

포먼트 필터와 음악 화성학에 기반한 차량 음질 연구

Study on the Vehicle Sound Based on the Formant Filter and Musical Harmonics

장 경 진* · 박 동 철†

Kyoung-Jin Chang and Dong Chul Park

(Received April 28, 2015 ; Revised July 13, 2015 ; Accepted July 13, 2015)

Key Words : Brand Identity(브랜드 정체성), Formant Filter(포먼트 필터), Harmonics(화성학), Target Sound(목표음), Driving Sound Synthesis(주행음 합성), Active Noise Control(능동소음제어), Engine Order(엔진 차수)

ABSTRACT

Driving sound is an effective element to promote the product identity of a vehicle by providing customers with attractive sound which reflects the concept of a vehicle. Recently, major automakers are focusing on the target sound setting so that the sound can represent the brand image as well as the unique concept of a vehicle. In this study, a new method of target setting for the driving sound will be introduced based on using formant filter and musical harmonics characteristics. In addition, a target sound suggested from this method will be realized and verified by using active noise control in vehicle.

이를 차량에서 구현하는 연구를 수행하였다.

1. 서 론

1.1 연구배경

차량 주행음질의 경우 단순히 소음을 저감하는 수준을 넘어서 고객에게 매력적인 음을 제공함으로써 차량의 상품성을 크게 높일 수 있다. 이를 위하여 메이저급 자동차 회사들은 차량 주행음 목표 선정 시 자사 브랜드 이미지를 표현하고 아울러 차급 및 차종에 따라 차별화된 주행음 목표를 선정하는 시도를 하고 있다⁽¹⁾.

이 연구에서는 브랜드 정체성과 해당 차량의 개발 컨셉을 토대로 화성학과 포먼트 필터에 기반하여 차량 주행음 목표를 선정하는 기술을 개발하고, 오디오 스피커를 이용한 능동소음제어 시스템을 통해

1.2 선호하는 주행음질의 요소

과거 차량에서 좋은 음질을 구현하기 위한 연구는 활발히 진행되어 왔으며⁽²⁾, 그 첫 번째 단계로서 어떤 음질이 좋은 음질을 구성하는 요소인지 규명하는 연구도 다양하게 전개되어 왔다⁽³⁾.

Fig. 1 및 2에 그 중 일부의 결과를 도시하였다. 즉, 좋은 음질은 짜증스럽지 않고, 긍정적인 느낌을 불러일으킬 수 있는 음이어야 한다. 아울러, 편안한 느낌을 주는 주행음의 조건을 Fig. 2와 같이 표현할 수 있다. 이 연구에서는 과거 고객의 목소리(voice of customers) 및 경쟁차 사운드의 분석결과를 토대로 차량에서 구현하고자 하는 좋은 주행음의 목표를 다음과 같이 정의하였다.

† Corresponding Author ; Member, Hyundai Motor Company
E-mail : dc.park@hyundai.com

* Member, Hyundai Motor Company

‡ Recommended by Editor Myung Jun Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

Positive Sound Quality means :

The noise ...
 ... Is not perceived as a hearing event, or as being annoying.
 ... Implies a positive sound image.
 ... Causes positive emotions with respect to the product.

Fig. 1 Elements of a positive sound quality

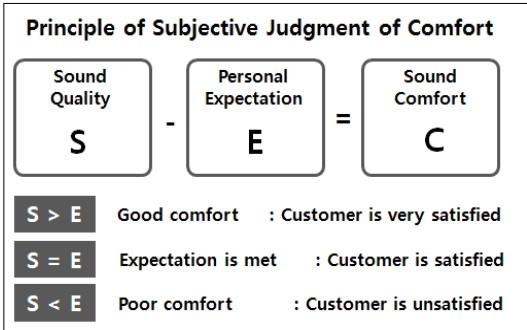


Fig. 2 Principle of judgment of a sound comfort

- 제1요소 : 고객의 기대치를 만족시켜야 함. (즉, 이상한 잡음이 없고, 기대하는 수준보다 시끄럽지 않고, 편안하고, 들을수록 즐겁게 만드는 주행음)
- 제2요소 : 브랜드와 차량의 이미지를 표현할 수 있어야 함. (즉, 브랜드의 정체성을 표현하고, 차량의 컨셉을 표현하며, 들을 때마다 브랜드와 차량을 연상시킬 수 있도록 친근하고 개성적인 주행음)

