

차량의 실내소음에 대한 음질평가 연구

Study on the Evaluation of Sound Quality of a Vehicle Interior Noise

이종규[†] · 채장범^{*} · 장한기^{**}

J. K. Lee, J. B. Chai and H. K. Jang

(2005년 4월 11일 접수 ; 2005년 6월 23일 심사완료)

Key words : Sound Quality Index(음질지수), Correlation Analysis(상관분석), Paired Comparison Method(쌍대비교법), Semantic Differential Method(의미분별척도법)

ABSTRACT

The purpose of this paper is to develop a linear regression model for the sound quality index of vehicle interior noise. For this, objective measurement data of the vehicles driving in acceleration was measured. On the basis of analysis, psychoacoustic parameters were extracted and subjective evaluation was performed by noise and vibration expert evaluators. For the subjective evaluation, the paired comparisons and the semantic differential methods were used to evaluate sound quality of vehicle interior noise. By the paired comparison which evaluate two pairs of vehicle interior noise, the preference was estimated. With the semantic differential and the factor analysis, it was evaluated words of two pairs which expressed appropriately the sense of evaluator about noise source. Therefore the characteristics of the sound quality for the vehicle were differentiated. From the results of both the correlation analysis and the multiple factor regression analysis, the sound quality evaluation model for the sense of human hearing was derived and indexed.

기 호 설 명

- a_i : i -번째 선호도 점수(i -th preference score)
- b : 선호도 점수의 평균(ave. of preference score)
- ct : 순환삼각형의 수(number of circular triad)
- f : 자유도(freedom)
- χ^2 : 카이 스퀘어 분포(chi-square distribution)
- R^2 : 결정계수(determination coefficient)
- t : 평가대상 소음의 수(number of sample)
- ζ : 일관성 계수(coefficient of consistency)

1. 서 론

오늘날 산업의 발전과 더불어 자동차 산업현장에서 운전자 위주의 보다 안락하고 쾌적한 제품을 개발하기 위한 노력들이 부단히 진행되고 있다. 자동차의 실내소음의 경우 그 동안 개선작업의 의미가 과거에는 단순히 실내 음압의 크기를 줄이는 것이 주된 관심사가 되어왔다. 그러나 실내 음압의 크기를 줄이는 작업은 그 동안 문혀있던 다른 소음원들이 상대적으로 두드러지게 나타나 또 다른 소음 문제를 야기할 뿐만 아니라 비용이나 설계상의 문제로 한계가 있다. 그러므로 이런 문제점들을 극복하기 위한 일환으로 단순히 소음의 저감이라는 음의 양적인 접근에서 듣기 좋은 음원을 만드는 음의 질적인 접근이 필요하게 되었다^(1,2). 음의 질적인 부분, 음질에 대한 접근은 소비자의 다양한 요구에 맞춰 고객중심의 제품을 만든

[†] 책임저자 : 정회원, GM Daewoo Auto & Tech.
E-mail : jongkyu.b.lee@gmdat.com

Tel : (032) 520-5275, Fax : (032) 520-4623

^{*} 정회원, 아주대학교 기계공학과

^{**} 정회원, 고등기술연구원 제품기술연구센터

는 선진 기술이라 할 수 있다. 따라서 소비자에게 편안하고 좋은 느낌을 주는 음질의 평가는 자동차의 소음 측면에서 매우 중요시되고 있다. 그런데 여기서 음질에 대한 평가는 단순히 물리적으로 측정된 음압의 크기에 결정되는 것이 아니라 감성적인 측면에서 인간이 느끼는 다양한 심리적, 감각적 요소가 복합적으로 연계되어 나타나게 때문에 평가시 어려움을 겪고 있는 것이 사실이다.

이 연구에서는 자동차 실내에서 주로 발생하는 소음원에 대한 규명과 감성적 분석을 위해 잘 알려진 음원에 대한 감성평가 기법인 쌍대비교법(paired comparisons method)⁽³⁾과 의미분별척도법(semantic differential method)⁽⁴⁾, 그리고 요인분석법(factor analysis method)⁽⁵⁾ 등을 사용하였다. 쌍대비교법을 통해서는 주관평가자들의 선호도를 분석하였고, 의미분별척도법과 요인분석법을 통해서는 다양한 소음원에 대한 음질 특성 등을 파악하여 이를 몇 개의 음질 요인으로 정량화하였다. 아울러 상관분석을 통해 선호도와 정량화된 음질요인과의 상관관계를 규명하였고, 객관측정 데이터로부터 추출된 음질 매트릭스와 주관평가 결과와의 다중회귀분석을 통해서는 음질요인들간의 선형 청감모형을 구축하였다.

2. 소음에 대한 음질분석 방법

2.1 쌍대비교법

이 방법은 평가대상인 소음을 두 가지씩 한 쌍으로 조합을 만들어 평가음의 모든 조합에 대하여 평가함으로써 각 소음의 상대적인 특성의 정도를 추정하는 방법이다. 쌍대비교법은 두 가지의 평가음에 대한 상대적인 비교 판단을 하게 되므로 평가가 쉬우며 평가자들의 판단에 대한 차이도 적은 것이 특징이다. 그런데 여기서 평가의 신뢰도를 높이기 위하여 평가음의 평가순서를 무작위화하거나 라틴방격법과 같은 검증된 방법을 사용하여 평가순서를 정하는 것이 필요하다. 일반적으로 평가쌍은 비교순서를 고려할 경우에는 $t(t-1)$ 개의 쌍으로 조합하고, 비교순서를 고려하지 않을 경우에는 $\frac{t(t-1)}{2}$ 의 쌍으로 조합한다. 쌍대비교법에서 여러 조합을 평가하면 모든 조합에 대해서 일관된 기준으로 평가하지 못하는 경우가 발생한다. 즉, A>B이고 B>C라고 평가했다면 A>C라고 평가해야 일관성이 있다고 보는데 C>A의 경우가 발

