

# 생리음향을 이용한 도어 닫힘음의 정량적 평가를 위한 새로운 음질요소의 개발

## Sound Metric Design for Quantification of Door Closing Sound Utilizing Physiological Acoustics

신 태 진\* · 이 승 민\* · 이 상 권†

Tae-Jin Shin, Seung-Min Lee and Sang-Kwon Lee

(Received October 12, 2012 ; Revised November 15, 2012 ; Accepted November 15, 2012)

**Key Words** : Gammatone Filter(감마톤 필터), Kurtosis(첨도), Psychoacoustic Parameters(음향심리학 매개변수), Physiological Acoustics(생리 음향학), Door Closing Sound(도어 닫힘음)

### ABSTRACT

In previous works, psychoacoustic parameters have been used for objective quantification. However, these parameters do not agree well with subjective assessment. Therefore, the correlation between psychoacoustic parameters and the subjective rating of door closing sounds of sampled cars is low, and it is not sufficient to use psychoacoustic parameters as an objective metric to quantify the sound quality of door closing sounds. In this paper, a new method is proposed to objectively quantify the sound quality based on physiological acoustics and statistical signal processing. The gammatone filter, as a pre-processing, is used in models of the auditory system and kurtosis, which is the fourth-order moment of temporal signal, and is used to extract information about sound quality quantification for door closing sounds. The new metric obtained through the proposed method is highly correlated with subjective rating, and it is successfully applied to the quantification of the sound quality of door closing sounds.

### 1. 서 론

구매 후 구매자가 듣는 첫 번째 소리가 문을 닫는 소리이기 때문에 자동차의 도어 닫힘음은 구매 결정에 있어 중요한 기준이다. 따라서 도어 닫힘음의 객관적인 정량화와 이것이 주관적인 인상과 어떤 관계가 있는지는 많은 연구의 주제가 되었다. 초기의 많은 연구들은 문이 닫힐 때의 음의 크기에 초점

을 맞추었다<sup>(1,2)</sup>. 최근의 연구들은 주관적인 취향도 스펙트럼 콘텐츠 및 복합적인 영향의 부족과 관련되는 것으로 나타났다<sup>(3-7)</sup>. 이러한 복합적 영향은 일반적으로 도어 닫힘음이 자동차의 고급감음질에 구현에 주요한 특성으로 간주된다<sup>(8)</sup>. 예를 들자면 문에 잔향이 있다거나<sup>(7)</sup> 또는 창문이 부분적으로 혹은 완전히 내려가 있을 때 창문 조절 장치의 덜컹거리는 소리 같은 것이다.

도어 닫힘음에 대해서 시간-주파수분석을 통해서

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

\* Member, Department of Mechanical Engineering, Inha University

‡ Recommended by Editor Jin Oh Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

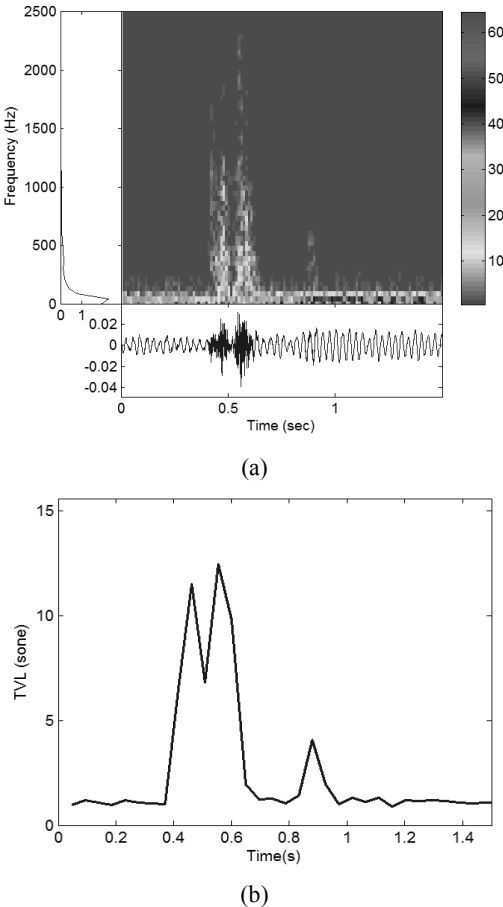
도어 닫힘음의 복합적 영향을 확인할 수 있다<sup>(9)</sup>. 이러한 결과에 의하면, 주관적 평가와 객관적 측정 기준간의 상관관계를 표현하는 음질요소는 충분하지 않다. 이 논문에서는 상관관계의 개선을 위해 생리음향에 기초한 새로운 음질요소를 제안한다.

Fig. 1(a)는 도어 닫힘음에 대한 시간-주파수 분석 결과로서 복합적 영향을 포함하는 도어 닫힘음의 예를 보여준다. 도어 닫힘음의 객관적인 정량화로서 라우드니스, 러프니스, 샤프니스 신호 처리 기술과 같은 음향심리학 매개 변수를 기반으로 개발되었다<sup>(6-10)</sup>. Fig. 1(b)는 Fig. 1(a)에서와 같이 신호에 대한 시간 변화 라우드니스<sup>(9)</sup>를 보여준다. 이 결과는 시간-주파수 정보를 단일 값 측정 기준으로 환원시키는 방법은 어렵다. 이 논문은 도어 닫힘음에서 복합적 영향의

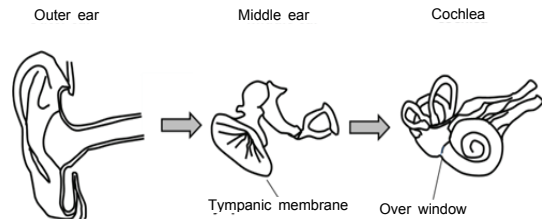
주관적인 평가에 일치하는 새로운 음질요소의 개발 및 적용을 제시한다. 새로운 측정 기준은 감마톤 필터(GTF)와 첨도(Kurtosis)를 기반으로 개발되었다. 감마톤 필터는 청각 시스템 모델에 널리 사용되며, 생리학적으로 말초 청각 처리 단계의 구조를 모방하기 위해 사용된다. 관자놀이 신호의 첨도는 통계 데이터에 관한 유용한 정보를 추출하기 위해 널리 사용된다<sup>(11)</sup>. 최근, 스펙트럼 첨도가 소개되었다<sup>(12)</sup>. 이 결과는 랜덤 프로세스와 하모닉 성분으로 구성된 신호의 효율적인 감지에 대한 객관적 표현을 가능하게 한다. 이 논문에서는 감마톤 필터와 첨도를 적용하여 도어 닫힘음의 음질 정량화를 위한 새로운 측정 기준을 개발하였다.