아울러 이 연구에서는 차량의 주행음에 위의 요소들이 표현될 수 있도록 방법론을 새로이 개발하였다.

2. 목표음 설정 방법론

2.1 방법론 비교

기존의 목표음 설정 방법은 먼저 Fig. 3과 같이 베이스 차량의 음질을 갖고, 베이스 차량의 음질이 갖는 문제성분은 제거하고, 선호하는 성분은 부가시키는 방법으로 목표음을 합성한다. 이렇게 얻어진 목표음 샘플에 대하여 청음평가나 시뮬레이션 프로그램 등을 통해 목표음이 주관적으로도 만족스러운지 확인하고, 이 과정을 반복하여 목표음을 최종 선정하는 방법을 주로 사용하였다⁽⁴⁾. 이러한 방법은 목표음 합성은 쉬운 편이나 베이스 차량의 음에서

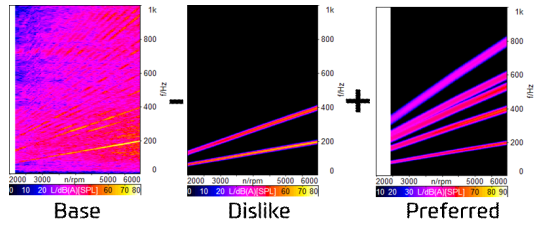


Fig. 3 Old methodology for target sound setting

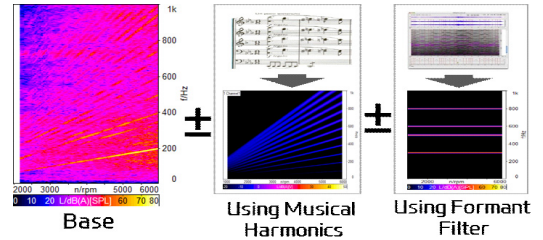


Fig. 4 New methodology for target sound setting

큰 폭의 변경이 어렵고, 또한 브랜드와 차량의 이미지를 사운드로 표현하기는 어렵다는 단점이 있었다.

이 연구에서 제안하는 방법은 두 가지의 과정을 거치는데, 첫 번째 과정은 음악 화성학에 의하여 음질을 합성하는 과정으로서, 먼저 화성학적으로 좋은 화음을 선정하고, 선정된 화음에 맞게 엔진 차수를 구성후 주행음을 합성하게 된다. 이 튜닝 과정의 특징은 엔진 차수별 레벨 조정이 가능하다는 점이다. 두 번째 과정은 사람 목소리의 발성기관 특징으로 인해 발생하는 스펙트럼 분포를 의미하는 포먼트(formant)를 활용하여 필터 제작하여 음질을 합성하는 과정으로서, 먼저 브랜드나 차량 컨셉에 맞는 특징적인 동물을 선정하고, 이 동물의 포호하는 울음소리로부터 포먼트 필터를 추출하여, 이를 이용하여 주행음을 합성하는 과정이다. 이 튜닝과정의 특징은 주파수별 레벨 조정이 가능하다는 점이다. 위의 두 가지 과정을 모두 거쳐서 최종적인 주행 목표음이 완성되게 되는데, 이 방법은 기존의 방법에 비하여, 베이스음 대비 변경 자유도가 크고, 브랜드와 차량의 이미지를 사운드로 표현 가능하다는 점이 매우 큰 장점이다. Fig. 4에 이 방법의 과정을 개념적으로 도시하였다. 한편, 이 연구에서 제안하는 첫 번째 목표 주행음 합성방법인 음악 화성학을 이용하는 방법은 과거 일부 유사한 연구가 수행된 사례^(5,6)가 있는데, 과거에는 협화음과 불협화음의 주파수 비율을

