

차량 배기토출음 음질분석에 대한 연구

A Study on Sound Quality of Exhaust Tail-pipe Noise of Vehicle

정인성*·김홍기*·신동호*·임희곤*·김상호*

In Sung Jung, Hong Ki Kim, Dong Ho Shin, Hee Gon Lim and Sang Ho Kim

(Received September 30, 2014 ; Revised February 9, 2015 ; Accepted February 9, 2015)

Key Words : Sound Quality(음질), Jury Test(청음평가), Human Auditory Organs(인간청각기관), The Science of Harmony(화성학), Psycho-acoustics(심리음향)

ABSTRACT

Recently, creating a signature sound for a brand has become more important in the automotive industry. It is important to remember that the people inside a vehicle are not the only one, who assess the signature sound, exhaust sound has become a more important factor. Most research has used psycho-acoustic parameter to objectively measure the aesthetic qualities of exhaust sound. However, these results do not parallel the results from subjective analysis. Therefore, this research focused on developing a method for objective quantification to assess the aesthetic qualities of exhaust sound in order to help develop a more appealing signature sound. To do so, the actual exhaust sound was synthesized and subjectively assessed at varied frequencies samples of 30 individuals employed at sejong R&D center. The results were analyzed using the science of harmony scale.

1. 서 론

차량 개발에 있어 소음진동 기술의 발전에 따라 차량의 실내소음은 크게 개선되었다. 하지만 최근에는 과거 정숙함에서 벗어나 BI(brand identity) 및 PI(product identity)를 대변할 수 있는 소리개발에 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 운전자 관점에서 개발은 꾸준히 연구되어 왔으나 운전자뿐만 아니라 일반사람들의 차량의 이미지를 판단하기 가장 쉬운 것이 실외에서 듣는 차량 소음이라는 점에서 배기 토출음은 중요한 음원 중에 하나이다. 이러한 소리를 개발함에 있어 가장 선행되어야 하는 것이 바로 음의 질적인 접근이다.

일반적으로 차량뿐만 아니라 산업계의 음질에 대한 연구는 주관적인 평가결과를 가지고 객관화하는 방법에 초점이 이루어져 있다. 특히 객관화 작업에 있어 Zwicker's 4parameters(loudness, sharpness, fluctuation strength, roughness)를 이용해 회귀분석하여 지수화⁽¹⁻⁴⁾ 시키거나 퍼지집합, 신경회로망, 뇌파연구 등을 통해 좀 더 정밀도를 높이는 데 주력하였다⁽⁵⁻⁷⁾. 하지만 이러한 음질지수는 배기계 개발과정에 있어 회전체 분석에서 많이 사용되는 오더(order) 분석 외 추가적인 분석을 요하게 되며 이러한 결과가 나오기 전까지는 음질에 대해 사전검토가 어렵게 된다.

차량에서 발생하는 소음의 형태는 매우 다양하다. 순음의 소리가 있는 반면 맥동성 소음 그리고 BSR(buzz, squeak, rattle) 등이 있다. 배기 토출음

† Corresponding Author ; Member, Sejong Korea R&D center
E-mail : insung.jeong@sjku.co.kr
Tel : +82-31-219-9930, Fax : +82-31-216-7832
* Sejong Korea R&D Center

‡ Recommended by Editor Myung Jun Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

의 경우 엔진의 행정에 따른 배기밸브 개폐에 따라 기본적인 소리가 결정되며 이러한 소리는 가장 기본이 되는 주파수와 기본 주파수의 배수들로 이루어진다. 이는 악기의 소리를 주파수 분석한 결과와 유사한 형태를 가지며 악기의 음색을 구분하는 인자라고조파(harmonics, 배음)인 것과 마찬가지로 배기 토출음의 음색을 결정짓는 인자는 결국 고조파가 되며 개발에 있어 음질분석을 위한 추가 분석 없이 주로 사용되는 오더결과만으로 화성학적인 분석을 통해 음질분석에 접근할 수 있다는 뜻이 된다.

따라서 이 연구에서는 사람들이 선호하는 배기음 질을 가진 쿠페차량을 선정하여 토출음을 측정하고 주파수 분석을 수행하고 고조파의 레벨을 증감하여 가상음원을 만들어 청음평가를 실시하였다. 청음평가 결과를 통해 청음자들이 선호하는 배기음은 오더들 간의 협화 혹은 불협화 정도에 따라 결정됨을 확인할 수 있었다. 따라서 배기토출음의 음질 접근을 위해 주 분석방법인 오더 트래킹(order tracking)을 이용하여 제작하였다. 이를 통해 기존의 상용음질지수 분석 없이 간단히 사전검토가 이루어지게끔 하였으며 배기토출음에서 발생할 수 있는 협화 및 불협화되는 조건들을 4가지 음질요소로 표현하여 분류하는 데 초점을 두었다. 또한 임의의 음질지수를 제작하여 실제 활용하는 데 무리가 없음을 추가적으로 확인하였다.

2. 배기 토출음의 주관적 평가

2.1 차량의 배기 토출음 측정

청음평가를 위한 가상음원 제작을 위해 일반 유저들이 선호하는 차량의 배기 토출음을 선정하여 측정 및 분석을 진행하였다. 최종 선정된 차량은 독일 회사의 스포츠 세단이다. 주행 중 배기 토출음을 계

측하기 위해 시험로에서 진행하였으며 Microphone은 ISO 5130 기준을 토대로 45°, 500 mm 위치에서 측정하였다. 시험차량 및 측정 장비 정보는 Table 1과 같다.

2.2 배기 토출음의 주파수 특성

엔진과 같은 회전체에서의 주파수 분석은 1회전당 이벤트로 정의되는 오더(order)로 수행하며 배기 토출음의 기본주파수는 엔진 RPM과 오더에 따라 변하게 된다.

가속 시 엔진 RPM에 따른 배기음의 특성을 나타내는 스펙트로그램(spectrogram)은 Fig. 1과 같다.