생할 수 있기 때문에 정확한 평가를 위해서는 때때로 이런 데이터들을 제외시키는 것이 필요하다. 이렇게 일관되지 못한 평가를 구분해내기 위해서는 다음의 식 (1)과 같은 순환삼각형(circular triad)의 수를 계산하는 것이 필수적이다^(6,7).

$$ct = \frac{1}{6} t(t-1)(t-2) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^t d_i(d_i-1)$$

$$\text{or } ct = t(t^2-1) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^t (a_i-b)^2 \quad (1)$$

여기서, t 는 평가대상 소음의 수, d_i 는 i -번째 평가대상 소음에서 열등하다고 판정한 수, a_i 는 i -번째 평가대상 소음의 선호도 점수, b 는 선호도 점수의 평균을 나타낸다. 그리고 각 평가자의 평가능력을 나타내는 일관성 계수(coefficient of consistency) ζ 는 평가대상 소음의 수가 홀수(odd)인가, 짝수(even)인가에 따라 다음의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$ct_{\max} = \begin{cases} \frac{t(t^2-1)}{24} & \text{if } t = \text{odd} \\ \frac{(t^3-4t)}{24} & \text{if } t = \text{even} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \zeta = 1 - \frac{ct}{ct_{\max}} \quad (2)$$

여기서 ct_{\max} 은 t 의 평가대상 소음에 대한 순환삼각형의 최대수를 의미하는데, 이는 일관성 계수가 양의 수가 되는 최대수와 같다. 또한 각 평가자의 평가능력은 χ^2 -분포(chi-square distribution)를 사용하여 유의성 검정(significance test)을 수행할 수 있는데, t 의 개수가 7이하인 경우($t \leq 7$)에는 각 유의수준에 해당하는 순환삼각형의 임계치를 기준으로 하고, t 의 개수가 7보다 큰 경우($t > 7$)에는 다음의 식 (3)을 사용하여 구한다.

$$\chi_0^2 = \frac{8}{t-4} \left\{ \frac{t(t-1)(t-2)}{24} - ct + \frac{1}{2} \right\} + f \quad (3)$$

여기서, 자유도 $f = \frac{t(t-1)(t-2)}{(t-4)^2}$ 이다.

2.2 의미분별척도법

의미분별척도법은 C.E. Osgood 등이 세계 각국의 언어의 의미가 어느 정도 상호 유사한지를 조사하는 비교문화 연구의 목적으로 개발한 이래로 어떤 대상

에 대한 인간의 감성을 표현하기 하기 위해 여러 가지 감성어휘를 이용하여 감성의 정량화에 대한 연구가 이어지고 있다⁸⁾.

인간의 감성은 심리적인 상태의 감정이나 기분을 표현하는 것으로서 이를 어휘로서 가장 적절히 나타낼 수 있는 것이 형용사를 수식어로 활용하는 것이다. 의미분별척도법은 바로 이 형용사를 여러 가지 감성어휘로 하여 어떠한 소음에 대한 주관적인 느낌을 평가자 자신이 척도를 가지고 절대 평가하는 방법으로, 비교적 쉽게 많은 데이터를 얻을 수 있기 때문에 평가음의 특성을 전부 나타내기에 매우 적합한 방법이다. 일반적으로 평가방법은 우선 한가지 소음을 들려주고 서로 대치되는 의미의 어휘를 보면서 일정한 평가척도를 기준으로 평가하게 한다. 이 때 평가에 사용된 어휘들 사이에 공통적으로 존재하는 요인을 찾기 위하여 일반적으로 통계적 방법인 요인분석법을 사용한다. 요인분석법을 이용하여 음질의 특성을 나타내는 서로 독립된 요인의 축을 결정한 후에는

Table 1 Specification of the test vehicles

Vehicle	Displacement	T/M	Class
A	1.6 D	A/T	Compact
B	1.5 D	M/T	Subcompact
C	2.5 V6	A/T	Intermediate
D	1.1 D	M/T	Mini Compact
E	1.0 S	M/T	Mini Compact
F	1.8 D	A/T	Compact
G	1.2 D	A/T	Subcompact

Table 2 Evaluation array by latin square method

AB	GC	FD	
EA	CB	DG	EF
AC	BD	GE	
FA	DC	EB	FG
AD	CE	BF	
GA	DE	CF	BG

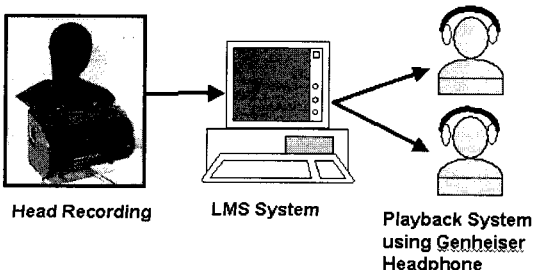


Fig. 1 Test setup for the subjective evaluation

음질 공간상에 음질요인을 표현하여 음질을 시각적으로 표현함으로써 음질특성을 규명한다. 그러므로 의미분별척도법은 현재의 음질과 비교하여 향후 바람직한 음질의 방향을 제시하려고 할 경우 매우 유용한 평가방법이라 할 수 있다.

