

승용차의 고급감 음질에 대한 연구

Research for High Sound Quality for a Passenger Car

김 태 규*. 김 성 중*. 이 상 권†. 박 동 철**. 이 경 훈***

Tae-Gyu Kim, Sung-Jong Kim, Sang-Kwon Lee, Dong-Chul Park and Kyung-Hoon Lee

(2009년 7월 20일 접수 ; 2009년 10월 22일 심사완료)

Key Words : Sound Quality(음질), Luxury Car(고급차), Jury Test(청음평가), Psycho-acoustics(심리음향), Sound Quality Metrics(음질요소), Multiple Regression(다중회귀분석), Correlation(상관도)

ABSTRACT

Future luxury car must satisfy the improvement of the luxury sound quality on the vehicle interior noise. Previously, we have analyzed vehicle interior noise by dB(A) based analysis. However, dB(A) has very little to do with the psychological satisfaction of the consumers. People want a sound that is characteristic and refined not a sound that is quiet and common. Subjective test were conducted to determine the relationship between subject's responses and calculated metric values. People choose the most luxury sound among the various vehicle interior noise. And the purpose of this study is that we understand the metrics which constitute the luxury vehicle sound. We have analyzed vehicle interior noise by using the statistical analysis such as multiple regression method and correlation method. And we organized the index of the luxury sound quality.

1. 서 론

국내외를 통틀어 자동차 산업이 경제활동에서 차지하는 비중은 엄청나다. 유럽에서 시작된 자동차 산업이 미국을 거쳐 현재는 일본이 업계 최고의 위치에 이르렀다. 현재의 소비자들은 자동차의 파워와 속도만을 중요시 여기던 과거와는 달리, 운전시의 쾌적한 느낌을 중요시 여기고 있다. 소비자의 감정적인 욕구를 만족시키기 위하여, 자동차 실내소음의 음압 저감 연구뿐만 아니라 음질(sound quality)의 향상이라는 측면에서도 많은 연구가 수행되었다⁽¹⁻⁴⁾. 그동안 연구되었던 자동차 실내소음은 크게 부밍 소음(booming noise), 럼블링 소음(rumbling noise),

기어소음(gear noise), 엔진 소음(engine noise), 타이어 소음(tire noise), 풍절음(wind noise), 배기소음, 각종 전장음 등이 있다. 하지만, 다수의 소비자를 위한 양산차량의 전반적인 음질 향상은 차량 제작사 입장에서 차량 제작 비용의 증가, 목표 음질 설정의 어려움과 같은 비효율적인 측면이 있다. 따라서, 일부 차량에 대해 특정한 음질 특성 향상을 위한 연구가 필요하게 되었다. 이 연구의 목표는 고급 차량의 60 km/h 거친 노면 정속 주행, 100 km/h 정속 주행, 2단 가속, 3단 가속시의 실내소음과 썬루프(sun Roof), 방향지시등(turn signal), 도어락(door lock) 소리에 대한 음질 평가를 수행하여 소비자가 고급스럽다고 느끼는 소리가 어떤 차량에서 발생하는지를 파악할 수 있게 되었다. 총 6종류의 해외 양산 고급 차량과 현재 개발중인 국내 고급 차량을 사용하였으며, 33명의 청음평가 집단을 구성하여 평가하였다. 새로 개발되는 고급 차량의 음질 수준을 확인하기 위하여, 실내소음의 음질 인덱스(sound quality index)를 구성하였다. 이를 통하여 번거로운 청음평

† 교신저자; 정회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : sangkwon@inha.ac.kr

Tel : (032)860-8776, Fax : (032)868-1716

* 정회원, 인하대학교 기계공학과

** 정회원, 현대기아자동차 선행기술센터 NVH그룹

*** 정회원, 현대기아자동차 제1차량개발본부NVH그룹

가를 수행하지 않고, 차량 실내 소음의 음질 요소 (sound quality metrics)^(5,6)의 계산만으로 소비자 만족도를 예측할 수 있다. 또한, 음질인덱스를 구성하기 위하여 통계적인 상관도 분석(correlation) 기법과 다중회귀분석(multiple regression)을 사용 하였다.