6기통 엔진의 경우 기본주파수는 3차 오더와 이와 배수를 이루는 오더들로 이루어져 있다. 하지만 해당 쿠페차량의 경우 이러한 오더뿐만 아니라 1.5차 및 4.5차와 같은 하프오더(half-order)들 또한 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 오더 분포는 럼블소음(rumble noise)라 하여 이전부터 쿠페차량과 같은 다이나믹한 음색을 구성하는 데 중요한 인자로 사용되어 온 것은 이미 널리 알려진 사실이다.⁽⁸⁻¹⁰⁾

이러한 오더는 엔진의 배기밸브 타이밍을 변경시키거나 배기계를 구성하는 부품 중 배기 매니폴드(exhaust manifold)의 러너(runner)길이의 부등장으로 발생하게 된다. Fig. 2는 배기 매니폴드의 러너 구성에 따른 하프오더의 발생 원리를 보여준다. V6 엔진의 한쪽면의 배기 매니폴드의 경우 크랭크 2회전 당 3번의 이벤트(event)가 발생하게 된다. 하지만 러너의 길이가 서로 다를 경우 러너간의 위상차가 발생하여 기본 차수 외 다른 오더들이 발생하게 되어 진폭변조(amplitude modulation)가 발생된다. 이

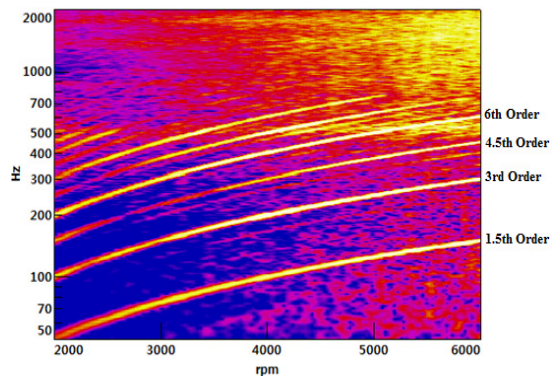


Fig. 1 Characteristics of tail-pipe sound

	Description
Vehicle	V6, A rear-wheel-drive
Microphone	1/2" Free-field
Tachometer	ONOSOKKI Analog
Data Acquisition	LMS Mobile front-end
FFT Analyzer	LMS Test.lab

Half Order Mechanism

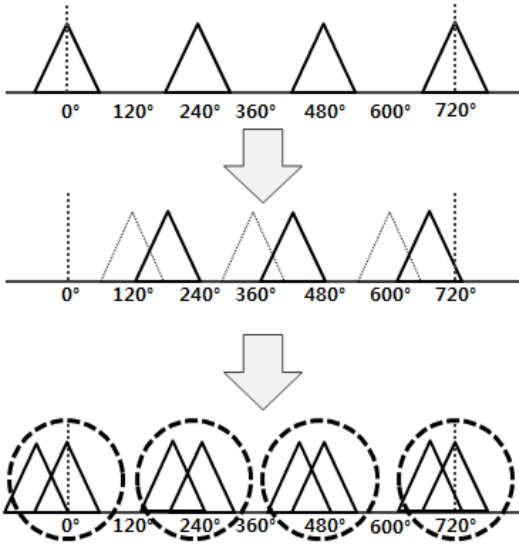


Fig. 2 Half order mechanism of tail-pipe sound

러한 변조는 음압이 시간에 따라 주기성을 가지고 변하게 되므로 역동적인 사운드를 구현하는 데 많이 사용되고 있다.

2.3 청음샘플 제작 및 평가

청음평가에 있어 특정장소에서 스피커를 사용할 경우 다수의 인원이 한 번에 진행할 수 있는 장점이 있으나 실내의 음장에 따라 음의 왜곡이 발생하기 때문에 헤드폰을 이용하여 실험을 진행하였다. 음원 파일은 2.1절에서 녹음된 차량의 배기토출음을 가지고 가상음원을 3인자 2수준으로 제작하였다. 음색을 결정하는 기본주파수인 3차 오더의 저차 및 고차 오더들과 공진(resonance)의 유무에 따른 음원파일을 각각 충분히 인지할 수 있도록 Table 2와 같이 제작하였다. Table 3과 Fig. 3은 제작된 가상음원의 주파수 특성을 보여준다.

청음평가는 연구소 인원 30명을 대상으로 진행하였으며 제작된 음원의 주관적 평가를 위해 레이팅(rating)방법을 사용하였다. 청음평가가 기준음에 대한 상대적인 레이팅을 사용하기 때문에 청음평가 전 2.1절의 스포티세단의 배기토출음이 기준음이며 7점에 해당함을 충분히 청음하여 인지시킨 뒤 각각의 샘플에 대해 스포티(sporty)하다고 판단되는 정도를 점수로 표현하는 것으로 실험을 진행하였다. 주관적

Table 2 Design of experiments for jury test

Number of factors : 3	Number of level : 2		Design
	1 level	2 level	
Lower harmonics	Ref. data	Equal main order	FD = 2 ³
Higher harmonics		Decrease 10 dB	
Resonance		Increase 10 dB	

Table 3 Description of virtual tail-pipe sound samples

Files	Description
1	Reference sound sample
2	Ref. + Add 350 Hz resonance
3	Ref. + Reduced higher orders
4	3rd sample + Add 350 Hz resonance
5	Ref. + Enhanced 1.5order
6	5th sample + Add 350 Hz resonance
7	3rd sample + Enhanced 1.5order
8	7th sample + Add 350 Hz resonance

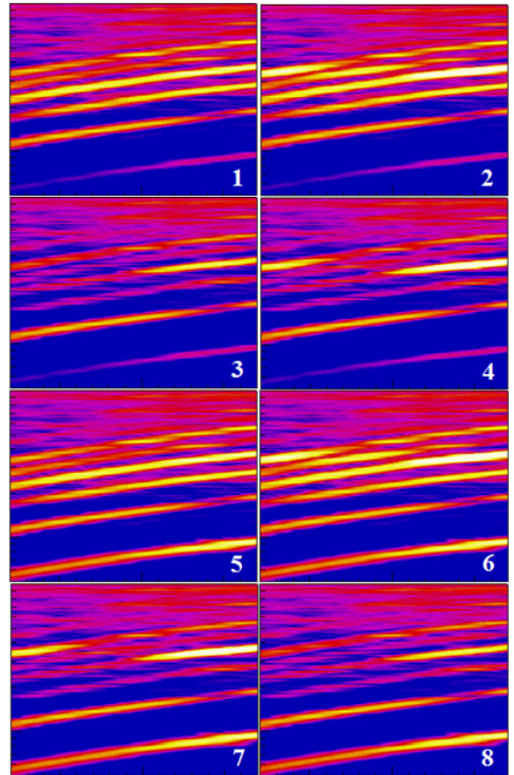


Fig. 3 Characteristic of virtual tail-pipe sound samples

Table 4 Criterion of subjective evaluation

Files	Description
9	Extremely(mania sound)
8	Excellent
7	Good
6	Not good than expectation
5	Bad
4	Very bad(quiet)