정의하고 불협화음을 회피하는 방식으로 목표음을 제안하는 방법이었고, 이 연구의 방법은 차량에서 브랜드 정체성을 표현하는 좋은 화음을 선정한 뒤, 이를 가속 주행 시 엔진 차수로 구현하는 방법을 제안했다는 점에서 차별화되었다고 볼 수 있다.

2.2 주요 요소별 주행음 표현 전략

(1) 회사 브랜드 정체성의 표현 전략

한 예로 K사의 세 가지 핵심정체성(core identity)은 각기 “활기차고(vibrant)”, “차별적이고 (distinctive)”, “신뢰할 수 있는(reliable)”으로서 이를 주행음으로 표현한다면, 다채롭고 활력이 넘치면서, K사의 개성을 전달할 수 있도록 차별화되고, 낮은 음대역을 활용하여 안정된 느낌을 주는 사운드로 표현할 수 있다. 이를 위해, 화성학 기법을 이용하여 각 브랜드 정체성을 대표할 수 있는 화음을 각기 저속/중속/고속 RPM 대역별로 선정하고, 주행음 스펙트럼에서 이에 부합하는 엔진 오더들의 레벨을 조정하여 원하는 화음을 표현하도록 하였다.

(2) 차량 컨셉의 표현 전략

쿠페, 세단, SUV 등 차량 유형별 혹은 소형, 중형, 대형 등 차급별 컨셉이 주행음에 나타나도록 하기 위한 방법으로서 포먼트 필터를 활용하였다. 즉, 중대형급 스포티한 차량 컨셉의 경우, 스포티한 느낌을 연상시킬 수 있는 동물을 먼저 선정하고, 이들의 성대구조를 이용하여 포먼트 필터를 합성한 후, 앞서 화성학적으로 얻어진 1차 목표 주행음에 필터를 결합하여 목표음을 도출하고자 하였다.

(3) 고객의 기대치를 만족시키기 위한 표현 전략

위의 과정으로 얻어진 2차 목표 주행음에 추가적으로 거슬리는 이음, 고주파 성분, 비선형적인 음색 등의 유무를 확인하여 이러한 성분을 제거하고 음질 정제과정을 거쳐서 최종적인 목표 주행음을 도출하고자 하였다.