2. 차량 시험 및 청음평가

2.1 차량 실내 소음 녹음

고급 승용 차량의 정상주행 시, 사람의 청감을 표현하기 위하여 실내 소음은 binaural 형태로 녹음되었다. Binaural recording은 양쪽 귀에서 감지되는 음압의 차이와 음원으로부터 두 귀에 이르기까지의 거리에 따른 소리 위상차도 녹음할 수 있기 때문에 임상실험에서 실제 소음을 듣는 것과 같은 느낌으로 평가할 수 있도록 만들어준다. 소음 데이터 녹음 장비로 Head-Acoustics사의 Artificial Head HMS III을 조수석에 장착하고, 실내 소음을 녹음하였으며, 엔진의 가속소음을 분석하기 위하여 RPM데이터를 실내소음과 동시에 측정하였다. 주행 시험은 총 7대의 고급 승용 차량에 대해 60 km/h 거친노면 정속주행, 100 km/h 정속주행, 2단 가속주행, 3단 가속주행을 수행하였으며, 전장음은 섀시와 방향지시등, 도어락 소음의 녹음을 수행하였다. 수집된 소음데이터는 청음평가 및 음질요소 분석을 위하여 LMS사의 CADA-X(version 3.5D)의 Test-Monitor 모듈을 이용하였다.

2.2 청음평가

청음평가는 29명의 남자와 4명의 여자로 구성된 33명의 자동차 동호회 회원을 섭외하여 33명의 평가단을 구성하였다. 또한, 실험 대상 차량이 국내의 고급차량인 점을 감안하여, 자동차 동호회에서 활동하고 있는 고급차에 관심이 많은 전문가 집단을 구성하였다. 이 연구 이전의 많은 연구를 통하여, 자동차 실내 소음을 녹음해서 들을 때 현장감이 떨어진다는 의견을 많이 수렴하여 33명의 평가단을 고급 차량에 탑승시켜 실제 해당 소음을 평가한 후, 평가단 모두에 대해 블라인드 청음평가를 수행하였다. 블라인드 테스트는 평가단의 차량에 대한 선입관을 없애기 위한 것으로 실제 탑승 시에 느꼈던 차량 소음에 대해 평가할 수 있도록 주지시켰다.



Fig. 1 Jury test using rating method

따라서, 7가지 차량에서 발생하는 60 kph 거친 노면 정속소음, 100 kph 정속소음, 2단 가속소음, 3단 가속소음, 방향지시등, 섀시, 도어락 소음에 대해 5~9점(고급스럽지않음~매우 고급스럽다) 레이팅 방법(rating method)를 이용한 청음평가를 수행하였으며, Fig. 1과 같이 평가자가 직접 마우스로 버튼을 클릭하여, 반복 청취하고 평가하도록 하였다.

3. 평가 결과 분석

3.1 청음평가 결과

7종류의 대상 소음에 대하여 청음평가자의 평가 결과를 분석하였다. 청음평가 결과를 통하여, 현재 개발중인 고급 승용차량의 음질 수준을 파악할 수 있었으며, 이를 통해 음질 인덱스 구성을 위한 주관적 수치를 얻게 되었다. 33명의 청음평가 점수 평균 수치와 각각의 실내 소음에 대한 음질요소 수치의 상관도 분석을 통하여 음질 인덱스 구성에 사용하였다. 2단 가속과 3단 가속 소음의 경우, 평가자의 음질 고급감에 대한 기준이 일정치 않아 평가자들을 그룹으로 나누어야 할 필요가 있다. 평가 전, 스포츠카를 선호하더라도 일반적인 고급차량을 선택하도록 지시하였지만 현재 스포츠카(쿠페 및 수입차)를 소유한 평가자(11명)들은 다른 사람들과 상이한 결과를 보였다. Table 1의 대상소음에 대한 평가자 점수 평균치 결과 중, 해당 차량의 가속소음 라우드니스 수치를 계산해 보면, Car06은 작게 나타나고 Car02는 크게 나타난다. 이를 통하여 평가자 간의 가속소음 평가 기준이 다름을 알 수 있다.

