

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.10.923>ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

전기자동차의 경고음에 대한 인지성 평가

한 만 옥* · 이 상 권*†

* 인하대학교 기계공학과

Detectability Evaluation for Alert Sound in an Electric Vehicle

Man Uk Han* and Sang Kwon Lee*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Inha Univ.

(Received April 4, 2017 ; Revised June 21, 2017 ; Accepted July 5, 2017)

Key Words: Electric Vehicle(전기자동차), Warning Sound(경고음), Chord(화성), Detectability(인지성)

초록: 모터로 구동되는 전기자동차에서 발생하는 소리의 특징은 일반적으로 내연기관 자동차보다 음압이 낮아, 보행자에게 접근하는 차량을 인지 못하는 경우가 종종 발생한다. 따라서 전기자동차에 추가적인 경고음이 필요하다. 잘 들리는 경고음을 개발하기 위해, 이번 연구에서는 화성학 이론과 신호처리를 기초로 제작하였다. 도로에서 측정된 배경소음은 합성된 신호에 추가되었다. 주관적 평가로 이 경고음의 인지성을 측정하였다. 심리음향 이론과 주관적 평가를 통해 인지성과 관련된 요소를 조사하였다. 라우드니스, 샤프니스, 러프니스 등 알려져 있는 심리음향 지표는 인지성과 낮은 상관성을 가졌지만, 반대로 음의 지속구간에 높은 상관성이 있음을 발견하였다.

Abstract: Generally, the sound emitted from a vehicle powered by an electric motor is lower than that of internal combustion engine vehicles. Therefore, pedestrians often cannot detect approaching electric vehicles. Therefore, a certain additional warning sound is required for these types of automobiles. In this study, to develop an audible warning sound, nine warning sounds are designed based on signal processing and chord theory. The background noise measured on the road is also added to these synthetic sounds. The detectability of these warning sounds is evaluated by subjective tests. The sound metric is correlated to detectability and is investigated through psychoacoustic theory and subjective evaluation. It is determined that known psychoacoustic parameters such as loudness, sharpness, and roughness have a low correlation with detectability. However, it is found that the interval of harmonic sound correlates well with detectability.

1. 서론

전기자동차(Electric Vehicle; EV)는 30km/h보다 낮은 속도로 주행 시 기존 내연기관 자동차(Internal Combustion Engine; ICE)보다 낮은 소음을 발생하게 된다.^(1,2) 속도가 점점 증가하면서 40km/h 근처에서 타이어 소음으로 인해 내연기관과 비슷한 크기의 소리를 발생시킨다.

전기자동차의 낮은 소음은 내연기관 자동차로 인한 소음공해를 줄일 수 있게 되었지만, 상대적으로 낮은 소음은 내연기관 자동차에 익숙한 보행

자들에게 잠재적 위험요소가 되었다. 통계조사에 따르면, 조사 당시 전기자동차의 판매 수준이 낮았음에도 보행자 혹은 자전거 탄 사람의 전기자동차에 의한 사고는 심각히 높은 수준으로 보고되었다.⁽³⁾ 보행자의 안전성 확보를 위해 자동차 제조사들은 추가적인 경고음을 제작 및 스피커를 부착하고 있다. 따라서 경고음 개발에 관한 연구가 계속 진행 중이다. 경고음의 개발에 주요한 문제는 경고음의 목적에 부합하는 경고음에 대한 보행자의 인지성(Detectability)과 경고음으로 인한 외부 환경소음의 증가가 보행자들을 괴롭게(Annoyance) 하지 않아야 한다.⁽⁴⁾ 그러므로 보행자를 위한 전기 자동차의 경보음은 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 소음 공해가 발생하지 않으면서 인지성을 높이는 방

† Corresponding Author, sangkwon@inha.ac.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

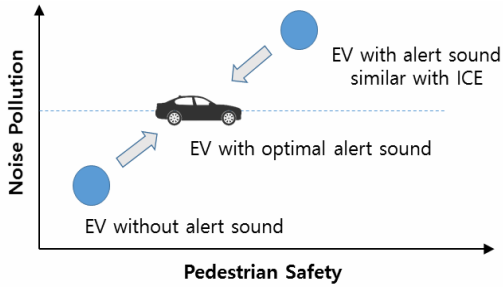


Fig. 1 Consideration for the design target of warning sound for pedestrians' safety and noise pollution

