

# 뇌파 측정을 이용한 차량 깜빡이 소리의 음질 평가

## Sound Quality Evaluation of Turn-signal of a Passenger Vehicle based on Brain Signal

신 태 진\* · 이 영 준\* · 이 상 권†

Tae-Jin Shin, Young-Jun Lee and Sang-Kwon Lee

(Received September 18, 2012 ; Revised October 29, 2012 ; Accepted October 29, 2012)

**Key Words** : Physiological Acoustics(생리음향), Psychological Acoustics(심리음향), Car Sound(자동차 소리), EEG Signal(뇌파)

### ABSTRACT

This paper presents the correlation between psychological and physiological acoustics for the automotive sound. The research purpose of this paper is to evaluate the sound quality of turn-signal sound of a passenger car based EEG signal. The previous method for the objective evaluation of sound quality is to use sound metrics based on psychological acoustics. This method uses not only psychological acoustics but also physiological acoustics. For this work, the sounds of 7 premium passenger cars are recorded and evaluated subjectively by 30 persons. The correlation between this subjective rating and sound metrics is calculated based on psychological acoustics. Finally the correlation between the subjective rating and the EEG signal measured on the brain is also calculated. Throughout these results the new evaluation system for the sound quality on interior sound of a passenger car has been developed based on bio-signal.

### 1. 서 론

승용차의 내부 소리에 대한 음질 평가는 중요한 일이며 지난 십년간 이 주제에 대해 연구가 이루어지고 있다<sup>(1-4)</sup>. 이러한 연구는 오직 심리음향을 바탕으로 연구되어 왔다. 이 방법은 심리음향을 기반으로 개발되었으며 A가중치 된 음압레벨을 이용하는 기존방법에 비해 훨씬 효과적이다. 이런 연구들은 승용차의 내부 소음 음질 개선에 기여를 했지만 평가방법이 인체의 생리적 반응과 직접 관련된 것은 아니다. 이 논문에서는 먼저 소리 신호가 청각 시스

템에서 뇌까지의 소리전달경로를 이해하기 위하여 청각 경로에 대한 해부학의 기초를 소개한다. 두 번째로 자동차 소리에 대한 뇌의 반응을 분석하기 위하여 8개의 전극에서 뇌파(EEG) 신호가 측정된다. 이 신호는 신경계의 어느 부분이 뇌파의 진동과 변동을 발생시키는지 확인하기 위하여 측정된다.

이 연구를 위해 승용차 7대의 깜빡이(turn-signal) 소리를 차량의 내부에서 인공헤드를 이용하여 측정하였다. 녹음된 소리는 실험참가자 30명의 주관적 평가에 사용된다. 마지막으로 승용차 7대의 소리에 대한 주관적 평가치와 실험참가자의 뇌에서 측정된 8개의 뇌파신호간의 상관도가 계산된다. 이 연구를

† Corresponding Author ; Member, AVSP Lab, Department of Mechanical Engineering, Inha University  
E-mail : sangkwon@inha.ac.kr  
Tel : +82-32-860-7305, Fax : +82-32-868-1716  
\* AVSP Lab, Department of Mechanical Engineering, Inha University

‡ Recommended by Editor Jin Oh Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

통해 자동차 내부소리에 대한 인간 두뇌의 반응에 대한 흥미로운 결과를 얻을 수 있다. 이러한 결과는 자동차산업분야의 신경과학에 대한 적용에 기여한다. 고급 소리로 상관된 뇌파신호는 음질평가 시스템의 생리음질요소로 사용된다. 이러한 점은 앞으로 심리음향을 기반으로 한 음질요소와 생리적 조건의 상관관계에 대한 설명으로 사용될 수 있다.

## 2. 소리 녹음 및 주관적 평가

### 2.1 내부 소리의 녹음

연구용 차량은 유럽, 일본, 한국회사의 고급승용차이다. 고급차 7대의 소리신호를 측정하였다. 이 소리들은 Head Acoustics사의 binaural head로 녹음되었다. 마이크로폰은 1/2 inch로 binaural head내부에 장착되어 있다. 측정된 아날로그 데이터는 44.1 kHz의 sampling frequency로 디지털 데이터로 변환되었다. 이 디지털 데이터는 Head Acoustics사의 playback system으로 재생되었다.

