

현가계 부쉬 이상소음 분석에 관한 연구

The Study on Noise Analysis of Bush on Suspension System

배철용†·이동원*·김찬중*·이봉현*·나병철*

Chul-Yong Bae, Dong-Won Lee, Chan-Jung Kim, Bong-Hyun Lee, Byung-Chul Na

Key Words : Pillow Ball Joint Bush(필로우 볼 조인트 부시), Sound Quality(음질), Sound Metrics(음질요소), Tonality(음색), Harmonics(배음).

ABSTRACT

It is known that the various noise sources which are engine, transmission, tire, intake system, etc exist at vehicle driving status. Specially noises which cannot be expected by a driver induce unpleasantness to all passengers. These noises are difficult to distinguish noise sources or specifications because of too many vehicle parts. Therefore in this paper, study on abnormal noise of bush on suspension system is performed by the measurement and analysis of the noises of bushings that are generated artificially. The measured noises are analyzed by two points-view of spectrum and sound quality. Finally, it is shown that the noise sources of bushings on the suspension system which are the pillow ball joint bush of a control arm and the rubber bush of a lower arm could be distinguished by the spectrum distribution and an index value based on tonality.

1. 서 론

자동차에서 발생하는 소음의 경로는 공기(air borne noise)와 차량 구조(structure borne noise)적으로 전파되어져 차량 실내로 유입되는 경로로 나눌 수 있으며, 이러한 경로를 통하여 운전자가 느낄 수 있는 소음은 엔진계, 동력계, 흡기계, 배기계, 타이어 등 다양한 소음원이 존재하게 된다. 현재의 자동차 산업은 흡/차음재 및 NVH 기술개발을 통하여 이러한 문제점을 개선시켜 운전자에게 보다 정숙하고 쾌적한 운전환경을 제공하고 있다. 하지만 차량이 가혹한 조건에 노출되거나, 주행거리에 따라 노후화되어짐에 따라 예상치 못한 이상소음들이 발생하게 된다. 이러한 예상치 못한 이상소음의 대표적인 예로 현가계에 장착된 부쉬에 의하여 발생하는 이상소음을 언급할 수 있다. 현가계에 장착된 부쉬는 동적거동이 상당히 크면서도 진동측면에서 상당히 중요한 요소부품으로 작용하여 부싱 특성에

따라 차량의 진동특성이 민감하게 변화하게 된다. 하지만 대부분의 부쉬 재질이 고무 혹은 스틸로 구성되므로 차량의 노후화와 노출환경에 따라 재질의 변화나 스틸부에 녹이 발생하게 되어 부쉬의 특성변화가 발생하며, 작동 중 이상소음을 유발시키게 된다. 부쉬에서 발생하는 이상소음은 운전자의 입장에서는 예상치 못한 소음이므로 불쾌감과 차량 실내소음의 정숙성을 떨어뜨리는 요인으로 작용하게 된다. 또한 현가계 내에 장착된 부쉬 중, 소음원으로 작용한 부쉬를 찾아내는 일은 대부분이 인위적인 방법을 통하여 경험적으로 수행되어지고 있기 때문에 부쉬를 양산하는 업체에서는 어떠한 부쉬에서 이상소음이 발생하는지에 대한 판별여부가 중요한 요소로 부각되고 있는 실정이다.

일반적으로 자동차 소음원의 판별은 측정된 음압레벨이나 주파수 분석을 통하여 이루어지게 된다. 그러나 1970년대 서유럽에서 시작한 음질분석(sound quality analysis)이 경쟁관계에 있는 유사제품의 분별을 가능케 하는 하나의 요소로 인식되면서 점차적으로 음질분석에 많은 관심을 갖게 되었다.¹⁾ 현재에 이르러 이러한 음질분석은 차량의 실내소음을 심리음향학적 모델로 만들어 통계적 기법을 통한 음질평가를 수행하거나,²⁾³⁾ 무밍이나 럼블링 소음과 같은 특정소음에 대하여 음질요소분석을 통하여 정량적 측정치를 정성적 판단의 기준으로 제시하기도 한다.¹⁾