Fig. 2를 통하여 각 차량 평가점수의 상황을 비교

Table 1 Average of jury test

	60 kph	100 kph	Turn signal	Sun roof	Door lock	2wot_C1	3wot_C1	2wot_C2	3wot_C2
Car 01	6.3265	6.8726	6.6291	6.9021	7.7181	7.3123	7.0928	7.8561	7.6928
Car 02	7.3552	7.4514	7.5455	6.7166	7.4514	7.2958	6.6010	8.0526	8.0928
Car 03	7.0166	7.2904	7.6013	7.0543	6.1053	7.1070	7.6211	7.4593	6.4010
Car 04	7.1866	6.9254	6.1112	6.9864	6.4151	7.5515	7.6144	7.5927	7.9787
Car 05	6.5616	5.9847	7.6545	5.7723	6.3206	7.7020	8.2593	7.2896	6.4144
Car 06	8.2227	8.1886	7.5416	7.5501	7.8170	8.2118	8.3943	5.9971	7.7598
Car 07	7.6349	7.6609	5.9060	8.3474	7.5961	6.6799	7.5856	6.7671	6.6498

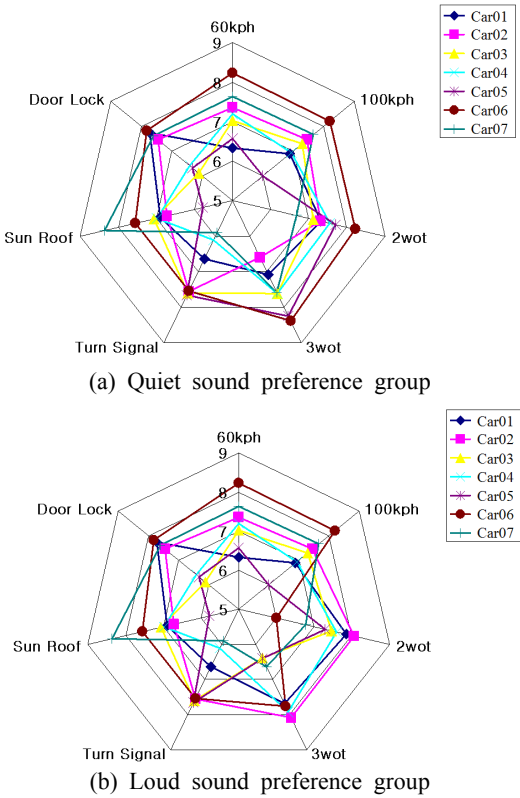


Fig. 2 Jury test result for preference group

할 수 있는데, Fig. 2(a)는 라우드니스가 작은 Car06의 가속 소음을 선호하는 집단이고 Fig. 2(b)는 라우드니스가 큰 Car02의 가속 소음을 선호하는 집단이다. 전체 평가 결과에서 그룹을 나누는 방법은 SPSS v.12의 K-평균 군집분석을 사용하였다⁽⁷⁾.