향으로 설계되어야 한다.⁽⁵⁾ 현재 진행 중인 전기자동차의 경보음은 주로 음의 주파수 변조(Frequency modulation)와 크기 변조(Amplitude modulation)를 통해 이루어지고 있다.⁽⁶⁾ 본 연구에서는 화성학을 기초한 경고음을 설계하고자 한다. 설계된 경고음에 대한 인지성 확보를 위해서 경고음 인지성 대한 주관 평가를 실시한다. 인지성의 주관 평가 결과가 심리음향과 화성학 관점에서 전기자동차의 경고음이 어떤 특성이 있는지를 연구하여 인지성이 높은 신호의 특징을 찾아서 향후 실제 경고음 설계에 도움을 주고자 한다.

2. 경고음 설계

화성학에 근거한 전기자동차 경고음의 주요 설계요소로서는 음을 구성하는 하모닉 성분들의 주파수, 음의 크기, 음의 지속 구간(Interval) 등이 주요 요소이다. 본 연구에서 화성학에 근거하여 이러한 요소들을 설계하고 청음평가를 통해서 인지성을 검증하였다.

2.1 화성학 기초한 경고음의 주파수 설정

경고음을 구성하는 음의 주파수 성분에 대한 결정은 매우 중요하다. 특히 보행자는 청력에 영향을 받지 않고 경고음을 인지할 수 있어야 한다. 따라서 1.5kHz 아래의 청력역치(Hearing threshold)는 나이에 크게 영향을 받지 않으므로, 경고음의 주파수 구간은 0.5kHz에서 1.5kHz 사이에 존재하도록 5 옥타브(octave) 구간으로 설정하였다.⁽⁷⁾ 화성학에서 3도 화음은 서로 다른 3개의 주파수 성분을 갖는 음으로 구성된다. 화성학에서 단음은 주파수가 한 개로 구성된 순음이다. 2도 화음은 2개의 주파수 성분을 갖는 음으로 구성된다. 본 연구에서는 단음, 2도 화음 그리고 3도 화음에 해당하는 주파수 성분들을 각각 f_1 , f_2 그리고 f_3 으로 표현하였다. 단음, 2도 화음, 3도 화음에 해당하는 음들의 주파수 조합 형태는 다양하다. 본 연구에

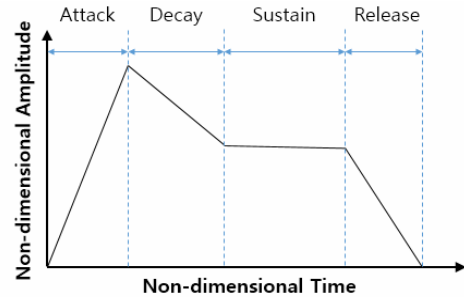


Fig. 2 Envelope of attack decay sustain release(ADSR)

서는 다양한 화음 조합을 가진 20개의 신호를 제작하여 청음평가를 통하여 진행하였으며, 청음평가의 점수가 높은 음을 선정하였다. 이 결과 단음은 G음, 2도 화음은 C와 D# 조합의 음, 3도 화음은 C-F-G 조합의 음을 선정하였다. 청음평가는 건강한 청력을 가진 성인 25명(남자 16명, 여자 9명)을 모집하여 진행하였다. 청음평가 방법은 자동차 음질평가에 적용되는 레이팅(Rating)⁽⁸⁾ 기술을 사용하였다. 레이팅 기술은 여러 개의 신호를 배열하여 청음평가를 등급화하는 방법이다. 청음평가의 질의어는 불쾌감을 일으키지 않으면서 전기자동차 경고음으로써 적합한 음을 선정하도록 하였다.