## 2. 청각 시스템

이 장에서는 청각 주변부 관련 구성요소의 개요에 대하여 간략히 소개한다. 자세한 내용은 참고문헌<sup>(13)</sup>에서 찾을 수 있다. 소리는 종파의 형태로 공기를 통과한다. 외이를 거친 후 고막에서 압력이 변하고 달팽이관 기저의 내창에 있는 중이의 뼈에 의해 기계적으로 변환된다. 달팽이관은 내이에 있으며 단단하고 유체로 채워진 관이다. Fig. 2는 청각계 주변부를 간단히 묘사한 것으로 청각계의 음 전달 과정을 나타낸다. Fig. 3에서 달팽이관은 감기지 않은 형태로 도시되어 있다. 기저막은 달팽이관의 길이방향으로 있으며 관을 두 개의 공간으로 나눈다. 달팽이관 기저에서 입력의 기계적 활동의 응답으로 정상파 패턴이 기저막으로 전해진다. 달팽이관 기저에서 입력의 기계적 활동의 응답으로 정상파 패턴이 기저막으로 전해진다.



**Fig. 1** Short time Fourier transform and time varying loudness(TVL) for the door-closing sound of a premium



**Fig. 2** Pathway of sound through outer ear to tympanic membrane, converted through the bones of the middle ear, into the cochlea by way of the oval window at the base of the cochlea

달팽이관의 기저막에서 음이 통과할 때 고주파 음은 기저막의 oval window부분에서 고주파음을 인식하며 저주파수 음은 apex 부분에서 저주파음을 인식한다. 기저막 내에는 내유모세포와 외유모세포가 공존하며, 유모세포는 음의 특징에 따라 기저막의 변위를 비선형적으로 적극적으로 감쇠 또는 강화한다. 이러한 비선형성의 결과 중 하나는 필터응답이다. 이 응답은 비선형성을 갖고 있음으로 입력 음의 자극 레벨에 따라 직접적으로 비례하여 확대되지 않는다는 것이다. 이 비선형적 거동은 사람이 넓은 동적범위(dynamic range)를 들을 수 있게 하는 중요한 요소로 고려된다. 외유모세포가 손상된 청각장애 인들은 달팽이관의 압축 비선형성을 잃는다. 이로 인한 음의 인식은 높은 음향강도에 대해서 비정상적인 크기의 증가로 “음량 과보상”이 이루어진다. 기저막의 운동이 정상적인 물리적인 범위내에서 일어나지 않기 때문에 청각 신경섬유의 발화율은 정상적인 귀보다 낮은 음향 수준에서 발화되어 청각의 동작 범위는 점점 좁아진다.

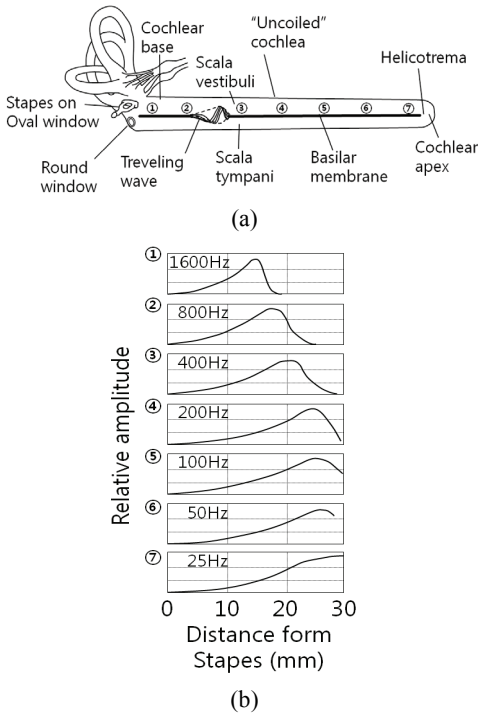
### 3. 청각시스템 모델에서의 감마톤 필터

감마톤 필터(GTF)는 청각시스템의 모델에 사용되며, 생리학적으로 말초 청각 처리 단계의 구조를 모방하기 위해 사용된다. Johannesma에 의해 도입된 감마톤 함수는<sup>(14)</sup> 고양이의 일차 청각 섬유에서 수집한 생리적인 데이터를 특징으로 한다. de Boer가 개발한 감마톤 청각 필터는<sup>(15)</sup> 고양이의 달팽이관의 달팽이관 임펄스응답이다. 인간의 청각계의 임펄스응답은 통계에서 알려진 감마 분포에 가깝고, 임펄스응답의 미세한 구조는 필터의 중심 주파수에서의 정현파이다. 따라서 임펄스응답은 다음과 같이 표현되었다.