### 2.2 주관적 평가

녹음된 소리의 주관적 평가를 위해서 고급차 클럽 회원 33명이 참가하였다(남자 29, 여자4). 실험에 참여한 사람의 나이는 20~30세 사이였다. 청력 검사 후, 그들은 현대자동차 연구소에서 7대의 시험용 차를 모두 운전하고, 실험실에서 녹음된 소리를 평가하였다. 주관적 평가를 위해 rating method가 사용되었다.

## 3. 청각 경로의 해부학

Fig. 1은 청각 시스템의 달팽이관을 통과하는 소리에 대한 신경 신호의 청각 경로를 보여준다. 신경 신호는 나선 신경절에서 청각 피질(auditory cortex)까지 다양한 경로로 전해진다. 기본 경로는 Fig. 1의 왼쪽에 간략하게 나와 있다<sup>(5)</sup>.

운전자가 내부 소리를 들을 때, 운전자는 동시에 발생하는 다른 소리에 대해 선택적으로 주의를 기울일 수 있다. 운전자의 뇌는 중요한 소리를 분석할 수 있어야 한다. 운전자는 뇌의 특정신경을 지정하여 각 소리를 인식할 수 없다. 그러나 대부분의 소리는 공통적으로 강도, 주파수, 발생위치 등의 특징

을 가지고 있다. 이 특징들은 각각 다른 청각 경로에서 표시된다. 소리 강도에 대한 정보는 신경의 흥분속도와 흥분된 신경 숫자의 상호작용으로 발생한다. 자극이 강해짐에 따라 달팽이관(cochlea)의 기저막(basilar membrane)이 더 진동하고 흥분된 청각세포의 박막 전위가 더 탈분극하거나 과분극해진다.

그 결과, 청각세포 시냅스의 신경섬유가 작동 전위가 더 커진다. Fig. 2에서 같은 주파수에서 강도가 커질수록 청각신경섬유가 더 빠르게 흥분하는 것을 볼 수 있다. 또한, 더 강한 자극은 기저막의 진동을 더 크게 하여 더 많은 청각 세포의 활동을 가져온다. 단일 청각 신경 섬유에서 흥분된 청각세포의 증가는 섬유가 응답하는 주파수 범위를 확대시킨다.

