

# 자동차 실내 소음의 음질 연구

김정우\* · 최종대\*\* · 허정기\* · 변연섭\*

## A Study on the Sound Quality of Passenger Cars

J.W. Kim, J.D. Choi, J.K. Heo, E.S. Byun

### ABSTRACT

This paper presents the psychoacoustic analyses on the vehicle interior noise generated when accelerating. Following the objective quantification for vehicle noises of different classes, the subjective decision process by the jury test is adopted to interrelate these results based on two different approaches. In particular, the paired comparison method is employed in assessing the sound quality in terms of the quietness, the powerfulness, and the pleasantness of the human auditory sensation. Special attention is paid to the physical interpretation of psychoacoustic parameters and their interrelation to the subjective assessment scores. In order to ensure the integrity of statistics of the survey, various tests are performed. The results show that the consistency of the "quiet" sensation is far higher than that of the "powerful" and the "pleasant" sensations. Also, it is found that the most significant parameter determining these feelings turns out to be the inherent loudness of the noise instead of the conventional indicators such as the weighted sound pressure level. It may be concluded that the psychoacoustic analysis offers more realistic evaluation for vehicle noise and assists the improvement of NVH more efficiently.

**KEY WORDS** : Sound Quality, NVH, Psychoacoustics, Objective Parameters, Paired Comparison Method, Subjective Assessment, Multiple Regression

### 1. 서론

일반적으로 차량 소음을 개선하기 위해 소음 레벨 측정과 주파수 분석을 수행하며 소음원과 전달 경로를 규명하고 이를 토대로 구조변경이 이루어진다.

과거에는 이러한 소음 개선 작업에서 대부분 소음 레벨억제가 주된 관심사였지만, 최근엔 이와 더불어 소비자들의 요구에 맞는 정숙하고 쾌적한 차를 만들기 위해 차량 제조 업계에서는 경쟁적으

로 차량소음과 관련된 청감 음향 인자(Psychoacoustic Parameter)를 규명하고 개선하는데 관심을 집중시키고 있다. 1960년대부터 시작된 청감 음향학 (Psychoacoustics)에 대한 연구는<sup>1)</sup> 1990년대에 이르러 자동차 소음 음질개선에 널리 응용되기 시작하였다. 이에 대한 중요도는 국제 규약에서 청감 인자에 대한 규정을<sup>2)</sup> 채택하기에 이르렀다. Hussain등은 주관적 불쾌인자(Annoyance)와 여러 객관 인자를 고려한 다중 회귀(Multiple Factor Regression) 분석을 통해 불쾌 지수(Annoyance Score)를 모형화하였다.<sup>3)</sup> Saito<sup>4)</sup>, Hatano<sup>5)</sup>, 그리고 Hashimoto<sup>6)</sup>는 차량 소음의 주요한 음질 인자를 SD 기법(Semantic

\*현대자동차 소음진동연구팀 \*\*현대자동차 기능시험1팀

Differential Technique )과 요인 분석 기법( Factor Analysis )을 이용해 쾌적 인자( Pleasant ), 파워 인자( Power ), 부밍 인자( Booming )의 세 형태로 정의하여 정량화하였으며, 동조( Modulation )에 대한 청감 계수를 주관 평가를 통해 구해 새로이 개선된 거칠기(Roughness) 모델을 수립하였다.

본연구의 목적은 첫째, 주행차량의 실내소음에 대한 청감 음향학적 고찰을 통하여 청감 객관 인자( Psychoacoustic Parameters )와 소음 분석에 필수적인 음압 레벨과 주파수 분석 결과의 상호관계를 규명하고, 둘째, 주관 평가를 통해 여러 타입의 차량들에 대한 청감인자의 선호도를 조사 분석하며, 마지막으로, 주관 평가 인자에 가장 영향력 있는 객관 인자를 찾아내어 청감 모델을 구성하는데 있다. 이렇게 구성된 청감모델은 주관평가를 거치지 않고 차량평가 및 음질개선의 지표로 이용할 수 있게 된다. 연구 내용은 그림 1 과 같은 절차로 진행되었다. 차량 주행 소음을 수집하여 청감 음향학 분석을 거친후 신호 처리되지 않은 소음 Data로 차량음질에 있어서 중요하게 연구되고 있는 "Quietness", "Powerfulness", "Pleasantness" 세 인자들에 대해 주관 평가 시험을 실시하였다. 평가 결과의 통계 처리로 유의 수준을 확보하고 객관 인자와의 상관 관계 그리고 주관 평가 인자간의 상관관계를 조사하여 주요 인자를 선택하였으며 이를 이용해 청감모델을 구성하였다.