$$h(t) = At^{N-1} \exp(-2\pi bt) \cos(2\pi f_c t + \phi) \quad (1)$$

$(t \geq 0, N \geq 1)$

여기서  $A$ 는 단일 개체로의 최대 진폭 전달을 정상화하는데 사용되는 임의의 요소이고,  $N$ 은 필터 차수,  $b$ 는 자극 반응의 기간을 결정하는 매개 변수이고 필터의 대역폭인  $f_c$ 는 중심 주파수 그리고  $\phi$ 는 위상이다. 필터의 4차 GTF는 인간의 청각계를 모방하는 최적함 임펄스응답이다<sup>(15,16)</sup>. 대부분의 청각 모델은 4차 GTF를 사용하지만 낮은 차수는 인공 귀에서 음성 수신 스코어를 최적화하기 위해 사용될 수 있다. 청각 필터의 형태가 선형 주파수 스케일에 대칭이 되는 GTF는 인간의 스펙트럼 분석의 좋은 모델이다. 선형 감마톤 필터 뱅크(filter bank)는 청각시스템에서 신호 처리를 시뮬레이션 하는 모델에 사용되고<sup>(17-20)</sup> 인공 귀에서 소리 가공에 사용될 수 있다. 식 (1)에서의 GTF는 아날로그 필터인 반면에 인공 귀에서의 청각 시뮬레이션과 신호 처리는 디지털 수행을 활용한다. 선형 GTF는 FIR(finite impulse response) 필터<sup>(19,21)</sup>, IIR(infinite impulse response) 필터로 구현되었다<sup>(22-25)</sup>. 청각 밴드패스(band pass) 필터의 대역폭(bandwidth)은 중심 주파수에 따라 차이가 있으며, 종종 ERB(equivalent rectangular bandwidth)에 의해 표현된다. 적당한 음향 수준을 보려면 ERB와 중심 주파수  $f_c$ 의 관계는 Glasberg와 Moore의 방정식에 의해 설명된다<sup>(26)</sup>. 감마톤 필터의 경우, 이 방정식은 대역폭  $b$ 의 요소가



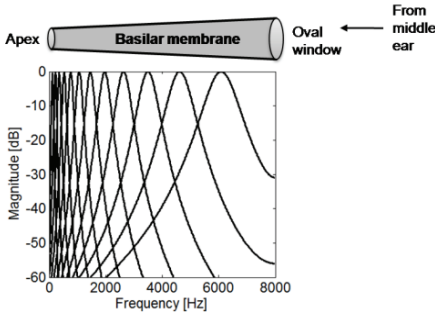
**Fig. 3** Caricature of basilar membrane motion in response to pressure at oval window viewed when the cochlear duct is unwrapped

1.019로 Patterson<sup>(17)</sup>에 의해 수정되었다.

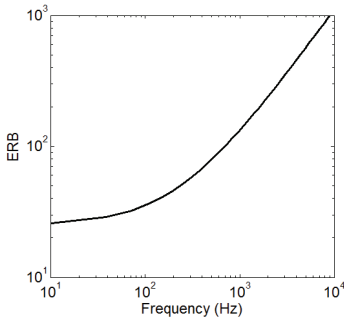
$$b(f_c) = 1.019 \times 24.7(1 + 4.37f_c / 1000) \quad (2)$$

아날로그 GTF의 전달함수는 임펄스응답의 라플라스 변환을 이용하여 얻어지고, Slaney<sup>(25)</sup>에 의해 처음으로 구해진 식은 다음과 같다.

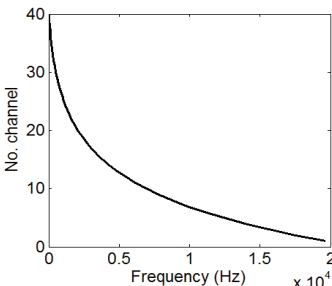
$$H(s) \propto \prod_{n=1}^N H_n(s) = \prod_{n=1}^N \frac{s - z_n}{(s - p_0)(s - p_0^*)} \quad (3)$$



(a)



(b)



(c)

**Fig. 4** Frequency responses of a gammatone filterbank with ten filters channels whose centre frequencies are equally spaced between 50 Hz and 8 kHz on the ERB-rate scale

이 식은 같은 켈레 복소수( $p_0, p_0^*$ )와 1 또는 0이 되는  $z_n$ 일 때, N차 GTF는 2차 필터로 구현할 수 있다는 것을 의미한다. 이 논문에서, GTF 필터 구현은 Cooke가 설명한 설계 규칙을 따른다<sup>(23)</sup>. 감마톤 필터 뱅크는 일반적으로 시간의 함수로 달팽이관 내에 두개골 기저막의 움직임을 시뮬레이션 하는데 사용되고, 각 필터의 출력은 Fig. 4(a)와 같이 한 장소에서 기저막의 주파수 반응의 모형을 만든다. 선형 감마톤 필터 뱅크는 일반적으로 필터 중심주파수 (center frequency)  $f_c$ 가 ERB 스케일로 알려진 대역폭에 비례한 주파수에 걸쳐 분산되어 있는 방법으로 정의된다<sup>(26)</sup>. Fig. 4(b)와 같이 ERB는 대체로 로그 스케일이고, 필터 중심주파수는 일정 간격을 둔다. Paterson의 모델에서 각 필터는 하나의 ERB의 폭이 넓지만, 채널 사이의 주파수 간격은 지정되지 않았다. 달팽이관에는 수천개의 유모세포가 있지만 컴퓨터 모델은 이 채널 밀도만을 어렵잡을 수 있다. Fig. 4(c)는 사용된 채널과 중심주파수  $f_c$  사이의 관계를 보여준다.

#### 4. 통계적인 분석과 척도

도어 닫힘음과 같은 불연속적인 신호에 대한 분석은 확률에 근거한 데이터 분석 기술을 사용한다. 일반적으로 통계적인 분석 기술로 사용되는 신호처리 기술로서 평균값, 표준편차, 비대칭도 그리고 첨도 등을 사용한다<sup>(11)</sup>.

식 (4)는 이러한 값들을 나타낸다.

$$\mu = E[X] \quad (4a)$$

$$\sigma = E[(X - \mu)^2] \quad (4b)$$

$$Skewness = E\left[\left(\frac{X - \mu}{\sigma}\right)^3\right] \quad (4c)$$

$$Kurtosis = E\left[\left(\frac{X - \mu}{\sigma}\right)^4\right] \quad (4d)$$

여기서  $X$ 는 확률변수이며,  $m$ 는 평균, 그리고  $s$ 는 표준편차, Skewness는 비대칭도, Kurtosis는 첨도를 나타낸다. 최근에 주파수 스펙트럼 첨도가 개발되어 Antoni<sup>(12)</sup>는 다음과 같이 정의하였다.

$$SK_x(f) = \frac{S_{4x}(f)}{S_{2x}^2(f)} - 2. \tag{5}$$

여기서  $S_{4x}(f)$ 는 신호  $X$ 에 대한 4차 모멘트이며,  $S_{2x}(f)$ 는 2차 모멘트인 상관도 이다.