3. 소음에 대한 음질평가

실내 소음의 평가 대상 차량으로서 Table 1과 같이 배기량별로 소형에서 대형까지의 7종류의 차량을 선정하였다. 이 차량들을 가지고 시험 전용도로에서 주행하면서 head system을 사용하여 운전자 귀 위치에서의 실내소음을 48 kHz의 샘플링 주파수로 녹음하였다. 이 때의 시험조건은 평평한 직선주행로에서 수동변속기의 경우 3단, 자동변속기의 경우는 2단에 기어를 고정시킨 후 가속페달을 전 가속 상태로 2000~6000 RPM까지 급격히 올리는 급가속 조건으로 주행하면서 녹음하였으며, 녹음된 실내소음을 가지고, 청음실에서 Head Acoustics사의 재생시스템과 음의 왜곡(distortion)이 극히 적은 고감도 헤드폰(genheiser headphone)으로 청취하면서 주관평가를 수행하였다. 주관평가는 20~40대 연령층의 차량 소음진동(NVH) 엔지니어 23명을 대상으로 평가하였는데, 주관평가자들의 소음진동 업무경력은 1년에서 16년 사이의 경력자들로 구성하였다. 여기서 쌍대비교법에 의한 평가는 라틴방격법을 사용하여 평가순서를 정하여 평가하였고, 쌍대비교법에 사용된 평가방법은 평가의 신뢰성을 위해 1과 0의 2단계로 평가하는 Bradley의 방법을 사용하였다. 그리고 의미분별척도법을 위한 설문지 내용 중 평가어휘들은 주로 문헌에 나와 있는 연구자료를 토대로 얻었으며^{9,10)}, 최종적으로는 소음진동 엔지니어들의 협의를 거쳐 결정하였다. 쌍대비교법으로 평가시 사용된 평가순서는 Table 2와 같이 하였고 주관평가를 위한 시험장치도는 Fig.1과 같이 하였다.

4. 평가결과

4.1 쌍대비교법에 의한 평가결과

Table 3은 7차량의 실차주행시 실내소음에 대한 평가자 23명의 선호도 점수를 나타낸 것이다. Table에서 행렬의 한 요소인 x_{ij} 는 i -번째 행의 차량과 j -번째 열의 차량 소음의 조합에 대한 비교평가 결과를

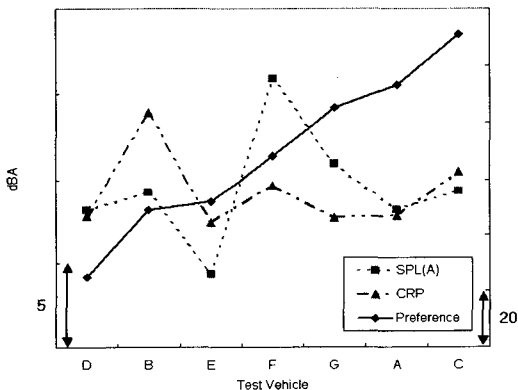
나타내는데, 이 때 i -번째 행의 차량이 j -번째 열의 차량의 소음의 비해 선호한다면 1의 수를 대입하고 선호하지 않는다면 0의 수를 대입한다. 일반적으로 평가쌍은 비교순서를 고려하지 않을 경우에 $\frac{k(k-1)}{2}$ 의 쌍으로 조합하는데, 이 연구에서는 평가음이 7차종이므로 21개 조합의 평가쌍을 평가하였다.

Table 3 Preference matrix for the total evaluators

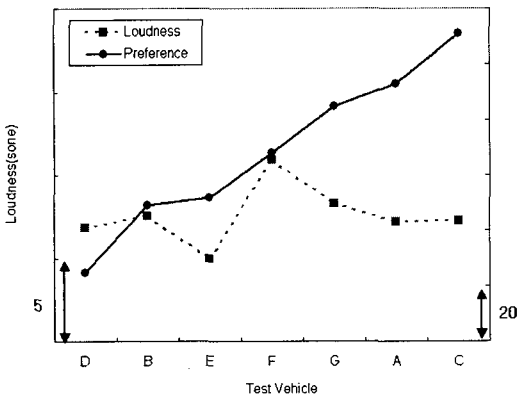
	A	B	C	D	E	F	G	Total
A		12	5	21	19	18	18	93
B	11		3	17	12	6	0	49
C	18	20		18	19	17	19	111
D	2	6	5		8	3	1	25
E	4	11	4	15		8	10	52
F	5	17	6	20	15		5	68
G	5	23	4	22	13	18		85

1 : i -th row > j -th column

0 : i -th row < j -th column



(a) A-weighted sound pressure level and



(b) Loudness level

Fig. 2 Comparison of the preference and previous sound quality matrices

평가행렬에서 각 행의 합은 다른 차량에 대해 해당 행의 차량소음의 선호 개수를 나타낸다.

Fig. 2은 전체 선호도를 기존의 음질 매트릭스 인자들과 비교한 것이다. 각각의 인자들은 2000~6000 RPM까지의 레벨의 평균치를 나타낸 것이다. 그림을 보면 octave상에서 음압을 조합하여 청감을 나타낸 응용지수중에 하나인 CRP(composite rate preference)나 라우드니스는 선호도와 어느 정도 순위 상관도를 따라가고 있지만 기존에 많이 사용하고 있는 A-보정 음압은 선호도의 경향을 잘 나타내 주는 못하는 결과를 보이고 있다. 이로부터 A-보정 음압에 의한 평가가 차량의 음질에 대한 선호도와 상관관계가 적음을 알 수 있다. 이 밖에 주파수간의 균형을 나타내는 샤프니스나 음의 거칠기를 나타내는 러프니스 그리고 음성인지도를 나타내는 AI(atticulation index) 등에 대해서도 상관관계를 알아보았다. 앞서 얻은 선호도 평가 결과가 어느 정도의 신뢰성이 있는지를 판단하기 위해 평가자 개인의 일관적인 판단능력을 나타내는 일관성 계수와 평가자 상호간의 판정의 일치성을 나타내는 일치성 계수를 포함한 통계적 검정을 수행하여 평가 결과에 대한 신뢰성을 검증하였다.