2.2 화성학에 기초한 경고음의 크기 및 지속구간 설정

경고음의 크기는 음량과 음색을 결정한다. 음의 신호를 분석하는 음향신호처리기술 관점에서 음의 크기는 경고음 신호에 대한 포락선(Envelope)을 조정하여 음량과 음색을 조절할 수 있다. 특히 음색에 주요한 역할이 되는 음의 크기는 커질수록 주관적 긴급성이 증가하므로 경고음이 없는 전기자동차 음압보다는 크고 내연기관 자동차 보다는 작도록 설계해야 한다.⁽⁹⁾ 본 연구에서는 전자 피아노에 사용되는 ADSR(Attack Decay Sustain Release)⁽¹⁰⁾ 기법을 적용하였다. ADSR은 음의 크기를 나타내는 음의 포락선을 설정하는 기술이다. ADSR을 이용하는 포락선의 형태는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2에서 A(Attack)는 음이 나오기 시작하여 최대 음량에 달하기까지의 시간을 말한다. D(Decay)는 최대 음량에서 지속 음량까지 계속 감소하여 도달하는 시간을 말한다. S(Sustain)는 건반을 누르고 있는 사이에 이 음량이 지속되는 지속음 레벨을 의미한다. R(Release)는 손가락을 건반에서 떼 후, 음이 줄어들어 없어질 때까지의 시간을 말한다. 이들 시간을 조합하여 음의 크기변화를 결정하는 지속 구간을 선정하여 다양한 음의 크기 변

Table 1 Design parameters for nine warning sounds

No.	Frequency(Hz)	Interval
1	$f_1 = 783$	Intv1 (AD)
2	$f_2 = 523, 622$	Intv2 (ADS)
3	$f_3 = 523, 698, 783$	Intv3 (ADSR)
4	$f_1 = 783$	Intv3 (ADSR)
5	$f_2 = 523, 622$	Intv1 (AD)
6	$f_3 = 523, 698, 783$	Intv2 (ADS)
7	$f_1 = 783$	Intv2 (ADS)
8	$f_2 = 523, 622$	Intv3 (ADSR)
9	$f_3 = 523, 698, 783$	Intv1 (AD)

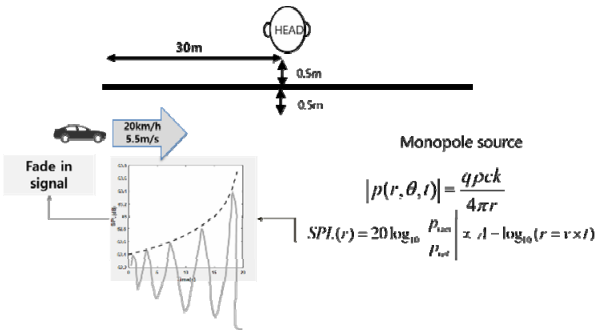


Fig. 3 Fade in model simulating the approach of an electric vehicle

화를 가진 경고음을 제작할 수 있다.⁽¹¹⁾ 본 연구에서는 지속 음량과 잔향이 없는 AD 구간(Intv1), 잔향만 없는 ADS 구간(Intv2), 그리고 전체 ADSR 구간(Intv3) 이렇게 3 구간의 포락선 수준을 적용하였다.

2.3 경고음 설계 제작

경고음의 제작을 위해한 주파수 구성은 단음 주파수 f_1 , 2도 화음 주파수 f_2 , 3도 화음 주파수 f_3 를 적용하였고, 경고음의 크기와 지속구간을 위하여 3가지 지속구간 Intv1, Intv2, Intv3를 적용하였다. 따라서 Table 1에서 보여 주는 바와 같이 총 9가지 조합으로 구성된 전기자동차용 경고음을 제작하였다. 본 경고음 제작을 위해서 상용 프로그램 MATLAB을 이용하였으며 샘플링주파수(Sampling frequency)는 일반적으로 전자음향에서 사용하는 44.1 kHz 를 적용하였다. 전기 자동차 차량의 접근 인지성 평가에 사용되는 주행 소음은 20km/h 주행시 약 6초이므로 신호 길이는 6초로 하였다.⁽⁹⁾

2.4 차량 접근용 신호 모델

보행자에게 접근하는 차량을 표현하기 위해 제작된 9개의 경고음에 대하여 Fig. 3에서 보여주는

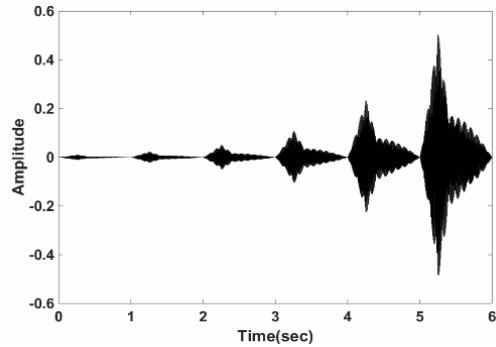


Fig. 4 Time history of the warning sound simulating the approach of an electric vehicle