### 5. 도어 닫힘음의 녹음과 주관적 평가

#### 5.1 내부 녹음

테스트에 사용된 7개의 고급 승용차의 내부 사운드는 Head Acoustics사에서 만든 입체 음향 헤드를 사용하여 기록하였다.

Fig. 5는 실험장비의 사진이다. 연구를 위한 실험용 차량은 유럽, 일본, 한국의 자동차 회사에서 생산된 고급 차량이다. 실험 중 엔진은 작동하지 않았다. Fig. 6은 7개 차량의 도어 닫힘음의 시간에 따른 음압이다. 신호에서 도어 닫힘음 전의 작은 배경소음은 사람이 인지할 수 없을 만큼 적었다.

#### 5.2 주관적 평가

명품 자동차 클럽의 멤버인 33명의 사람들이 주관적 평가에 참여하였다. 참가자들은 29명의 남자와 4명의 여자로 구성되었다. 참가자들은 기록된 도어 닫힘음을 주관적으로 평가하였다. Fig. 7은 승용차 소리의 주관적인 평가를 위한 실험장비에 대한 set-up 이다.

녹음된 소리에 대한 주관적 평가를 위해서 레이팅 방법이 사용되었다<sup>(27)</sup>. 주관적인 점수는 현대 자동차가 제시한 가이드라인에 따라 4점부터 9점까지 평가되었다<sup>(28,29)</sup>.



Fig. 5 Pictorial illustration of a binaural acoustic head for recording interior sound inside a passenger car

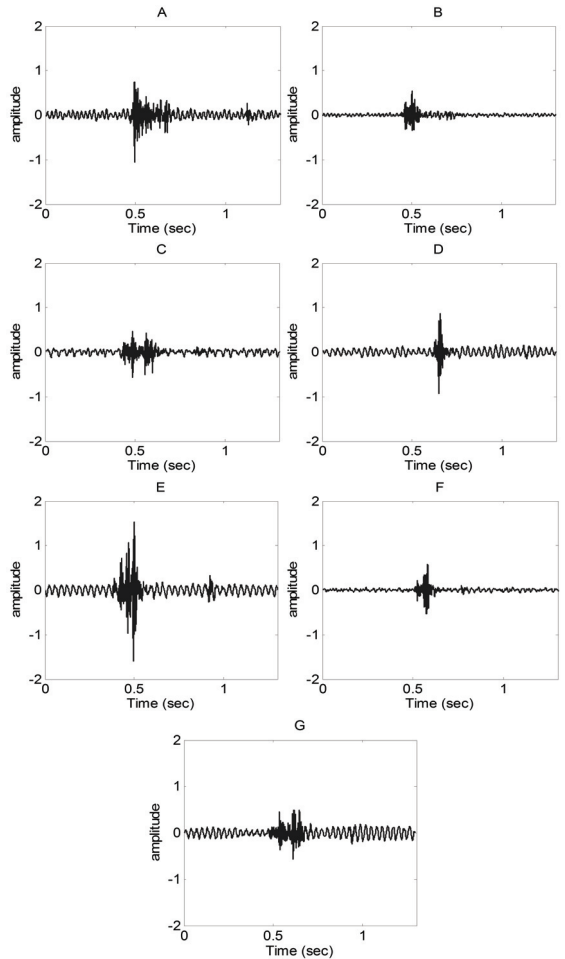


Fig. 6 Time history of the door closing sound of 7 premium passenger cars

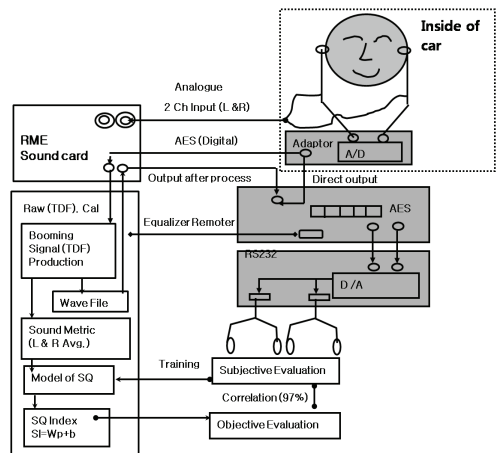


Fig. 7 Experimental set-up for the subjective evaluation of the sound of a passenger car

Table 1은 주관적 점수를 위한 가이드라인의 리스트이다. Table 2는 7개 차량의 주관적 평가 결과이다. 참가자들은 “고급감”을 평가하도록 했다. Table 2에서 차량 B의 도어 닫힘음이 가장 고급스러운 소리라는 것을 알 수 있다.

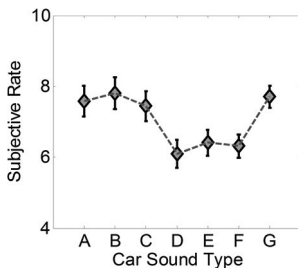
Fig. 8은 7개의 고급 승용차의 도어 닫힘음의 주관적 평가의 평균이다. 그림에서 다이어몬드는 각각의 소리의 주관적 평가의 평균 응답을 나타낸다. 95% 신뢰 구간의 표준 편차도 Fig. 8에 표시되었다.

