

차수 스펙트럼 변화를 통한 차실내부 음질 향상

Sound Quality Improvement of Car Interior Noise Through the Change of Order Spectrum

신성환[†], Takeo Hashimoto*

(Sung-Hwan Shin[†] and Takeo Hashimoto*)

국민대학교 자동차공학과, *Seikei University, Japan

(접수일자: 2013년 4월 11일; 채택일자: 2013년 5월 8일)

초 록: 자동차 엔진을 포함한 구동계 및 흡배기계 소음의 특징은 차수 스펙트럼 (order spectrum) 분석으로 파악할 수 있다. 기존의 선행 연구에서는 엔진의 1차 및 2차 점화주파수 (firing frequency)와 관련된 차수성분이 차실내부 소음에 주요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 차수스펙트럼의 변환에 따른 차실내부 소음의 음질 (쾌적감) 차이를 파악하고자 한다. 이를 위하여 6실린더 및 4실린더 가솔린 엔진을 가진 승용차의 차실 내부 소음을 측정하고, 이 소음에 적응형 디지털 필터 (adaptive digital filter)를 적용하여 차수레벨을 가감하는 방법으로 수정한다. 쌍 비교법을 이용한 청음실험을 통하여 원음 및 편집음의 음질 정도를 평가하고, 음질 향상을 위한 차수스펙트럼 변화 방향을 제시한다. 결과적으로 반-차수 (half-order) 성분의 차수레벨 감소가 차실내부 소음의 쾌적감 향상에 영향을 주는 반면, 점화차수 레벨의 감소가 향상 음질에 긍정적인 영향을 주는 것은 아님을 파악하였다.

핵심용어: 차실 소음, 음질, 차수스펙트럼, 쾌적감, 쌍비교법

ABSTRACT: Order spectrum analysis is widely used to grasp the features of noises due to powertrain system including engine and intake/exhaust system. It is known from many previous researches that order components related to the first and second firing frequencies of engine considerably affect the noise of car interior. The purpose of this paper is to find out the difference in sound quality: Pleasantness of car interior noise according to the change of its order spectrum. For this, car interior noises of 6-cylinder and 4-cylinder engines are recorded and their order spectrum levels are modified by applying adaptive digital filters. After subjective listening test employing paired comparison method is conducted, it is investigated that the level change of half-order components is a noticeable factor to improve Pleasantness of the car interior noises whereas level decrease of firing order does not always give the positive effect on its sound quality.

Keywords: Car interior noise, Sound quality, Order spectrum, Pleasantness, Paired comparison method

PACS numbers: 43.50. Qp

1. 서 론

최근 자동차 분야에서 음질기반 소음제어(sound quality based noise control)은 제품의 시장 경쟁력 및 선호도를 향상시키는 중요한 분야로 인식되고 있다.^[1] 자동차 차실내부 소음은 풍절음(wind noise), 타이어 소음, 엔진을 포함한 구동계 소음 및 흡배기계

음으로부터 영향을 받는다. 특히 엔진 소음은 차량 정지 및 주행 중 주요한 소음원으로 차실내부 소음의 향상을 위해서는 이에 대한중점적인 고려가 요구된다.

자동차 엔진 소음은 차수분석(order analysis)을 통해서 그 특징이 파악되고, 1차 및 2차 점화주파수 (firing frequency) 성분이 차실내부 소음레벨(SPL(dB))에 큰 영향을 준다. 하지만, 데시벨(dB) 스케일에서의 소음레벨이 음질(sound quality)을 직접적으로 표현하기에는 부족하고,^[2] 보다 자세한 음질평가를 위해서는 차수스펙트럼 분포와 2차 이상의 점화 주파

[†]Corresponding author: Shin Sung-Hwan (soulshin@kookmin.ac.kr)
Department of Automotive Engineering, 77 Jeongneung-ro, Seongbuk-gu, Seoul 136-702, KOREA
(Tel: 82-2-910-5743, Fax: 82-2-910-4839)

수 성분이 고려되어야 한다는 연구가 발표되고 있다.^[3-5]