Table 4에는 총 평가자 23명의 판정능력을 나타내는 순환삼각형의 수와 일관성 계수, 그리고 통계적 검정인 χ^2 -검정을 나타내었다. χ^2 -검정으로 각 평가자의 평가능력을 판정하면 유의수준 5%와 자유도 $f=24$ 의 검정통계량 $\chi_0^2(24, 0.5)=36.415$ 가 된다. 여기서 순환삼각형의 수 ct 가 4이하인 경우 $\chi_0^2 \geq$ 이 되므로 각 평가자의 평가능력은 $ct \leq 4$ 이면 평가의 일관성이 있다고 판단을 내릴 수 있다. 즉 주관 평가에 참여한 평가자 23명 가운데 20명이 95% 이상의 신뢰도로 일관적인 판정을 내렸다고 생각할 수 있다.

4.2 의미분별척도법에 의한 평가결과

이 연구에서는 확정된 18개 형용사쌍의 평가어휘에 대해 총 23명의 소음진동 전문엔지니어가 5단계의

Table 4 Distribution of the total evaluators of the coefficients of consistency

ct	0	1	2	3	4	5	6
ζ	1	0.93	0.86	0.79	0.71	0.64	0.57
χ_0^2	48.0	45.3	42.7	40.0	37.3	34.7	32.0
No of evaluator	11	5	2	2	0	2	1

scale로 각각 7차량에 대해 급가속 주행시의 차량소음을 평가하였다. 이 때 평가어휘의 이해를 돕고자 평가어휘를 충분히 숙지할 수 있는 시간을 주었고, 차량의 선입견을 없애고자 7개 차량을 무작위로 재생하였으며, 1개 차량에 대해서는 5번씩 순차적으로 들려주었다. Fig.3은 총 18개의 형용사쌍에 대한 전체적인 평가를 통해 얻은 극성 윤곽도(profile of polarity)를 나타내고 있다. 윤곽도상에 표시된 점수는 전체 평가자들의 득점을 평균하여 얻은 값을 표시한 것이다. 그림을 보면 대체로 C차량이 조용한(quiet), 고급의(expensive), 선형적인(linearly) 형용사에 가장 가까운 경향을 보이고 있으며, D차량은 C차량과는 대조로 시끄러운(noisy), 값싼(cheap), 울리는 booming) 형용사에 가장 가까운 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

4.3 요인분석 결과

차량 실내소음의 음질과 관련된 평가어휘를 도출하기 위해 앞서 소음진동 전문엔지니어가 평가한 데이터를 통계분석 전용 소프트웨어인 MINITAB을 이용하여 요인분석을 수행하였다. 우선 주성분방법에 의하여 요인들을 추출한 후, 최소고유값의 기준과 상관행렬의 고유값 곡선(eigenvalue curve)을 기준으로 주요인의 수를 결정하였다.

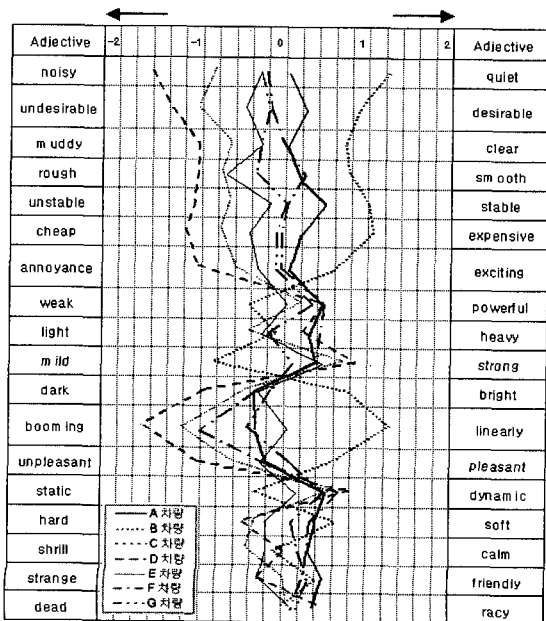


Fig. 3 Profile of polarity of 18 paired of adjectives

이때 최소고유값을 기준으로 세 번째 요인까지가 고유값이 1이상이 됨을 알 수 있으며, 변수들의 고유값 곡선(Fig.4 참조)에서도 세 번째 요인까지가 상관행렬의 고유값이 경사가 급격해지다가 네 번째 요인부터는 경사가 완만해짐을 알 수 있다. 앞서의 방법은 일반적으로 요인수를 추출하기 위한 4가지 방법중 첫 번째와 두 번째 방법인데, 여기서 검증하는 차원으로 요인수 추출 방법의 세 번째와 네 번째 방법을 적용시켜 요인수를 재계산해 보았다.

요인수 추출 방법의 세 번째 방법인 요인공통분산의 총분산에 대한 일반적인 비율을 이용하면 "모든 변수의 분산중 적어도 75% 이상이 요인들로서 설명되어질 수 있어야 한다"는 기준을 만족시켜야 하기 때문에 네 번째 요인도 포함시켰다(3개의 요인에 의