Table 5 Results of virtual sound jury test

Files	Jury test results			
	Total	Average	SD	Rank
1	210	7	0	4
2	217	7.23	0.86	3
3	183	6.10	1.03	8
4	192	6.40	1.07	7
5	232	7.73	0.94	2
6	245	8.17	0.87	1
7	214	7.13	0.97	6
8	225	7.50	0.94	5

인 척도는 SAE J1060을 참조하여 10-scale로 구성할 수 있으나 10점 척도 사용 시 분석에는 용이하지만 평가를 진행하기에는 어려운 점이 발생한다. 따라서 이 연구에서는 4점부터 9점까지 6점 척도법으로 평가자들이 점수를 쉽게 결정할 수 있도록 하였다. Table 4는 평가자들을 위한 점수별 기준을 나타낸다.

2.4 청음평가 결과

평가자의 주관적인 결과는 Table 5와 같으며 평균 및 표준편차를 계산하였다. 샘플별 점수빈도 분포는 Fig. 4와 같다.

평가자들이 가장 선호하는 소리는 기본주파수인 3차 오더 외 1.5차 및 고차 오더 모두 레벨이 높은 6번 샘플임을 볼 때 결국 오더들이 음색을 결정하는 데 중요한 인자임을 알 수 있다. 이는 주 오더(main order)가 중심이 된 부밍소리(booming sound) 뿐만 아니라 럼블소리(rumble sound)와 같은 진폭변조되는 소리가 크면 클수록 보다 더 스포티한 소리로 인지됨을 보여준다.

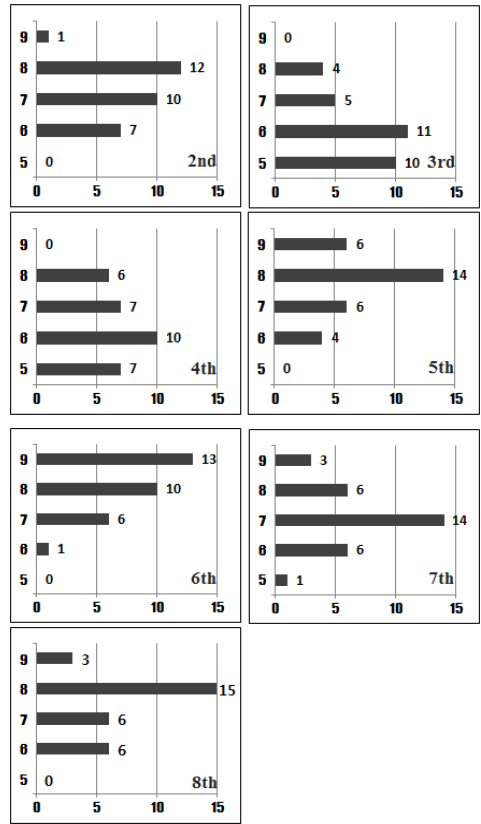


Fig. 4 Rating distribution of jury test

3. 청음결과의 객관적 음질분석

3.1 상용 음질지수를 통한 분석

상기 주관적 평가를 마친 음원 샘플을 가지고 가장 많이 사용되고 있는 Zwicker의 4 parameter 중 라우드니스(loudness), 샤프니스(sharpness), 러프니스(roughness)를 음질분석에 사용하였으며 변동강도(fluctuation strength)는 20 Hz 미만으로 변조되는 소음에 사용되므로 비트(beats)음과 같은 낮은 변조는 고려대상이 아니기 때문에 이 연구에서는 분석에서 배제하였다. 아울러 보통 음질분석에는 사용되지 않지만 소음분석에 있어 기본적인 음량을 나타내는 전체음압(overall level, dBA) 그리고 신규 제작한 오더비율(order ratio)를 추가하여 분석을 수행 하였다. 오더비율은 다음 수식과 같으며 기본차수 외 오더를 많이 포함 할수록 값이 커지게 된다.

$$Order\ Ratio = \sum (SPL_{harmonics} / SPL_M) \quad (1)$$

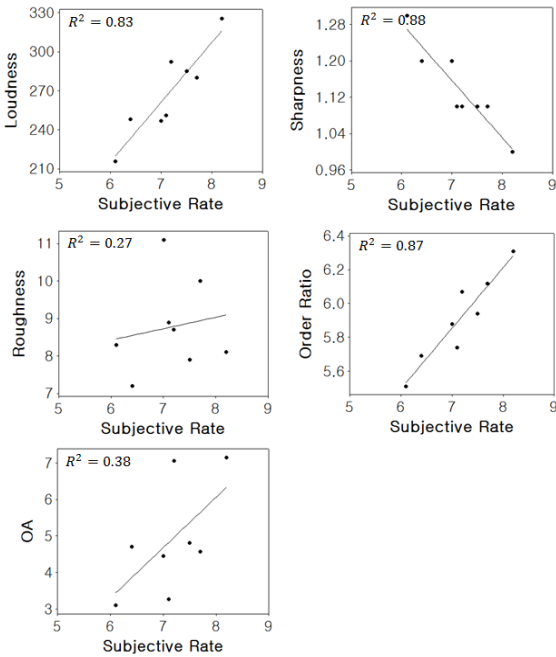


Fig. 5 Correlation coefficients between the sound metrics and the mean response of participants

3.2 분석 결과

Fig. 5는 음질요소와 가속 소음의 주관적 평가간의 상관관계를 분석 한 것이고 Fig. 6은 주 효과 분석을 한 것이다. 전체음압 및 Zwicker의 4 parameter의 경우 라우드니스 외에는 러프니스나 샤프니스 모두 낮은 상관도를 보인다. 특히 샤프니스의 경우 상관도의 값은 크지만 평가자들이 스포티하다고 생각할수록 그 값이 떨어지는데 이는 일반적인 사람이 들었을 때 스포티함을 느끼는 감각과는 거리가 멀다는 것을 알 수 있다. 또한 라우드니스는 음의 크기만을 표현할 뿐 음색에 대해 표현하기 불가능 하다.

