

## 음질 요소의 주파수 의존성에 대하여

류윤선\*, 최재원\*, 조희복\*

### On the Frequency Dependency of Sound Quality Factors

Yun S. Ryu\* , Jae W. Choi\* , Hee B. Cho\*

#### Abstract

Sound quality is becoming the major concern in passenger vehicle. The study on it has been done recently but it is not good enough. In order to improve the sound quality in passenger vehicle, so many noise sources must be considered and human feeling to the noise also be taken into account.

In this paper, the sound quality was analyzed by vehicle road test which was carried out with varying the traveling speed. As basic factors for sound quality, only objective factors are considered such as loudness, sharpness, speech intelligibility, sound pressure level...etc. The relations between sound pressure level and other factors are discussed from a point of view of traveling speed dependency. The frequency dependency of sound quality factor is also analyzed by frequency analysis.

#### 1. 머릿말

최근 10년간 자동차의 소음 문제는 크게 발전되어 많은 성과를 거두어 왔으나, 아직까지 음질에 대해서는 개선의 여지가 많은 것으로 파악된다. 이는 음질이 자동차의 소음 문제에 적극적으로 반영되지 못하고 있기 때문이기도 하다. 이처럼 자동차에서 소음, 특히 차 실내 음질(音質)은 제품의 고급화를 가늠하는 중요한 요소의 하나로 지적되고 있다. 최근, 음질의 연구에 여러 가지 통계학적 수법이 활용되고, 감성(感性) 실험의 결과를 지수화하는 연구도 시도되고 있으며, 음질 평가 요소를 정립하는 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이다. 그러나, 음질의 요소를 공학적인 표준으로 정할 수 있는 단계에 이

르렀다고 볼 수 없는 것 또한 사실이다<sup>[1]</sup>.

자동차의 소음 문제는 엔진과 차체의 설계, 조립이 끝난 단계에서 결과적으로 나타나는 경우가 대부분이며, 대개의 경우는 시행착오를 거쳐 부분적으로 흡/차음 함으로써 그 해결책을 모색하고 있다. 이러한 방법이 음압을 감소시키기 위해서는 현실적이며, 효과적인 것으로 활용되어 왔다. 그러나, 지금까지 소음에서 음압의 측면이 강조되어 온 것과는 달리, 음질의 문제는 흡/차음으로 해결될 수 없는, 구조적으로 민감한 요인이 될 가능성이 대단히 크다. 특히 음질의 경우, 정확한 예측/분석이 선행되어야 하며, 적절한 대응 방법에 대하여 깊은 연구가 요구된다<sup>[2]</sup>.

본 연구는, 자동차의 실내 음질을 설계 단계에서 미리 예측/개선하기 위하여, 음질의 시험/분석 과정을 정립한다는 차

\*: 현대자동차(주) 선형연구실 TM 진동연구팀

원에서 음질의 객관적 평가 인자인 음질 요소를 정리하고, 음질 요소와 음압이 주행 속도에 따라 어느 정도 연관성을 가지는지에 대한 검토를 목적으로 한다. 이를 위하여, 주행 상태의 차 실내음을 측정하고, 음질 요소에 대한 객관적 평가 인자를 분석하여 고찰한다.

## 2. 음질 요소

자동차 실내의 음질 요소는 객관적인 평가 인자로서, 주관적인 관점을 객관화 시키기 위한 것이다. 차 실내 음질 평가에는 객관적인 평가와 병행하여, 주관 평가도 활용되고 있지만, 본 연구에서는 객관적인 음질 요소에 대해서 언급한다.

### 2.1 음압 레벨(Sound Pressure Level)

음질 요소 중 주관적으로 느끼는 짜증스러움(annoyance)에 가장 민감한 요소이다. 인간의 귀 구조를 감안하여 청각의 주파수 전달 특성을 고려한 음압 레벨을 구하고, 이를 A 특성 가중치로 수정하여 사용하는 방법으로, dB(A) 스케일로 나타낸다.

### 2.2 라우드니스(Loudness)<sup>[3]</sup>

라우드니스는 일반적으로 'N'으로 표기하며, 라우드니스의 단위는 'sone'이다. 심리 음향 실험을 통해 구해진 등라우드니스 곡선을 이용하여, 40 dB를 갖는 1 kHz 순음의 라우드니스를 1 sone으로 정의하였다.