3. 목표 주행음 개발

3.1 화성학 기법에 의한 주행음 개발

(1) 음악 화음과 엔진음의 비교

먼저 음악과 차량 주행 시 엔진음의 특성을 비교

하면 서로 음의 특성이 크게 다른 것을 알 수 있다. 음악은 음계(tone)와 화음(chord) 성분으로 구성이 된 반면, 엔진음은 회전수에 따라 변화하는 엔진폭발음과 여러 기계 부품들의 회전체음 및 공진음으로 구성이 되어 있다. 이를 다시 음의 주요 구성요소끼리 비교하면, 먼저 음악 화음은 일반적으로 기본음(tonic)과 배음들(harmonics)들로 구성이 되어 있고, 이에 반해 차량 엔진음은 엔진폭발성분에 의한 기본 차수(main order), 반차수(half orders) 및 배수 차수들(harmonic orders)로 구성이 된다. 또한, 음악화음은 각 악기가 가진 고유진동수가 반영되어 특정한 음색을 띠게 되고, 유사하게 차량엔진음은 엔진과 각종 기계 부품이 가진 고유진동수가 반영되어 특정 주파수가 강조됨으로 인해 차량 고유한 음색을 띠게 된다. Table 1에는 12음계법의 각 음계와 주파수 및 엔진차수간의 상호관계를 보이고 있다. 기본 음계(main tone)를 어느 엔진차수와 같게 설정하느냐에 따라 상관관계는 각기 다르게 나오는데 여기서는 C3 음계를 엔진의 기본 차수(4기통은 2차수, 6기통은 3차수)와 같게 설정한 경우이다. 화성학기법과 엔진음을 연계시키기 위해서는 절대화음이 아니라 상대화음을 이용해야 한다. 즉, 차량이 가속을 하게 되면 rpm이 변하므로, 그 기본차수는 유지하더라도 그 주파수는 변하게 된다. 변화된 rpm에서 여전히 같은 화음을 유지하는 것이 필요하므로 이전 rpm에서의 음계는 변화된 rpm에서도 같은 음계로 재설정 이 되고, 다시 얘기하면 가속하는 엔진음은 음악적으로 계속 조변경을 하는 경우와 같다고 할 수 있다. 예를 들어, 3,924 rpm에서 엔진 2차수와 엔진 3차수는 131 Hz 및 196 Hz로서 각기 C3 음계와 G3 음계이며, 계이름으로는 도와 솔에 해당하는 완전5도 화음에 해당한다. 여기서 4,404 rpm으로 가속하면 주파수가 변하면서 절대음계로는 D3 음계와 A3 음계가 되지만, 조변경을 했다고 가정하고 여전히 C3 음계와 G3 음계로 구성이 된 상대음계 화음으로 계산하는 것이다.

(2) 화성학 기법을 이용한 A형 목표음 설정

앞 절에서 소개한 음악화음에 의한 화성학 기법을 이용하여 2.2절에서 설명한 K사의 브랜드 정체성을 표현하는 목표음을 만들고자 하였다. 즉, K사의 다채롭고 활력이 넘치는 사운드를 표현하기 위해

Table 1 Comparison between musical tones and engine orders(when C3 tone corresponds to main order)

Main tones	Frequency (Hz)	Engine order		
		4-cyl.	6-cyl.	8-cyl.
C3	130.8	2.00	3.00	4.00
D3	146.8	2.24	3.37	4.49
E3	164.8	2.52	3.78	5.04
F3	174.6	2.67	4.00	5.34
G3	196.0	3.00	4.49	5.99
A3	220.0	3.36	5.05	6.73
B3	246.9	3.78	5.66	7.55
C4	261.6	4.00	6.00	8.00
D4	293.7	4.49	6.73	8.98
E4	329.6	5.04	7.56	10.08
F4	349.2	5.34	8.01	10.68
G4	392.0	5.99	8.99	11.99
A4	440.0	6.73	10.09	13.45
B4	493.9	7.55	11.33	15.10
C5	523.3	8.00	12.00	16.00
D5	587.3	8.98	13.47	17.96
E5	659.3	10.08	15.12	20.16
F5	698.5	10.68	16.02	21.36
G5	784.0	11.99	17.98	23.97
A5	880.0	13.45	20.18	26.91
B5	987.8	15.10	22.65	30.20
C6	1046.5	16.00	24.00	32.00

완전8도/완전4도/완전5도와 장3도를 조합하고 계류4 화음(sus4 chord)을 적절히 가미하였다. 먼저 2,000 rpm 이하 저속에서는 완전8도와 장3도 화음 위주로 구성된 C3/C4/E4/E5 음계를 사용하였고, 이를 엔진 차수와 연결시키기 위해 4기통 엔진의 경우에는 엔진 2차/4차/5차/10차를 강화하고, 6기통 엔진의 경우에는 엔진 3차/6차/7.5차/15차를 강화하였다. 다음으로 2,000~4,000 rpm 이하 중속에서는 완전5도와 완전4도로 이루어진 계류4화음(sus4 chord)을 가미하고자 F3/C4/G4/C5 음계를 사용하였고, 이를 엔진차수와 연결시키기 위해 4기통 엔진의 경우에는 엔진 2.5차/4차/6차/8차를 강화하고, 6기통 엔진의 경우에는 4차/6차/9차/12차를 강화하였다. 마지막으로 4,000 rpm 이상의 고속에서는 완전8도와 완전5도 및 장3도 위주로 구성된 C3/C4/G4/E5/G5 음계를 사용하였고, 이를 엔진차수와 연결시키기 위해 4기통 엔진의