본 논문에서는 차실내부 소음의 음질 향상을 위하여 차수스펙트럼의 변화에 따른 차실내부 소음의 음질(쾌적감, *Pleasantness*) 차이를 파악하고자 한다. 이를 위하여 6 실린더 및 4실린더 가솔린 엔진을 갖는 승용차(*passenger car*)의 차실 내부 소음을 측정하고, 차수분석을 수행한다. 차수스펙트럼을 변화시키기 위해서 적응형 디지털 필터를 적용하고, 각 차수레벨을 가감하여 평가음을 제작한다. 음질 변화 파악을 위해서는 쌍비교법(*Paired Comparison Method; PCM*)을 이용한 주관적 청음평가를 수행한다. 이를 바탕으로 대상 차량의 음질 향상을 위한 차수스펙트럼 패턴 변화 방향을 제시한다.

II. 대상 소음 및 평가 방법

본 논문에서 사용된 대상 소음은 I형 6실린더 가솔린 엔진(배기량 2800 cc)를 가진 중형차(*mid-sized sedan*)와 I형 4실린더 가솔린 엔진(배기량 2200 cc)의 차실 내부 소음으로 반무향실에서 2000 rpm에서 4000 rpm 까지 2단 급가속 주행조건으로 녹음되었다. 대상음의 녹음 위치는 차량 조수석에 위치한 더미헤드(*dummy head*)를 이용하였다.

녹음된 대상소음의 차수분석 결과를 바탕으로 차수성분의 레벨을 변경하여 평가음을 생성하였다. 각 그룹별 대상음 수정 방법은 III장 각 절에서 자세히 기술한다.

차수성분의 변화에 따른 쾌적감의 차이를 파악하기 위하여 주관평가(*subjective listening test*) 방법 중 가장 일반적으로 사용되는 등급평가 방법(*ranking method*)인 쌍비교법을 적용하였다. 쌍비교법에서는 t 개의 평가음이 주어질 경우, ${}_tC_2 = \frac{t(t-1)}{2}$ 개의 비교쌍을 조합한 후, 임의의 순서로 재생하여 주어진 청감(쾌적감)에 더욱 적합한 음을 선택하는 방법으로 Fig 1과 같은 평가프로그램을 제작하여 수행하였다.

쌍비교법에서 평가자(*jury or subject*)의 평가 결과가 평가중 일관성을 유지했는지를 확인하기 위하여 일관성계수(*coefficient of consistency, ξ*)를 계산하였다. ξ 는 다음과 같이 정의된다.^[6]

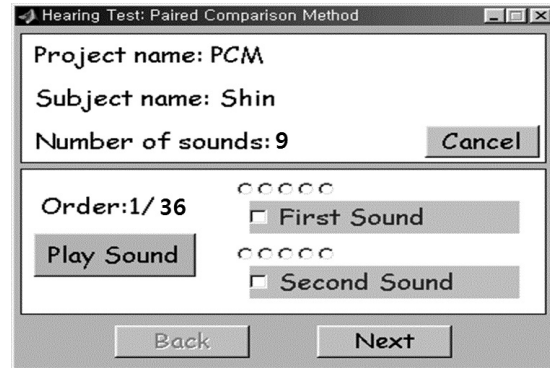


Fig. 1. Software for subjective listening test employing paired comparison method.

$$\xi = \begin{cases} 1 - \frac{24c}{t(t^2-1)} & \text{if } t \text{ is odd} \\ 1 - \frac{24c}{t(t^2-4)} & \text{if } t \text{ is even} \end{cases} \quad (1)$$

$$c = \frac{t}{24}(t^2-1) - \frac{1}{2}T, \quad (2)$$

$$T = \sum_{i=1}^t (a_i - \bar{a})^2, \quad (3)$$

$$\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^t a_i}{t} = \frac{1}{2}(t-1). \quad (4)$$

여기서, c 는 평가자의 일관성 결여를 나타내는 원형 삼각관계의 개수(*circular triad*)이다. 즉, 평가음 A, B, C가 있을 경우, 평가에서 $A > B > C > A$ 로 평가한 횟수를 의미한다. a_i 는 각 평가음이 주어진 청감에 적합하다고 선택된 횟수이다. ξ 는 c 가 0인 경우, 즉 전체 평가에서 일관성을 유지했을 때 1이고, 반대로 모든 평가에서 일관성을 갖지 못할 경우, 최소값 0을 갖는다. 본 연구에서는 χ^2 분포의 95% 신뢰도를 고려하여 $\xi=0.6$ 이상의 일관성을 갖는 평가 결과만을 반영하였다.