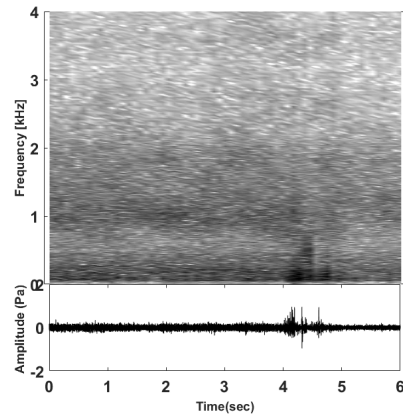


Fig. 5 Short time Fourier transform for the background noise measured at road

바와 같은 페이드 인(fade in) 모델을 적용하였다.⁽¹²⁾ 속도 변화에 따라서 음원이 청음자에게 접근하는 음압레벨을 음향학적 이론을 이용하여 모델링 하였다. 따라서 접근 시간에 따라 일정하게 커지는 선형 곡선 모형이 아닌 지수 곡선 모형 (Exponential Curve Shape)을 적용하여 청음자에게 전기자동차가 빠르게 접근함을 인식하는 모델이다. Fig. 4는 제작된 경고음으로 Table 1의 3번에 해당하는 신호에 페이드 인 모델을 적용하여 보행자에게 접근하는 신호를 모델링한 것이다.

2.5 배경소음 및 차량접근 신호

일반도로에는 주변 환경에 기인한 배경소음이 존재하므로 도로에서 측정된 배경소음을 제작된 경고음 신호에 반영하여 최종 신호를 제작하였다. 배경소음은 매우 다양하므로 배경소음의 다양성에 대한 연구는 본 연구에서 제외하였고 일반적인 도로소음 만을 반영하였다. Fig. 5는 일반도로에서 측정된 배경소음 신호에 대한 STFT(Short Time Fourier Transform) 결과이다.⁽¹³⁾ STFT는 신호의 시간에 따른 주파수 변화와 음압 정보의 변동을 알

수 있다. Fig. 5에 의하면 측정된 배경소음을 제작된 9개 경고음에 추가하여 배경소음을 고려한 경고음을 제작하였다. 측정된 환경소음은 4초 주변에 다른 차량의 소음발생으로 인해서 저주파에서 음압이 증가함을 볼 수 있다. 이러한 배경소음을 고려한 9개 전기차의 경고음에 대한 주관적 인지성평가를 청음평가를 통하여 실시하였다.

3. 청음평가

3.1 청음평가 방법

청음평가의 신뢰성과 정확성을 확보하기 위해서 자동차의 청음평가에 일반적으로 많이 활용되는 되는 N. Otto에 의해 제시된 청음평가 세부 절차를 적용하여 진행하였다.^(8,14) 총 25명 대학생이 참여했으며, 청음평가자 모두 건강한 청력을 가진 성인 남자 16명과 여자 9명이다. 청음평가자들의 평균 나이는 25명이고 표준편차는 1.9살이다. 이번 청음평가는 평가자가 보행자로서 새로운 경고음에 대한 인지성을 확인하는 실험이다.

실험의 목적과 방법 그리고 제작한 신호에 대한 이해가 충분히 될 때까지 설명하였다. 소음이 없는 청음실 환경에서 청음평가자는 컴퓨터 앞에 앉아 100cm 떨어진 곳에 설치된 2채널의 스피커로 청음평가를 진행하였다. 청음평가 프로그램은 Fig. 6과 같이 Matlab GUI를 이용하여 제작하였다. 가장 왼쪽 버튼(▶)은 합성한 배경소음과 신호를 재생한다. 재생순서는 9개 신호를 랜덤하게 발생하도록 배열하였다. 청음평가자는 신호의 방향성을 파악 후, 인지되는 방향과 상응하는 Left, Right 버튼을 누른다. 재생버튼을 누른 순간부터 방향 버튼을 누른 순간까지의 시간을 측정하여 청음평가자의 반응시간을 측정한다. 모든 신호에 대한 평가를 종료 후, SAVE 버튼을 눌러 실험 데이터를



Fig. 6 Program for subjective evaluation of 9 simulated warning sounds

저장한다. 저장데이터는 Table 1에 일치하는 경고음 번호에 대한 청음평가 값이다.