이에 본 연구에서는 현가계에 장착되어지는 부쉬 중에서

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

* 자동차부품연구원 에너지부품연구센터

로워암에 장착되는 고무부쉬와 콘트롤암에 장착되는 필로우 볼 조인트 부쉬에서 발생하는 이상소음을 측정하여 스펙트럼 분석과 더불어 다양한 음질요소에 대한 이상소음분석의 두 가지 관점을 통하여 각 부쉬를 구성하는 재질의 접촉에 따라 발생하는 이상소음의 특성 및 소음원의 판단 기준을 제시해보고자 한다.





2. 부쉬 이상소음측정 시험

2.1 시험대상의 선정

자동차에는 수많은 부쉬가 각각의 장착된 위치에서 진동 저감을 위한 역할을 수행하고 있다. 이에 본 연구에서는 현 가계에 적용된 부쉬 중, 대표적으로 고무-고무의 접촉이 발생하게 되는 로워암부의 고무부쉬와 플라스틱-스틸의 접촉이 이루어지는 콘트롤암부의 필로우 볼 조인트 부쉬를 선정하여 각 부쉬에 인위적으로 이상소음을 발생시켜 소음을 측정하였다.

Table 1은 본 연구에 적용되어진 시험대상을 나타낸 것으로서 로워암 고무부쉬의 경우 마모가 진행되어 있는 고품의 경우와 신품의 경우로 나누어 진행하였으며, 콘트롤암에 장착되는 필로우 볼 부쉬는 정상적인 상태와 볼 스테드부에 인위적인 녹을 발생시켜 조립한 두 가지 경우로 나누어 시험대상을 선정하였다. Fig. 1은 필로우 볼 조인트 부쉬의 구조를 보여주는 것으로서, 스틸로 구성된 볼 스테드와 플라스틱으로 구성된 볼 시트가 상시 접촉하게 됨을 알 수 있다.

Table 1 Classification of Bush

Type	Item	Bush	Contact Condition
I		Pillow Ball Joint Bush	steel-plastic contact
II		Rusted Pillow Ball Joint Bush	rusted steel-plastic contact
III		Lower Arm Bush (Used Article)	worn rubber-worn rubber contact
IV		Lower Arm Bush (New Article)	rubber-rubber contact

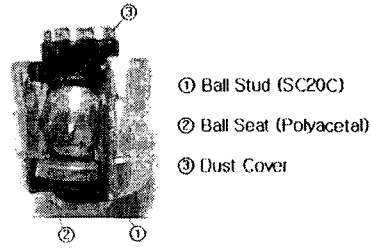
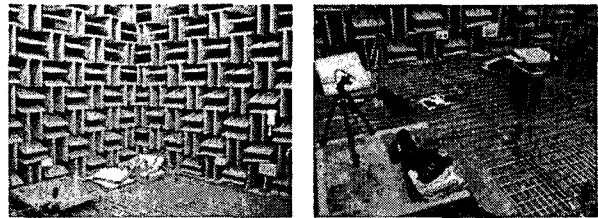


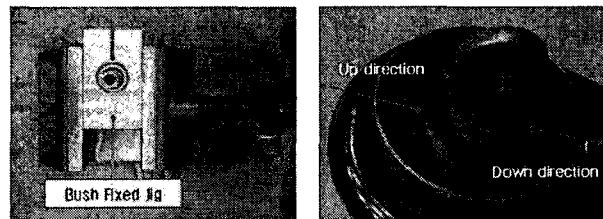
Fig. 1 Composition of Pillow Ball Joint Bush