### 2.3 대화의 명료도 (Speech Intelligibility)

대화의 명료도는, 대화가 배경 소음에 의해 어느 정도 방해 받는가를 판단하는 척도로 쓰여지고 있다. 이는

Beranek<sup>[4]</sup>에 의해 제안되었으며, 600 - 1200 Hz, 1200 - 2400 Hz, 2400 - 4800 Hz의 각 주파수 대역에서의 음압 레벨의 평균값으로 구해진다.

### 2.4 샤프니스(Sharpness)

샤프니스는 스펙트럼의 저주파-고주파 성분간의 분포에 의해 결정되며 측정 방법은 Bismark, Aures 등에 의해 제안되었으나, 라우드니스와는 달리 아직 표준으로 채택된 것은 없다. 단, Zwicker 등에 의해 reference value, 즉 60 dB, 1 kHz의 순음의 샤프니스가 1 acum으로 정의되었다.

$$S = C \frac{\int_0^{24\text{bark}} N'(z)g(z)dz}{\ln\left(\frac{N+20}{20}\right)} \text{ (acum)} \quad (1)$$

이때, S는 샤프니스(Sharpness)를 나타내며, z는 임계 대역률, N'는 specific loudness, g(z)는 임계 대역의 함수로 주어지는 샤프니스 가중치로서 다음과 같이 정의된다.

$$g(z) = 0.066 \cdot e^{0.171z} \quad (2)$$

### 2.5 소리의 거칠기 (Roughness)

Roughness는 변조 주파수가 20 Hz에서 300 Hz인 소음의 "거칠기"를 나타내며, fluctuation strength는 변조 주파수가 20 Hz 미만인 경우의 청감에 의한 크기 변조량을 나타낸다. 1 kHz의 순음이 70 Hz의 변조 주파수로 100%의 크기로 변조될 때, roughness는 1 asper를 갖고 일반적으로 'R'로 표기한다. Fluctuation strength는 저주파 변조에 의한 부가적 짜증스러움의 척도로서 60 dB, 1 kHz 순음이 변조 주파수 4 Hz로 100% 변조될 때, fluctuation strength, F=1 vacil로 정의되었다.

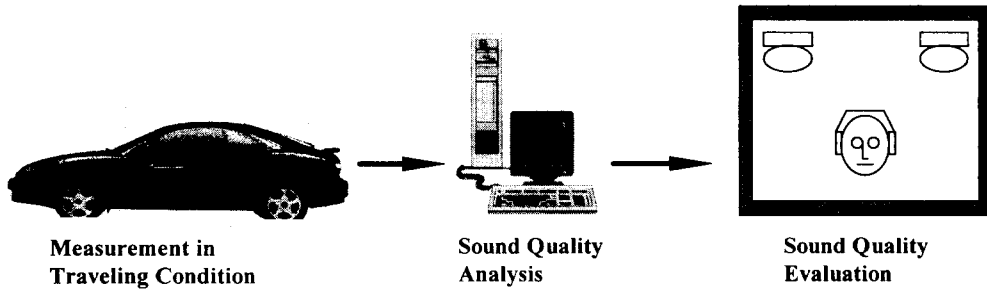


Fig. 1 Procedure of Sound Quality Analysis for Interior Noise

### 3. 시험 분석 시스템

자동차의 실내 음질에 대한 계측/분석의 개요를 Fig.1에 보인다. 실내 음질 계측은 정밀하게 이루어져야 하며, 음질은 여러 가지 조건에 민감하므로 목표를 명확히 한 상태에서 계측 및 분석되어야 한다. 일반적인 음질 계측은, 자동차가 주행 상태에 있을 때, 승객이 느낄 수 있는 형태로 녹음하는 것이 가장 이상적인 것으로 인식되고 있다. 녹음된 음으로 음질 분석 소프트웨어를 통하여 음질 인자를 파악한 후, 주관적인 평가 시험을 위해 재생 장치를 통해 재생, 평가하게 된다. 본 연구에서는 주관 평가를 생략하고, 객관 평가 인자에 해당되는 음질 요소에 대하여 분석한다<sup>[5]</sup>.