## 2. 자동차 실내 음질 분석

### 2.1 차량 실내 소음 수집

실제 청감을 묘사하기 위하여 Binaural Sound 형태의 소음 데이터를 수집하였다. 데이터 수집 장비로서 Head Acoustic사 Artificial Head Measurement System을 조수석에 위치시키고 Engine Tacho Signal과 동시에 Dual Channel DAT Recorder에 기록하였다. 주행 시험은 남양승용 연구소 직선 주행로에서 실시되었다. 데이터 수집시 음향 환경은 관련 규격(1)에 명시된 사항을 준수하였으며 측정 방법도 이에 기초하였다. 본 시험에서는 10대의 차량 소음 데이터가 수집되었으며 차량은 Engine 기종별로 표1 에 분류 정리하였다.

주행 시험은 자동 변속기 장착 차량의 경우 2단,

수동 변속기 차량은 3단에 각각 고정시킨 후 Engine의 회전 속도를 1,500 rpm에서 5,500rpm까

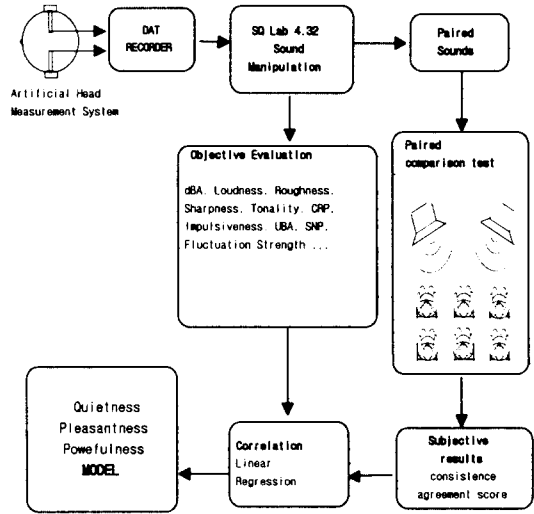


그림 1: 음질평가 분석 절차

CAR	TYPE	Engine	T/M
A	sedan	1.5L	M/T
B	sedan	1.5L	A/T
C	sedan	1.5L	A/T
D	sedan	2.0L	A/T
E	sedan	2.0L	A/T
F	coupe	2.2L	A/T
G	coupe	2.5L	M/T
H	sedan	3.0L	A/T
I	wagon	3.0L	A/T
J	sedan	3.0L	A/T

표 1 : 음질 분석 시험 차량

지 급가속시키는 Sweeping Test로서 실시하였다. 그림2 에 수집된 데이터들의 O/A level과 3000-4000rpm구간의 1/3rd spectrum을 도시하였다.