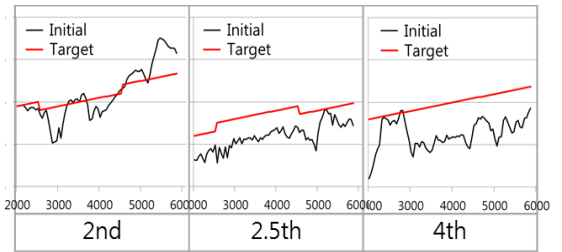


Fig. 5 Target sound level estimated from a harmonics method depending on engine orders of 4-cylinders

경우에는 엔진 2차/4차/6차/10차/12차를 강화하고, 6기통 엔진의 경우에는 3차/6차/9차/15차/18차를 강화하였다. Fig. 5에는 상기의 방법으로 선정된 4기통 엔진의 A형 목표음에 대하여 rpm 축에서 일부 엔진 차수의 선도를 도시하고 있다. 흑색은 초기차량의 주행음 레벨을 적색은 목표음 레벨을 표시한다.

(3) 화성학 기법을 이용한 B형 목표음 설정

이번에는 화성학 기법을 이용하여 앞절의 목표음과 차별화하면서 간결하고 완벽하고 편안한 느낌을 전달하는 B형 목표음을 설정하고자 하였다. 이를 위해 완전8도/완전4도/완전5도 등 으뜸화음(tonic chord) 위주로 목표음을 구성하였다. 먼저 2,000 rpm 이하 저속에서는 완전8도와 장3도 화음 위주로 구성된 C3/C4/C5/E5 음계를 사용하였고, 이를 엔진차수와 연결시키기 위해 4기통 엔진의 경우에는 엔진 2차/4차/8차/10차를 강화하고, 6기통 엔진의 경우에는 엔진 3차/6차/12차/15차를 강화하였다. 다음으로 2,000~4,000 rpm 이하 중속에서는 완전8도와 완전5도 및 장6도를 추가하여 C3/C4/G4/E5 음계를 사용하였고, 이를 엔진차수와 연결시키기 위해 4기통 엔진의 경우에는 엔진 2차/4차/6차/10차를 강화하고, 6기통 엔진의 경우에는 3차/6차/9차/15차를 강화하였다. 마지막으로 4,000 rpm 이상의 고속에서는 완전8도와 완전4도 위주로 구성된 G3/C4/G4/G5 음계를 사용하였고, 이를 엔진차수와 연결시키기 위해 4기통 엔진의 경우에는 엔진 3차/4차/6차/12차를 강화하고, 6기통 엔진의 경우에는 4.5차/6차/9차/18차를 강화하였다. 이렇게 구성된 목표음은 청음평가 결과, 완전화음 위주로 구성이 되어 매우 조화롭고 편안한 느낌을 주는 것을 확인하였다.