2.2 부쉬의 이상소음측정

부쉬의 이상소음은 Table 1에서 선정되어진 부쉬의 동적 영역에서 인위적인 작동을 통하여 발생시켰다. 또한 부쉬에서 발생하는 이상소음 외에 주변소음을 통제하기 위하여 Fig. 2와 같이 무향실 내에서 이상소음 측정을 수행하였다. 시험샘플 I, II의 필로우 볼 조인트 부쉬의 경우 형상이 원형임을 고려하여 부쉬를 고정시킬 수 있는 Fig. 3 (a)와 같은 지그를 사용하여 바이스에 고정시켜 볼 스테드부를 인위적으로 가진시켜 이상소음을 발생시켰으며, III과 IV의 로워암 고무부쉬는 로워암을 직접 바이스로 고정시켜 부쉬가 차량에 장착 시 작동하는 방향으로 고무부쉬 중심부를 인위적으로 가진시켜 이상소음을 발생시켰다. 특히, 로워암 고무부쉬의 경우 Fig. 3 (b)와 같이 두 방향의 간극이 존재하기 때문에 양 방향을 각각 가진시켜 이상소음을 발생시켰다.



(a) Full Anechoic Chamber (b) Experiment Setup
Fig. 2 Experiment Setup in Anechoic Chamber



(a) I, II (b) III, IV
Fig. 3 Fixed Bush for Experiment

이상소음측정 시험은 G.R.A.S社의 ICP 타입의 마이크로폰을 사용하여 무향실에서 발생하는 암소음(Background Noise)을 측정하여 소음측정 영역의 신뢰성을 확보한 이후에, 각각의 부쉬에 10회씩의 이상소음을 발생시켜 LMS Pimento¹⁵⁾ 장비를 이용하여 발생된 소음을 저장하였다. 또

한 측정 샘플링 비율은 50kHz로 설정하여 가청주파수 내의 모든 주파수영역을 포함시켰다.

3. 측정 이상소음의 결과 분석

3.1 이상소음 주파수분석 결과

Fig. 4는 시험샘플 II 측정이음의 대표적인 시간영역 응답을 나타내며, 인위적으로 순간적인 가진을 통하여 얻어진 응답이기 때문에 임펄스형태의 응답특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 측정되어진 이상소음의 주파수분석은 측정되어진 전체 시간영역에 대한 AFFT와 0.2초 간격당 FFT를 수행하여 워터폴 선도(waterfall diagram)형태로 나누어 결과를 분석하였다. Fig. 5는 분석되어진 AFFT 결과를 나타내며, Fig. 6은 0.2초 간격의 워터폴 선도를 나타낸다. 또한 로워암의 고무부시의 두 방향에 대한 결과는 동일한 결과 값을 나타내기 때문에 본 논문에서는 한 방향에 대한 결과만을 도시하였다.

Fig. 5(a) 및 Fig. 6(a)은 시험샘플 I의 스틸-플라스틱의 마찰에 의한 이음의 측정결과를 도시한 것으로서, 다양한 가진조건을 적용하더라도 이상소음이 발생하지 않음을 확인할 수 있다. Fig. 6(a)에서 발생한 주파수 성분은 부시의 먼지떨개가 접히는 아주 미소한 소음으로써 이를 제거한 후에는 소음이 발생하지 않았다. 이는 초기 신차의 경우 필로우볼 조인트 부위류에서는 이상소음이 발생하지 않게 됨을 의미한다. Fig. 5(b) 및 Fig. 6(b)는 시험샘플 II의 녹 발생 스틸-플라스틱 접촉에 의한 이상소음의 분석결과를 나타낸 것으로서, 시험샘플 I과는 달리 부위의 가진에 따라 이상소음이 확연하게 발생하고 있으며, 410Hz를 1차 성분으로 갖는 배음구조(Harmonics) 형태의 주파수분포를 나타내고 있다. 이는 부위의 노후화 및 여름철의 습한 환경 하에 차량이 장시간 노출되어져 부위의 볼 스테르드부에 녹이 발생하게 될 때, 예상치 못한 이상소음이 발생할 수 있음을 의미하게 된다.