반면에 임의로 만든 오더비율은 높은 상관도를 보인다. 이는 오더들 간의 상관관계가 결국 악기와 같이 음색을 결정하기 때문이다. 따라서 주관적 평가 결과를 객관적으로 표현하기 위해서는 오더들 간의 상관관계를 보여주는 새로운 음질 모델이 필요함을 알 수 있다.

4. 화성학과 심리음향을 이용한 음질요소 개발

4.1 배기토출음의 화성-심리음향 관계

악기와 마찬가지로 배기토출음 또한 많은 고조파를 갖는다. 이러한 고조파의 배열에 따라 악기의 음색이 결정된 많은 연구를 통해 밝혀진 사실이다.

배기토출음의 경우 엔진회전수와 엔진의 실린더 개수에 따라 기본주파수가 결정된다. 이 기본주파수와 그 배수들로 구성되어 있는 고조파들은 화성학의 순정율에 의해 음자리가 결정되고 배기토출음의 고조파간의 음정에 따라 협화 및 불협화가 결정된다. Fig. 7과 Fig. 8은 각각 배음렬 및 음정의 분류와 배기토출음의 고조파 음자리 및 음정에 따른 협화 및 불협화 관계를 보여준다. 이러한 기본음에 대해 협화가 될수록 기본음과 잘 어울리게 되며 불협화가 될수록 기본음과는 다른 음색으로 변화된다.

이러한 불협화음은 2.4절의 청음샘플의 럼블사운드(rumble sound)와 배기관의 충격파로 인한 버징사운드(buzzing sound)가 대표적이다.

서양 음악에서는 음들을 구성할 때 협화음과 불협화음을 구분하는 방법으로 순정률이나 평균율을 이용했으나 심리음향이 발달함에 따라 귀의 구조에 따른 협화음과 불협화음을 구분할 수 있게 되었다.

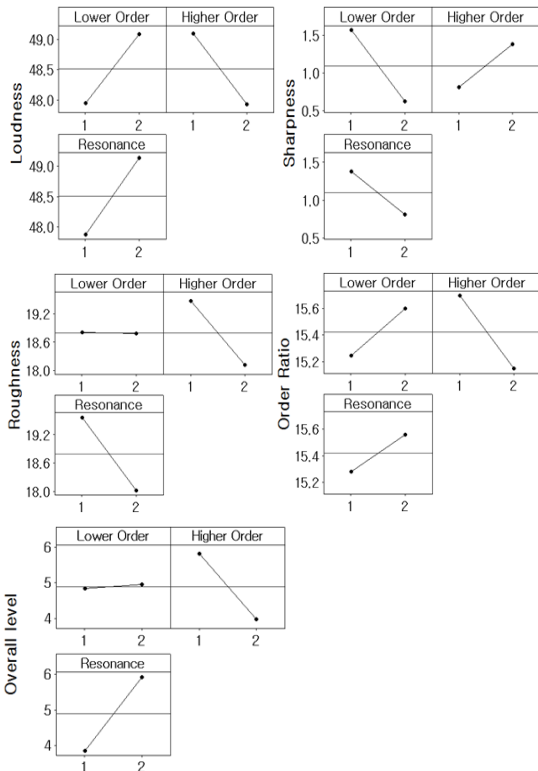


Fig. 6 Main effects plot for SN ratio

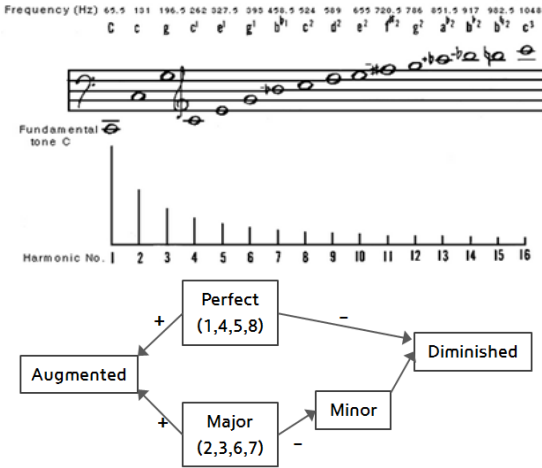


Fig. 7 Harmonic series on C of piano & interval classification

1f	C	Octave (1:2)	Perfect consonance
2f	C		
3f	G	Perfect 5th (2:3)	Perfect consonance
4f	C		
5f	E	Perfect 4th (3:4)	Imperfect consonance
6f	G		
7f	Bb	Major 3rd (4:5)	Imperfect consonance
8f	C		
9f	D	Minor 3rd (5:6)	Imperfect consonance
10f	E		
			Dissonance

Fig. 8 Correlation between harmonics and chord on exhaust sound

Fig. 9는 달팽이관의 기저막이 부위별로 각각 다른 특정음파에 대해 진동하게 되는 것을 보여준다. 고주파는 기저부의 기부에서 최대 진동을 발생시키며 중주파는 기저막의 중앙 부분에서 최대의 진동을 일으킨다. 마지막으로 저주파는 기저막의 정점부분에서 최대 진동을 발생시킨다. 이와 같이 특정 주파수에 반응하는 기저막의 위치를 24개 대역으로 분리한 것이 임계대역(critical band)이다. Plomp와 Levelt는 이러한 심리음향요소를 이용하여 화성적인