우리가 인식하는 라우드니스는 청각 신경 중 활성화된 뉴런의 수와 활성화된 비율의 상관관계에 있다고 생각된다. 달팽이관의 청각세포에서 청각 피질로

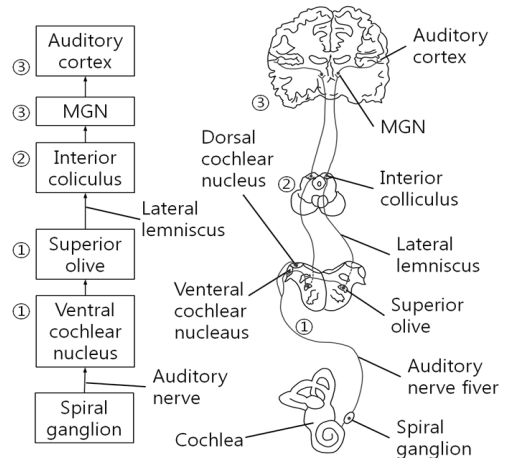


Fig. 1 Auditory Pathway of neural signal for a sound

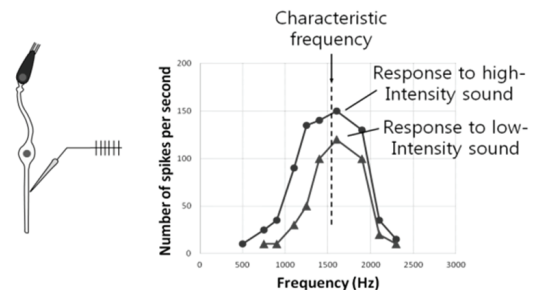


Fig. 2 Response of an auditory nerve fiber to different sound frequencies

이어지는 다양한 신경들은 자극 주파수에 더 민감하다. 그 신경들은 특정 주파수에 가장 민감하다. 주파수 감도는 박막의 다른 부분들이 각각 다른 주파수의 소리에 의해 최대로 변형되기 때문에 주로 기저막의 메커니즘에 의한 결과이다. 달팽이관의 선단으로 이동하면서 기저 박막의 최대 변형을 발생하는 주파수는 점점 감소한다. 이는 청각 신경의 주파수 일치하는 데, Fig. 3과 같이 기저 박막 선단과 가까운 청각세포와 연결된 청각신경섬유는 낮은 특징 주파수를 가지고 있고 이 기저박막 아래와 가까운 신경세포와 연결된 청각신경섬유는 높은 특징 주파수를 가지고 있다.

달팽이관의 청각-전정신경 시냅스의 청각 축색돌기는 특정 주파수를 기반으로 패턴을 조직한다. 주변 뉴런들은 같은 특징 주파수를 가지고 있으며 달팽이관 핵의 위치와 특징 주파수 사이에는 체계적인 관계가 있다. 즉, 달팽이관 핵 안의 기저막에 대한 지도가 있다. 청각 구조 내의 특정 주파수의 체계적인 구조는 주파수처리 뇌 신경망(tonotopy)이라고 하며, 시각 구조의 망막 위상적 지도(retinotopy)와 비슷하다. Tonotopic map은 각 중계 핵, 내측슬상핵(MGN), 청각피질 내의 기저막에 존재한다. Tonotopy가 청각

시스템을 표현하기 때문에 청각 핵의 활성화된 신경의 위치는 소리의 주파수를 가리킨다. 청각 경로에서 음원 위치는 중요하다. 청각 시스템에서 처리의 모든 마지막 단계는 양쪽 귀에서의 소리에 의해 영향을 받는 binaural신경에 있다. Binaural 신경의 응답 특성은 그들이 수평면에서 음원 위치를 정하는데 중요한 역할을 하는 것을 증명한다. Fig. 1과 같이 binaural 신경이 있는 구조는 상올리브(superior olive)이다. 내측슬상핵에서 나와 배열되어 있는 내포를 통해 청각피질로 향하는 축색돌기는 청각부챗살이라 부른다. Fig. 4와 같이 주요 청각 피질은 관자놀이 옆의 브로드만 영역 41에 해당한다. 청각피질의 tonotopic 표현에서 낮은 주파수는 돌기부분과 옆부분에 표현되는 것에 비해 높은 주파수는 꼬리부분과 중앙부분에 표현된다. 청각피질에서 중의측으로는 같은 주파수 영역이다. 즉, 청각피질을 가로지르는 섬유가닥은 특정 주파수를 가진 신경을 포함하며 일부 신경은 특정 소리 강도에 최대 응답을 주는 강도로 조정되어 있다.

4. EEG

뇌파를 측정하는 것은 상대적으로 간단하다. 주로 비침투성 방법이며 고통이 없다. Fig. 5는 EEG전극을 부착하는 일반적인 위치이다. 오른쪽 그림은 EEG신호의 예이다. 대개 몇 십 마이크로 볼트로 측정되는 전압 변동은 선택된 전극 쌍 사이에서 측정된다. 뇌의 앞, 뒤, 왼쪽, 오른쪽의 다른 부분은 적절한 전극 쌍을 선택하여 측정한다. 전형적인 뇌파 기록은 전극 쌍 사이의 전압 변화를 동시에 많이 기록하는 것의 집합이다.