Fig. 5(c) 및 Fig. 6(c)는 시험샘플 III의 로워암 고무부시의 마모된 고무-마모된 고무의 이상소음에 대한 결과를 나타낸다. Fig. 5(b)와 Fig. 6(b)의 결과와 동일하게 부시 가진에 따른 이상소음이 확연하게 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 하지만 녹 발생 스틸-플라스틱 접촉의 경우와는 달리 어느 특정한 성분에 대한 배음형태의 주파수 구조가 아닌 400, 600, 1900, 3250Hz 등의 다양한 주파수 성분이 발생하는 상음구조의 주파수 구조를 나타내고 있다. 이러한 현상은 고무-고무의 접촉이 높은 마찰계수를 동반하게 되어 두 접촉면의 부분적인 진동을 유발시키기 때문으로 분석되어진다. Fig. 5(d) 및 Fig. 6(d)는 시험샘플 IV의 신품 로워암 고무부시의 고무-고무 접촉의 이상소음 측정결과를 나타낸다. IV의 경우도 III과 동일하게 부시 가진에 따라 이상소

음이 발생하고 있으며, 주파수 분포도 III의 마모된 고무-마모된 고무의 접촉과 유사한 상음구조의 주파수 구조를 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 로워암의 고무부시의 경우 부위의 노후화정도 보다는 차량의 가혹한 거동 유무에 따라 이상소음이 발생할 수 있음을 확인할 수 있다.

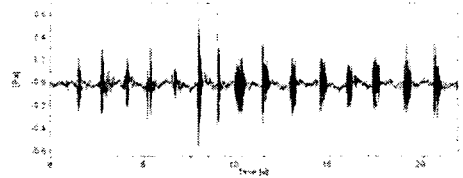
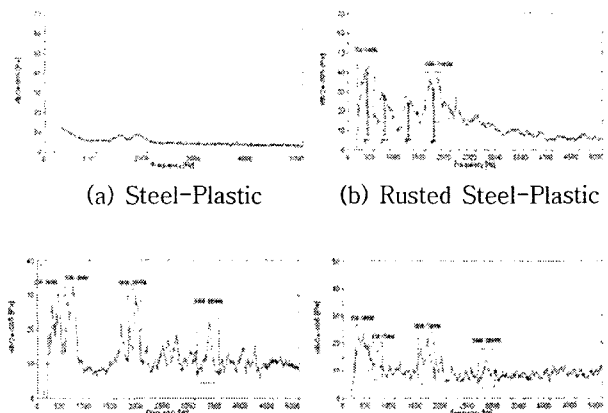
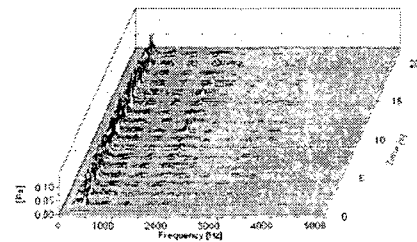


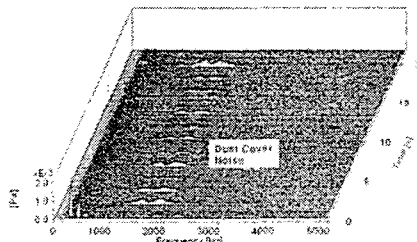
Fig. 4 Time Domain Response of II



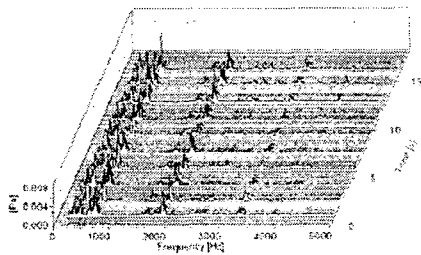
(a) Steel-Plastic (b) Rusted Steel-Plastic
(c) Worn Rubber-Worn Rubber (d) Rubber-Rubber
Fig. 5 Averaged FFT Results of Measured Noise