**Table 1** Grade for subjective evaluation of the axle-gear

Subjective rates	Production guide of cars
9	Very excellent
9.5	Excellent
8	Good
7.5	Acceptable for mass production
7	Marginal
6.5	Not good
6	Bad
5.5	Unacceptable to mass production
5	Very bad
4.5	Fail(impossible to develop)

**Table 2** Mean response of subjective rate for door-closing sound of 7 premium passenger cars

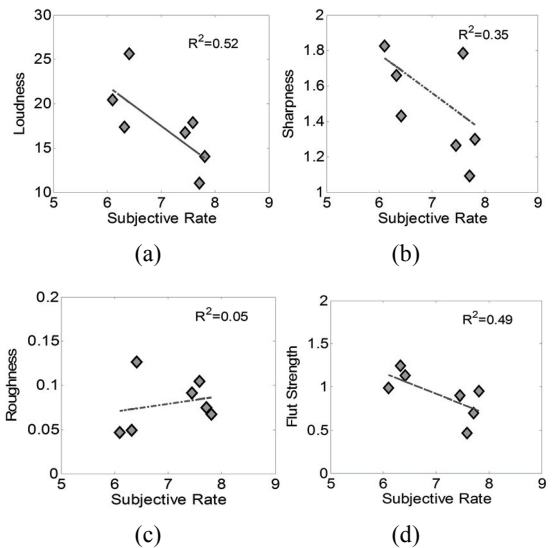
Car type	Car A	Car B	Car C	Car D	Car E	Car F	Car G
Mean value	7.59	7.81	7.45	6.10	6.41	6.32	7.71



**Fig. 8** Mean response of subjective rate for interior sounds of seven premium passenger cars

## 6. 음향심리학 매개변수

자동차 소리의 음질의 음향심리학적 측면과 관련하여, 4개의 음질요소가 사용되었다<sup>(29)</sup>. Zwicker는 4개의 주요 음질요소인 라우드니스, 샤프니스, 러프니스, 변동 강도를 도입하였다. 라우드니스는 소리의 크기에 관련된 청각 지각 특성을 말한다. 라우드니스는 phone이나 sone 단위로 측정 되는데, 1 sone은 1 kHz에서 40 dB의 퓨어톤 사운드의 음의 크기이다. 샤프니스는 소리의 스펙트럼 상관계에 관한 청각 지각을 말한다. 샤프니스의 단위는 acum이고, 1 kHz에서 60 dB의 순음의 선명도이다. 러프니스는 진폭 변조와 관련된 청각 지각 특성이고 70 Hz 주위의 중간 주파수에서 주파수 변조를 한 소리의 주파수 변조이다. 러프니스는 고주파 변조와 관련되어 있다. 러프니스의 단위는 asper



**Fig. 9** Correlation between psychoacoustic parameters and subjective rate for the door closing sound of 7 premium passenger car

**Table 3** Correlation  $R^2$  between psychoacoustic parameters and subjective rate for door-closing sound of 7 premium passenger cars.

Loudness	Sharpness	Roughness	Fluctuation strength
0.52	0.35	0.05	0.49



이다. 1 asper는 1 kHz에서 60 dB의 사운드의 거칠기이고, 70 Hz의 변조 주파수에서 100 % 변조되었다. 변동 강도는 진폭 변조와 관련된 청각 인식 특성이고 4 Hz 주위의 낮은 주파수에서 주파수 변조를 한 소리의 주파수 변조이다. 변동 강도의 단위는 vacil이다. 1 vacil은 1 kHz에서 60 dB의 순음의 변동 강도이고, 4 Hz의 변조 주파수에서 100 % 변조되었다.

Fig. 9는 음향심리학 매개변수와 7개의 고급 승용차의 도어 닫힘음의 주관적 평가 점수 사이의 상관관계를 보여준다. 이 결과에 따르면, 이들의 상관관계는  $R^2=0.7$ 보다 작으며, 이것은 일반적으로 상관관계의 결정을 위한 중요한 값이다<sup>(30)</sup>.

Table 3은 음향심리학 매개변수와 주관적 평가 점수 사이의 상관관계 값  $R^2$ 의 리스트이다. 4개의 매개변수들은 7개 차량의 소리의 주관적 평가를 표현하기에 충분하지 못하다. 따라서 주관적 평가를 표현하는 새로운 매트릭스가 필요하다.

### 7. 생리 음향을 기반으로 한 새로운 음질요소

6절에서 설명한 음향심리학 음질요소는 단힘음이 다중 효과 소리이기 때문에 객관적으로 도어 닫힘음의 음질을 정량화하는데 실패했다. 웨이블릿 변환은 자동차 음질 연구에서 충격음의 음질 평가를 객관적으로 정량화 하는 음질요소의 개발에 사용되었다<sup>(31,32)</sup>. 도어 닫힘음과 같은 충격음도 음의 특성이 비정상(non-stationary) 임으로, 웨이블릿과 같은 시간-주파수 변환 기술을 적용 할 수 있으나 도어 닫힘음의 충격이 특성이 다양함으로 이 연구에서는 3장에서 제시한 GTF  $h(t)$ 를 적용하여 생리적 음향 특성을 고려한 음질요소의 개발을 연구하였다. GTF는 청각 시스템의 생리 음향 기능을 모방하기 위해 사용되었고 GTF로 필터링한 신호  $g(t)$ 에 첨도를 적용하여 음질요소를 개발하였다. 첨도는 필터에 의해 처리된 신호의 통계분석을 통하여 도어 닫힘음의 주관적인 평가에 일치하는 새로운 정보의 추출에 사용되었다. 새로운 음질요소의 개발 진행은 Fig. 10과 같다.

음질요소의 개발을 위해서 먼저 Fig. 6과 같이 신호  $x(n)$ 은 시간에 따른 도어 닫힘음의 음압이다. 신

호  $x(n)$ 은  $m$ 번째 채널의 중심 주파수에 대응하는 주파수 대역폭을 가진 감마톤 필터  $h(m,n)$ 에 의해 필터링 된다. 필터링 된 신호의 에너지 분포  $|G(m,n)|^2$ 는 시간 데이터  $g(n)$ 을 얻기 위해 주파수 축을 따라 합쳐진다. 신호  $g(n)$ 을 위한 첨도  $K_g$ 는 식 (4d)를 사용하여 얻어진다. 이  $K_g$ 는 이 논문에서 제시하는 새로운 음질요소다.