### 2.2 객관 인자 분석

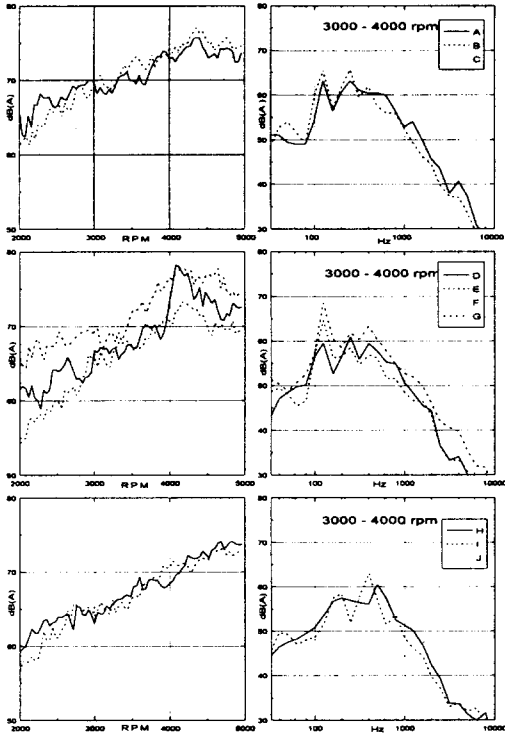


그림 2: 시험차량들의 O/A레벨과 1/3rd Spectrum

수집된 소음 Data는 Head Acoustics사 SQ Lab System( Version 4.32 )을 이용하여 처리하였다.<sup>9)</sup> HMS System에서 Digital 형태로 수입된 Data는 Engine Tacho Signal을 기준으로 여러 특정 구간 별로 처리되었다. 주관평가 구간과 비교분석을 위해 3,000~4,000 rpm 구간을 선택하여 Zwicker의 Psychoacoustics 이론<sup>1)</sup>에 근거한 객관 인자 분석이 실시되었다. 여기서 분석된 청감인자 (Psychoacoustic Parameters)들과 이로부터파생된 응용 인자에 대한 정의 및 요약은 부록에 포함하였다. 객관 음질 인자 분석에 앞서 차실내 소음 Data는 Engine RPM Sweeping Test 결과이므로 Raw Data의 통계학적 특성에 대한 고찰이 필요하다. 통계 분석 결과 최대 및 최소값에 따른 변화는 미소하게 나타났다. 따라서 Data의 평균값을 기준으로 분석을 실시하였다. 그 결과를 Level(dBA)을 기준으로 그림3에 비교 도시하였다. 여기서 Loudness(sone)는 Level(dBA)과 비례적인

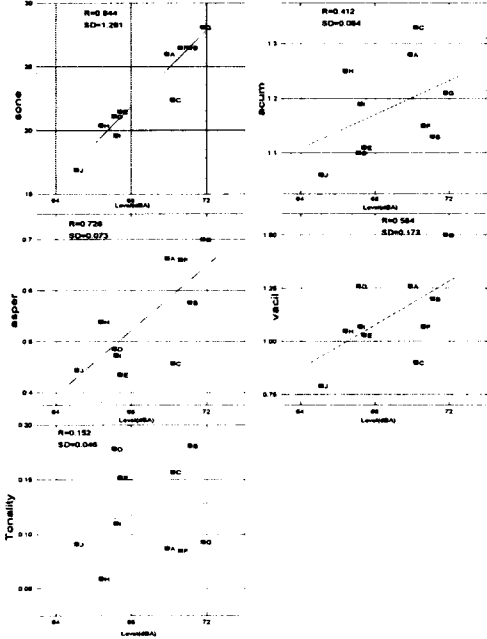


그림 3 : 레벨(dBA)에 따른 청감인자 (Psychoacoustic Parameters) 계산결과

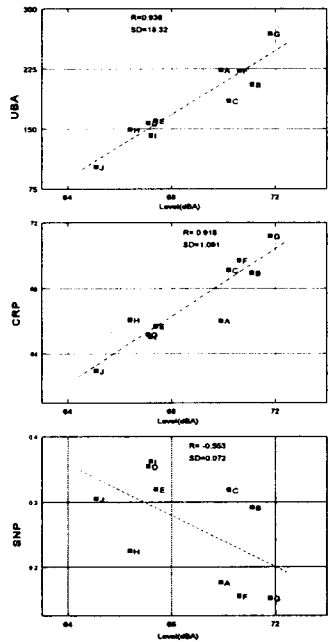


그림 4 : 응용 쾌감인자 계산 결과

성향을 나타내나 이외의 다른 인자들은 Level(dBA)과 다른경향을 보여준다. 또 객관 기본 인자에 근거해서 Pleasantness 혹은 그반대 개념인 Annoyance를 정량화시킨 응용지수로서 CRP(Composite Rate of Preference)<sup>7)</sup>, UBA(Unbiased Annoyance), SNP(Sensory Pleasantness) 를 계산한 결과를그림4 에 도시하였다. CRP와UBA는 Level(dBA)에 따라 증가하는 성향을 보여주며, SNP는 반비례적으로 나타나지만 그 상관성이 약함을 볼 수있다.