Fig.2는 음질 계측/분석 시스템을 보다 자세하게 표현한 것이다. 주행 시험의 조건은 ISO 5128-1980을 따랐으며, 실제 시험은 직선 주행 상태에서 실시되었다. 시험을 시작하기 전에 94dB의 신호를 DAT(Digital Audio Tape) Recorder에 녹음시켜 분석시 보정 신호로 삼을 수 있도록 하였다. 주행 중의 차 실내에서 승객이 감지할 수 있는 음을 정밀

하게 계측하기 위하여, Head Acoustic사의 Artificial Head Measurement System을 조수석에 고정시켰다. 더미헤드의 양귀 위치에 있는 마이크로폰을 통하여 감지된 음은 DAT Recorder를 통해 디지털 형태로 녹음되었다. 이때, 녹음되는 음은 binaural 상태, 즉 인간이 감지하는 형태에 근접시키기 위하여, 별도의 보정을 거치게 된다.

속도에 따른 경향을 관찰하기 위하여 60 km/h 부터 시작하여 120 km/h 까지

10 km/h 간격으로 속도를 고정시켜가며 약 9-10 초정도씩 녹음하였다. A/T 차량의 경우 Over Drive Off 상태에서 3 단고정으로 하였다. 이렇게 녹음된 실내음은, 음질 분석 소프트웨어에 의해서 분석되었다. 본 연구에서 사용한 음질 분석 소프트웨어는 SDRC사의 "I-DEAS Sound Quality"이다<sup>[6]</sup>. 음질 분석이란, 각 음질 요소에 대한 분석을 뜻하며, 이는 감성의 객관적인 표현법의 한 형태로 볼 수 있다.

### 4. 음질 분석 결과 및 고찰

본 절에서는, 자동차의 주행 속도에 따라 여러 가지 음질 요소들이 받게 되는 영향을 분석한다. Fig. 3은 차량의 주행 속도에 따른 실내 음압 레벨의 주파수 분석 결과를 나타낸 것이다. 횡축은 옥타브 밴

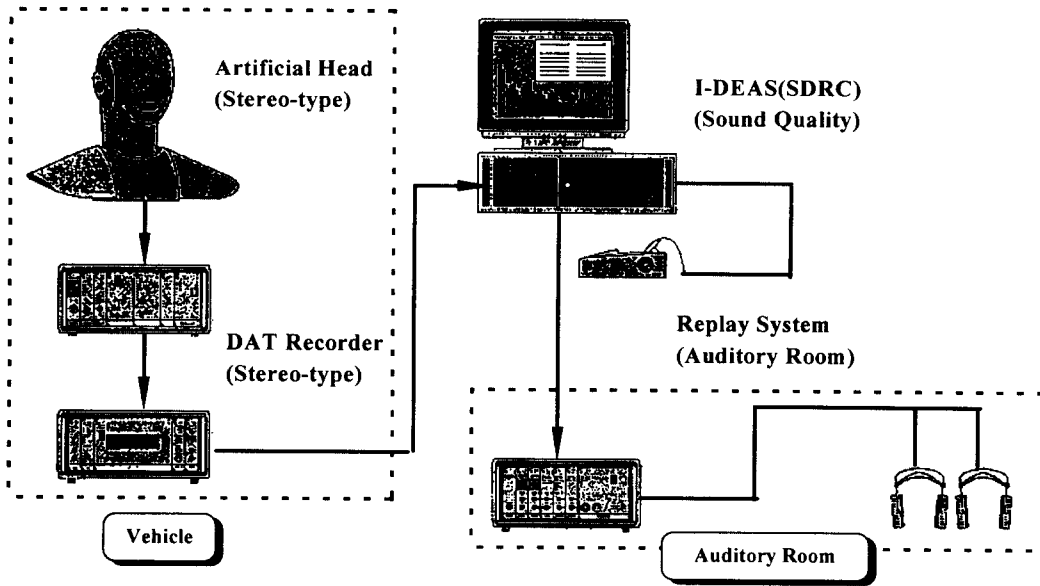


Fig. 2 Measurement and Analysis System of Sound Quality

드의 중심 주파수를 나타내고, 종축은 음압 레벨을 표시하고 있다. Fig. 4부터 Fig. 7은, 주행 속도에 따른 각 음질 요소들의 변화를 나타낸다.