주관평가에는 정상청력^[7]을 갖는 22명의 남성과 10명의 여성, 총 32명의 평가자가 참여하였고, 평가음은 개방형 뒷계(*open-type circumaural*) 헤드폰을 사

용하여 재생되었다. 개방형 뒷게헤드폰은 저주파수 성분의 생리소음(physiological noise)과 관련한 레벨 변화를 감소시키기 때문에 저주파수 소음을 포함한 음의 평가에 적당하다.^[8]

III. 차수 스펙트럼과 쾌적감

차실내부 소음의 차수 스펙트럼과 쾌적감과의 관계를 알아보기 위하여 이미 녹음된 대상음의 차수분석 결과를 바탕으로 차수성분을 4개의 그룹으로 분류하고, 적응형 디지털필터^[9]를 사용하여 각 차수레벨을 가감하는 방법으로 수정하였다. 각 그룹별 수정된 평가음은 쌍비교법을 이용하여 쾌적감 등급이 평가되었다. 3.1절에서 3.4절까지는 6 실린더 엔진 차량 소음의 차수 스펙트럼과 쾌적감의 관계를 알아보고, 3.5절에서는 4실린더 엔진 차량소음에 대한 추가 고찰과 실험 결과를 요약한다.

3.1 반-차수(half-order) 성분 변화

6 실린더 엔진 차량에 대한 차실내부 소음의 반-차수 성분이 음질에 미치는 영향을 파악하기 위하여 15차 이하의 반-차수 성분(C1.5, C2.5, C3.5 등)의 레벨을 대상음(원음)의 레벨을 기준으로 -12dB에서 +12dB 까지 3dB 간격으로 증감하였다. 원음을 포함하여 총 9개의 평가음에 대해서 쌍비교법 적용 청음평가를 수행하였다. 각 평가자에 대한 ξ 을 계산한 결과 평가자 32명 모두가 0.6 이상의 값을 나타냈다. 이는 주어진 평가음 사이의 차이가 확연했다는 것을 의미한다.

모든 평가자의 실험결과를 평균하여 BTL(Bradley-Terry-Luce) 값^[10,11]으로 표현한 결과는 Fig. 2와 같다. 여기서 BTL 값이 클수록 해당 평가음이 더 쾌적하다는 것을 나타낸다.

Fig. 2에서 보여진 것과 같이, 차실내부 소음의 쾌적감은 반-차수 성분의 레벨이 감소할수록 증가하는 경향을 보이고, 반-차수 성분의 레벨이 6dB 이상 감소할 때, 원음과 비교하여 쾌적감 향상이 두드러지게 나타남을 알 수 있다. 이러한 BTL 값들의 차이는 평가음 사이에 차이가 두드러짐을 의미하고, 이는 평가자들이 일관성 있는 평가를 한 것과 관련된다. 소음제어 관점에서 실질적으로 반-차수 성분을 6dB

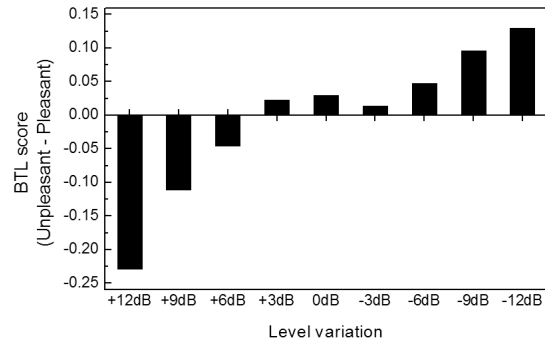


Fig. 2. Effect of variation in levels of the half-order components to Pleasantness.