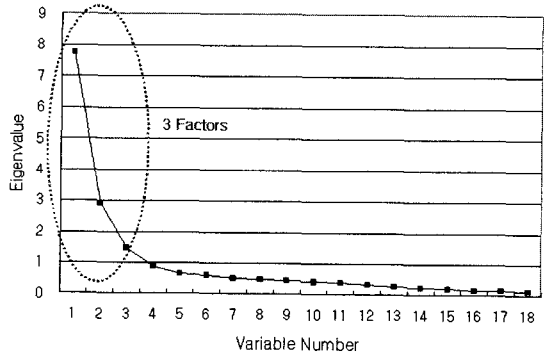


Fig. 4 Eigenvalue curve of the variable number

Table 5 Evaluation vocabularies and factor loading values

Evaluation vocabularies	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Communality
noisy : quiet	0.807	0.257	0.213	0.792
undesirable : desirable	0.776	0.042	0.415	0.777
muddy : clear	0.753	0.027	0.126	0.784
rough : smooth	0.514	0.060	0.668	0.713
unstable : stable	0.800	0.001	0.306	0.774
cheap : expensive	0.758	0.031	0.415	0.747
annoyance : exciting	0.859	-0.082	0.174	0.826
weak : powerful	-0.096	-0.819	0.240	0.776
light : heavy	0.174	-0.428	0.633	0.614
mild : strong	-0.374	-0.814	-0.068	0.797
dark : bright	0.765	0.085	-0.239	0.750
booming : linearly	0.754	0.211	-0.129	0.741
unpleasant : pleasant	0.826	-0.077	0.086	0.805
static : dynamic	-0.141	-0.772	-0.021	0.746
hard : soft	0.284	0.088	0.789	0.738
shrill : calm	-0.045	-0.006	0.835	0.767
strange : friendly	0.535	-0.302	0.445	0.705
dead : racy	0.152	-0.805	-0.011	0.721

해 설명되는 전체 분산의 비율이 67.3% 정도임). 다섯 번째 요인은 고유값이 너무 작게 나와 제외시켰다. 또한 요인수 추출 방법의 네 번째 방법인 통계적 가설검정을 이용하면 네 번째 요인까지 P 값이 0.05 보다 적은 수로 95% 신뢰수준에서 유효하게 나왔다. 그런 이유로 요인을 3개에 대해 각각 주요인분석법으로 요인분석을 수행하여 Table 5와 같이 인자부하량(요인과 변수와의 단순상관관계)을 얻었다. 이때 인

Table 6 Classification of the sound quality factor for the evaluation vocabularies

Factors	Evaluation Vocabularies	Factor Name
Factor 1	noisy : quiet, booming : linearly dark : bright, muddy : clear annoyance : exciting, unpleasant : pleasant undesirable : desirable cheap : expensive unstable : stable	Pleasantness
Factor 2	static : dynamic, weak : powerful dead : racy, mild : strong	Powerfulness
Factor 3	hard : soft shrill : calm	Comfort

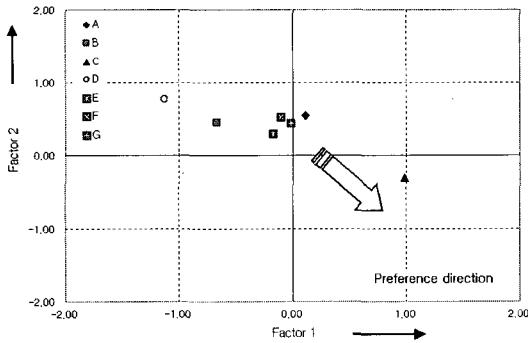


Fig. 5 Factor pattern of factor 1 and factor 2

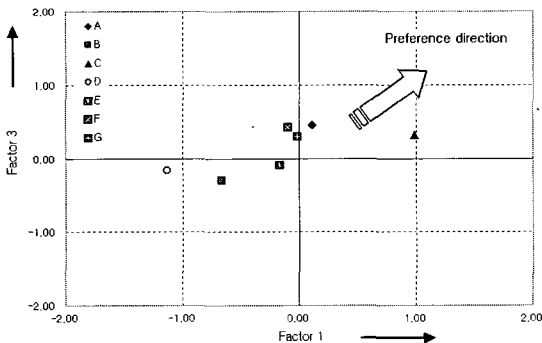


Fig. 6 Factor pattern of factor 1 and factor 3

자축의 회전은 요인간 상호독립성을 강조하여 요인과 변수간의 구분을 용이하게 한 베리맥스의 직각회전 방법을 사용하였다. Table 5의 결과를 보면 각 요인의 요인부하량과 공통요인분산이 나와있는데, 전반적으로 추출된 세 요인에 의해 각 변수들의 설명정도가 모두 75% 이상으로 매우 높게 나타남을 알 수 있다. 또한 각 요인별로는 요인부하량이 큰 어휘를 묶어 Table 6과 같이 평가어휘들의 음질 요인을 특성별로 구분하여 각각 명명하였다. 그러나 요인 3과 요인 4의 요인점수를 계산해보면 거의 같은 경향을 보이고 있어 이를 하나로 하여 세 번째 요인까지로 최종 결정하였다. 세 번째 요인까지 감안하여 요인분석을 수행한 결과 요인 3과 요인 4의 변수들이 매우 큰 요인부하량을 보여 결국 같은 요인임이 판명되었다. Table 6에서 첫 번째 요인인 쾌적감(pleasantness)은 시끄러운(noisy)-조용한(quiet), 울리는(booming)-선형적인(linearly), 탁한(muddy)-맑은(clean), 불쾌한(unpleasant)-유쾌한(pleasant), 괴로운(annoyance)-흥미로운(exciting), 값싼(cheap)-고급의(expensive), 거슬리는(undesirable) - 바람직한(desirable), 어두운(dark) - 밝은(bright), 불안정한(unstable)-안정된(stable) 등의 변수들과 밀접한 관계를 갖고 있고, 두 번째 요인인 박력감(powerfulness)은 활기없는(dead) - 생동감 넘치는(racy), 빈약한(weak)-힘있는(powerful), 정적인(static)-동적인(dynamic), 여린(mild)-강한(strong) 등의 변수들과 밀접한 관계를 갖고 있으며, 세 번째 요인인 안락함(comfort)은 딱딱한(hard)-부드러운(soft), 날카로운(shrill)-평온한(calm) 등의 변수들과 밀접한 관계를 갖고 있음을 알 수 있다.