그림은 공통적으로 종축은 각각의 음질 요소, 횡축은 주행 속도로 표현하고 있다. 계측 결과는 양귀 위치에 대해서 별도로 분석하였으며, 비교를 위하여 좌우 양귀에 대한 결과를 병기한다.

Fig.3 은 차량의 주행 속도마다 음압 레벨의 주파수에 따른 변화 양상을 나타내고 있다. 대체로 저주파 영역에서는 엔진 부하에 의한 소음이 지배적으로 나타난다. 이는 차의 속도가 저속에서부터 고속에 이르기까지 공통적으로 나타나는 현상이며 자동차 실내음에 있어서 가장 지배적인 요인으로 지적된다. 차 속도가 고속으로 증가함에 따라 점차 고주파 영역의 음압 레벨이 증가하는 것을 볼 수 있는데 이것은 주로 바람에 의한 영향으로 판단된다.

Fig. 4는 실내 음압과 주행 속도와의 관계를 나타낸 것으로, 주행 속도가 증가함에 따라 음압은 비례적으로 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 속도는 엔진의 부하와 비례하기 때문에, 결국 음압의 증가는 주로 소음원인 엔진의 부하에 의한 요인으로 분석된다.

Fig. 5는 라우드니스(Loudness)와 주행 속도와의 관계를 나타낸 것으로, 주행 속도가 증가함에 따라 라우드니스도 비례적으로 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 라우드니스는 음압에 의한 영향을 가장 민감하게 받고 있으므로, 음압 증가와 같은 경향을 보여주고 있다.

Fig. 6은 대화의 명료도와 주행 속도와의 관계를 나타낸 것으로, 주행 속도가 증가함에 따라 대화의 명료도는 비례적으로 감소하는 경향을 확인하였다. 대화의 명료도 역시 음압에 의한 영향을 가장 민감하게 받고 있으므로, 실내 음압이 증가함에 따라, 대화를 방해 받는 요소도