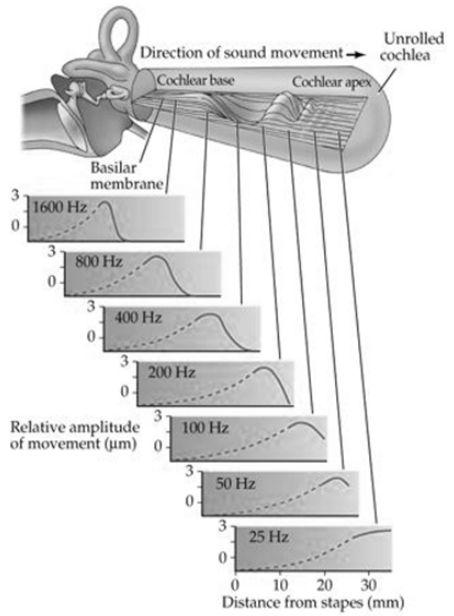


Fig. 9 Envelope for several frequencies response of cochlea

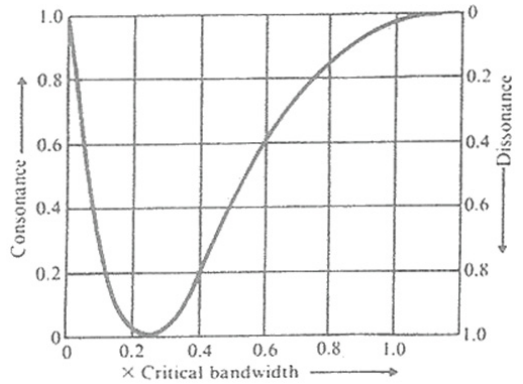


Fig. 10 The perceived consonance and dissonance of two pure tone

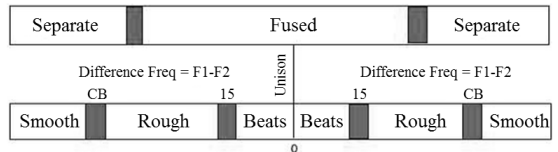


Fig. 11 The illustration of the perceptual changes which occur when a pure fixed at frequency

협화음과 불협화음의 구분을 했다.

Fig. 10과 Fig. 11은 두 개의 순음이 다른 음정을

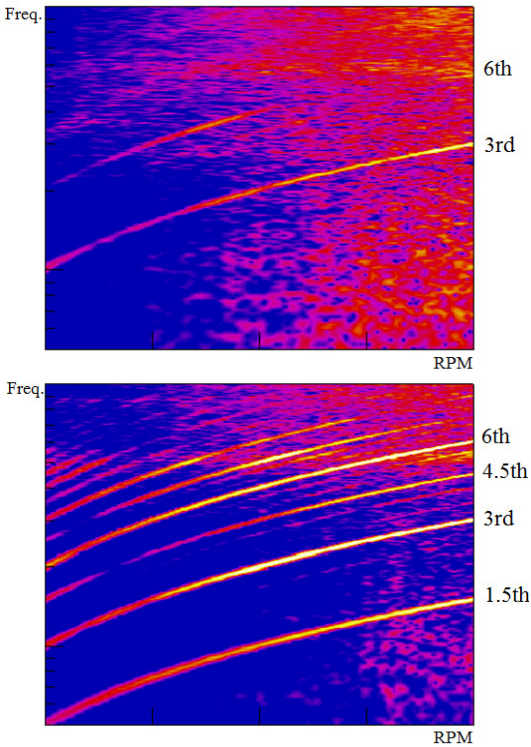


Fig. 12 Spectrogram of sedan and coupe

가질 때의 협화로 인지하는 정도를 나타내는 그림이다⁽¹²⁾. 두 개의 사인파는 임계대역에 따라 비트 (beats), 거칠음(rough), 분리음(separated tone)으로 구분됨을 알 수 있다. 특히 임계대역에서 1/4지점이 가장 불협화됨을 알 수 있으며 그 이하일 경우 비트가 발생하게 된다. 이와 같은 구분은 차량의 엔진회전수에 따라 고조파들이 순정렬에 있어 협화 관계일지라도 음정에 따라 협화 혹은 비협화로 들리게 됨을 의미한다.

4.2 쿠페차량의 화성-심리음향 분석

Fig. 12는 한 독일 차량제조회사의 6기통 세단과 쿠페차량의 토출음의 스펙트로그램이다. 세단의 경우 기본주파수와 정배수에 해당하는 고조파로 구성되어 있으나 쿠페차량의 경우 정배수 외 다른 고조파까지 포함하는 것을 확인할 수 있다.

쿠페차량의 경우 1.5차 오더가 발생함에 따라 1.5차 오더를 기준으로 다시 배음렬(harmonic series)을 구성할 수 있다. 따라서 1.5차 기본주파수를 기준으로 3차 오더는 옥타브(octave)가 된다. 마찬가지로 3차

오더와 4.5차 오더와의 관계는 완전5도가 된다. 이는 쿠페차량의 토출음이 악기와 마찬가지로 고조파를 구성하는 주파수가 높아질수록 레벨이 작아지게 되나 하프오더가 발생함으로써 동일 주파수 범위 내 배기 토출음을 구성하는 화음들이 많이 존재한다는 것을 의미한다. 이는 독창보다는 합창이 목관악기보다는 금관악기가 울림이 풍부하고 듣기 좋은 소리를 내는 것과 동일한 것으로 풍부한 배기음을 결정하는 데 중요한 인자가 된다.

5. 음질지수 개발

배기토출음은 엔진의 배기밸브에서의 압력에 의해 기본 음량이 정해지지만 배기 매니폴드부터 소음기까지의 주파수 튜닝을 통해 각기 다른 주파수의 음압크기 조절이 가능하다. 따라서 주파수가 높아질수록 음압이 작아지는 형태가 아니라 특정 주파수의 음압이 큰 형태 등의 다양한 음색을 갖는다.

인간이 소리를 감지하는 특성은 주파수보다는 낮은 주파수 영역에서 감도가 떨어지는 반면 작은 음압의 크기만으로 음량차이를 느끼게 된다. 이러한 점을 감안하여 추출된 스펙트럼(spectrum)에 가중치(weighting)함수를 적용한 뒤 화성학적인 개념을 이용하여 임의의 음질지수를 제작하고자 하였다.