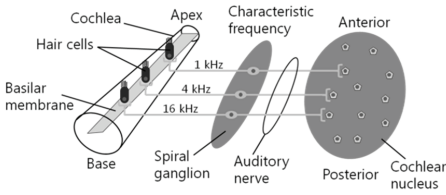


Fig. 3 Tonotopic maps on basilar membrane and cochlear nucleus

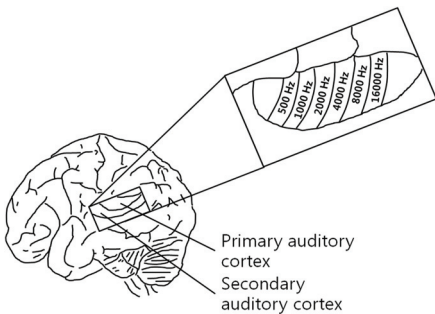


Fig. 4 Primary auditory cortex and response frequency

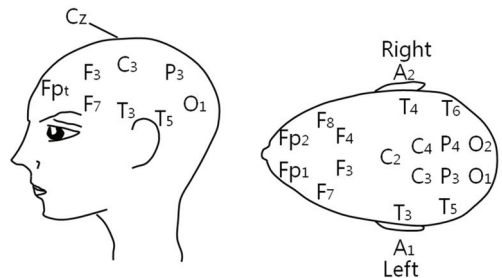


Fig. 5 Standard position for the placement of EEG electrodes

대부분의 경우 뇌파는 뇌 질량의 80%를 차지하며 두개골 바로 아래에 있는 대뇌 피질의 많은 피라미드형 신경의 수상 돌기의 시냅스 자극 동안 생긴 전류에 의해 생성된 전압을 측정한다. 그러나 단일 피질 신경의 전기 생성은 매우 작으며 신호는 Fig. 6과 같이 유체 뼈, 피부를 통해 전극까지 여러 겹의 비신경 조직을 투과해야 한다. 그러므로 볼 수 있는 충분히 큰 뇌파신호를 발생시키기 위해서는 수천 개의 신경이 작용해야 한다.

이 연구에서 8채널의 전극이 부착되었다 : Fp1 : Pre-Frontal Lobe, Fp2 : Pre-Frontal Lobe, F3 : Frontal Lobe, F4 : Frontal Lobe, T3 : Temporal Lobe, T4 : Temporal Lobe, P3 : Parietal Lobe, P4 : Parietal Lobe. Fig. 7은 자동차 소리를 듣고 있는 참가자이다. 뇌파 신호는 참가자가 7대의 승용차 소리를 듣는 동안 8채널의 전극에서 측정된다. 측정된 신호는 EEG analyzer로 전송된다. 이 신호는 디지털 신호로 변환되어 컴퓨터에 기록된다. 이 데이터는 뇌파와 주관적 평가치의 관계를 얻기 위해 분석된다. 측정된 뇌파는 다양한 각도로 분석된다<sup>(6)</sup>. 다른 베타, 감마파형은 이 실험에서는 감성 음향과 연관이 없었다. 이 연구에서는 알파파형은 생리 음향의 음질요소로 사용하였다.

### 5. 상관관계 및 결과

뇌의 뇌파는 7개의 turn signal에 대한 인간의 인식에 대한 정보를 준다. EEG에서 알파파형 8 Hz에서 13 Hz사이의 주파수 대역 신호이다.

뇌의 알파파형은 전극 측정위치와 자동차의 turn signal 소리에 따라 다르다. Fig. 8은 주관적 평가와 뇌파 측정에 대한 결과이다. 이 결과에 따르면, Fig. 8에서 보는 바와 같이 알파파형의 강도는 뇌의 위치에 따라 다르다. Fig. 9와 같이 알파파형은 자동차 소리에 따라 다른 값으로 방출된다. 주관적 평가와 알파 파형간의 상관관계는 뇌파에 대한 많은 정보를 준다. 뇌파는 사람이 왜 좋은 소리에 대해 좋은 인식을 가지는지에 대한 확인에 적용될 수 있다. 알파 파형과 주관적 평가와의 상관관계는 Ch3에 가장 크다. 이것은 frontal lobe(F3)의 뇌파가 자동차의 turn signal에 대한 사람의 감성평가와 상관이 존재함을 알 수 있다. Table 1은 알파파형의 측정값과 감성평가와의 상관도를 보여준다.