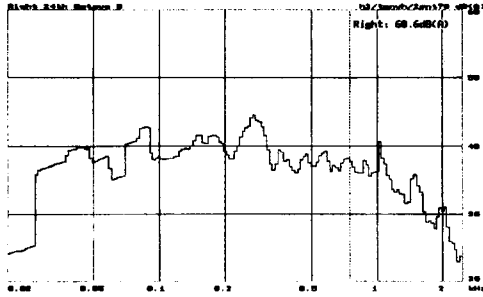


Fig.3(a) Spectrum of SPL at 70 km/h

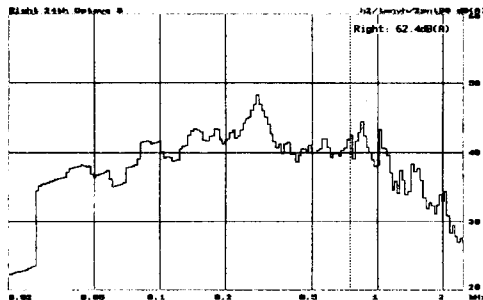


Fig.3(b) Spectrum of SPL at 80 km/h  
Fig.3 SPL Spectrum via Traveling Speed

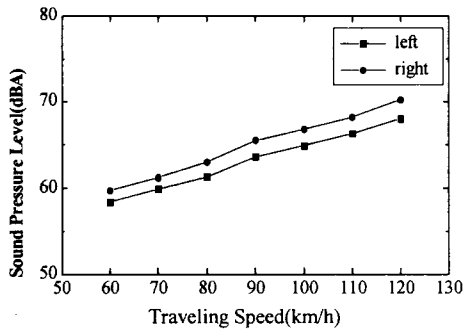


Fig.4 Result of SPL Relating to Traveling Speed

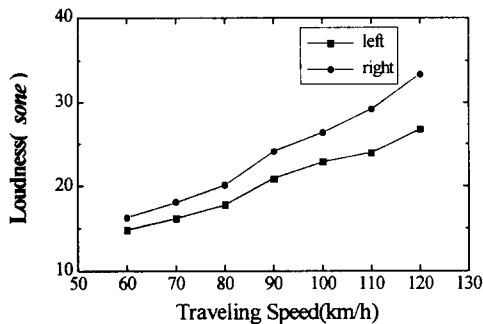


Fig.5 Result of Loudness Relating to Traveling Speed

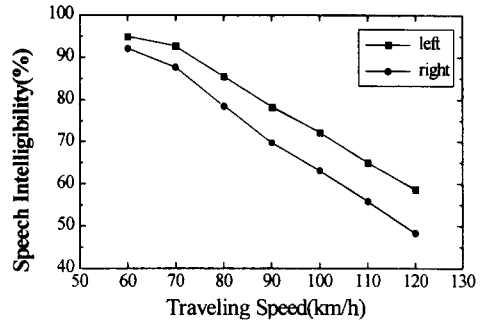


Fig. 6 Result of Speech Intelligibility Relating to Traveling Speed

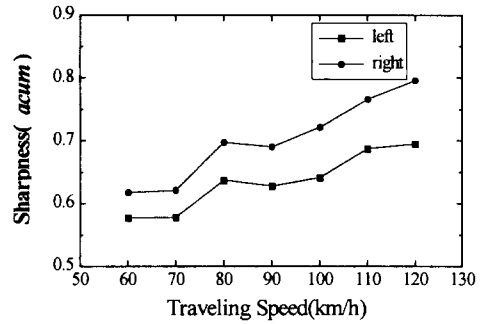


Fig.7 Result of Sharpness Relating to Traveling Speed

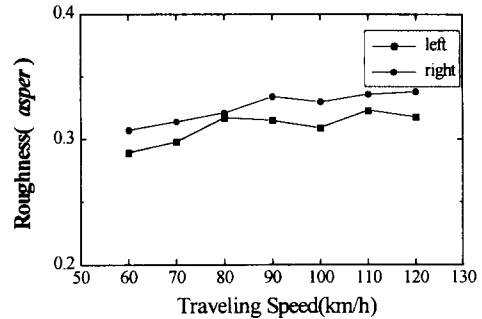


Fig.8 Result of Roughness Relating to Traveling Speed

아울러 증가하므로, 명료도는 비례적으로 감소한다고 볼 수 있다.

Fig. 7은 샤프니스(Sharpness)와 주행 속도와의 관계를 나타낸 것이다. 샤프니스는 많은 경우에 있어서 사람들이 느끼는 주관적인 느낌에 대해 라우드니스보다 더 많은 영향을 미치므로 많은 연구가 필요한 인자이다<sup>[7]</sup>. 본 시험에서 나타난 대체적인 경향으로서, 속도가 증가함에 따라 비례적으로 증가한다고 볼 수 있다. 샤프니스는 음압과 비교적 독립적인 인자이다. 주로 샤프니스에 영향을 끼치는 인자는 주파수 성분과 협대역음의 중심 주파수이다<sup>[7]</sup>

분석결과에 따르면 차속이 80 km/h의 경우에 샤프니스가 급격히 증가하는 경향을 보이는데 이것은 Fig. 3으로부터 원인을 찾을 수 있다. Fig. 3(b)에서 차속이 80 km/h인 경우 주파수 성분 곡선의 약 800 ~ 900 Hz 정도에서 발견되는 피크치가 많은 영향을 끼친 것으로 보인다. 이는 특정차에서만 특징적인 현상으로 나타나므로 고유의 현상으로 볼 수 있다. 대체적으로 차종에 따른 비교에서도 비슷한 음압 레벨을 갖는 두 차종에 대해 샤프니스는 비교적