그리고 각 요인공간상에 차량들의 위치를 표시하기 위하여 각 차량들의 요인점수를 구하였다. 이는 한 차량에 대해 얻은 전체의 데이터로부터 각각의 평가자에 대한 요인점수를 평균하여 차량의 요인점수로 하였다. 이때 각 변수에 주어지는 가중치는 단순가중치(요인부하량이 0.75를 기준)를 사용하여 Fig. 5~6과 같이 좌표상에 도식화 한 것인데, 이는 요인축상에 차량의 위치를 표시하여 측정 차량의 음질 특성을 타차량과 비교 혹은 그 차량의 음질을 시각적으로 표현하였다

결과를 보면 쾌적감의 경우 실내소음의 음압레벨이 낮을수록(C차량) 매우 높게 나타났고, 반대로 박력감

의 경우는 실내소음의 음압레벨이 높을수록(D차량) 높게 나타났으며, 안락함의 경우는 배기량이 크고 비싼 고급차일수록 높은 경향을 보이지만 쾌적감의 경우처럼 강한 상관관계를 보이지는 못하고 있다. 여기서 주목할 점은 A차량의 경우는 세 가지의 주요인이 모두 골고루 우수한 높은 값을 나타내고 있어 쾌적감이 있는 상태에서 박력감이나 안락함을 동시에 만족시키려면 A차량의 음질특성을 먼저 고려해야 할 것으로 판단된다.

5. 음질에 대한 청감모델

5.1 요인분석에 대한 신뢰성 검증

다음은 Cronbach $\bar{\alpha}$ 의 신뢰계수를 사용하여 앞서 선정된 18쌍 평가어휘들에 대한 내부신뢰성을 검증하고자 하였다. Table 7은 형용사쌍의 평가어휘들에 대한 Cronbach $\bar{\alpha}$ 신뢰계수를 나타내고 있는데, 신뢰계수가 모두 0.7 이상의 높은 값을 보이고 있으므로 요인분석에 선택된 어휘들이 내부 신뢰성을 가진 변수들로 선택되어 있음을 알 수 있다.

5.2 청감모델의 도출

쌍대비교법을 통해 얻은 선호도 점수를 의미분별척도법에 의한 차량 음질요인들과 비교하기 위하여 의미분별척도법을 통해 얻은 각 평가자들의 점수를 평균하여 각 차량별 요인점수로 표현하였다. 그런데 두 변수들(선호도와 음질요인들)간의 척도가 다를뿐더러 평균이나 표준편차가 워낙 차이가 나서 상관분석과 회귀분석을 수행하는데 있어 값들을 표준화하여 계산하였다. 표준화된 선호도 점수와 표준화된 음질요인

의 상관관계를 분석한 결과 factor 2(박력감)와는 순위 상관계수가 -0.46 정도로 작게 나타나 상대적으로 순위 상관계수가 1과 0.79의 높은 값을 보이는 factor 1(쾌적감)과 factor 3(안락함)의 두 요인에 대하여 분산분석과 회귀분석을 수행하였다. 분석결과 결정계수(R^2 는 93.3%로 높은 편이었고, 유의성 검정인 P 값이 0.006으로 회귀식의 매우 유의하였으며, 회귀모형의 적합도를 측정하는 기준인 s 도 0.3384로 매우 좋은 수준을 보였다.

그리고 독립변수들간에 다중공선성이 존재하는지 알아보기 위해 각각의 평가변수들을 살펴보았다. 우선 예측변수들간에 상관성이 있을 때 추정된 회귀식 계수의 변동이 어느 정도로 커지는가를 측정하는 계수인 분산팽창요인을 보면 1.9의 값을 나타내므로 다중공선성이 존재하지 않는다고 할 수 있다. 두 번째로 모수 추정치에 대한 허용도를 보면 0.53으로 다중공선성의 문제는 없음을 알 수 있다. 마지막으로 자동상관과 관계된 더빈-왓슨 계수도 2에 가까운 1.45로 독립변수들간에는 다중공선성이 존재하지 않음을 알 수 있다. 이렇게 검증된 상관분석 및 회귀분석을 통해 식 (4)와 같은 첫 번째 청감모델을 얻을 수 있었다.

$$\text{선호도 점수} = 0.779 \times \text{Factor 1} + 0.242 \times \text{Factor 3} \quad (4)$$

한편, 도출된 세 개의 음질요인들을 이용하여 각각의 요인에 고유치의 비를 가중치로 주어 계산하면 차량별로 세 개의 음질요인들이 하나의 지수(주 요인점수)로 나타낼 수 있다. 이를 가지고 표준화한 후, 표

Table 7 Cronbach $\bar{\alpha}$ values of the paired of adjectives for the confidence evaluation

Evaluation Vocabularies	Cronbach $\bar{\alpha}$	Evaluation Vocabularies	Cronbach $\bar{\alpha}$
noisy : quiet	0.9311	mild : strong	0.9435
undesirable : desirable	0.9453	dark : bright	0.9041
muddy : clear	0.9387	booming : linearly	0.8962
rough : smooth	0.9462	unpleasant : pleasant	0.9317
unstable : stable	0.9434	static : dynamic	0.8861
cheap : expensive	0.9423	hard : soft	0.9519
annoyance : exciting	0.9427	shrill : calm	0.8925
weak : powerful	0.7640	strange : friendly	0.9409
light : heavy	0.8269	dead : racy	0.7469

