을 비교분석함으로써, 실제 도로주행 시험의 필요성을 확인하고자 한다. 또한 향후 이 연구의 연구결과는 6축가진기를 이용한 진동내구평가의 입력 프로파일 생성을 위한 기초자료로 활용될 예정이다.

2. 국내도로 주행시험

2.1 대상부품 및 신호측정 위치 선정

수많은 자동차 부품이 진동내구평가의 대상이 될 수 있겠지만, 이 연구에서는 자동차 운전자가 직접 피로도를 느끼기 쉽고, 진동내구환경에 의해 피로내구에 가장 큰 영향을 받으며 6축 가진기를 통해 진동내구시험을 수행하기 적합한 운전석 시트와 도어를 시험평가 대상으로 선정하였다.

실차도로 주행 시험차량은 국내 2,500 cc 중대형 승용차인 그랜저 XG를 선정하여 시험에 활용하였다.

신호의 측정은 3축 가속도계 8개(일반형 7개, 시트형 1개)를 이용하여 주행 시의 진동신호를 측정하였다. 측정위치의 선정은 향후 6축가진기를 이용한 진동내구평가 시, 시뮬레이터의 한정된 자유도를 고

려하여 가장 제어성이 우수한 위치를 선정하였다. Fig. 1은 시트에 설치된 3축 가속도계의 위치를 보여주며, Fig. 2는 도어에 설치된 3축 가속도계의 위치를 보여준다. 도어의 경우 차체와 면 접촉을 하면서 주행이 이루어지기 때문에 가장 이상적인 경우는 접촉이 이루어지고 있는 차체를 그대로 측정하여 동일한 경계조건이 이루어져야 하기 때문에 각 도어 위치와 맞닿아 있는 3곳을 선정하여 가속도계를 위치 시켰다.

Fig. 1과 Fig. 2에서 'R' 은 참조(reference) 입력신호를 의미하며 향후 PSD 분석 이후에 전달함수를 구하기 위해 측정된 신호를 의미한다.

시트 및 도어측의 총 8개 가속도계의 24채널 응답은 LMS Pimento와 Frontend⁽⁵⁾를 이용하여 250 Hz의 샘플링 주파수(sampling frequency)로 데이터를 측정하였다. Fig. 3은 시험을 위한 전체적인 장치도를 개략적으로 나타낸 것이다.