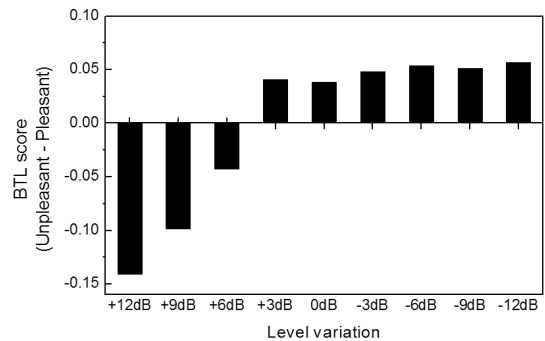


Fig. 3. Effect of variation in levels of the integer order components excluding the firing order and its harmonics to Pleasantness.

이상 감소하는 것이 쉽지 않기 때문에 반-차수 성분을 6dB 감소한 경우를 최적으로 판단한다.

3.2 정수배 차수(integer order) 성분 변화

6실린더 엔진의 점화차수(C3) 및 점화차수의 조화 성분(C6, C9, C12, C15)을 제외한 정수배 차수(C1, C2, C4, C5, C7 등)들의 쾌적감에 대한 영향을 보기 위하여 각 차수 성분의 레벨을 -12dB에서 +12dB까지 3dB 간격으로 증감하였다. 이 때 평가음 제작을 위해 사용한 기준음은 원음이 아니라 3.1절에서 최적으로 판단된 반-차수 성분의 레벨이 6dB 감소한 것이다.

수정된 평가음을 쌍비교법으로 평가한 결과는 Fig. 3와 같다. 일관성 검증을 통하여 21명의 평가자의 평가 결과만을 적용하였고, 이는 평가음 사이의 차이가 명확하지 않았기 때문에 평가에 어려움이 있었음을 의미한다.

정수배 차수 레벨이 변하지 않은 기준음과 비교할 때, 각 차수 성분의 레벨이 6dB 이상 증가할 경우 쾌

적감이 명확하게 감소한다. 그러나 차수 성분의 레벨이 감소한 경우에는 쾌적감 면에서 주목할 만한 변화가 나타나지 않는다. 이러한 결과는 정수배 차수의 변화가 쾌적감의 향상에 큰 영향을 주지 못함을 나타낸다.

3.3 점화차수(firing order) 성분 변화

6 실린더 엔진의 점화차수는 차수분석에서 3차 성분으로 차실내부 소음의 음압레벨에 가장 큰 영향을 준다. 이러한 점화차수 성분의 쾌적감에 대한 영향을 파악하기 위하여 3.1과 3.2절과 같이 점화차수 레벨을 -12 dB에서 +12 dB 까지 3 dB 간격으로 증감하는 방법으로 평가음을 만들었다. 이 때, 기준음은 3.2절에서 사용한 것과 동일하다.

점화차수 레벨 변화에 따른 쌍비교법의 결과는 Fig. 4와 같고, 일관성 검증을 통하여 21명의 평가자의 결과를 반영하였다. Fig. 4에서 점화차수 레벨이 변화된 평가음들의 BTL 값들을 기준음의 BTL 값과

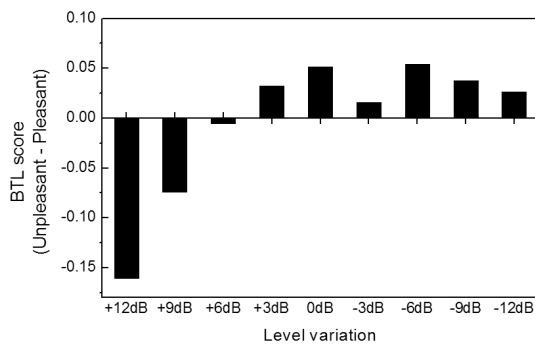


Fig. 4. Effect of variation in level of firing order (C3) component to Pleasantness.