3.2 청음평가 결과

청음평가 결과는 Fig. 7과 같다. 이 결과는 청음평가자들 모두 방향은 정확히 인지하였으므로, 방향성을 제외한 반응시간에 대한 인지성 평가를 나타낸다. 수직직선은 각 경고음에서 인지시간에 대한 편차를 나타내며 중간 값은 평균치를 나타낸다. 인지시간이 가장 빠른 신호는 5번과 8번이며, 가장 늦게 인지하는 신호는 4번이다.

Fig. 8은 청음평가자의 반응시간 데이터를 이용하여 20km/h로 접근하는 차량의 거리에 따른 인지성 평가 시간이다. 왼쪽 노란색 막대는 평가자가 인지하기 전까지 차량이 접근한 거리이다. 오른쪽 남색 막대그래프는 전체 길이 30m에서 평가자가 인지하기 전까지 움직인 자동차의 거리와의 차이를 의미한다. 오른쪽 열은 적색 부분은 보행자와 자동차 사이의 거리가 7.5m 이내 지역으로 최소한 보행자는 이전에 자동차를 인지해야 한다. 3번과 4번 신호는 평가자들이 평균적으로 7.5m 이내에 인지하므로 경고음으로써 적합하지 않다. 평가자들의 평균적으로 빠르게 인식하면서 낮은 표

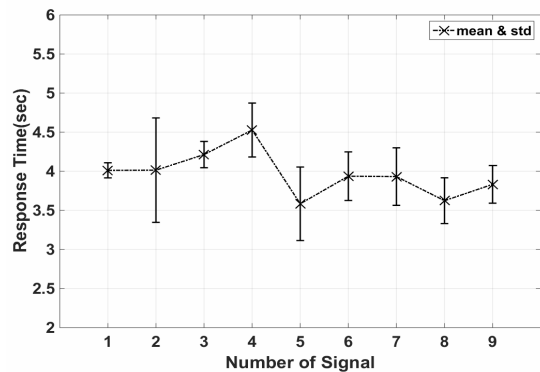


Fig. 7 Subjective evaluation for response time recognizing 9 warning sounds

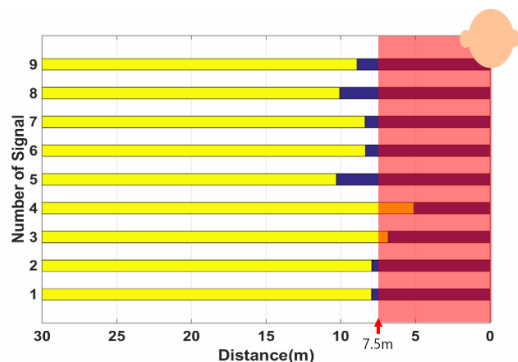


Fig. 8 Detectability evaluation of approaching vehicles

준편차를 보이는 8번 신호가 경고음으로써 가장 적합하다. 청음평가 결과를 Table 1에서 보여주는 신호의 주파수와 지속구간을 비교하였다. 지속구간은 주파수 화성에 따라 다른 결과를 보인다. 그러나 2도 화음 f_2 를 가지는 2번 5번 8번 신호는 평균적으로 높은 인지성을 보였다. 2번의 2도화음에 대한 청음평가의 편차를 감안하면 5번 8번이 경보음으로 적절하다.

3.3 심리음향 음질 요소(Pschoacoustic parameter)

심리음향 음질요소는 사람이 듣는 청감을 객관적으로 평가하는 요소이다. 라우드니스(loudness)는 소리의 크기에 관한 음질 요소이며 샤프니스(sharpness)는 날카로운 느낌에 대한 음질 요소이며 그리고 러프니스(roughness)는 거친 느낌에 대한 음질 요소이다.⁽¹⁵⁾ 아래 항에서 각 음질 요소에 대해서 간단히 설명하였다.