Fig. 13은 음질지수 개발을 위한 순서를 도식화한 것이다. 먼저 청음자 위치에서 수음된 데이터(data)를 가지고 FFT를 수행한다. 이후 MATLAB을 이용하여 FFT 결과와 엔진 RPM신호를 가지고 각각의 오더를 추출한다. 오더는 백색잡음과 같은 노이즈를 제거했을 때 하나의 독립된 피치(pitch, 음높이)를 가지고 있는 것만을 취하도록 하였다.

추출된 오더는 인간의 청감특성에 따라 기본주파수의 레벨에 따른 상대적인 가중치를 적용한 뒤 각각의 주파수 비율에 따라 협화음과 불협화음 등으로 구분지어 음질요소를 제작한 뒤 이를 가지고 최종적으로 지수를 만들도록 하였다.

5.1 Specific Weighting 함수 적용

6기통 엔진의 배기토출음의 경우 RPM에 따라 기본주파수는 30~300 Hz로 비교적 저주파에 속한다. 이런 저주파를 기본주파수로 하는 복합음은 기본적으로 다른 피치를 발생하지 않는 경우 기본음을 제

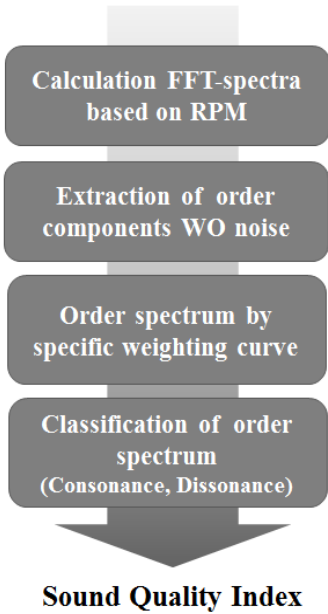


Fig. 13 Flow chart for new sound quality index

거하더라도 같은 음높이로 청음된다. 이를 missing fundamental이라 한다. 기본주파수를 제거하더라도 구성하는 고조파가 존재 한다면 음색은 변화시키지만 음높이는 변화되지 않는다는 것을 볼 때 기본주파수의 배수가 되는 고조파들의 레벨이 전체 음색을 결정하게 된다. 따라서 기존에 C-가중치와 같이 평탄한 가중치를 취하는 것은 음색을 결정하는 청감특성을 배제한 것이라 불합리하고 A-가중치와 같이 저주파 에너지를 배제하는 것은 2.4절의 청음결과와 같이 실제적으로 저주파가 음질 결정에 영향을 미친다는 점에서 불합리하다. 또한 배기토출음의 기본주파수는 엔진RPM에 따라 변하며 레벨 또한 소음기 주파수별 감쇠성능에 의해 그 폭이 커 기본주파수에 해당하는 폰(phon)곡선을 찾기 용이하지 않다. 따라서 이 연구에서는 청음자 위치에서의 기본주파수의 음압을 기준으로 하는 등청감곡선에서 나머지 구성음에 가중치를 적용 하였다. 이를 위해 먼저 10폰 간격으로 된 등청감곡선을 1 phon차이로 보간법을 이용해 재배열한 뒤 측정된 데이터의 스펙트로그램에서 기본주파수의 레벨에 해당하는 등청감곡선을 찾아 기본주파수에 크기에 대한 나머지 고조파에 대해 가중치가 적용된 스펙트로그램을 만들도록 알고리즘을 제작하였다. 아울러 기본음량을 결정하기

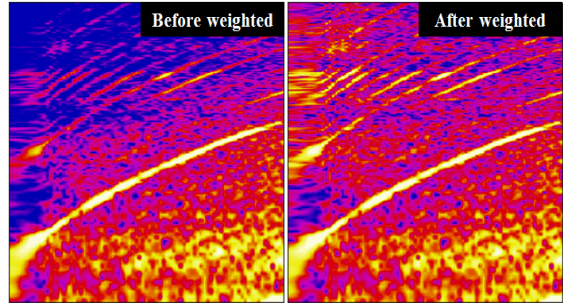


Fig. 14 Comparisons of spectrogram between before and after weighted

Table 6 Definition of sound quality factors

Sound quality factors	Description
Loudness	$f(H1.5, H3)$
BASS	$f(H1.5, H3; RMS)$
Perfect 5th	$f(H1.5, H3, H4.5; RMS)$
Tonic triad	$f(H1.5, H3, H6, H7.5, H9; RMS)$
Dissonance (metallic sound)	$f(Residual\ order, critical\ band)$
Dissonance (rumble sound)	

위해 기본주파수에 해당하는 라우드니스 값을 얻었다. Fig. 14는 제작된 알고리즘의 가중치 적용 전후 결과를 보여준다. 이렇게 가중치가 적용된 독립된 피치를 가진 고조파간의 화성적인 분류를 통해 음질 지수를 제작했다.

5.2 음질지수 제작

이전 연구에서는 배기음은 저주파로 갈수록 파워풀(powerful)한 음색을 가지고 고주파로 갈수록 스포티(sporty)한 음색을 갖는 것으로 구분하였으나 이는 다양한 배기음색을 구분함에 있어 단순한 모델이다. 따라서 배기토출음의 음색을 결정하는 인자인 고조파들 간의 관계를 4.1절의 Fig. 8과 같이 완전협화음, 불완전협화음, 불협화음으로 구분하여 표현하였다. 특히 불협화음은 버징(buzzing)과 같은 화음에서 벗어난 고주파의 금속성 소리와 음정 문제로 발생하는 럼블소음과 같은 진폭변조되는 소리로 구분하였다. Table 6은 배기토출음에서 발생할 수 있는 협화 및 불협화 조건에 따라 만든 음질요소이다.

라우드니스는 기본음을 결정하는 3차 오더의 비 라우드니스 값을 뜻하며 3차 오더 값이 낮다면 1.5 차 오더가 대신하여 비라우드니스 값으로 표현되어 진다. 이 라우드니스 값은 음색을 결정하지 않지만 스포티함을 결정함에 있어 음의 크기는 중요한 요소 이므로 다음 장의 음질지수 제작 시 사용하였다.

베이스(BASS)는 기본음색을 결정하는 1.5차와 3 차 오더의 함수 값으로 1.5차 오더가 커질수록 큰 값을 갖으며 H1의 비라우드니스 값과 함께 고급세 단을 위한 조용한 차인지 스포티 사운드를 위한 차 량인지가 결정된다.