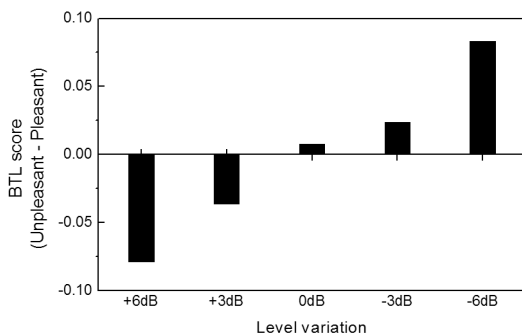


Fig. 5. Effect of variation in levels of the firing harmonic order components (C6, C9, C12, C15) to Pleasantness.

비교할 때, 대부분 작거나 거의 비슷한 값을 갖고 있음을 볼 수 있다. 특히, 레벨 감소가 클 경우(-9 dB, -12 dB)에 쾌적감이 오히려 감소하는 것으로 나타난다. 이러한 결과는 대상 차량의 점화차수 레벨 변화가 차실내부 소음의 쾌적감 향상에 영향이 크지 않다는 것을 의미한다.

3.4 점화차수의 조화성분 변화

마지막으로 점화차수의 조화성분(C6, C9, C12, C15) 레벨 변화가 차실내부 소음의 쾌적감에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 3.2절에서 사용한 기준음에서 각 조화성분 레벨을 -6 dB에서 6 dB 까지 3 dB 간격으로 증감하였다. 기준음과 4개의 평가음을 대상으로 쌍비교법을 적용하고, 일관성 검증을 통하여 27명의 평가 결과로부터 얻은 결과는 Fig. 5와 같다.

Fig. 5로부터 점화차수의 조화성분 레벨을 감소시킬수록 차실 내부의 쾌적감이 증가함을 알 수 있다. 실제 소음 제어 관점에서 점화차수의 조화성분 레벨에 대해서 3 dB 감소시킬 경우 향상된 쾌적감을 얻을 수 있다고 판단된다.

3.5 추가 실험 및 요약

3.1절부터 3.4절까지 6 실린더 엔진 차실내부 소음의 차수 스펙트럼과 쾌적감 사이의 관계를 알아보기 위해 수행한 과정을 4 실린더 엔진 차실내부 소음에 동일하게 적용하였다. 단, 4 실린더 엔진의 경우 점화차수는 차수분석에서 2차 성분(C2)이다.

Fig. 6은 쌍비교법을 적용한 결과이다. 반-차수 성

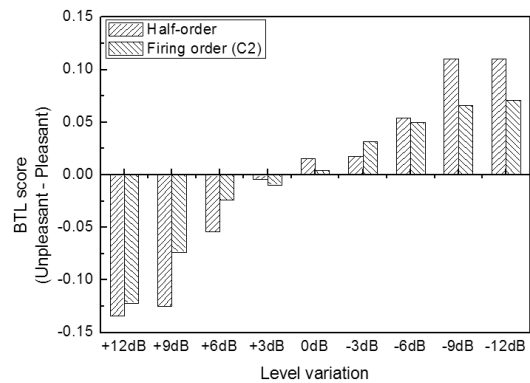


Fig. 6. Effects of variation in level of half-order components or firing order (C2) component to Pleasantness.

본 레벨 변화에 대하여 일관성 검증을 통과한 30명의 평가 결과를 보면, 관련 성분의 레벨을 6dB 감소시킬 때 쾌적감이 주요하게 증가한다. 그리고 27명의 평가자 결과를 사용한 점화차수의 경우에는 레벨을 3 dB 감소시킬 때 쾌적감에 긍정적인 영향이 나타남을 확인할 수 있다. 반면, 4 실린더 차량의 경우에는 정수배 차수 성분과 점화차수의 조화성분 레벨