3.2 K-평균 군집분석

가속소음의 경우 ‘고급감이 느껴지는 소리’에 대한 평가자들의 기준이 상이하므로 데이터들의 일관성이 떨어지는 경향을 나타내기 때문에 33명의 평

가자들을 일정 군집으로 분류하여 분석해야 할 필요가 있다. 이러한 군집분석(cluster analysis)을 위하여 통계프로그램인 SPSS v.12를 사용하여 K-평균 군집분석을 수행하였다⁽⁷⁾. 일반적인 군집분석법은 계층적 군집분석(hierarchical cluster analysis)와 K-평균(K-means) 군집분석법이 있다. K-평균 군집분석은 군집의 수를 미리 정해줘야 하는 단점이 있으나, 연산속도가 빠르므로 대량의 군집분석에서 유용하다. K-평균 군집방법은 계층적 군집분석과 달리 개체가 어느 한 군집에만 속하도록 하는 상호 배반적 군집방법이다. 이 방법은 군집의 수를 미리 정하고, 각 개체가 어느 군집에 속하는지를 분석하는 방법으로서 대량의 데이터의 군집분석에 유용하게 이용되는 방법이다. 군집의 유사성 측정을 위하여 각 대상이 지니고 있는 특성에 대한 측정치들을 하나의 거리로 환산하여 측정한다. 거리 측정의 방식에는 다음과 같은 식 (1)-(4)과 같은 방식들이 있다.

$$\text{Distance}(O_1, O_2) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{1i} - X_{2i})^2} \quad (1)$$

$$\text{Distance}(O_1, O_2) = \sum_{i=1}^n (X_{1i} - X_{2i})^2 \quad (2)$$

$$\text{Distance}(O_1, O_2) = \sum_{i=1}^n |X_{1i} - X_{2i}| \quad (3)$$

$$\text{Distance}(O_1, O_2) = \left(\sum_{i=1}^n (X_{1i} - X_{2i})^p \right)^{1/p} \quad (4)$$

O_i = 대상

X_{ji} = 대상 j 의 변수의 i 좌표

군집분석에서 많이 사용되는 방식으로 식 (1)은 유클리디안 거리(Euclidean distance), 식 (2)는 유클리디안 제곱거리(squared Euclidean distance)를 나타낸다. 식 (3)은 맨하탄 거리, 도시 블록 거리(manhattan distance, city-block distance)를 나타내

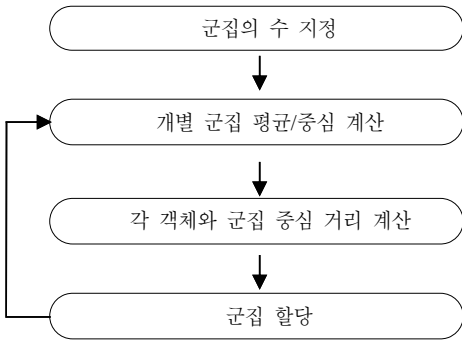


Fig. 3 Flow-chart of K-means cluster analysis

며 식 (4)는 민코우스키 거리(Minkowski distance)를 나타내며, Fig. 3에서 K-평균 군집분석을 수행하는 단계에 대해 설명하였다. 군집의 수를 정하고 군집의 중심/평균을 계산한 후, 각 객체와 군집 중심 간의 거리 계산을 통하여 군집이 모두 나누어질 때까지 반복하여 계산한다.

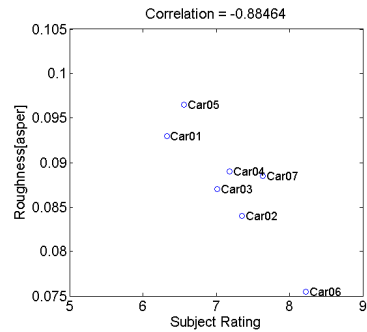
3.3 음질요소 분석

7가지 실내 소음에 대한 각각의 음질요소를 분석하여 청음평가와의 관계를 상관도(correlation) 분석을 통하여 규명하여 주관적인 결과치인 청음평가 평균 수치와 객관적인 음질요소의 값을 계산해야 한다.