3.3.1 라우드니스(loudness)

라우드니스(loudness)는 주관적인 소리의 크기를 의미하는 음질 요소이며 이 논문에서는 Zwicker 모델을 사용하였다.

$$\text{If } L \geq 40\text{dB}, N = 2^{\frac{L-40}{10}} \text{ (sone)}$$

$$\text{If } L < 40\text{dB}, N = \left(\frac{L}{40}\right)^{2.86} - 0.0005 \text{ (sone)}$$

라우드니스는 폰(phon)과 손(sone) 단위를 사용하며, 1손은 1kHz에서 40dB를 가지는 순음의 라우드니스 값이다.

3.3.2 샤프니스(sharpness)

샤프니스(sharpness)는 비 라우드니스의 주파수 분포에 의해 결정되며, 이 논문에서는 Bismarck의 계산 모델을 사용하였다.⁽¹⁶⁾ 샤프니스의 계산 모델은 다음과 같다.

$$S = 0.11 \times \frac{\int_0^{24\text{Bark}} N'zg(z) dz}{\int_0^{24\text{Bark}} N'dz} \text{ (acum)}$$

여기서 N은 하나의 임계 대역에 해당하는 라우드니스 값을 말하며, g(z)는 weight factor 0.006e0.17z, z는 critical band rate이다. 샤프니스의 단위는 acum이며, 1 acum은 60dB, 1kHz의 순음의 지각량을 의미한다.

3.3.3 러프니스(roughness)

20Hz 이상으로 진폭 또는 주파수 변조되는 소

Table 2 Correlation between psychoacoustic parameter and subjective evaluation for detectability

No.	Detection time(sec)	dB(A)	loudness (sone)	sharpness (acum)	roughness (asper)
1	4.01	62.4	9.81	0.14	1.16
2	4.68	60.3	8.95	0.34	0.81
3	4.21	69.9	19.06	0.39	0.93
4	4.52	62.2	8.30	0.01	0.93
5	3.58	65.5	10.21	0.30	0.92
6	3.93	52.9	7.27	0.28	0.70
7	3.87	53.9	4.62	0.02	0.91
8	3.62	55.6	6.28	0.23	0.64
9	3.83	67.2	15.43	0.68	0.90
Correlation Coefficient (%)		14.39	11.63	22.72	1.4

음의 경우, 음의 크기 변화를 느끼지 못하며, 전체적인 거친 느낌을 제공한다. 이와 같은 청감을 러프니스(roughness)로 정의하며, 단위는 asper를 사용한다.

$$R = 0.3 \times \frac{f_{mod}}{\text{kHz}} \times \int_0^{24\text{Bark}} \frac{\Delta L_E(z) dz}{\text{dB/Bark}} \text{ (asper)}$$

1 asper는 1kHz 순음이 70Hz의 변조 주파수로 100% 크기 변조될 때의 거친 정도를 나타낸다.

3.4 경고음 인지 반응시간과 상관성 분석

Table 2는 청음평가를 통하여 얻은 9개 경고음에 대한 평균인지반응시간과 계산된 음질요소에 대한 결과를 나타낸다. 또한 청음평가 결과와 음질요소에 대한 상관성을 나타낸다. 이 결과에 의하면 청음평가와 dB(A), 라우드니스, 러프니스, 샤프니스 각각의 상관도는 14.39%, 11.63%, 22.72%, 1.4%이다. 이 들 음질요소는 70% 미만으로 인지성과 거의 관련이 없다. 음의 크기와 관련 있는 dB(A)와 라우드니스는 상관도가 낮으므로 반드시 소리가 크다고 차량의 접근을 빠르게 인지하지 않음을 알 수 있다. 따라서 음압이 높지 않으면서 즉 소음공해가 적으면서 인지성이 높은 경고음 제작의 가능성이 확인하였다.