완전5도(perfect 5th)와 으뜸화음(tonic triad)은 해당 음정(interval)에 있는 오더의 분포를 결정하는 것으로 구성음이 커질수록 큰 값을 갖게 된다. 불협 화가 되는 구성음이 존재하지 않는 경우 이 구성음 의 분포가 배기토출음의 기본음색을 주로 결정하게 된다.

불협화(dissonance)는 금속성소리가 발생하는 경 우와 진폭변조가 일어나는 경우로 나누어서 제작하 였으며 각각의 구성음들의 순정율과 임계대역에 따 라 구분되어 진다.

Fig. 15는 2.3절의 청음샘플 중 하나로 상기 음질 요소로 가지고 엔진 RPM별로 분석한 것이다.

각각의 제곱평균제곱근(RMS)들로 계산된 음질요 소는 로그 스케일(log scale)을 통해 4단계로 구분하 였다. 1단계 이하는 각각의 음질요소가 기본음에 영 향을 미치지 못하는 것으로 그 차이가 -6 dB가 된 다. 1단계에서 3단계 까지는 기본음과 잘 어울리는 화음의 크기로 기본음과 3 dB~7 dB정도의 차이를 나타내며 4단계가 가까워지게 되면 독립적인 톤으로 들리게 된다.

상기 음질요소를 가지고 배기토출음에서 발생할 수 있는 음색을 4가지의 음질지수를 제작하였다. Table 7은 각각의 제작된 음질지수를 보여준다.

Powerfulness는 부밍(booming)과 같은 청감상의 묵직한 소리를 표현하기 위한 것으로 기본음량과 베 이스와의 조합으로 만들었다. 베이스(BASS)를 구성 하는 음들은 옥타브 관계라 가장 기본음색과 잘 매 칭이 되며, 임계대역 안에 구성음이 존재하는 RPM 일 경우 변조가 되어 보다 강력한 맥동으로 들리게 된다.

Dynamics는 음정이 불협화 관계가 위치하고 있

으며 진폭변조가 되는 비트음(beat sound)나 럼블소 리(rumble sound)와 같은 시간에 따라 음압의 크기 가 주기적으로 변하는 소리를 표현하기 위해 제작하 였다. 특히 임계대역 안의 구성음이 많을수록 높은 값을 갖는다.

Buoyant는 음색을 결정하는 기본주파수의 장3도 와 단3도와 같은 협화음을 구성하는 정도 차이를 표현하기 위해 제작하였다. 기본음색을 결정함에 있 어 협화음을 이루는 고조파간의 조화가 높을수록 높 은 값을 갖는다.

Sharpness는 금속성 소리와 같이 불협화음을 구 성하는 음의 조합으로 같은 불협화음인 dynamics와 는 구분하여 제작하였다. 이러한 금속성 소리는 BSR(buzzing, squeak, rattle)로 인해 주로 발생하게 되며 배기계의 경우 충격과 발생으로 인한 buzzing sound가 대표적인 예이다. Buzzing으로 발생한 높 은 주파수의 오더는 배음렬상 불협화음 범위에 속하 게 되고 이러한 오더들의 합은 톤니파와 같은 파형 으로 합쳐지게 되어 날카롭게 들리게 된다.

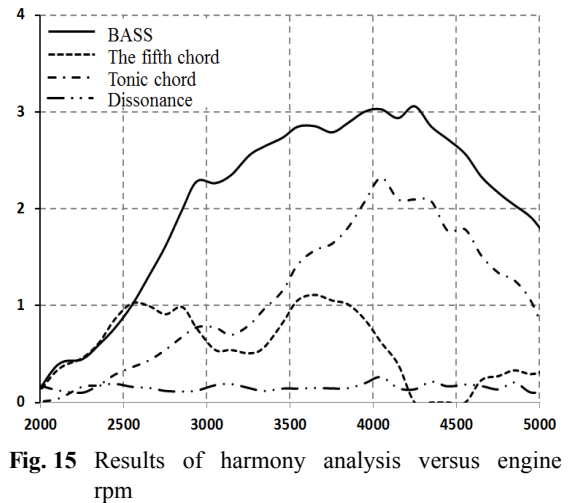


Fig. 15 Results of harmony analysis versus engine rpm

Table 7 Definition of sound quality index

Sound quality index	Description
Powerfulness	$f(\text{loudness \& BASS})$
Dynamics	Dissonance(rumble) - C (C; constant)
Buoyant	$f(\text{perfect 5th \& tonic triad})$
Sharpness	Dissonance(metalic) - C (C; constant)

Fig. 16은 음질분석 결과를 바탕으로 2000~4000 RPM 구간에서의 2.3절의 청음음원샘플들의 음질분석 결과를 나타낸다. 청음결과와 마찬가지로 부밍과 럼블을 의미하는 powerfulness와 dynamics가 쿠페차량의 이미지를 결정하는 주 인자가 됨을 알 수 있다.

5.3 실제 차량의 차외 청음을 통한 타당성 검증

임의로 제작된 음질지수의 타당성 검증을 위해 일반 세단차량을 제외한 스포츠 세단 및 쿠페차량 4대를 가지고 차외에서 청음을 통해 선호도 조사를 실시하였다. 주행 외 아이들(IDLE)상태에서의 음질 문제는 고조파간 음정이 모두 불협화음에 속해 차후 연구를 위해 이번 연구에서는 배제하였다.