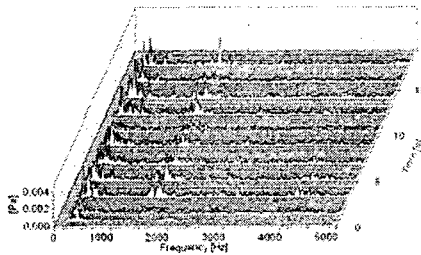
(a) I : Rusted Steel-Plastic Contact



(b) II : Steel-Plastic Contact



(c) III : Worn Rubber-Worn Rubber Contact



(d) IV : Rubber-Rubber Contact

Fig. 6 Waterfall Diagram of Measured Noise

3.2 이상소음 음질분석 결과

선정된 4가지 부위에 대한 주파수 결과에서 이음이 발생한 녹 발생 스틸-플라스틱의 접촉과 고무-고무 접촉에 의해 발생한 이상소음은 서로 상이한 주파수 분포를 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 하지만 부위의 소음원 및 특성을 판별하기 위해서는 더욱 다양한 판단기준이 있어야만 신뢰성 있는 판별기준을 제시할 수 있을 것이다. 이에 본 연구에서는 음질분석 측면에서 각 측정된 이상소음을 분석하여 현가계의 부위에서 발생 할 수 있는 이상소음의 판별기준을 제시해보고자 한다.

음질을 분석하는 음질요소로는 라우드니스(loudness), 러프니스(roughness), 샤프니스(sharpness), 커토시스(kurtosis), 톤리티(tonality) 등 상당히 많은 인자가 존재하게 된다. 하지만 이러한 다양한 음질요소 모두가 각각 측정된 음원의 청감특성을 반영하여 목적하는 결과 값으로 사용되어지는 것은 아니다. 따라서 가능한 많은 음질요소를 분석한 이후에 연구목적에 부합하는 음질요소를 찾아내어 청감특성이 반영된 심리음향학적 판단기준을 제시해야만 한다.

본 연구에서는 상용 소프트웨어인 MTS社 Sound Quality¹⁶⁾를 이용하여 측정된 4가지 종류의 시험대상 부위의 음질요소를 분석하여 접촉 재질에 따라 발생하는 이상소음의 청감특성의 판단기준을 제시해보고자 한다.

음질요소를 분석하는 방법에는 측정된 시간영역 전체에 대한 분석을 수행하여 하나의 평균화된 수치로 나타내는 방법과, 시간 변화에 따른 측정 데이터의 변화를 도표화시켜 분석하는 방법으로 나누어진다.

Table 2는 각 시험샘플의 측정된 전체 시간영역에 대하

여 시험조건에 따라 분석 가능한 다양한 음질요소를 분석하여 하나의 평균화된 수치로 나타낸 결과 값이다.

Table 2 Analysis Result of Sound Metrics

Sound Metrics	unit	I	II	III	IV
Linear Sound Pressure Level	dB	41.2	66.7	54.7	51.1
A-Weighted SPL	dB(A)	39.7	65.8	53.4	50.2
Speechband SPL	dB	34.7	63.9	52.3	44.7
Articulation Index	%	98.8	90.9	92.8	96.5
Preferred Speech Interference	dB	29.5	37.7	35.7	31.3
Speech Interference	dB	30.6	36.1	35.7	32.6
Frame Kurtosis	-	8.03	6.97	6.3	6.6
Average Kurtosis	-	16.0	26.8	33.0	61.8
ISO532B Loudness	sone	3.3	9.1	6.7	5.2
ISO532B Loudness	phon	57.3	71.8	67.5	63.8
Sharpness	acum	2.35	1.65	2.13	2.33
Transient Loudness	sone	2.9	18.8	11.1	5.3
Transient Loudness	phon	55.1	82.3	74.7	64.1
Transient Sharpness	acum	2.40	2.02	2.24	2.41
Time Varying Loudness	sone	3.5	19.0	11.9	6.9
Time Varying Loudness	phon	58.2	82.4	75.7	67.8
Roughness	asper	0.87	0.66	0.68	0.83
Fluctuation Strength	vacil	0.12	0.74	0.99	0.54
Tonality	-	0.02	0.19	0.07	0.03