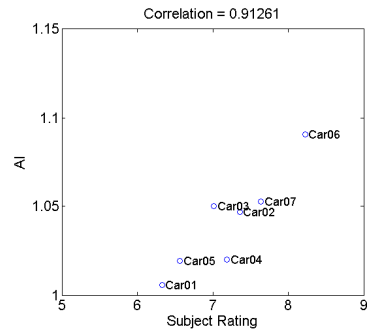
음질 요소(sound quality metrics)와 청음평가 결과와의 상관도 분석을 통해 상관도가 높은 음질요소를 두 개씩 선정하여 음질 인덱스(sound quality index)를 구성하는 인자로 사용하였다. 가속소음의 경우, 엔진의 작동 RPM에 따른 엔진 주 오더 소음의 영향이 크므로 엔진소음 발생 영역에 따라 필터링하였다. 부밍 소음 발생지역 0~2 bark, 럼블링 소음 발생지역 2~5 bark, 5 bark 이상을 필터링하여 음질요소를 계산하였다^(8~10). 또, 8 bark 이상에서 발생하는 타이어 패턴 노이즈 발생 구간에 따라 8 bark 이상과 이하를 필터링하여 샤프니스를 계산하였다. 가속 소음의 작동 RPM에 따라 주요 오더 성분을 칼만필터(Kalman filter)기법으로 분해하여 엔진성분 오더의 합(combination of relevant engine orders, CEO)을 계산하였다. CEO는 엔진 주요 오더 성분의 dB(A)값을 계산한다. 음질요소간의 상관도 분석을 통하여 서로 독립적인 인자를 선정하였다. Table 2와 같이 주요 음질요소 중 변동 강도(fluctuation strength)와 샤프니스가 0.89의 유사한

Table 2 The correlation of soundmetrics for sun roof

	Zwicker	Sharpness	Roughness	Fluct_strength
Zwicker	1	-	-	-
Sharpness	0.6120	1	-	-
Roughness	0.3728	0.5546	1	-
Fluct_strength	0.5363	0.8924	0.3896	1



(a) Roughness



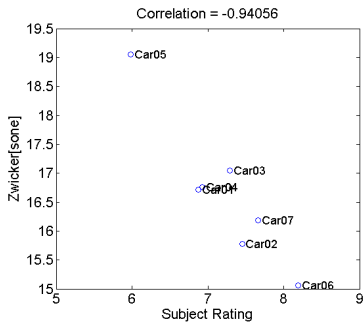
(b) AI

Fig. 4 Correlation of soundmetrics for 60 kph

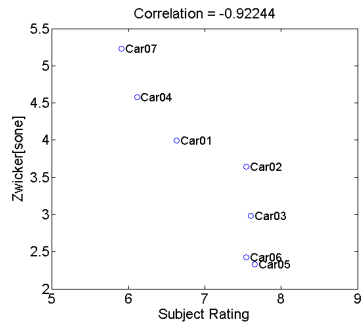
상관관계를 갖고 지만 샤프니스와 러프니스는 0.55의 상관관계를 갖는 독립적인 요소임을 알 수 있다. 이와 같은 방법으로 7가지의 실내 소음에 대한 요소간 상관도 분석을 마친 후, 인덱스를 구성하기 위한 인자를 두 개씩 선정하였다.

Fig. 4에서 Fig. 12까지 7가지 실험에 대한 청음평가 결과에 대해 상관도가 높은 음질요소 두 가지씩 나타내었다.

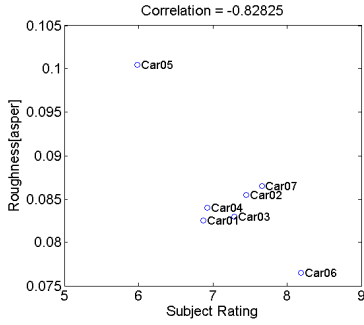
- (1) 60 kph 거친 노면 정속주행 소음(Fig. 4)
- (2) 100 kph 정속주행 소음(Fig. 5)
- (3) 썬루프(sun roof) 작동 소음(Fig. 6)
- (4) 방향지시등(turn signal) 작동 소음(Fig. 7)