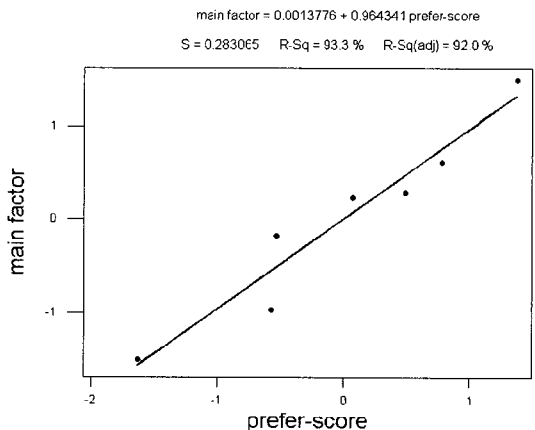


Fig. 7 Regression analysis of the main factor and the preference score

준화된 선호도 점수와 선호도 순위와의 회귀분석을 수행하면 아래의 식 (5)~(6)과 같은 두 번째와 세 번째 청감모델을 얻을 수 있다. 다음의 Fig. 7은 청감 모델들의 회귀추세선을 나타낸 것이다.

$$\text{주요인점수} = \alpha_1 \times \text{선호도 점수} + \beta_1 \quad (5)$$

$$\text{주요인점수} = \alpha_2 \times \text{선호도 순위} \quad (6)$$

5.3 음질지수의 도출

이 논문에서는 주관평가로 도출된 청감모델의 음질 요인들을 정량화하기 위해 LMS와 MTS Sound Quality Module을 이용하여 기존의 음질분석에 가장 많이 사용되고 있는 라우드니스 인차이외에 주파수별 가중치를 적용한 요소를 포함한 130가지의 음질지수들을 분석하였다. 그리고 MINITAB 통계프로그램을 이용하여 도출된 음질요인들과 기존 음질지수들에 대한 95% 신뢰구간을 기준으로 다중회귀분석을 수행하였다. 그 결과 식 (7)과 같이 음질요인에 대한 주관평가 점수와 가장 잘 일치하는 지수들로 구성된 음질 평가지수를 얻을 수 있었다. 수식에서 *는 기울기와 절편 그리고 선형성에 대한 가중치를 적용한 것을 의미한다. 이는 차량소음에 대한 추세선을 구한 후 소음의 선형성에 대한 가중치를 구하기 위해 측정소음의 데이터들과 추세선과의 차이에 대한 표준편차를 구하였다. 그런 다음 여기에 각각의 추세선에 대한 기울기와 절편을 기준 기울기와 절편의 dB-scale의 비로 나누어 보정하여 측정데이터들을 하나의 값으로 표현하였다. 여기서 기울기와 절편을 보정하는 이유는 음원이 시변신호라 특성상 하나의 수치로 표현하기가 어려워 이 논문에서는 이를 극복하고자 음원의 선형성과 시끄러움을 하나의 수치로 표현하기 위해 음원을 보정한 것이다. Table 8과 Table 9는 다중회귀분석에 사용된 기존 음질지수들을 보여주고 있다.

$$\text{선호도 점수} =$$

$$\alpha_1 - \beta_1 \times ZLS^*(510 \text{ HP}) - \gamma_1 \times \text{ANSI-SIL}^*(920 \text{ HP}) \quad (7)$$

여기서 ZLS^* 추세선에 대한 추정치에 기울기와 절편을 보정한 라우드니스를 의미하고, ANSI-SIL^* 언어소통에 중요한 4개의 비가중 1/1 옥타브 밴드를 산술평균한 값을 의미하는데, 이 또한 추세선에 대한 추정치에 기울기와 절편을 보정한 값을 기초로

하였다. 또한 HP는 해당주파수 이상만 통과시키는 Highpass를 의미한다.

Table 8 Previous sound quality index based on the sound pressure level

No.	Categories	Metrics	Units	Remarks
1	Index based on the sound pressure level	dB	dB	Linear SPL ¹⁾
2		dBA	dBA	A-weighted SPL ¹⁾
3		dBB	dBB	B-weighted SPL ¹⁾
4		dBC	dBC	C-weighted SPL ¹⁾
5		dBD	dBD	D-weighted SPL ¹⁾
6		MV	dB	Mean Value SPL(Linear) ¹⁾
7		MVA	dBA	Mean Value SPL(A-weighted) ¹⁾
8		SD	dB	Standard Deviation SPL(Linear) ¹⁾
9		SDA	dBA	Standard Deviation SPL(A-weighted) ¹⁾
10		WEI	dB	Weighted SPL(Linear) ¹⁾
11		WEIA	dBA	Weighted SPL(A-weighted) ¹⁾
12		WFOO	dBA	Weighted Engine Firing Order(Linear) ¹⁾
13		WFOA	dBA	Weighted Engine Firing Order(A-weighted) ¹⁾
14		1/1OCT	dB	1/1 Octave(Linear)
15		1/3OCT	dB	1/3 Octave(Linear)
16		1/1OCTA	dBA	1/1 Octave(A-weighted)
17		1/3OCTA	dBA	1/3 Octave(A-weighted)
18		HFL	dBA	High Frequency Level(OA & 920HP)
19		HF	dBA	High Frequency Factor(OA & 920HP)
20		LF	dB	Low Frequency Factor
21		MLF	dB	Modified Low Frequency Factor
22		SB	dB	Spectrum Balance(OA & 920HP)
23		CRP	dBA	Composite Rating Preference ¹⁾
24		WCRP	dBA	Weighted CRP ¹⁾
25		SIL	dB	Speech Interference Level(OA & 920HP)
26		ESIL	dB	Preference SIL(OA & 920HP)
27		ANSI-SIL	dB	ANSI-Preference SIL(OA & 920HP)
28		SSPL	dB	Speech band SPL(200-5000Hz Linear)
29		AI	%	Standard Articulation Index(OA & 920HP)
30		MAI	%	Modified Articulation Index(OA & 920HP)

1) Frequency Range : Original, 20~200 Hz Bandpass, 200~510 Hz Bandpass, 510 Hz Highpass, 920 Hz Highpass