2.2 실차시험 주행모드

실차주행 시험 모드는 국내에서 자동차를 주행하면서 접할 수 있는 다양한 종류의 노면을 선정하였

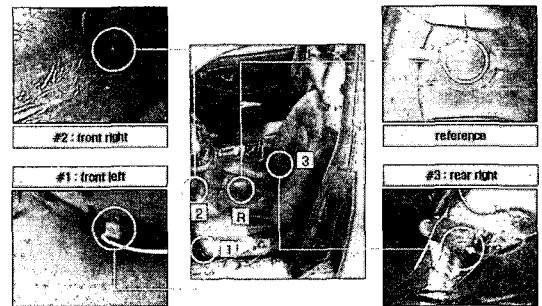


Fig. 1 The position of accelerometers at the seat

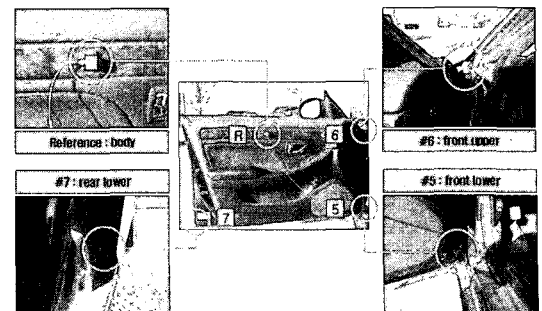


Fig. 2 The position of accelerometers at the door

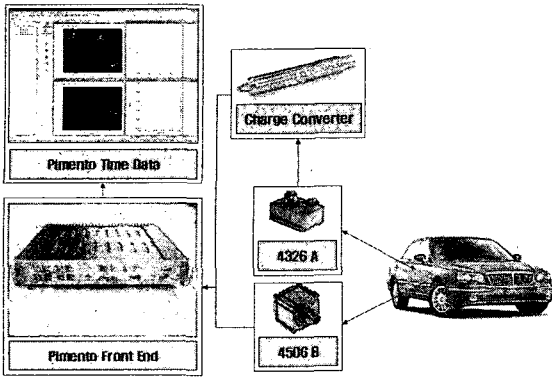


Fig. 3 The schematic diagram of experimental setup

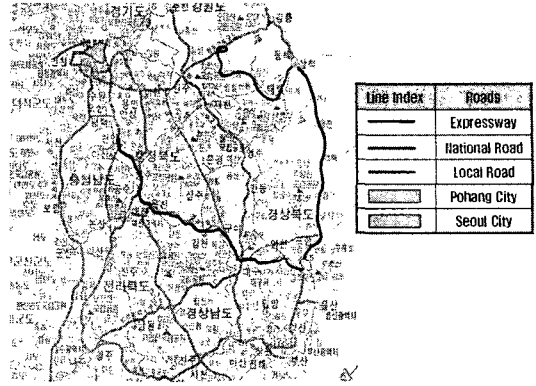


Fig. 4 The map of driving course

Table 1 The test mode in field driving

Roads	Detail section	Driving distance
Expressway (Kyungbu)	Chunan - Gumgang service area	104 (km)
	Gumgang Service Area - Gimcheon IC	
	Gimcheon IC - Geoncheon service area	
National road (No. 7)	Gyeongju IC - Hogye	278 (km)
	Hogye - Gyeongju IC	
	Gyeongju IC - Pohang City road	
	Pohang City Road - National Road No. 7	
	Pohang - Younghae	
	Younghae - Wondeok	
	Wondeok - Samcheok	
National road (No. 38)	Samcheok - Taebaek	150 (km)
	Taebaek - Sabuk	
Local road (No. 421)	Sabuk - Molun	150 (km)
Local road (No. 424)	Molun - Jeongseon	
National road (No. 59)	Jeongseon - Jeongseon	
National road (No. 42)	Jeongseon - Pyungchang	21 (km)
Unpaved road	Myunon - Kumdang	
	Kumdang - Kumdang	
	Kumdang - Myunon	
Seoul City road	Yangjae - Jamsil - Gangnam	40 (km)
	Banpo - Hannam Bridge	
Unpaved road	Gwangdeok Temple Road	4.6 (km)
Total driving distance		739.6 (km)

다. 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 자동차 주行的 주행 모드는 주행 상황에서의 교통흐름에 맞춰 규정속도보다 조금 높게 혹은 조금 낮게 운전하는 방식의 실 사용자 운전모드로 주행을 추진하였다. 특히 차량이 자동변속기 차량임을 감안하여 무리한 가속을 통한 변속충격이 발생하는 것을 최대한 배제하고, 실제 노면에서 올라오는 가진원만이 측정될 수 있도록 주행모드를 설정하였다. 또한 실차시험 시험자의 안전도를 고려하여 50분간 데이터 획득 후, 10분간의 휴식을 갖으며 안전운행에 최대한 노력하였다.

Fig. 4는 천안에서 시작하여 다시 천안으로 돌아오는 주행코스 중, 계속이 진행된 구간을 나타낸다. 특히, 서울시내의 경우는 강북과 강남으로 나누어 시험을 진행하였다.

3. 국내도로 실차시험 결과

3.1 시험노면의 분류

실제 주행모드를 선정하고 주행시험을 수행한 결과 동일한 종류의 노면이라 할지라도 구간에 따라서 다른 특성을 나타냄을 알 수 있었다. 경부고속도로 하행선의 경우는 횡그루브(lateral groove)를 갖는 콘크리트 노면과 거친 아스팔트, 신규아스팔트 등으로 나누어 질 수 있었으며, 이외에 국도나 지방도 역시 노면의 표면 밀도에 따라 각기 다른 특성을 나타냄을 확인할 수 있었다. 이를 육안으로 확인하기 위해 Fig. 5에 각 노면의 표면을 도시하였다.