### 2.3 주관 인자 평가 분석

급가속 주행시 3,000~4,000 rpm 구간의 차량실 내소음에 대하여 주관 평가 시험을 실시하였다. 효과적인 주관평가를 위해 적절한 시간길이의 소음 데이터를 선택하기 위해서 3000-4000rpm구간을 선택하였다. 총 45개 Pair에 대한 쌍대 비교( Paired Comparison ) 방식으로 청음 Test 를 실시하였고 평가 집단은 총 55명으로 그 인원 구성은 표2 와 같다. 주관 평가 시험은 Head Acoustics사의 Playback System과 Meyer Sound사 Loudspeaker System이 설치되어 있는 Studio Class의 청음실에서 실시되었다. 10가지 Sample 소음으로 이루어진 45개 Pair를 임의로 추출하여 순서를 정한후, 일렬로 나열하였다. 이를 다시 Digital Audio Tape 에 녹음하여 평가자에게 청취시키는 방법을 택하였다. 평가자는 다음과 같은 소음의 3가지 청감에 대한 설문에 대답하였다.

1. 정숙함(Quietness)
2. 힘있음(Powerfulness)
3. 쾌적함(Pleasantness)

여기서 제3항의 쾌적함( Pleasantness )은 거부감( Annoyance )의 역으로 간주할 수 있다. 위 세가지 항목에 대한 청감 시험으로 각 평가자의 선호도 행렬( Preference Matrix )은 표3 과 같이 작성된다.각 소음 Sample에 대한 평가자의 선호도는 j 번째 열( Column )의 '1' 수를 적산함으로써 얻어진다. 반면에 같은 소음의 불쾌도( Annoyance )는 같은 열에 있는 '0' 수를 더한 결과로 나타난다. 쌍대 비교( Paired Comparison ) 응답 결과의 분석함에 앞서 고려할 사항은 응답 결과의 일관성(

평가자		인원
성별	여	8
	남	47
연령	20~29	22
	30~39	33
NVH 연구 경력자		31

표 2 : 청음 평가자 구성

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
A	E	1	0	0	0	0	1	0	0	0
B	0	E	0	1	0	0	1	0	0	0
C	1	1	E	1	1	0	1	1	1	0
D	1	0	0	E	1	0	1	0	0	0
E	1	1	0	0	E	0	1	0	0	0
F	1	1	1	1	1	E	1	1	1	0
G	0	0	0	0	0	0	E	0	0	0
H	1	1	0	1	1	0	1	E	1	0
I	1	1	0	1	1	0	1	0	E	0
J	1	1	1	1	1	1	1	1	1	E

1 : ith row > jth column,  
 0 : ith row < jth, column  
 E : ith row = jth column

표 3 : 선호도 행렬

Consistence )이다. 응답 Pattern의 일관성을 검증하기 위해 Kendall의 일관 계수( Kendall's Coefficient Consistence, K )를 계산하였다.<sup>10)</sup>

$$K = \frac{12 \sum (R - \bar{R})^2 - 3k}{k(k^2 - 4)}$$

여기서,

$$\begin{aligned} R &= \text{Row Sum} \\ \bar{R} &= \text{Row Sum의 평균} \\ k &= \text{Sample 수} \end{aligned}$$

일관 계수 K 에 따른 평가자 분포는 그림5 와 같다.

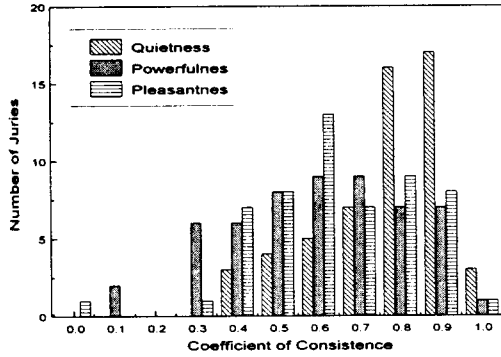


그림 5 : 일관계수(K)에 대한 평가자분포

각 소음 Sample에 대한 평가자 선호도를 각 주관평가인자들에 대하여 합산해서 평가자수로 나누어 선호도점수 구한다. 소음의 선호도 점수와 각 평가자간 일관 계수의 일치성을 조사하기 위하여  $\chi^2$ -test 를 수행하였다. 본 조사와 같이 Sample 집단의 크기가 10인 경우 ( $k > 7$ ), 다음 식을 사용한다.<sup>10)</sup> (Kendall )

$$\chi^2 = \frac{8}{k-4} \left( \frac{1}{4} C_3^k - d + \frac{1}{2} \right) + df,$$

여기서,

$$df = \frac{k(k-1)(k-2)}{(k-4)^2},$$

$$d = \frac{k(k^2-4)(1-K)}{24} \text{ 이다.}$$

정규 확률 분포의 95% 유의 수준 ( $\chi^2$  분포의 5% 유의 수준 )으로 신뢰도를 선정할 경우, 일관 계수  $K$  는 0.85 이상으로 확정되므로 본 연구에서는  $K \geq 0.85$  이상인 표본만을 고려하였다.