Table 8은 쿠페차량의 선호도 점수에 따른 랭킹 및 음질지수 결과를 보여준다. 2.4절 가상음원 평가 결과와 마찬가지로 쿠페차량의 음질을 좌우하는 가장 큰 요소는 powerfulness와 dynamics임을 알 수 있다. 또한 B차량 대비 A, C, D 차량의 경우 같은 차량제조사에서 제작된 쿠페차량으로 powerfulness

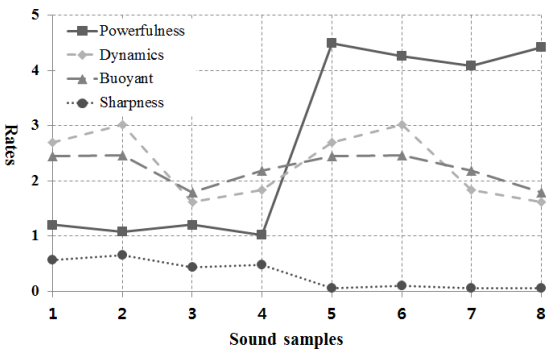


Fig. 16 Sound quality index of virtual tail-pipe sound

Table 8 Results of jury test for validation

Results	Test vehicle			
	A	B	C	D
Ranking	2	1	3	4
Powerfulness	1.81	2.65	0.75	0.56
Dynamics	2.34	1.87	2.60	2.19
Buoyant	2.70	1.38	3.55	2.26
Sharpness	0.04	0.15	0.54	0.43
Powerfulness + dynamics	4.15	4.52	3.35	2.75

의 buoyant를 높게 구성함으로써 B차량과는 다른 협화음을 구성하는 고조파가 존재함을 알 수 있다. 이와 같은 특색 있는 구성은 제조회사의 BI & PI에 따라 결정되는 것으로 판단된다.

6. 결 론

이 연구에서는 배기토출음의 객관적인 음질분석을 위해 가상음원을 제작한 뒤 주관평가를 수행하였다. 결과분석을 통해 중요인자를 추출 뒤 화성학을 접목시켜 객관적인 객관화 시킬 수 있는 임의의 음질지수를 개발하여 검증하였다.

이 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 악기와 마찬가지로 배기토출음의 경우 많은 고조파(harmonics)를 가지고 있다는 점에서 기존 Zwicker의 4 parameters을 통한 분석보다는 화성학에 입각하여 고조파간 음정에 따른 협화 정도를 이용한 분석방법이 더 유용함을 알 수 있었다.

(2) Equal loudness contours의 경우 1 kHz 음의 크기를 가지고 저주파 혹은 그 이상의 주파수에 대해 가중치를 적용하나 배기토출음의 경우 기본음색을 결정하는 주파수가 낮기 때문에 특정 weighting만으로 음질을 분석하는 데 무리가 따른다. 따라서 기본주파수의 음량을 기준으로 다른 고조파들의 상대적인 가중치를 적용하고 심리음향적인 음의 크기인 폰(phon)을 사용함으로써 새로운 피치(pitch)의 발생유무 확인이 용이하다.

(3) 최종적으로 만들어진 지수(index)는 4가지로 배기토출음에서 발생할 수 있는 4가지 음색을 가지고 분류하였다. 향후 차량의 BI & PI(brand identity & product identity)를 통해 별도의 청음평가 없이 목표달성을 함으로써 개발 시 소요시간 및 비용을 단축하는데 기여할 것으로 기대된다.

References

(1) Kim, E. Y., Lee, Y. J. and Lee, S. K., 2012, Design of Sound Quality Index for Laser Printers and Its Application for Improvement Study, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol. 22, No. 6, pp. 509~523.
 (2) Jeong, J. E., Yang, I. H., Fawazi, N., Jeong, U.

C., Lee, J. Y. and Oh, J. E., 2012, Sound Quality Evaluation for Laundry Noise by a Virtual Laundry Noise Considering the Effect of Various Noise Sources in a Drum Washing Machine, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 6, pp. 564-573.

(3) Lee, J. K., Cho, T. H., Seo, D. W., Lim, Y. S. and Won, K. M., 2012, A Development of Sound Quality Index of Intake and Exhaust System for High Quality Improvement of Luxury Vehicle, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 3, pp. 234-243.

(4) Kida, S., Namekawa, K. and Mochida, T., 2006, Development of Exhaust Sound Quality for New Type Cruiser, SAE, 2006-32-0080.

(5) Lee, C. M. and Kim, D. G., 2009, A Study on Sound Quality Analysis of Exhaust Acoustic Signal of Vehicle, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 11, pp. 1202-1213.

(6) Jo, B. O., Lee, S. K., Park, D. C., Lee, M. S., and Jung, S. G., 2006, New Development of Two-dimensional Sound Quality Index for Brand Sound in Passenger Cars, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 5, pp. 457-469.

(7) Lee, S. M. and Lee, S. K., 2013, Psychoacoustical Analysis and Application of Electroencephalography (EEG) to the Sound Quality Analysis for Acceleration Sound of a Passenger Car, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 3, pp. 258-266.

(8) Fuhrmann, B., Garcia, P. and Wiemeler, D., 2006, Exhaust System Sounds, SAE, 2006-01-1372.

(9) Hiscutt, P. and Ishikawa, S., 2008, Development of Exhaust Sound Quality on Aston Martin V8 Vantage, SAE, 2008-01-0895.

(10) Ambrosino, M., Lubrano, L., Sciacca, F., Giorgi, P. and Ferla, L., 2011, DualMode Sporty Exhaust Development, SAE, 2011-01-0926.

(11) Zwicker, E. and Fastl, H., 1999, Psychoacoustics: Facts and Models, Springer, New York.

(12) Juan, G. and Roederer, 2001, The Physics and Psychophysics of Music: An Introduction, Springer, New York.



In Sung Jung received the B.S. in Material Science and Engineering from Ajou University in 2006. He is senior research engineer at Sejong Korea R&D center. He has continued NVH research of Exhaust system.



Hong Ki Kim received the B.S., M.S. in Automobile Engineering from Ulsan University in 2000 and 2002. He is chief research engineer at Sejong Korea R&D center. He has continued NVH research of Exhaust system.



Dong Ho Shin received the B.S., M.S. in Mechanical Engineering from Kyunggi University in 2011 and 2013. He is research engineer at Sejong Korea R&D center. He has continued NVH research of Exhaust system.



Hee Gon Lim received the B.S., M.S., in Mechanical Engineering from Kyunggi University in 2008 and 2010. He is research engineer at Sejong Korea R&D center. He has continued NVH research of Exhaust system.



Sang Ho Kim received the B.S., M.S. and Ph.D. in Automobile Engineering from Ulsan University in 1996, 1998 and 2010. Dr. Kim is currently Research & Development Manager at Sejong Korea and China R&D center.

His interesting research field is NVH and Durability technology for the exhaust system especially in acoustic & vibration source extraction and optimization.