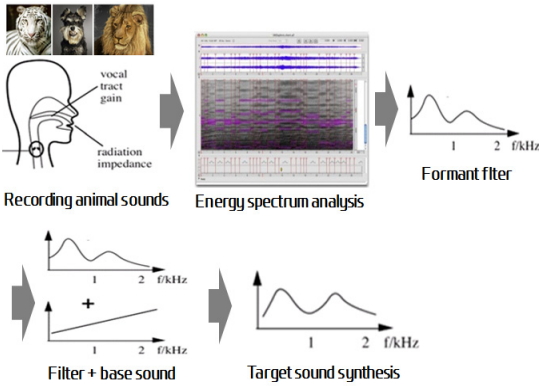


Fig. 6 Process of a target sound synthesis based on a formant filter

3.2 포먼트 필터에 의한 주행음 개발

(1) 포먼트 필터의 소개

포먼트 분석법은 음운론 연구 및 음성인식 등을 위해 음의 발생과정 및 특징을 분석하는 기법이다. 과거 포먼트 분석 및 합성법을 이용하여 컴퓨터의 음성인식 알고리즘을 개발하거나 음원을 합성하는 연구 등이 수행된 사례가 있다^(7,8). 이 연구에서는 동물의 울음소리가 갖는 조음특성에 착안하여 차량 컨셉에 걸맞는 동물을 선정 한 후, 그 상대구조의 고유진동수와 연관된 포먼트 필터를 추출하여 이로부터 목표 주행음을 합성하는 기법을 개발함으로써, 고객이 주행음을 듣는 것만으로 선정된 동물을 연상할 수 있도록 하였다. Fig. 6에는 개념적인 알고리즘을 도시하고 있다.

(2) 포먼트 필터를 이용한 목표음 설정

먼저 스포티한 차량 컨셉에 맞는 동물로서 호랑이를 선택하고, 그 호랑이 울음소리들의 파워스펙트럼으로부터 포먼트 필터를 추출하였다. Fig. 7의 파워스펙트럼에서 나타나듯이, 에너지가 가장 큰 몇 개 주파수 대역 중 특히 710 Hz 부근 대역이 가장 크게 강조되었는데, 이 주파수는 호랑이 성대 공명과 연관된 것으로 추정된다. Fig. 8에는 추출한 포먼트 필터의 주파수응답함수를 도시하고 있다.

3.3 목표 주행음의 정제 과정

위의 과정을 거친 목표 주행음에 대하여 고객의 선호도를 고려하여 추가적인 목표음 합성 과정을

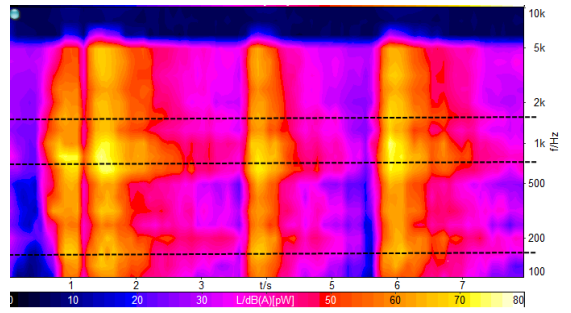


Fig. 7 Power spectrum of a tiger's cry for estimating a formant filter

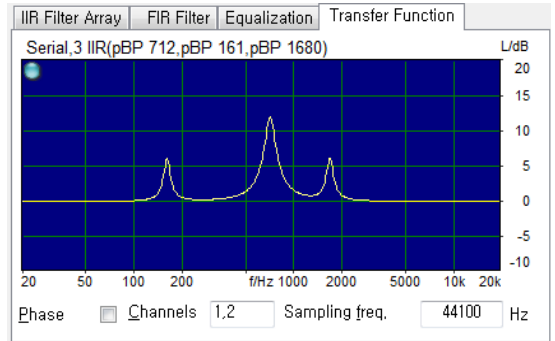


Fig. 8 Frequency response function of the estimated formant filter

수행하였다. 즉, 저급스러운 부밍음, 거슬리는 이음, 고주파 성분, 비선형적인 음색 등의 유무를 확인하여 이러한 성분을 필터로 제거함으로써 음질을 고급화하고 정제하였고, 이로써 최종적인 목표 주행음을 도출할 수 있었다.