따라서 Fig. 5와 같이 동일 종류의 노면에서도 표면의 밀도가 서로 다르게 나타나기 때문에 실차시험 결과분석을 위해서는 노면의 분류가 필요하게 된다. 이에 Table 3과 같이 육안으로 확인된 노면 표면의 특성에 따라 총 18개의 노면 카테고리를 분류하여 각 노면의 상관성 분석을 수행하였다.

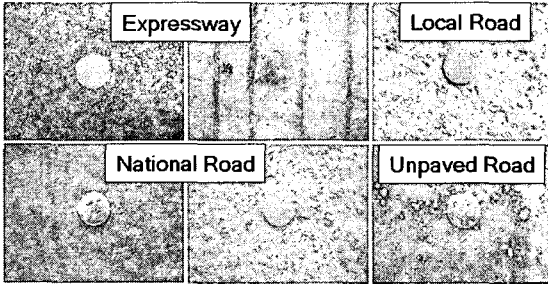
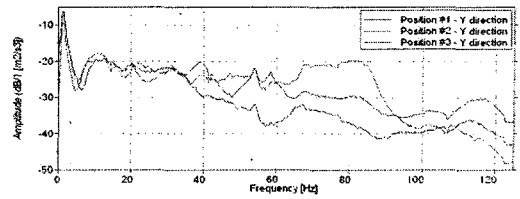


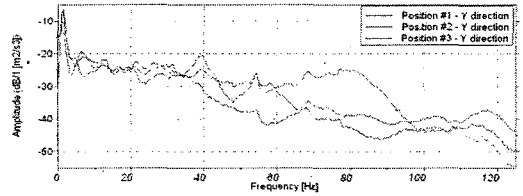
Fig. 5 The surface density of each road

Table 2 The classification of road according to surface

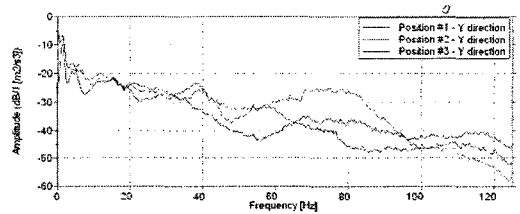
Road classification	Detail section
1 Expressway (first)	Chunan – Gungang service area
2 Expressway (second) I	Gungang service area – Gimcheon IC
3 Expressway (second) II	Gimcheon IC – Geoncheon service area
4 National road (first) I	Gyeongju IC – Hogye
5 National road (first) I	Hogye – Gyeongju IC
6 National road (first) III	Gyeongju IC – Pohang City
7 Pohang City road	Pohang City road – National road No. 7
8 National road (Second) I	Samcheok – Taebaek
9 National road (Second) II	Taebaek – Sabuk
10 Local road (First) I	Sabuk – Molun
11 Local road (First) II	Molun – Jeongseon
12 Local road (Second) I	Myunon – Kumdang
13 Local road (Second) II	Kumdang – Kumdang
14 Local road (Second) III	Kumdang – Myunon
15 Seoul City I	Yangjae – Jamsil – Gangnam
16 Seoul City II	Banpo – Hannam Bridge
17 Local road (Third) I	Gwangdeok Temple Road
18 Local road (Third) II	Gwangdeok Temple Road



(a) Highway road

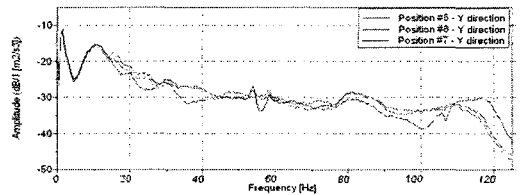


(b) National road

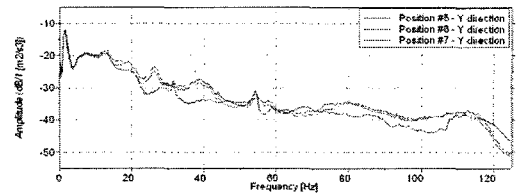


(c) Local road

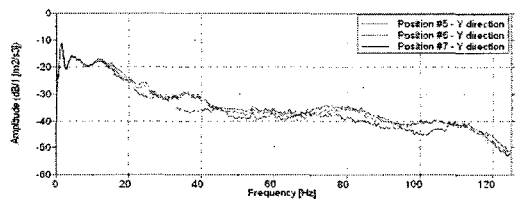
Fig. 6 The PSD results of seat positions