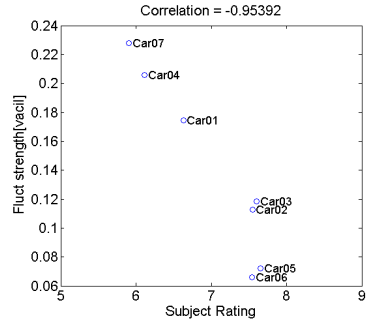
(a) Loudness



(a) Loudness



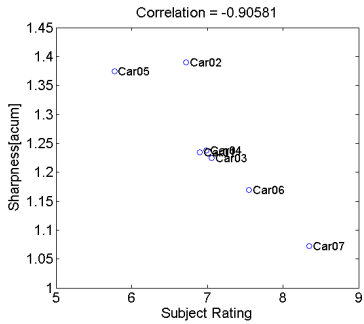
(b) Roughness



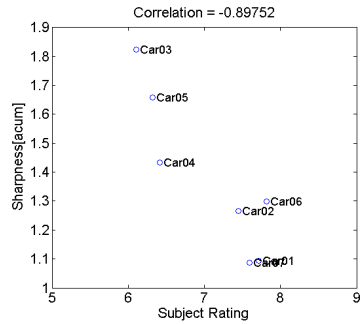
(b) Fluctuation strength

Fig. 5 Correlation of soundmetrics for 100 kph

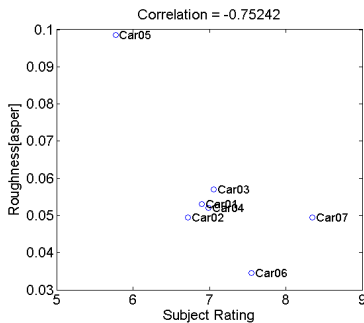
Fig. 7 Correlation of soundmetrics for turn signal