Fig. 11은 감마톤 필터  $h(m,n)$ 에 의해 필터링 신호의 에너지 분포  $|G(m,n)|^2$ 를 시간-주파수 영역에서 나타내었다.  $m$ 번째 채널의 중심 주파수에서 감마톤 필터의 대역  $b(f_c)$ 은 식 (2)에서 얻어진다. Fig. 11에서 수직 축은 주파수와 관련된 채널의 번호를 보여 주고 수평 축은 시간을 나타낸다. Fig. 11에서 보여진 결과에 따르면, 차량 D, E, F의 도어 닫힘음은 채널 번호 20 밀의 고주파 성분을 포함하는 특성이 있다. 채널 번호와 중심 주파수 사이의 관계는 Fig. 4(c)에서 알 수 있다. Fig. 8에서 처음 평가 결과는 주관적 평가 점수의 평균 응답값이 낮다는 것을 보여준다. 그러므로 고주파 성분은 도어 닫힘음의 음질을 나쁘게 만든다. 다음 단계에서는 도어 닫힘음의 음질의 객관적 정량화를 위한 새로운 음질요소를 만들기 위해 Fig. 6에서 보여진 것과 같이 시간에 따른  $g(n) = \sum_{m=1}^M |G(m,n)|^2$  이 계산된다. 여기에서  $M$ 은 채널의 개수이다.

Fig. 12는 시간에 따른  $g(n)$ 을 보여준다. 마지막 단계에서는 주관적 평가와 일치하는 음질요소를 얻기 위해  $g(n)$ 을 위한 첨도  $K_g$ 는 식 (4d)를 사용하여 추정된다. Fig. 13(a)는 첨도  $K_g$ 와 주관적 평가 점수의 평균 반응 사이의 상관관계  $R^2$ 을 보여준다. 상관 관계가 높으면, 첨도  $K_g$ 가 도어 닫힘음의 객관적 정량화에 사용될 수 있다. Fig. 13(b)는 GTF  $h(n)$ 로 필터링 하지 않은 원신호  $x(n)$ 의 첨도와 주

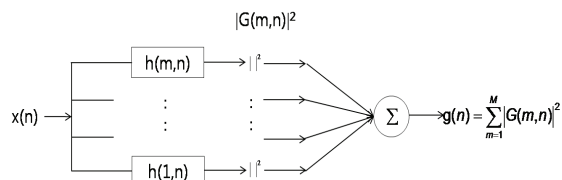
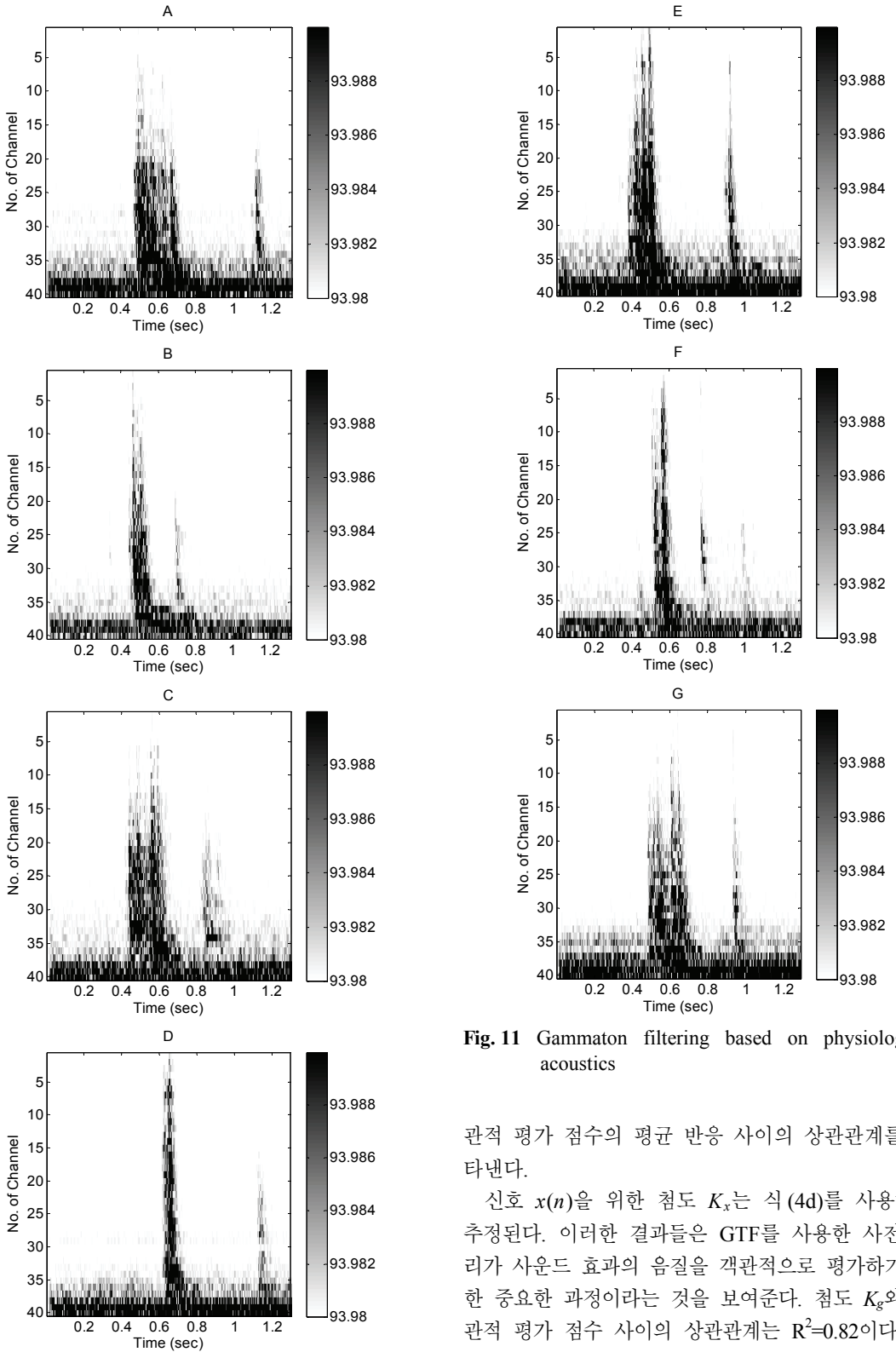


Fig. 10 Flow chart for the progress in the development of new sound metric



**Fig. 11** Gammaton filtering based on physiological acoustics

관적 평가 점수의 평균 반응 사이의 상관관계를 나타낸다.