Fig. 7 Measurement of EEG on the measurement with 8ch electrodes

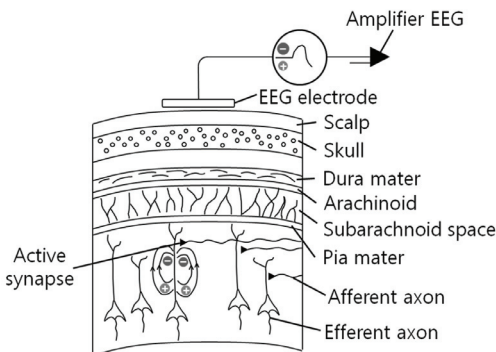
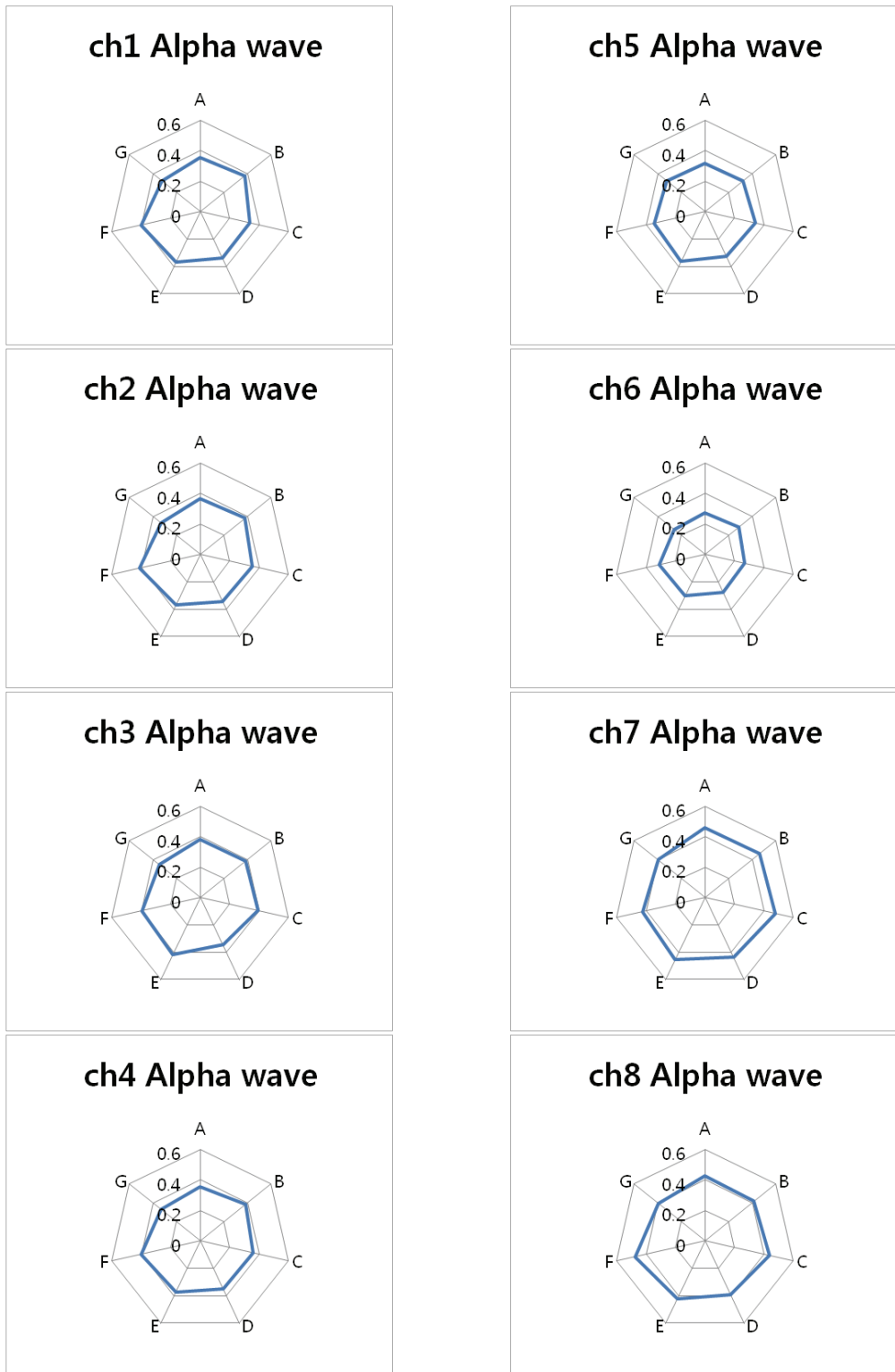