변화가 차실 내부의 쾌적감 향상에 뚜렷한 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

지금까지 살펴본 2가지 엔진타입의 차실내부 소음에 대하여 쾌적감 향상을 위한 차수 스펙트럼 변화 방향을 정리하면 Table 1 과 같다. 두 종류의 차량에 대해서 반-차수 성분의 레벨이 감소할 경우 쾌적감이 향상되고 있다. 기존 연구에서 차실내부 소음 레벨에 주요한 영향을 주었던 점화차수의 경우에는 4 실린더 엔진 차량의 경우에만 레벨 변화가 쾌적감 향상에 영향을 주고 있다. 또한 점화차수의 조화성분들의 레벨 감소는 6실린더 엔진 차량에서만 쾌적감을 향상시킨다. 이러한 결과는 점화주파수와 관련된 차수 성분의 레벨 감소가 항상 음질을 향상시키는 것은 아니라는 것을 의미한다. 점화차수와 점화차수의 조화성분을 제외한 정수배 차수의 레벨 변화의 경우에는 차실내부 소음의 쾌적감에 큰 영향을 주지 않는다.

Table 1. Order level variations for improving Pleasantness of car interior noise.

Order	6-cylinder vehicle	4-cylinder vehicle
Half orders	-6 dB	-6 dB
Integer orders	level unchanged	level unchanged
Firing order	level unchanged	-3 dB
firing harmonic orders	-3 dB	level unchanged

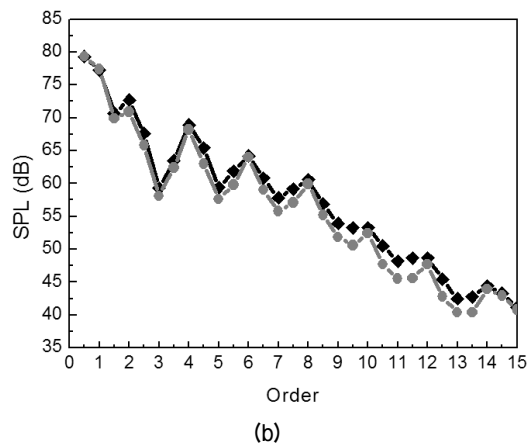
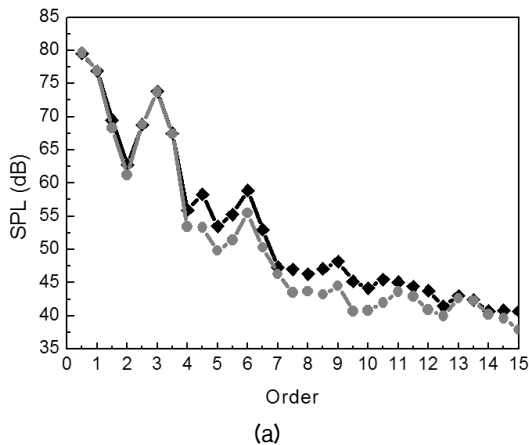


Fig. 7. Comparisons between order spectra of original car interior noise (-◆-) and its modified sound (-●-) for improving Pleasantness: (a) I6 type and (b) I4 type engines.

Figs. 7(a)와 (b)에서는 각 차량 소음에 대하여 쾌적감이 향상되는 방향으로 변형된 차수스펙트럼을 원음의 차수스펙트럼과 비교한다. 차수 변화에 따른 차실 내부 소음레벨 차이는 6실린더 차량의 경우 0.8 dB, 4기통 차량의 경우 1.3 dB임에도 불구하고, 차수 스펙트럼 변화에 따라 쾌적감에서는 주목할 만한 변화가 발생함을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문은 차실내부 소음 음질을 향상시키기 위하여 차수스펙트럼과 쾌적감의 관계를 알아보았다. 6 실린더 차량의 경우 기대했던 것보다 달리 점화차수의 레벨의 감소가 쾌적감의 향상에 큰 영향을 주지 못한 반면, 반-차수 성분과 점화차수의 조화성분의 레벨 감소가 쾌적감 향상에 영향을 주었다. 또한 4 실린더 차량의 경우에는 점화차수 레벨 감소와 함께 6 실린더 차량과 마찬가지로 반-차수 성분의 감소가 쾌적감 향상에 기인함을 확인하였다. 이는 반-차수 성분이 정수배 차수와 더해져 음의 거친 정도(roughness)가 증가하고, 명료도(clarity)가 감소하기 때문으로 파악된다.