K	정숙함	강력함	쾌적함
$\geq 0.85$	29	12	12

표 4. 일관 계수  $K \geq 0.85$  인 평가자수

그 결과 표4 에 의한 선호도 점수 ( Preference Score )의 평균을 그림6 에 나타내었다.

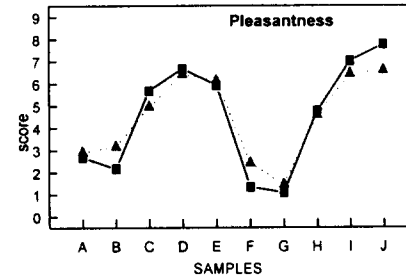
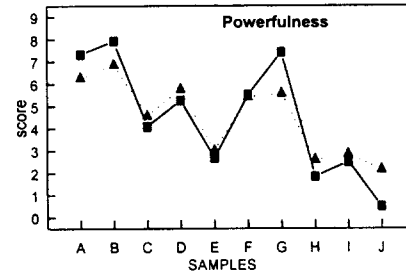
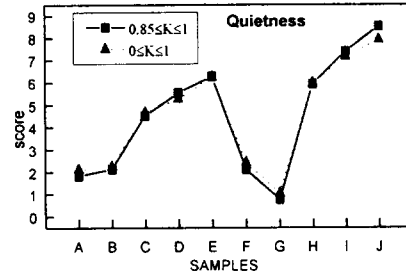


그림 6 : 일관계수(K)에 따른 주관평가 결과

## 2.4 객관 인자 비교분석

### (1) 객관인자들간의 상관계수

(표5)에서 기본인자들간의 결정계수( $R^2$ )를 보면 dBA와 Loudness가 0.89, Roughness와 Loudness가 0.74로 다소 상관성이 크게 나타났으나 그밖의 다른 인자들 상호간의 상관계수는 아주 작은 값을 보여줌으로서 이들 객관인자들은 서로 독립적인 음질(SOUND QUALITY)적 표현요소임을 보여주고 있다. 용용인자인 UBA는 Loudness와 큰 결정계수( $R^2=0.95$ )를 보여주고 있으며, SNP는 음의 거칠기(Roughness)와 크게 관련( $R^2=0.81$ )이 있는 것으로 나타났다.

### (2) 주관평가 인자들간의 상관계수



Pleasantness를 표현한다고 볼 수있다.

### 3. 청감모델 구성

주관평가인자들을 정량화 하기 위해 기본인자들에 대해 다중회귀분석을 실시하였다. 99.7%이상의 신뢰구간을 기준으로 주관평가점수와 가장 잘 일치하는 모델들을 찾아 표6 에 정리하였다. 다중회귀분석을 위해 주관평가인자들의 평균선호도 점수를 최고점으로 나누어 Normalized score를 기준으로 청감 모델을 구성하였다. SQT는 Loudness인자 하나로 98%까지 추정할수있고, SPW는 dBA와F를 이용해 95%, SPT는 dBA와R를 이용해 93%까지 추정할 수 있는 청감 모델이 만들어 졌다. 이렇게 구성된 청감 모델과 실제 주관평가 결과를 그림7에 비교 도시하였다.