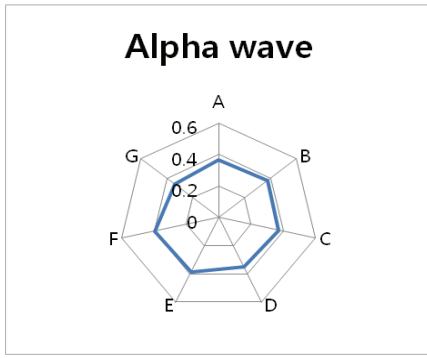
Fig. 6 The generation of very small electrical fields by synaptic currents in pyramidal cells

Table 1 Correlation alpha wave between subjective for 7 car sounds

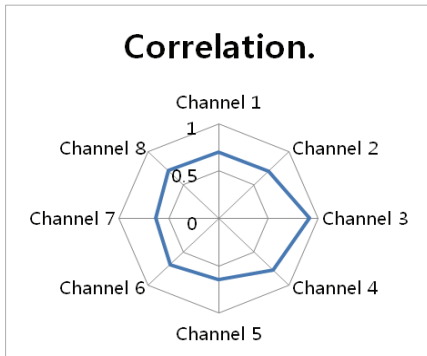
Vehicle	A	B	C	D	E	F	G	Corr
Subject	6.629	7.546	7.601	6.111	7.655	7.542	5.906	
Ch 1	0.355	0.375	0.337	0.337	0.371	0.401	0.323	0.699
Ch 2	0.364	0.380	0.354	0.345	0.367	0.410	0.332	0.705
Ch 3	0.381	0.386	0.391	0.345	0.418	0.398	0.349	0.910
Ch 4	0.356	0.382	0.356	0.352	0.376	0.401	0.334	0.774
Ch 5	0.316	0.324	0.340	0.327	0.364	0.346	0.322	0.645
Ch 6	0.269	0.288	0.271	0.278	0.302	0.310	0.260	0.691
Ch 7	0.460	0.464	0.476	0.434	0.454	0.423	0.398	0.631
Ch 8	0.427	0.414	0.439	0.391	0.426	0.473	0.394	0.714
Avg.	0.366	0.377	0.371	0.351	0.385	0.395	0.339	0.899



**Fig. 8** Alpha wave emitted form different brain position

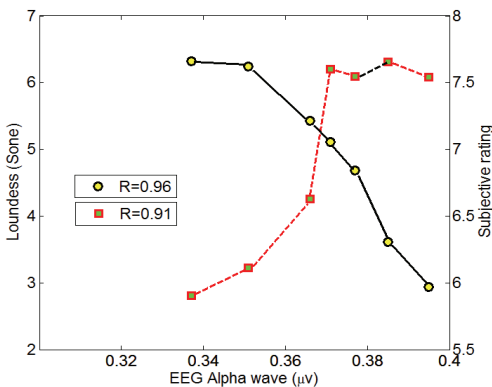


(a)



(b)