Table 2의 다양한 음질요소 분석결과는 시간의 흐름에 종속적인 변화를 보이고 측정 데이터의 변동이 크지 않은 정상상태 응답특성의 음질요소 분석에는 효율적인 측면을 나타내게 된다. 하지만 본 연구를 위해 수행되어진 부위 이음측정 시험의 경우, 시간의 흐름에 독립적이며, 임펄스성 응답과 같은 과도응답 형태를 나타내기 때문에 Table 2의 음질분석 방법을 통해서 원하는 음질분석 판단의 기준을 제시할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 음질요소의 두 번째 분석방법인, 시간의 흐름에 따라 측정된 이음을 Table 2에 나타낸 음질요소에 따라 도표화 시킨 결과를 분석하여 음압레벨(linear sound pressure level), 트랜지언트 샤프니스(transient sharpness), 톤리티 등의 세 가지의 음질요소가 시험을 통하여 얻어진 부위 이상소음의 특성을 적합하게 표현하고 있는 것을 확인하였으며, 부위 이상소음의 음질판단 기준으로 제시 가능함을 확인하였다.

Fig. 7은 음압레벨 음질요소의 분석결과이다. 음압레벨

음질요소는 일반적으로 사용되어지는 사운드 레벨 미터 (sound level meter)의 측정방법과 동일한 방법으로 계산 되어지는 음질요소이다. 본 연구에서는 임펄스성 응답특성임을 감안하여 250ms의 응답특성으로 입력조건을 설정하여 음압레벨을 분석하였다. 음질요소 분석결과 로워암의 고무부쉬는 유사한 음압분포를 나타내며, 녹 발생 스틸-플라스틱 접촉에 의한 필로우 볼 조인트 부쉬의 발생이음이 상대적으로 높은 음압분포를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

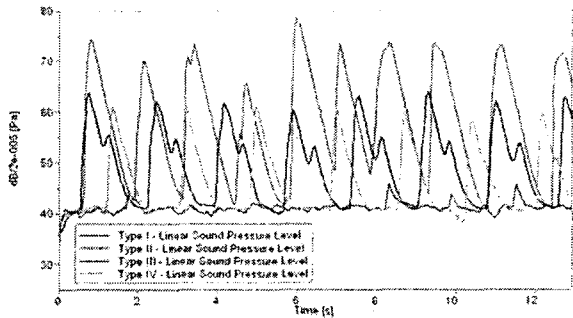


Fig. 7 Analysis Result of SPL Metrics

트랜지언트 샤프니스 음질요소는 일반적으로 분석되어지는 샤프니스 음질요소에 post-masking 효과를 고려하여 고주파 음에 대하여 선형적 가중화를 통해 인간의 청감특성에 더욱 가까운 척도를 표현할 수 있는 음질요소이다. Fig. 8의 트랜지언트 샤프니스의 분석결과에서는 로워암 고무부쉬의 이상소음 대비, 녹 발생 스틸-플라스틱 접촉의 필로우 볼 조인트 부쉬가 더 낮은 레벨을 나타내고 있다. 이는 샤프니스 음질요소가 고주파영역에 가중치를 두어 계산하는 음질요소임을 감안할 때, 녹 발생 스틸-플라스틱 접촉이 이루어지는 부쉬는 1500Hz 이하 영역에서 배음구조의 주파수 분포를 갖는 반면, 로워암의 고무부쉬는 저주파에서 고주파까지 넓은 영역의 상음구조로 주파수 성분이 분포되어 있기 때문에 발생하는 현상으로 분석되어진다.