(a) Highway road



(b) National road



(c) Local road

Fig. 7 The PSD results of door positions

3.2 PSD를 이용한 시험결과 분석

Fig. 6과 Fig. 7은 각 노면의 실차주행 시험에서 측정되어진 시간영역의 가속도 응답을 주파수 영역의 PSD(power spectral density)로 분석한 결과를 도시한다. PSD분석은 250 Hz 샘플링 주파수를 측정된 시간 내에서 Hanning 창 함수를 통하여 512의 블록 사이즈로 고속 푸리에 변환을 통하여 얻어진 결과이다. 지면의 한계상 3축 가속도계의 응답 중, 고속도로/국도/지방도에서 차량의 수직방향의 응답만을 도시하였다.

Fig. 6은 Table 2의 주행모드 2번, 8번 및 10번에 대한 시트에서 측정된 분석결과를 도시하고 있으며, 주파수 전 영역에서 2번 위치의 에너지 밀도가 다른 위치의 응답보다 크게 발생하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 노면가진에 의한 전달경로 상에서 전륜 휠과 가장 근접한 위치에 있기 때문에 가장 큰 가속도가 발생하고 있음을 알 수 있으며, 3번 위치의 경우는 전륜 휠에서 발생하는 가진의 영향을 가장 덜 받고 있는 위치이므로 전 주파수 영역에서 가장 적은 에너지 밀도 레벨을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 도어에서의 분석결과를 도시하고 있으며, Fig. 6의 결과와는 달리 주파수 전 영역에서 각 위치별 유사한 에너지 분포를 보이고 있다. 또한 5번, 6번의 응답위치에서는 거의 동일한 에너지 밀도 분포를 나타내고 있으며 7번 위치는 5, 6번에 비하여 미소 낮은 에너지 분포를 나타내고 있다. 이는 7번 위치의 응답이 차량 휠베이스의 중심방향에 있기 때문에 노면에서 발생하는 가진의 영향을 가장 적게 받고 있음을 의미한다. 즉, 도어의 경우 노면 가진력의 영향을 가장 직접적으로 받을 수 있는 도어의 경첩 부위에서 상대적으로 큰 가속도가 발생할 수 있음을 예측할 수 있다.

4. 주행 노면별 상관성 분석

4.1 노면별 상관성 분석방법 선정

PSD선도는 측정된 위치에서의 에너지 값을 나타내며 주파수 변환 과정에서 윈도우의 크기에 상관없이 동일한 레벨 값을 나타내주기 때문에 노면 사이의 상관성을 분석하는데 적절한 데이터로 활용 가능하다.

이러한 PSD선도를 통해 노면 사이의 상관성을 나타내는 분석방법으로는 기여도함수(coherence function)를 이용하는 방법과 각 주파수대역에서 발생한 에너지 레벨 값을 벡터화 시켜 분석하는 방법 등으로 나눌 수 있다. 전자의 경우는 주요 주파수 성분을 제외한 나머지 영역에서는 낮은 상관성을 나타낼 수 있기 때문에 전주파수 영역의 상관성 분석에는 적절치 못하다. 따라서 이 연구에서는 후자의 방법을 이용하여 각 노면별 상관성 분석을 수행하였다.

후자의 분석방법에서 분석을 요하는 두 노면의 PSD선도에서 측정되어진 주파수 대역의 이산화된 각 주파수의 에너지 값을 벡터 P_A 와 P_B 로 정의할 때 두 벡터 사이의 상관성은 아래의 관계식을 통하여 정규화된 상관성 지수를 얻을 수 있다. 현재 분석된 데이터는 푸리에 변환과정에서 512의 블록 사이즈를 갖기 때문에 약 0.244 Hz 간격의 에너지 값에 대한 벡터를 얻을 수 있다. 상관성 지수는 '%'로 표기되며, 100%의 지수는 두 노면에서 발생하는 전주파수 대역에서의 가진 에너지값이 서로 완전히 상이함을 의미하게 되고, 지수가 낮을수록 분석 주파수 대역 내에서 유사한 가진 에너지값을 갖게 됨을 의미한다.