4. 결과 분석

4.1 분산분석

인지성과 관련된 인자를 찾기 위해, 두 설계요소인 화성과 관련된 주파수 및 크기의 변화에 관련된 지속구간에 관하여 청음평가 결과를 분산분

Table 3 Design factors effects (ANOVA)

Design Factor	Frequency	Interval	Freq × Intv
Effectiveness	0.298	0.023	0.001*

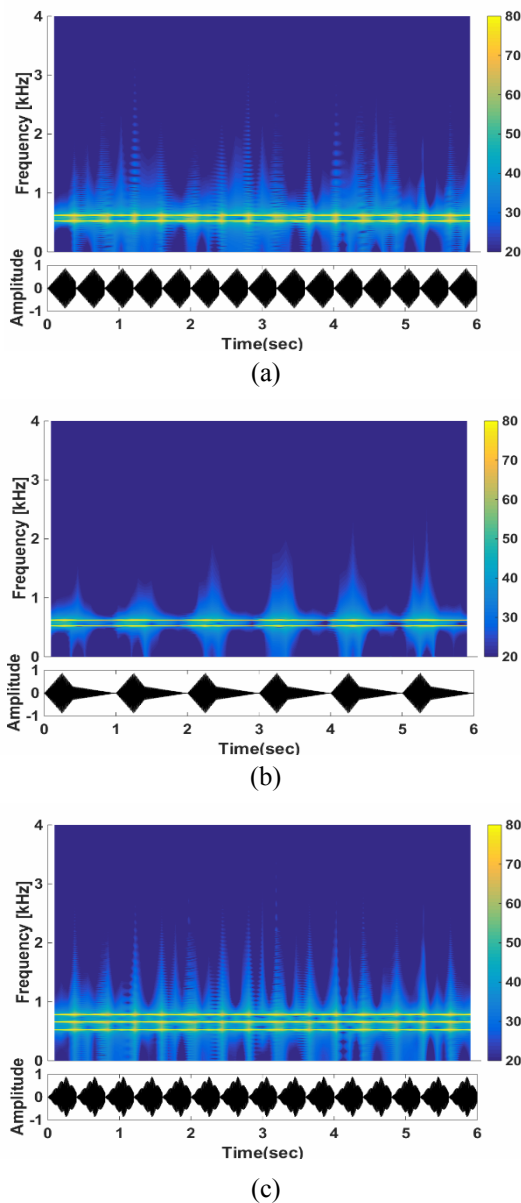


Fig. 9 Short time Fourier transform for three waning sounds with high detectability (a) Sound no. 5 (f_2 , AD) (b) sound no. 8 (f_2 , ADSR) (c) Sound no. 9 (f_3 , AD)

석 하였다. 통계 프로그램 SPSS를 이용하여 종속 변수인 반응성에 대하여 분산분석을 한 결과 유의 확률(p-value)은 다음 Table 3과 같다. 통계 분석결과 두 요소 각각의 유의확률은 0.01보다 크므로, 반응성은 단독적으로 반응시간에 유의하지 않다. 그러나 주파수와 지속구간의 교호작용은 유의 확

률이 0.001로 0.01보다 작으므로 유의하다. 즉 두 설계요소는 청음평가자의 반응성에 단독적인 영향보다 두 설계요소의 교호 작용이 반응시간에 영향과 관련 있다.

4.2 시간 주파수 분석

Fig. 9는 청음평가 결과 인지성이 우수한 5번, 8번, 9번 신호에 대한 STFT(Short Time Fourier Transform) 결과를 나타낸다. 화성 관점에서 보면 같은 2도 화음 f_2 주파수를 갖는 5번, 8번 신호가 3도 화음 f_3 주파수를 9번 신호보다 인지성이 다소 높다. 그리고 지속 구간 관점에서 보면 같은 2도 화음으로 구성된 신호이지만 Intv3인 8번 신호가 Intv2인 5번 신호보다 더 인지성이 우수하다.

이는 지속기간이 다소 길어서 심리음향학 관점에서 시간 마스킹 효과에 기인한 것으로 Release 구간 동안 post-masking 효과가 존재하는 것으로 판단 된다.^(12,17)