**Fig. 9** Alpha wave for car sound and correlation between EEG for channel and subjective rating of car sound



**Fig. 10** Alpha wave for car sound and correlation between EEG for channel and subjective rating of car sound

마지막으로 심리음향의 음질요소와 EEG와의 연관성과 청음평가와의 관계를 규명하기 위해서 라우드니스와 EEG와의 상관도를 측정 한 결과 Fig. 10에서

보여주는 바와 같이 알파 파형이 0.37 mV 이상이 되는 경우 turn signal의 음질이 좋아진다고 평가한다. Table 1과 Fig. 9(a)로부터 B,C,E,F 차량이 여기에 해당된다. 라우드니스의 경우 청음평가와 비교적 선형적인 상관성을 갖지만 EEG의 경우는 특정값 이상이 되면 차량의 음질이 우수하다고 평가한다. 이 결과는 흥미로운 것으로 EEG의 특정 값을 우수 음질에 대한 임계값으로 사용할 수 가 있음을 나타낸다.

## 6. 결 론

이 논문은 자동차 소리에 대한 뇌파와 주관적 평가의 상관관계를 제시한다. 이 연구를 위해 인간 청각계와 뇌 구조에 대한 기본 연구가 필요함을 알 수 있다. 소리의 선호음질과 뇌파 사이에는 높은 상관관계가 있음을 발견하였다. 이 연구를 바탕으로 앞으로 음질 분야에서 심리음향에 대한 연구가 가능하다는 것을 알 수 있다. 특히 EEG의 특정값을 우수 음질에 대한 임계값으로 사용할 수 가 있음을 발견했다.

## 후 기

이 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 Mid-career Researcher Program의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2010-0014260).

## 참 고 문 헌

- (1) Lee, S. K. and Chae, H. C., 2004, The Application of Artificial Neural Networks to the Characterization of Interior Noise Booming in Passenger Cars, Proceeding of the Institute of Mechanical Engineers Part D, Journal of Automobile Engineering, Vol. 218, No. 1, pp. 33~42.
- (2) Lee, S. K., Kim, B. S. and Park, D. C., 2005, Objective Evaluation of the Rumbling Sound in Passenger Cars based on an Artificial Neural Network, Proceeding of the Institute of Mechanical Engineers Part D, Journal of Automobile Engineering, Vol. 219, No. 4, pp. 457~469.
- (3) Lee, S. K., 2008, Objective Evaluation of Interior



Sound Quality in Passenger Cars during Acceleration, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 310, No. 1, pp. 149~168.

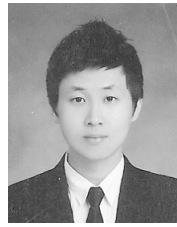
(4) Lee, S. K., Kim, H. W. and Na, E. W., 2010, Improvement of Impact Noise in a Passenger Car Utilizing Sound Metric based on Wavelet Transform, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, No. 17, pp. 3606~3619.

(5) Bear, M. F., Connors, B. W. and Paradiso, M. A., 2007, *Neuroscience : Exploring the Brain*, Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, PA.

(6) Schaefer, R. S., Vlek, R. J. and Desain, P., 2011, Music Perception and Imagery in EEG Alpha band Effect of Task and Stimulus, *International Journal of Psychophysiology*, Vol. 82, No. 3, pp. 254~259.



**Tae Jin Shin** is a graduate student in Department of Mechanical Engineering at Inha University. He has studied for sound quality analysis.



**Young-Jun Lee** is a graduate student in Department of Mechanical Engineering at Inha University. He has studied for the application of signal processing to acoustics and vibration in automotive sound quality.



**Sang-Kwon Lee** was born in Pusan, Korea, in 1959, He studied mechanical engineering at the Pusan National University, Pusan, Korea for a bachelor's degree In 1998 he received a Ph.D. degree in signal processing at the ISVR (Institute of Sound and Vibration Research) of the University of Southampton in U.K. He has 11 years experience in automotive noise control by working in Hyundai Motor co. and the Renault-Samsung Motor Company in Korea. In 1999, he moved to Inha University, Incheon, Korea. He has continued the sound and vibration research in the department of mechanical engineering at the Inha University.