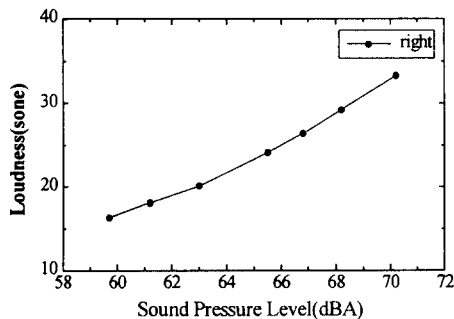


Fig. 9 Relation between SPL and Loudness

고주파 영역의 크기에 비례하는 경향이 있는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 음의 거칠기와 주행 속도와의 관계를 나타낸 것이다. 음의 거칠기도 음압과 비교적 독립적인 인자로서, 음의 주파수 성분에 좌우되는 것으로 파악된다. 자동차와 같이 여러 가지 복합적인 소음원을 가진 시스템에서는 매우 중요한 요인으로서, 각 소음원의 기여도를 파악하는데 활용되기도 한다. 또, 음의 거칠기는 엔진 회전수에 비례하는 요소로서, 정속 주행일 경우에는 주행 속도와 뚜렷한 연관성을 나타내지 않는 것으로 파악된다.

Fig. 4, Fig. 5에서 보인 바와 같이, 음압과 라우드니스(Loudness)은 주행 속도에 비례하는 특징을 보여주고 있으므로, 음압과 라우드니스와의 직접적인 관계를 살펴 본다. Fig. 9의 횡축은 음압, 종축은 라우드니스를 나타내고 있으며, 음압과 라우드니스는 서로 일의적인 비례 관계에 있음을 볼 수 있다. 또, Fig. 10에는, 횡축을 음압, 종축을 대화의 명료도로 두면, 음압과 대화의 명료도 사이에는 일의적인 반비례 관계를 가지고 있음을 확인한다. 이러한 경향은 좌,우 양귀에서 동일하게 나타나고 있음을 확인하였다.

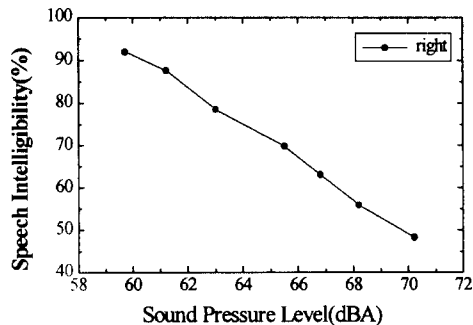


Fig. 10 Relation between SPL and Speech Intelligibility

## 5. 맺음말

주행 상태에서의 자동차 실내 음질 요소들에 대하여 음질을 분석한 결과, 주행 속도와 음질 요소와의 관계에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 주행 중의 차 실내 음압은 주행 속도에 직접적인 영향을 받으며, 주행 속도가 높아질수록 선형 비례적으로 증가하는, 비례 증가적인 관계를 가지고 있다.
2. 실내 음압은 라우드니스에 지배적인 영향을 미치는 요인으로 지적되며, 이들의 관계는 일의적이며, 비례 증가적이다.
3. 음압은 대화의 명료도에도 지배적으로 영향을 미치며, 상호 비례 감소적인 관계를 가지고 있다.

향후, 음질 요소들을 지배하는 주파수 성분에 대하여 보다 깊은 분석이 이루어져야 할 것으로 생각되며, 이에 대한 검토가 기대된다.

## 참고 문헌

1. H. Takao, S. Hatano, and T. Hashimoto, "Relation between Unpleasantness of Artificial Amplitude-modulated and Real Car Interior Noise and Roughness Level - Modulation frequency Range Causing Maximum Unpleasantness -", Proceeding of JSAE No.991, 1991, pp455-458
2. H. Murata, H. Tanaka, H. Takada, and Y. Ohsasa, "Sound Quality Evaluation of Passenger Vehicle Interior Noise", Journal of SAE, 931347, 1993
3. E. Zwicker, "Procedure for Calculating Loudness of Temporally Variable Sounds", Journal of Acoustical Society of America, Vol.62 No.3, Sept. 1977, pp675-682
4. L. Beranek, "Criteria for Noise and Vibration in Communities, Buildings and Vehicles in Noise and Vibration Control", rev. ed. McGraw-Hill Inc., 1988
5. M. Schneider, M. Wilhelm, and N. Alt, "Development of Vehicle Sound Quality - Targets and Methods", Journal of SAE, 951283, 1995
6. SDRC, "I-Deas Sound Quality™, Technical Manual", 1996
7. E. Zwicker, H. Fastl, Psychoacoustics, Facts and Models, Springer-Verlag, 1990