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

4.2 노면별 상관성 분석결과

식 (1)을 통하여 Table 2에서 나타난 모든 주행모드에 대하여 PSD 분석을 수행하여 각 주행모드별 노면간 상관성 분석을 수행하였다. 지면관계상 모든 노면간의 상관성 분석결과를 도시하지는 못하고 대표적인 결과만을 도시하였다.

Fig. 8은 동일 종류의 노면에 대하여 Table 2에 분류된 주행모드에 따른 상관성을 나타내고 있다. Y축은 각 노면별 상관성 지수(interrelationship index)를 나타내며 X축은 참조 채널을 제외한 6개 채널의 X, Y, Z축으로의 응답위치를 순서대로 나열한 것이다. 동일한 종류의 노면에서는 비교적 낮은 상관성 지수를 나타내고 있다. 이는 노면에서 입력되는 가진 에너지가 유사함을 의미하게 되며 동일 노면이라 하더라도, 노면의 밀도에 따라 고속도로 상과 하 I의 비교와 같이 상대적으로 큰 상관성 지수를 갖게 된다.

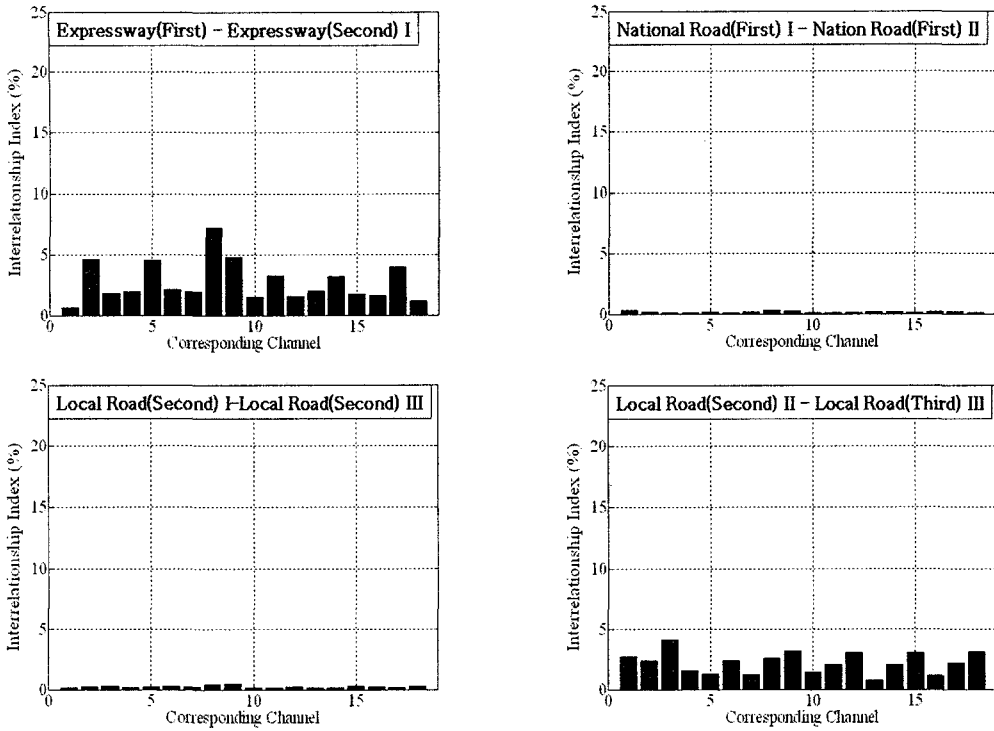


Fig. 8 The interrelationship index between similar roads

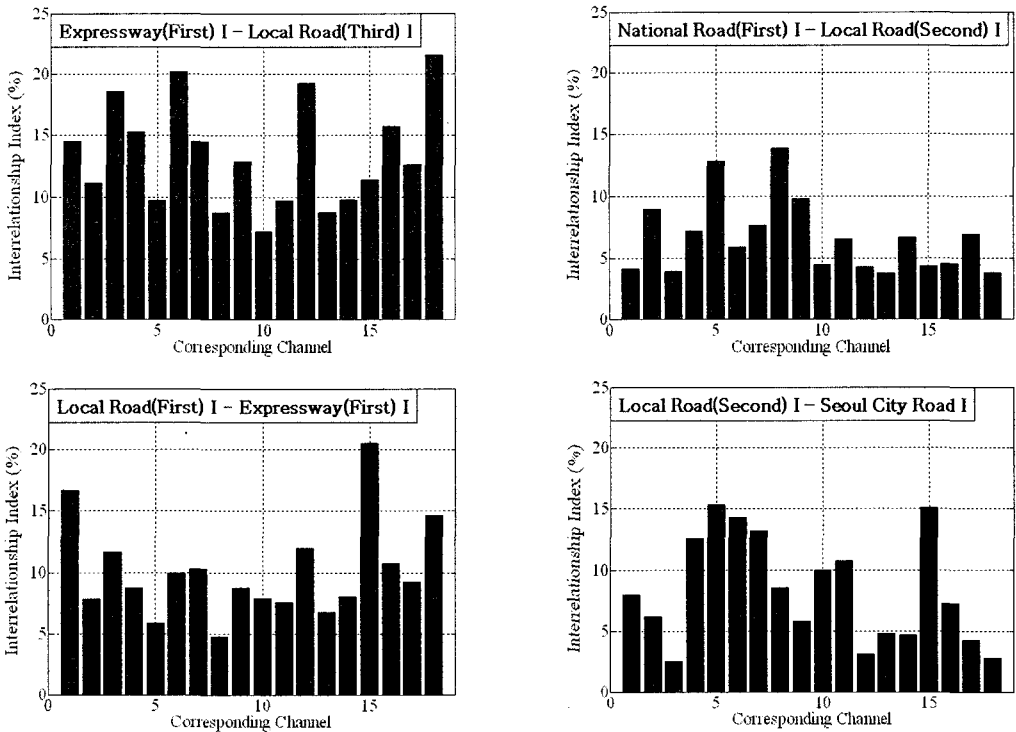


Fig. 9 The interrelationship index between different roads

Fig. 9는 서로 다른 노면에 대하여 Table 2에 분류된 주행모드에 따른 상관성을 분석한 결과이다. 결과에서 확인할 수 있듯이, 상이한 노면간 상관성 지수는 상대적으로 높은 값을 나타내고 있다. 이는 노면에서 발생하는 가진 에너지가 분석 주파수 대역 내에서 서로 상이함을 나타내는 결과이다.

Table 3과 Table 4는 Fig. 8과 9에 도시한 바와 같이 두 노면간의 상관성 지수를 식 (2)를 이용하여

각 채널별 오차율을 계산한 후, 전 채널에 대하여 평균화 시켜 하나의 대표적 수치로 나타낸 것이다. 여기서 r 과 r' 은 서로 다른 노면을 의미하고, n 과 m 은 측정된 가속도 채널을 의미한다.

$$\text{error ratio} = \left\{ \sum_{n=1}^m \left(\frac{r(n) - r'(n)}{r(n)} \right) \right\} / m \quad (2)$$

Table 3 The error ratio of interrelationship index between different roads

Road section	Error ratio(%)
Local road(first) I-Expressway(first)	10.1
Local road(first) I-Local road(second) I	7.7
National road(first) I-Expressway(first)	5.5
National road(first) I-Local road(second) I	6.6
National road(first) I-Local road(third) I	5.9
Expressway(first)-Local road(second) I	13.1
Expressway(first)-Local road(third) I	13.4
Expressway(first)-Seoul City I	12.2
Local road(second) I-Local Road(third) I	4.9

Table 4 The error ratio of interrelationship index between similar roads

Road Section	Error Ratio(%)
National road(second) I - National road(second) II	1.2
Local road(first) I - Local road(first) II	1.4
National road(second) I - Local road(first) I	2.3
National road(second) I - Local road(first) II	0.8
National road(first) I - National road(first) II	0.2
National road(first) II - National road(first) III	2.9
National road(first) I - Pohang City road	0.4
National road(first) III - Pohang City road	1.9
Expressway (first) - Expressway (second) II	1.8
Expressway (second) II - Expressway (second) III	0.9
Local road(second) I - Local road(second) III	0.2
Local road(third) I - Local road(third) II	0.4
Local road(second) I - Local road(second) II	3.2