Table 9 Previous sound quality index based on the psychoacoustic parameters

No.	Categories	Metrics	Units	Remarks
1	Index based on the psychoacoustic parameters	SLS1/SLE1 WSLS1/WSLE1	sones phon	Original & Weighted Steven's Loudness ¹²⁾ (M-VI, sone, phon)
2		SLS2/SLE2 WSLS2/WSLE2	sones phon	Original & Weighted Steven's Loudness ¹²⁾ (M-VII, sone, phon)
3		ZLS/ZLP WZLS/WZLP	sones phon	Original & Weighted Zwicker Loudness ¹²⁾ (sone, phon)
4				
5				
6		N10	sones	N ₁₀ Zwicker Loudness ⁹⁾ (OA & 920HP)
7		CB	dBA	Critical Bark
8		IMP	peak(pa)	
9		IMPS	pa/s	Impulsiveness(OA & 920HP)
10		SHARP	acum	Sharpness(OA & 920HP)
11		ROUGH	asper	Roughness(OA & 920HP)
12		TON	tu	Tonality(OA & 920HP)
13		PSTREN	-	Pitch Strength(OA & 920HP)
14		FSTREN	vacil	Fluctuation Strength (OA & 920HP)
15		STI	-	Speech Transmission Index
16		KUR	dB	Kurtosis(OA & 920HP)
17		UBA	au	Unbiased Annoyance(OA & 920HP)
18		SMP	-	Sensory Pleasantness(OA & 920HP)

2) NB = $(N_L^{1/0.669} + N_R^{1/0.669})^{0.669}$ = Binaural Loudness

3) N10 = Value of loudness that is exceeded 10% of the time

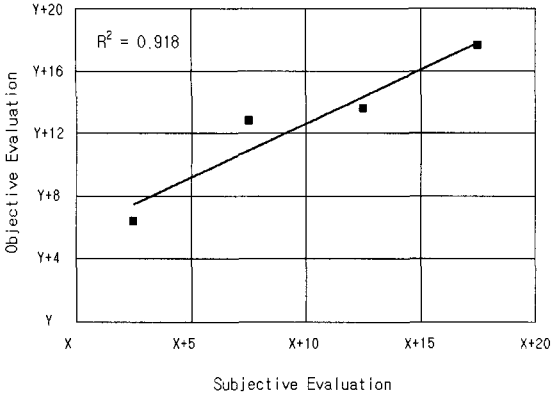


Fig. 8 Verification of sound quality at wide-open driving condition

5.4 음질지수에 대한 검증

이 논문에서 추출된 음질지수에 대한 신뢰성을 검증하기 위해 다른 4대의 차량을 이용하여 객관적으로 측정된 데이터를 10명의 소음진동 전문 평가자가 평가한 선호도 평가결과와 비교하였다. Fig. 8은 급가속 시험시 차량에 대한 주관평가치(선호도 점수)와 객관 데이터로부터 선호도를 예측한 음질지수에 대한 선형 회귀식을 나타낸 것이다. 결과를 보면 결정계수가 각각 91.8%로 비교적 높은 상관도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

6. 결론

앞서의 결과들로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 차량의 음질특성을 알기 위하여 차량의 소음을 두 가지씩 한 쌍으로 조합을 만들어 모든 조합에 대하여 평가함으로써 음질에 대한 차량의 선호도를 추정하였다.

(2) 소음에 대한 평가자의 감성을 적절히 표현할 수 있는 형용사쌍의 평가어휘를 선정한 후 통계적 방법인 요인분석 등을 통하여 요인들의 특성을 분석하였다. 그 결과 차량의 음질 특성은 쾌적감, 박력감, 안락함이라는 세 개의 주요 요인으로 구분할 수 있었

으며, 이중에서 쾌적감이 선호도와 가장 강한 상관관계를 보이고 있음을 알 수 있었다. 또한 선호도와 세 개의 음질요인과의 상관분석과 회귀분석을 통하여 인간의 청감을 잘 대변할 수 있는 청감모델과 객관화된 음질지수를 도출하였다.

참고 문헌

- (1) 이해승, 변언섭, 강구태, 2001, "음질지수를 이용한 자동차 실내 소음의 분석," 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 1114-1119.
- (2) 이상권, 채희창, 박동철, 정승균, 2003, "신경망 회로를 이용한 부밍음질의 인덱스 개발에 관한 연구", 한국소음진동공학회논문집, 제 13 권, 제 6 호, pp. 445~451.
- (3) Kendall, M. G. and Babington, S. B., 1939, "On the Method of Paired Comparison," Biometrika, 31, pp. 324~345.
- (4) Mushtaq 외, "Statistical Evaluation of an Annoyance Index for Engine Noise Recordings," SAE Paper 911080.
- (5) Guilford, J. P., 1952, "When Not to Factor-Analyze," Psychological Bulletin, Vol. 49, No. 1, pp. 26~37.
- (6) 허덕재, 2002, "차량 실내소음의 음질분석 및 모델화," 아주대학교 시스템공학과, 박사학위논문, pp. 128~163.
- (7) 三浦, 1995, "新版 官能検査ハンドブック" 日科技連 官能検査委員会.
- (8) 정광용 외2명, 1999, "공동주택 설비소음의 심리평가를 위한 한국어 어휘에 관한 연구," 한국소음진동공학회논문집, 제 9 권, 제 1 호, pp. 77~84.
- (9) 田中, 1995, "機械音の音色改善設計," 日本機械學會誌 98-917 pp. 55~59.
- (10) Shkeli, V. and Vandenbrink, K. A., "The Use of Subjective Jury Evaluation for Interior Acoustic Packaging," SAE Paper 2003-01-1506.