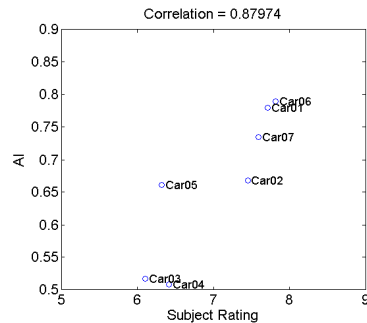
(a) Sharpness



(a) Sharpness



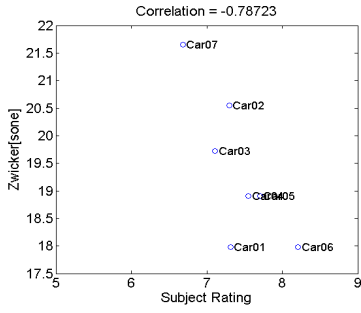
(b) Roughness



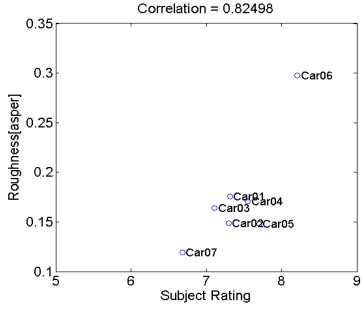
(b) AI

Fig. 6 Correlation of soundmetrics for sun roof

Fig. 8 Correlation of soundmetrics for door lock

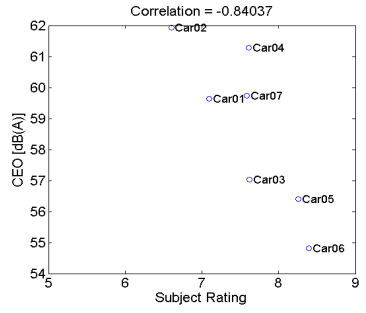


(a) Loudness

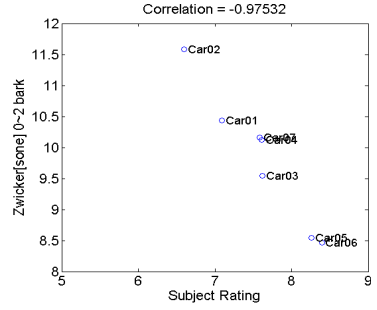


(b) Roughness

Fig. 9 Correlation of soundmetrics for 2wot cluster No.1

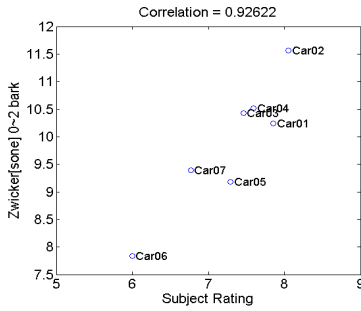


(a) CEO

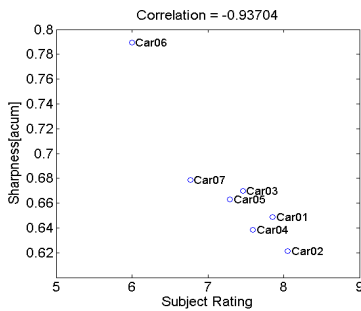


(b) Loudness 0~2 bark

Fig. 11 Correlation of soundmetrics for 3wot cluster No.1

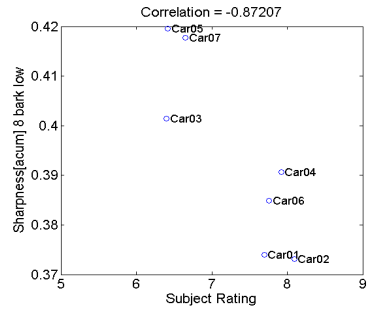


(a) Loudness 0~2 bark

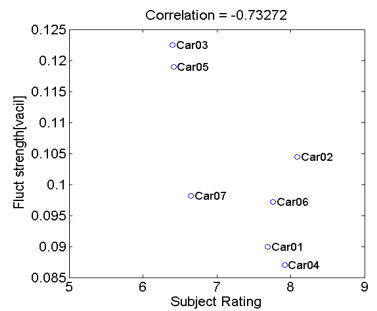


(b) Sharpness

Fig. 10 Correlation of soundmetrics for 2wot cluster No.2



(a) Sharpness 8 bark low



(b) Fluctuation strength

Fig. 12 Correlation of soundmetrics for 3wot cluster No.2

- (5) 도어락(door lock) 작동 소음(Fig. 8)
- (6) 2단 가속(2wot) 주행 소음(Figs. 9, 10)
- (7) 3단 가속(3wot) 주행 소음(Figs. 11, 12)

4. 음질 인덱스 구성

4.1 다중 선형회귀 분석

선형회귀 분석법은 독립변수들 사이에 선형관계가 있는 경우에 사용하는 선형회귀 분석법이다. 청음평가 결과와 두 개의 음질요소 수치를 이용하여 다중선형회귀모델을 구성하였다. 식 (5)는 다중선형회귀모델의 기본식이다.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_i X_i + \varepsilon \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

(X_i : i 차량의 index 추정수치,

Y_i : soundmetrics 입력값)

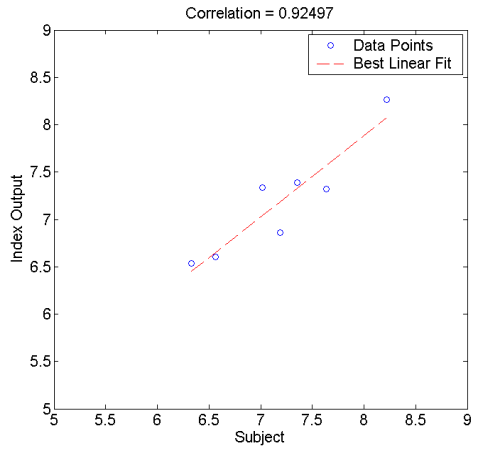
4.2 음질 인덱스

개선될 고급 승용차량의 소비자 만족도를 예측하기 위하여, 음질 인덱스를 구성하였다. 다중회귀분석(multiple regression)을 이용하여 구성하였으며, 7 가지 소리에 대해 각각 인덱스를 구성하였다. Table 3에 모든 인덱스의 함수를 표시하였다. 구성된 각각의 인덱스에 대하여 청음평가 결과와 인덱스를 통한 결과와의 상관도 분석을 수행하여 Fig. 4 ~ Fig. 12에 검증 결과를 나타냈었다.