	Est.SQT	Est.SPW	Est.SPT
A	2.315	-5.552	4.685
B	-0.079	0.078	-0.047
C	0.0	0.604	-1.765
X <sub>1</sub>	Loudness (Sone)	Level (dBA)	Level (dBA)
X <sub>2</sub>		Fluctuation strength(vacil)	Roughness (asper)
R	0.988	0.936	0.965
t value	22.65	-4.359	4.486
P(t)	0.000	0.003	0.003
F*	322.7	24.912	47.436
P(F*)	0.000	0.001	0.000

Est.Model = A+B(X<sub>1</sub>)+C(X<sub>2</sub>)

X<sub>i</sub> : Psychoacoustic measur

A,B,C : Regression coefficient

R : Correlation of Coefficient

t-value : t test

F\* : F test

P : Significance Level

표 6 : 주관평가인자들에 대한 다중회귀분석

### 4. 결 론

(1) "정숙함(Quietness)", "힘있음(Powerful ness)", "쾌적함(Pleasantness)" 세항목에 대한 주관평가 결

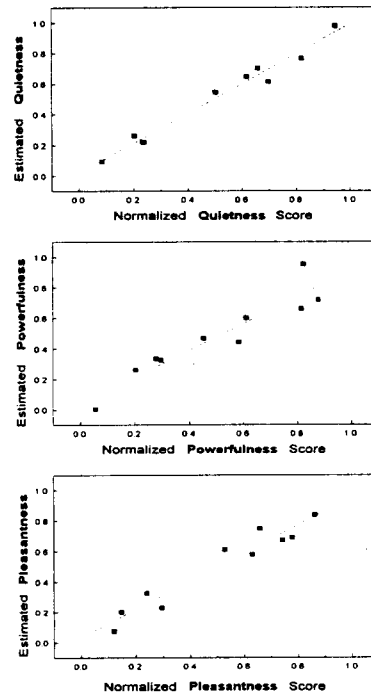


그림 7 : 청감모델 과 주관평가 결과 비교

과 "정숙함"에 대한 일관성(Consistence)이 가장 크게 나타남으로서 "정숙함"에 대한 사람들의 청감적 기준이 가장 잘 일치하는 것으로 확인되었다.

(2) 음의 크기(Loudness)가 주관평가인자("정숙함", "힘있음", "쾌적함")들과 가장 큰 상관계수가 나타남으로서 "쾌적함" 혹은 "불쾌감"을 표현하는 객관용어(CRP, UBA, SNP)들보다 청감적 음질표현요소로 더 적합하다고 확인되었다.

(3) 주관평가 결과 "쾌적함"과 "정숙함"은 비례적 경향을 보였으며, "정숙함"과 "힘있음"은 서로 반비례적 경향을 나타냈다. 그러나 "쾌적함"과 "힘있음"은 다소 독립적인 요소로 평가 되었다.

(4) 주관평가인자 "쾌적함(Pleasantness)"은 음의 크기(Loudness)이외에 음의 거칠기(Roughness)와도 높은 상관성을 보여줌으로서 여러 청감요소들

이 복합적으로 작용하는 것으로 확인되었다.

(5) 가속시 차량실내소음에 대해 주관적으로 느끼는 Quietness, Powerfulness, Pleasantness들을 객관인자들을 이용해 정량화 하였다.

## 참고 문헌

1. Zwicker, E., and Fastle, H., Psychoacoustics - Facts and Models, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1990.
2. ISO 532B. Acoustics - Method for Calculating Loudness Level, 1975.
3. Musthaq Hussain, Josef Golles, Arno Ronacher, and Herbert Schiffbanker, "Statistical Evaluation of Annoyance Index For Engine Noise Recordings", SAE paper 911080.
4. Haruki Saito, and Takeo Hashimoto, "Sound Quality Evaluation of Vehicle Interior Noise -Objective Evaluation of Comfortableness and Powerfulness", JSAE paper 9303762
5. Shigeko Hatano, and Takeo Hashimoto "Estimation on Booming Factor of Running Car Interior Noise - Estimation by Artificial Sound and the Location of Car Interior Noise ", JSAE paper 9435441
6. Takeo Hashimoto, "Modification of Roughness Level for Higher Correlation with Unpleasantness - Weighted Roughness Level due to Modulation Frequencies", JSAE paper 9735132.
7. "Vehicle noise quality - towards improving the correlation of objective measurements with subjective rating" C389/468 IMechE 1992.
8. ISO 5128-1980. Acoustics - Measurement of Noise inside Motor Vehicles ( 1980-08-01 )
9. Binaural Sound Measurement - A New Start for Hearing- adapted Classification of Noise, BAS manual, Appendix A
10. Ferguson, G. A., and Takane, Y., Statistical Analysis in Psychology and Education, Sixth Edition, McGraw-Hill, New York, New York, 1989.