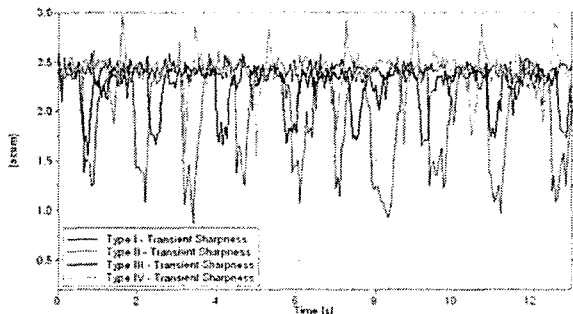


Fig. 8 Analysis Result of Transient Sharpness Metrics

토널리티는 음의 음률 고저의 정량적 측정치를 제시하여 음의 명료도를 표현하기 위한 음질요소이다. Fig. 9는 토널

리티 음질요소의 분석결과를 나타낸다. 분석결과 시험샘플 II의 녹 발생 스틸-플라스틱의 접촉에 의한 이음발생의 경우가 기타 시험샘플 대비 현저하게 높은 레벨을 나타내고 있다. 이는 시험샘플 II의 주파수 분포가 배음구조로써, 넓은 영역의 주파수 분포를 갖는 고무부쉬의 이상소음 대비 일정한 음색으로 나타나기 때문이며, 분석된 세 가지 음질요소 중, 부쉬의 소음원 판단의 기준제시에 가장 부합하는 음질요소로 분석되어 졌다.

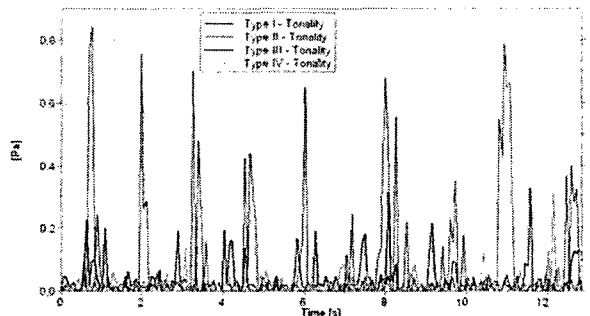


Fig. 9 Analysis Result of Tonality Metrics

Fig. 7~Fig. 9의 도표화된 음질요소 분석결과는 측정된 이상소음의 전체적인 경향을 나타낸 것으로써, 이를 토대로 각 부쉬의 이상소음 특성을 반영하여 소음원이 되는 부쉬를 판별할 수 있는 정량적인 인덱스를 개발하여야 한다.

아래 식 (1)은 분석되어진 음압레벨, 트랜지언트 샤프니스, 토널리티 등의 세 가지 음질요소에 대하여 정량적 인덱스를 계산하기 위해 사용되어진 수식을 나타낸다. 정량적 인덱스의 계산은 측정된 각각의 n 개 피크에 대한 rms(root mean square)값의 평균으로 계산되어졌다. 여기서 n 은 측정된 이음의 피크 총수를 의미하며, x_i , m 은 피크에 대하여 분석되어진 음질요소의 데이터를 의미한다.

$$Sound\ Metrics\ Index = \left[\sum_{i=1}^n \sqrt{\left(\frac{\sum_{j=1}^m x_j^2}{m} \right)} \right] / n \quad (1)$$

Table 3은 식 (1)을 통하여 얻어진 세 가지 음질요소의 대표적인 정량적 인덱스 값을 나타낸 것이며, 계산되어진 인덱스에 대한 편차범위는 측정된 이음의 최대/최소값을 제외한 rms 범위를 나타낸다. 또한 시험샘플 I의 스틸-플라스틱 접촉에 의한 이상소음의 경우, 이상소음이 발생하지 않았기 때문에 이에 대한 정량적 판단이 어려우므로, Table 3의 인덱스 계산에는 제외시켰다. 특히, Table 3의 토널리티 음질요소에 대한 정량적 판단기준에서 로워암 고무부쉬의 경우, 신품과 고품에 대한 정량적 인덱스의 편차가 유사하게 발생하고 있으나, 시험샘플 III의 녹 발생 스틸-플라스틱 접촉의 필로우 볼 조인트 부쉬의 경우는 고무부쉬와는 확연

하게 대비되는 정량적 인덱스 값을 나타내고 있다. 따라서 현가계에 장착되어 있는 부쉬류의 이상소음을 측정하여 발생한 이상소음 피크에 대한 토널리티 음질요소의 rms 값을 계산하게 되면, 소음원으로 작용한 부쉬 및 소음을 유발시킨 재질의 이음특성을 주파수 분석결과와 연계하여 판단할 수 있게 된다.