4. 목표 주행음 합성 및 실차 검증

4.1 목표 주행음 합성 결과

앞서 3.1절의 화성학적인 방법으로 1차 도출된 목표음에 3.2절의 포먼트 필터를 추가하여 목표음을 갱신하고, 다시 3.3절의 정제 과정을 거쳐서 최종적으로 4기통과 6기통 엔진 각각에 대한 목표음을 합성할 수 있었다. 기존의 초기음이 저음만 두드러졌던 반면, 최종 합성된 목표음은 Fig. 9와 같이 각기 원하는 차수가 균형있게 강조되고, 특히 포먼트 필터에 의해 특정 주파수 대역이 더욱 강조되며, 고주파 이음이 감소된 것으로 나타났다.

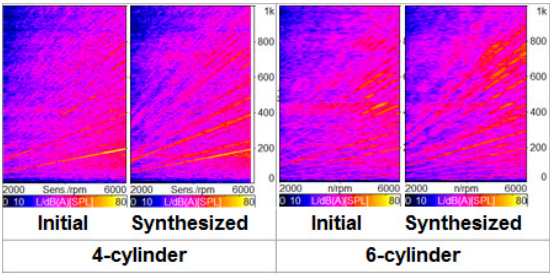


Fig. 9 Sound comparison between the initial and synthesized target

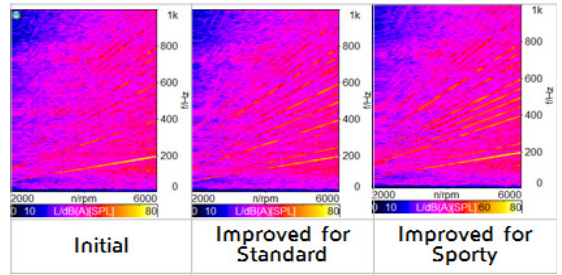


Fig. 11 Vehicle noise test using ANC/ASD

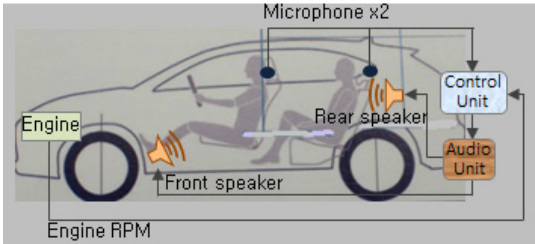


Fig. 10 Active noise control system of a vehicle

4.2 능동소음제어 시스템을 이용한 목표음 구현

(1) 실차 능동소음제어 시스템의 구성

차량에서 엔진회전수 등 주행 정보를 읽고, 실내 전·후석에 위치한 마이크로폰에서 오차신호를 실시간 받아들여서, 제어기에서 적응제어 로직으로 필터값을 업데이트한 후, 오디오 앰프 및 스피커로 제어신호를 내보내는 능동소음 제어/재생 시스템(ANC/ASD: active noise control, active sound design)을 활용하여 목표 주행음을 구현코자 하였다⁹⁾. Fig. 10에 일반적으로 사용되는 능동소음제어 시스템의 구성도를 도시하였다.

(2) 목표음 구현

4.1절의 합성음을 제어 목표로 두고, 차량 스피커를 통한 능동소음제어 시스템을 적용하여 4기통 중형차에서 목표음의 적정성을 확인하였다. 이때 초기 대비 음량을 저감하거나 증가하는 과정에서 FxLMS 알고리즘에 기반한 능동소음저감 및 목표음 추종 로직을 적용하였다. 실차 주행 시 초기값이 목표음 합성시 초기값과 다르기 때문에 주행 시 주관적인 음질 평가를 기준으로 차수별 목표값에 대한 미세 조정 과정을 거쳐서 표준형 목표음을 만들었고, 이를 좀더