신호  $x(n)$ 을 위한 침도  $K_x$ 는 식 (4d)를 사용하여 추정된다. 이러한 결과들은 GTF를 사용한 사전 처리가 사운드 효과의 음질을 객관적으로 평가하기 위한 중요한 과정이라는 것을 보여준다. 침도  $K_x$ 와 주관적 평가 점수 사이의 상관관계는  $R^2=0.82$ 이다. 라



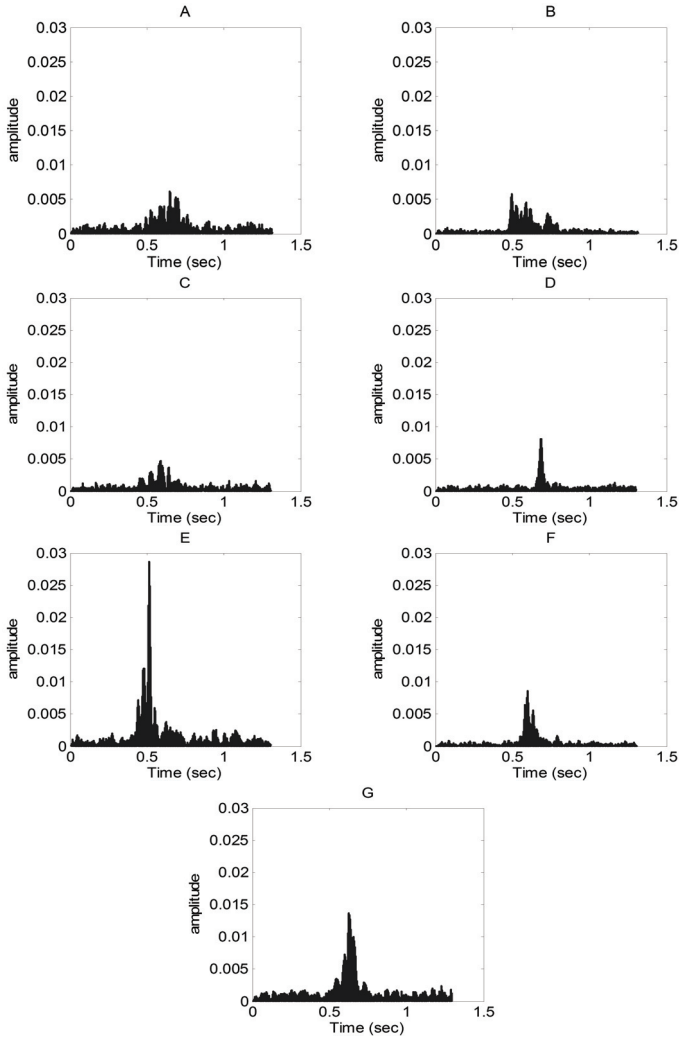
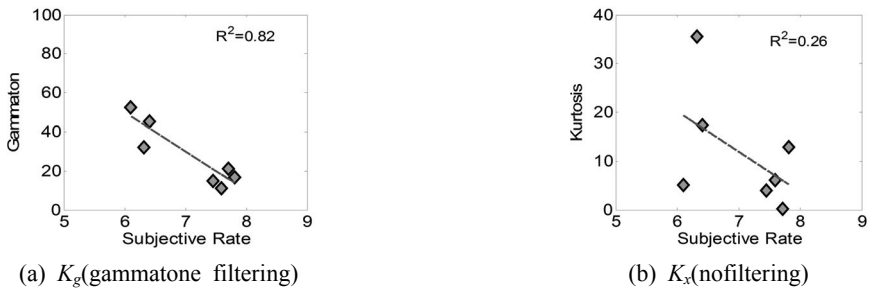


Fig. 12 Time history  $g(n)$  for the data summed along frequency axis of energy distribution  $|G(m,n)|^2$



(a)  $K_g$ (gammatone filtering)

(b)  $K_x$ (nofiltering)

Fig. 13 Correlation between kurtosis and mean response of subjective rating

우드니스와 주관적 평가 점수 사이의 상관관계는  $R^2=0.51$ 이다. 사운드 효과의 음질의 객관적인 평가를

위한 새로운 음질요소  $K_g$ 는 음향심리학 매개변수 라우드니스 보다 우수한 상관도를 가진다.

## 8. 결 론

이 논문에서 생리 음향학과 통계적 신호 처리를 기반으로 음질을 객관적으로 정량화 하는 새로운 방법이 제시되었다. 이 연구에서 감마톤 필터는 청각 시스템의 모형을 만드는 데 사용되었다. 감마톤 필터는 말초 청각 처리 단계의 구조를 모방한다. 도어 닫힘음은 감마톤 필터를 통과시켜 신호의 에너지 분포를 계산하여 에너지에 대한 침도를 계산하여 새로운 음질요소를 개발하였다. 새로운 음질요소와 주관적 평가 점수간의 높은 상관관계는 도어 닫힘음의 음질을 정량화하는 가능성을 확인하였다.

## 후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다. MEST(No. 2010-0014260).

## 참 고 문 헌

(1) Hojbjerg, K., 1991, Measuring the Loudness of Door Slams, SAE 911090, Proc. of SAE Noise and Vibration.

(2) Fridrich, R., 1991, Investigating Calculated Loudness ISO 532 for Evaluating Impulsive Sounds, SAE 911088, Proc. of SAE Noise and Vibration.