향후 엔진 종류에 따른 대상 차종을 다양화하여 동일 시험을 수행함으로써 연구 결과에 대한 일반성을 확보하고, 차수스펙트럼 변화에 따른 쾌적감 이외의 청감(perceptual feeling)에 대한 영향을 파악할 예정이다. 이에 더하여 엔진 타입에 따라 최적의 차실내부 음질 구현을 위한 차수스펙트럼 레벨분포를 제안하고자 한다. 이러한 연구는 하이브리드 차 또는 전기차와 같이 저소음 차량에 대한 음 설계(sound design) 분야에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 논문은 국민대학교 교내 연구지원 프로그램 및 Seikei Univ. 심리음향연구실의 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다.

참고 문헌

1. R. H. Lyon, *Designing for Product Sound Quality* (Marcel Dekker, New York, 2000).
2. R. S. Hellman and E. Zwicker, "Why can a decrease in dB (A) produce an increase in loudness?," *J. Acoust. Soc. Am.* **82**, 1700-1705 (1987).
3. H. Murata, J. Tanaka, H. Takada, and Y. Ohsasa, "Sound quality evaluation of passenger vehicle interior noise," *SAE Noise and Vibration Conference*, Traverse City, USA, SAE931347 (1993).
4. S. Kitahara, T. Tsuchida, H. Takao, T. Hashimoto, S. Hatano, S.-H. Shin, "Relation between sound quality of car interior noise at acceleration and the other spectrum profile," *INTERNOISE 2006*, Hawaii, USA, No. 147, (2006).
5. S.-H. Shin, J.-G. Ih, T. Hashimoto, and S. Hatano, "Sound quality evaluation of booming sensation for passenger cars," *Appl. Acoust.* **70**, 309-320 (2009).
6. H. A. David, *The method of paired comparisons*, (Oxford university press, New York, 1988).
7. ISO 7029, *Acoustics-Statistical distribution of hearing thresholds as a function of age* (2000).
8. E. H. Berger and M. C. Killion, "Comparison of the noise attenuation of three audiometric earphones, with additional data on masking near threshold," *J. Acoust. Soc. Am.* **86**, 1392-1403 (1989).
9. Anon., *Artemis user manual Ver. 9.1* (Head acoustics, Germany, 2007).
10. F. Wickelmaier and C. Schmid, "A Matlab function to estimate choice model parameters from paired-comparison data," *Behav. Res. Meth. Ins. C.* **36**, 29-40 (2004)
11. D. R. Atkinson, B. E. Wampold, S. M. Lowe, L. Matthews, and H.-N. Ahn, "Asian American Preferences for Counselor Characteristics: Application to the Bradley-Terry-Luce Model to Paired Comparison Data," *Couns. Psychol.* **26**, 101-123 (1998).

저자 약력

▶ 신 성 환(Sung-Hwan Shin)



1997년 2월: KAIST 기계공학과 학사
 1999년 2월: KAIST 기계공학과 석사
 2004년 8월: KAIST 기계공학과 박사
 2004년 9월 ~ 2005년 9월: KAIST 기계기술연구소 BK21 연수연구원
 2005년 9월 ~ 2008년 12월: Seikei Univ., Post Doc.
 2008년 12월 ~ 2013년 1월: 한국원자력연구원, 선임연구원
 2013년 3월 ~ 현재: 국민대학교, 자동차공학과, 조교수

▶ Takeo Hashimoto

1967년 3월: MS, D., Mechanical Eng., Seikei Univ.
 1972년 3월: Ph. D., Mechanical Eng., Seikei Univ.
 1975년 3월 ~ 1979년 3월: Research Fellow at Japan Automotive Research Institute
 1979년 4월 ~ 2012년 3월: Professor, Seikei Univ.
 2012년 4월 ~ 현재: Chancellor, Seikei Education Institution