5. 결론

본 연구는 화성학을 기초로 경고음의 주파수와 지속구간을 설정하여 전기자동차에 적용되는 9개의 경고음을 설계 제작하는 방법을 제시하였다. 또한 실제 도로의 배경소음⁽¹⁸⁾에 대한 전기자동차의 접근성을 고려하여 최종적으로 9개의 청음평가용 경고음 신호를 제작 후 보행자에 대한 전기차의 접근성에 대한 인지성을 연구하였다. 이들 신호에 대한 청음평가 결과를 활용하여 심리음향적 음질요소인 라우드니스, 러프니스, 샤프니스, dBA 등과의 상관성을 검토하였다. 상관성 검토 결과 심리음향적 음질요소는 경고음의 인지성과 상관성이 매우 낮았다. 실제 경고음의 어떤 특성이 인지성에 영향을 미치는지 확인 하기 위하여 통계 분석을 시행하였다. 분석결과 화성 관점에서는 2도 화음이 단음과 3도 화음 대비 인지성 높았다. 2도 화음 중에서는 지속구간이 긴 경고음이 지속구간이 짧은 경고음 보다 인지성이 상대적으로 높았다. 통계분석 결과에서는 화성과 지속 구간은 상호 교호작용이 존재함을 발견하였다. 본 연구의 결과는 향후 계속 이어지는 전기차의 실제 경고음 설계 연구에 많은 도움이 되리라 사료된다.

후 기

여기에 이 논문은 2015년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2015R1A2A1A15052549).

참고문헌
(References)

- (1) Lee, S. K., Lee, S. M., Shin, T. and Han, M. U., 2017, "Objective Evaluation of the Sound Quality of the Warning Sound of Electric Vehicles with a Consideration of the Masking Effect: Annoyance and Detectability," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 18, No. 4, pp. 699~705
- (2) Zeitler, A., 2012, "Psychoacoustic Requirements for Warning Sounds of Quiet Cars," *SAE Int. J. Passeng. Cars - Electron. Electr. Syst.* Vol. 5, No. 2, pp. 572~578.
- (3) Hanna, R., 2009, *Incidence of Pedestrian and Bicyclist Crashes by Hybrid Electric Passenger Vehicles*, National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), DOT HS 811 204.
- (4) Jacobsen, G. N., Ih, J. G., Song, W. K. and Macdonald, E. N., 2016, "Predicting Detectability and Annoyance of EV Warning Sounds Using Partial Loudness," *Internoise2016*, pp. 1706~1715.
- (5) <http://evader-project.eu>, 2011, *Electric Vehicle Alert for Detection and Emergency Response*, eVADER project, FP7.
- (6) Haas, E.C and Casali, J. G., 1993, "The Perceived Urgency and Detection Time of Multi-tone and Frequency-Modulated Warning Signals," *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Vol. 37, No. 9, pp. 554-548.
- (7) ISO 7029, 2000, *Statistical distribution of hearing thresholds as a function of age*.
- (8) Otto, N., Amman, S., Eaton, C. and Lake, S., 1999, "Guidelines for Jury Evaluation of Automotive Sounds," *SAE Technical Paper*, doi:10.4271/1999-01-1822
- (9) Parizet, P., Ellermeier, W. and Robart, R., 2014, "Auditory Warnings for Electric Vehicles: Detectability in Normal-vision and Visually-impaired Listeners," *Applied Acoustics*, Vol. 86, pp. 50~58.
- (10) Pinch, T. and Frank, T., 2004, *Analog Days: The Invention and Impact of the Moog Synthesizer*, Harvard University Press. ISBN 978-0-674-01617-0.
- (11) Jones, D., 2012, *Music Technology A Level*, Darren Jones, Bournemouth, pp. 147~157.
- (12) Lee, S. K., 2016, Objective Evaluation of Sound Quality in an Electric Vehicle Based on Effect of Temporal and Spectral Masking, *FISITA 2016*, F2016-ETNVH-3.
- (13) Langford, S., 2013, *Digital Audio Editing*, Focal Press, Abingdon, pp. 44~57.
- (14) 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," *Trans. Korean Soc. Noise Vibration. Eng.*, Vol. 23, No. 3, pp. 258~266.
- (15) Zwicker, E. and Fastl, H., 1999, *Psychoacoustics: Facts and Models*, Springer, Berlin, pp. 203~233.
- (16) Bismarck, V. G., 1974, "Sharpness as an Attribute of the Timbre of Steady Sounds," *Acustica*, Vol. 30, No. 3, pp. 159~172.
- (17) Zwicker, E. and Fastl, H., 1999, *Psychoacoustics: Facts and Models*, Springer, Berlin, pp. 61~110.
- (18) Ann, Y. C., Lee, J. H. and Kim, S. H., 2014, "Interior Noise Characteristics of the Electric Trains in Gyeongchun Line," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A*, Vol. 38. No. 7, pp. 817~822.