(3) Fridrich, R., 1997, Pitch Matching for Impulsive Sounds, SAE 971981, Proc. of SAE Noise and Vibration.

(4) Fridrich, R., 1999, Percentile Frequency Method for Evaluating Impulsive Sounds, SAE 1999-01-18518, Proc. of SAE Noise and Vibration.

(5) Uchida, H., Nakamura, S., Yamada, K., Nagano, K., Kojima, N. and Mikami, M., 2002, Development of Solid Door Closing Sound, SAE 2002-08-0435, JSAE Autumn Conference.

(6) Petniunas, A., Otto, N., Amman, S. and Simpson, R., 1999, Door System Design for Improved Closure Sound Quality, SAE 1999-01-1681, Proc. of SAE Noise and Vibration.

(7) Hamilton, D., 1999, Sound Quality of Impulsive Noises: an Applied Study of Automotive Door Closing

Sounds, SAE 1999-01-1684, Proc. of SAE Noise and Vibration.

(8) Blommer, M., Otto, N., Wakefield, G., Feng, B. and Jones, C., 1995, Calculating the Loudness of Impulsive Sounds, SAE 951311, Proc. of SAE Noise and Vibration.

(9) Blommer, M., Yang, B. and Vandenbrink, K., 2005, Detection and Classifying Secondary Impacts in Door Closing Sound, SAE 2005-01-2471, Proc. of SAE Noise and Vibration.

(10) Kim, E. Y., Lee, Y. J. and Lee, S. K., 2012, Sound Metric Design for Evaluation of Tonal Sound in Laser Printer, Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 13, No. 8, pp. 1~10.

(11) Shin, K. and Harmond, J. K., 2008, Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers, John Wiley & Sons Ltd, West Sussex.

(12) Antoni, J., 2006, The Spectral Kurtosis: a Useful Tool for Characterizing Non-stationary Signals, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 20, No. 2, pp. 282~307.

(13) Pickles, J. O., 1998, An Introduction to the Physiology of Hearing, Academic Press, 2nd edition.

(14) Johannesma, P. I. M., 1972, The Pre-response Stimulus Ensemble of Neurons in the Cochlear Nucleus, in Symposium on Hearing Theory, IPO, Eindhoven, The Netherlands, pp. 58~69.

(15) de Boer, E., 1975, Synthetic Whole-nerve Action Potentials for the Cat, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 58, pp. 1030~1045.

(16) Patterson, R. D., Robinson, K., Holdsworth, J. W., McKeown, D., Zhang, C. and Allerhand, M., 1992, Complex Sounds and Auditory Images, in Auditory Physiology and Perception, edited by Y. Cazals, L. Demany, and K. Horner(Pergamon, Oxford), pp. 429~446.

(17) Patterson, R. D., Allerhand, M. H. and Giguère, C., 1995, Time-domain Modelling of Peripheral Auditory Processing: A Modular Architecture and a Software Platform, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 98, No. 4, pp. 1890~1894.

(18) Dau, T., Kollmeier, B. and Kohlrausch, A., 1975, Modeling Auditory Processing of Amplitude Modulation. I. Detection and Masking with Narrowband Carriers, J.

Acoust. Soc. Am., Vol. 102, No. 5, pp. 2892~2905.

(19) Dau, T., Kollmeier, B. and Kohlrausch, A., 1997, Modeling Auditory Processing of Amplitude Modulation. II. Spectral and Temporal Integration, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 102, No. 5, pp. 2906~2919.

(20) Shackleton, T. M., McAlpine, D. and Palmer, A. R., 2000, Modelling Convergent Input to Interaural-delaysensitive Inferior Colliculus Neurons, Hear. Res., Vol. 149, No. 1, pp. 199~215.

(21) Evans, E., 1986, Cochlear Nerve Fibre Temporal Discharge Patterns, Cochlear Frequency Selectivity and the Dominant Region for Pitch, in Auditory Frequency Selectivity, Edited by B. C. J. Moore and R. Patterson (Plenum Publishing Corporation), pp. 253~260.

(22) Patterson, R. D., Holdsworth, J., Nimmo-Smith, I. and Rice, P., 1988, SVOS Final SAE: The Auditory Filterbank, Tech. Rep. 2341, MRC Applied Psychology Unit, Cambridge.

(23) Cooke, M. P., 1991, Modelling Auditory Processing and Organization, Ph.D. Thesis., Department of Computer Science, University of Sheffield.

(24) Darling, A. M., 1991, Properties and Implementation of the Gammatone Filter: a Tutorial, in Speech Hearing and Language, Work in Progress (University College London, Department of Phonetics and Linguistics), pp. 43~61.

(25) Slaney, M., 1993, An Efficient Implementation of the Patterson-Holdsworth Auditory Filter Bank, Tech. Rep. 35, Apple Computer, <http://rvl4.ecn.purdue.edu/~malcolm/apple/tr35/>.

(26) Glasberg, B. R. and Moore, B. C. J., 1990, Derivation of Auditory Filter Shapes from Notched-noise Data, Hear. Res., Vol. 47, No. 1, pp. 103~108.

(27) Otto, N., Amman, S., Eaton, C. and Lake, S., 1999, Guidelines for Jury Evaluations of Automotive Sounds, SAE 1999-01-1822, Proceedings of SAE Noise and Vibration Conference, Traverse City, Michigan, USA.

(28) Lee, S. K., 2008, Objective Evaluation of Interior Sound Quality in Passenger Cars During Acceleration, Journal of Sound and Vibration, Vol. 310, No. 00, pp. 149~168.

(29) Zwicker, E. and Fastl, H., 1999, Psychoacoustics : Facts and Models, 2nd Edition, Springer-Verlag, Berlin.

(30) MacQueen, J. B., 1967, Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations, University of California Press., In Berkeley, USA,

(31) 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.

(32) Park, S. W., Kim, H. W., Na, E. W. and Lee, S. K., 2010, Sound Metric for Impact Sound of a Car, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 11, pp. 1018~1024.



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



**Seung Min 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 EEG signal analysis and 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.