Table 3과 4의 오차율 비교를 통하여 동일노면간의 입력 에너지값은 유사함을 알 수 있으며, 서로 상이한 노면에서의 입력 에너지 값은 상대적으로 큰 차이가 나타남을 알 수 있다. 따라서 Table 3과 4를 이용하여 국내의 다양한 노면에서 발생하는 입력 에너지를 노면의 종류가 다르다 할지라도 유사 가진원을 갖는 노면으로 그룹화 할 수 있게 된다.

4.3 상관성 분석결과의 활용

이 연구에서 측정되어진 노면은 국내 도로의 대표적인 노면 대부분을 포함하고 있다. 또한 각 노면별 상관성 분석을 통하여 차량 주행 시 가진원으로 입력되는 에너지 값 비교를 통한 상관성 분석을 통하여, 에너지 크기에 따른 노면의 분류를 가능하게 하였다. 하지만 측정 시간이 상당히 길다는 단점이 있기 때문에 6축가진기를 이용한 진동내구 평가의 입력 가진원으로는 직접적인 사용이 불가능하다. 따라서 일반적인 6축가진기용 입력 가진원은 가속도가 큰 주행시험장의 특수로 주행을 통하여 입력 가진원을 생성하는 것이 일반적이다. 여기서 사용자가 원하는 국내 도로의 주행모드에 따라 이 연구결과에 따른 각 노면에서 발생하는 에너지 값을 특수로에서 측정된 노면의 에너지 값과 비교/검증하여 특수로에서 측정된 가속도가 큰 입력가진원을 몇 사이클 반복할 것인지를 결정할 수 있게 된다. 이는 국내 도로환경 하에서 사용자가 원하는 국내도로 내구주행 모드에 부합하는 진동내구 평가용 입력 프로파일을 생성할 수 있게 해 주는 것이며, 6축가진기를 이용한 진동내구 평가의 시간과 비용을 절감 시킬 수 있는 중요한 기초자료를 제공하게 된다.

5. 결 론

국내 각 노면에 대한 실차시험과 분석된 결과를

통하여 이 연구에서는 아래와 같은 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 국내 대표적인 노면별 도어와 시트부에서의 진동가속도 데이터에 대한 DB를 구축할 수 있었다.

(2) 측정된 각 노면의 PSD 분석을 통하여 각 노면별 상관성 지수를 계산하여 노면별 가진 에너지양에 대하여 노면별로 그룹화가 가능함을 확인 하였으며 상이한 노면의 경우 상관성 지수가 높게 발생함을 확인 하였다.

(3) 이 연구결과를 토대로 주행시험장에서 측정된 특수로의 데이터와 실제 사용자가 원하는 국내도로의 다양한 주행조건을 측정된 데이터의 다양한 조합을 통한 비교/검증을 통해 진동내구 평가를 위한 입력 가진원 생성에 중요한 기초 자료를 제공할 수 있게 해준다.

후 기

이 논문은 산업자원부에서 주관하는 표준화기술개발사업의 성과내용의 일부로써 관계자분들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Joe, H., Morrill, II., Thomas Achatz and Abolhassan Khosrovaneh, 1998, "An Application for Fatigue Damage Analysis Using Power Spectral Density from Road Durability Events", SAE, 980689.

(2) Lin, J. S. and Yim, K.-S., 2000, "Application of Random Vibration Test Methods for Automotive Subsystems Using Power Density", SAE, 2000-01-1331.

(3) Sung, D. W., Jung, G. S., Jung, S. G., 2004, "Accelerated Reliability Test of Engine Mounts and Engine Wiring Harness Using Multi-axial Simulation Table", KASE Annual Spring Conference, pp. 899 ~ 904.

(4) Kim, C. J., Lee, B. H. and Kim, G. H., 2005, "Generating Method of the Input Profile in the MAST System", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 9, pp. 1070 ~ 1076.

(5) LMS, 2006, "Pimento Training Manual" .