Table 3 Sound Metrics Index for Analyzed Result

Sound Metrics		Index(α)	Deviation
SPL Metrics (unit: dB)	II	66.0	$66.1 \leq \alpha \leq 66.7$
	III	57.54	$57.2 \leq \alpha \leq 58.4$
	IV	53.44	$53.3 \leq \alpha \leq 53.6$
Transient Sharpness Metrics (unit: acum)	II	1.84	$1.82 \leq \alpha \leq 1.87$
	III	2.05	$2.04 \leq \alpha \leq 2.05$
	IV	2.18	$2.18 \leq \alpha \leq 2.20$
Tonality Metrics	II	0.35	$0.28 \leq \alpha \leq 0.38$
	III	0.09	$0.09 \leq \alpha \leq 0.11$
	IV	0.06	$0.05 \leq \alpha \leq 0.07$

4. 결 론

본 연구에서는 자동차 현가계에 일반적으로 사용되는 로워암 고무부쉬와 필로우 볼 조인트 부쉬의 이상소음을 측정하여 주파수 분석과 음질분석을 통한 정량화 인덱스를 통하여 부쉬 이상소음에 대하여 소음원으로 작용한 부쉬의 판별기준을 제시해보고자 하였다. 주파수 분석결과, 고무-고무 접촉에 의해 이상소음이 발생하는 경우에는 고무의 부분적 접촉 및 마찰진동에 기인하여 저주파에서 고주파 대역까지 고른 주파수 분포를 갖는 상음구조 형태를 나타내고 있으며, 녹 발생 스틸-플라스틱의 경우에는 1500Hz 이하영역에서 4차 하모닉성분을 포함하는 배음구조형태의 이상소음이 발생하고 있는 것을 확인하였다. 또한 음질분석을 통해서 토널리티 음질요소가 시험에 선정된 각 부쉬의 청감특성을 반영하여 소음원이 되는 부쉬를 판별할 수 있는 음질요소임을 확인하였다. 따라서 본 연구결과를 통해 차량의 현가계의 대표적인 부쉬에서 발생 가능한 이상소음에 대하여 소음원으로 작용한 부쉬의 판별기준을 제시할 수 있었다.

향후 다양한 종류의 부쉬와 시험샘플의 수를 증가하여 보완시험 및 검증을 통해 본 연구결과에 대한 신뢰성을 향상시킬 예정이다.

후 기

본 연구는 창원단지혁신클러스터에서 주관하는 인프라 활용연계사업의 지원 하에 수행되었으며, 이에 관계자분들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Choi, B. H., 2004, "Experimental Study on Subjective Sound Quality Evaluation of Vehicle Noises", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 12, pp.1223~1232.
- (2) Vastfjall, D., Gulbol, M. A., M. Kleiner, Garling, T., 2002, "Affective Evaluations of and Reactions to Exterior and Interior Vehicle Auditory Quality", Journal of Sound and Vibration, 255(3), pp.501~518.
- (3) Lee, J. K., Kim, I. D., 2005, "Development of a Model for the Sound Quality Evaluation of a Vehicle Interior Noise", KSAE Annual Autumn Conference, pp.1071~1077.
- (4) Lee, S. K., Kim, B. S., Park, D. C., Jung, S., G., 2004, "Transient Rumbling Index Development of Sound Quality on a Passenger Car", KSAE Annual Autumn Conference, pp.744~749.
- (5) LMS, 2006, "Pimento Training Manual".
- (6) MTS, 2001, "MTS Sound Quality User Guide".