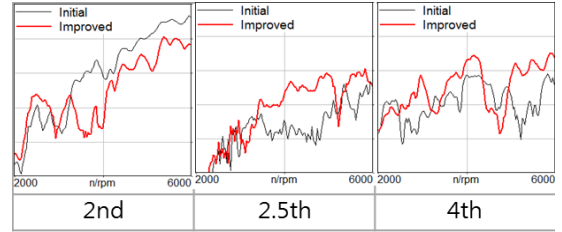


Fig. 12 Order level of a vehicle noise using ANC/ASD

강화한 스포티형 목표음을 추가로 만들었다. 이 두 가지 목표음을 각기 능동소음제어 시스템으로 실차에서 구현한 후 차량에서 측정한 결과를 초기값과 함께 Figs. 11, 12에 비교하였다. Fig. 12는 표준형 목표음에 대하여 제어 대상 8개 차수중 3개만 비교하였는데, 개선결과를 보면 2차 성분의 중~고rpm 대역은 음량이 줄고, 2.5차의 중rpm 대역은 음량이 증가하며, 4차 성분은 중~고rpm 대역에서 음량이 증가하는 것이 Fig. 5의 목표값을 비교적 잘 추종하는 것을 볼 수 있다. 결과적으로 이 연구를 통해서 초기 대비 브랜드 이미지 및 차량 컨셉에 잘 어울리는 주행 음질을 구현할 수 있었다.

5. 결 론

이 연구를 통해 화성학과 포먼트 필터를 이용하여 목표 주행음에 브랜드 정체성과 차량 컨셉을 반영하는 목표음 설정 기술을 개발하였고, 실차에서 능동소음 제어/재생 시스템을 이용하여 그 타당성을 검증하였다.

References

(1) Terazawa, N. and Wakita, T., 2004, A New

Method of Engine Sound Design for Car Interior Noise Using a Psychoacoustic Index, SAE Technical Paper, 2004-01-0406.

(2) Cerrato, G., 2009, Automotive Sound Quality - Powertrain, Road and Wind Noise, Sound and Vibration, Vol. 43, No. 4, pp. 16~24.

(3) Bray, W., Lake, S. and Blommer, M., 2011, Sound Quality, SAE NVC 2011 Workshop.

(4) Schulte-forkamp, B., Genuit, K. and Fiebig, A., 2007, A New Approach for Developing Vehicle Target Sounds, Sound and Vibration, Vol. 41, No. 10, pp. 12~17.

(5) Alt, N. W. and Jochum, S., 2003, Sound Design under the Aspects of Musical Harmonic Theory, SAE Technical Paper, 2003-01-1508.

(6) Yoon, T. G. and Park, D. C., 2012, Musical Harmonic Theory Analysis of Automotive Interior Noise, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 358~363.

(7) Kim, U. S. and Bae, K. S., 1991, A Study on The Formant Speech Synthesis By Analysis, IEIE Conference(Signal Processing), Vol. 4, No. 1, pp. 440~443.

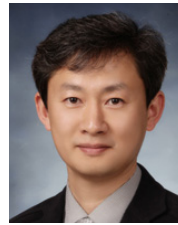
(8) Choi, J. S., 2013, Formant Enhancement Algorithm of Speech Using Auditory Filter, J. of Advanced Information Technology and Convergence, Vol. 11, No.

7, pp. 173~178.

(9) Kim, E.-Y. and Lee, S.-K., 2012, Design of a New VSS-adaptive Filter for a Potential Application of Active Noise Control to Intake System, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 2, pp. 146~155.



Kyoungh-Jin Chang received the B.S., M.S., Ph.D. degrees in Mechanical Engineering from Yonsei University, Korea in 1993, 1995, 1999, respectively. Currently, he is a global R&D master at Hyundai Motor Company. His research focuses on the noise and vibration control of a vehicle using both active and passive technique.



Dong Chul Park received the B.S., M.S., Ph.D. degrees in Mechanical Design Engineering from Seoul National University, Korea in 1990, 1992, 1996, respectively. Currently, he is a research fellow at Hyundai Motor

Company. His research focuses on vehicle sound quality and sound designing.