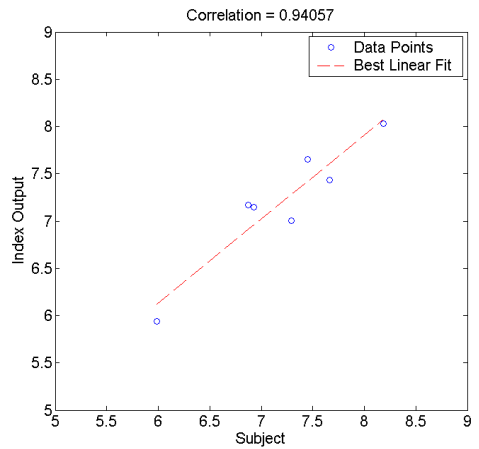
차체 검증을 통하여 7가지 음질 인덱스 모두 우수한 상관도를 보임을 확인하였으며, Fig. 13의 직선

Table 3 Sound quality index

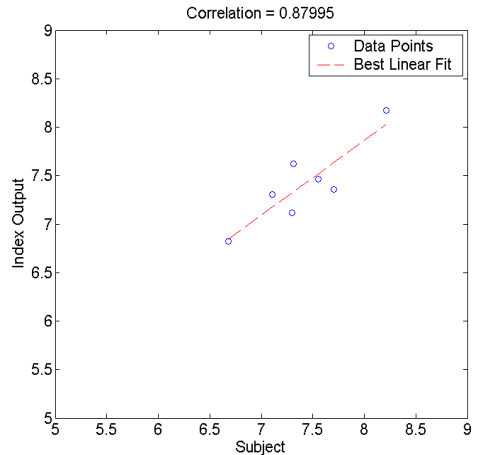
	β_0	β_1	β_2	X_1	X_2
60 kph	-4.2784	-32.1679	13.7241	Roughness	AI
100 kph	15.9090	-0.5160	-1.3597	Loudness	Roughness
2wot_C1	9.5053	-0.1492	4.5405	Loudness	Roughness
3wot_C1	9.9188	0.0841	-0.7377	CEO	N(0~2 bark)
2wot_C2	9.3871	0.2595	-6.9308	N (0~2 bark)	Sharpness
3wot_C2	19.9754	-26.4726	-21.9859	S (8 bark ow)	Fluct_strength
Turn signal	8.5178	0.0565	-12.3302	Loudness	Fluct_strength
Sun roof	14.0706	-5.0046	-14.2510	Sharpness	Roughness
Door lock	6.9974	-1.4639	3.1301	Sharpness	AI



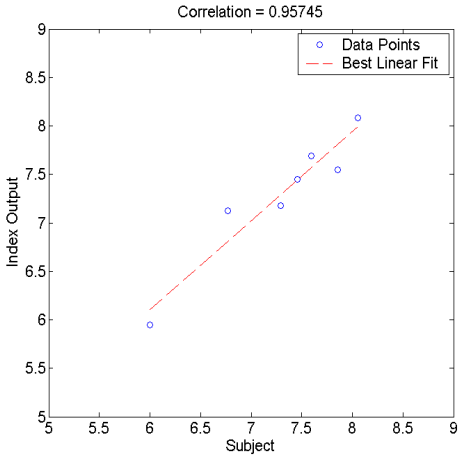
(a) Verification of sound quality index for 60 kph



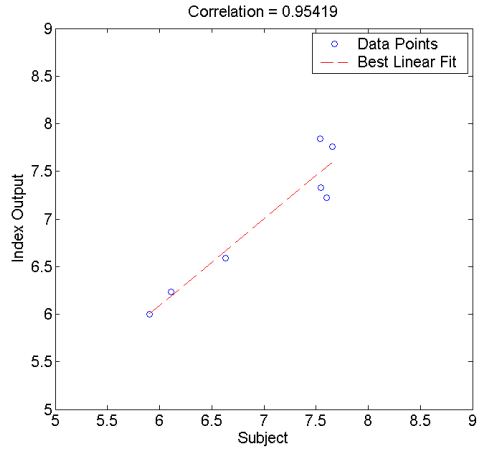
(b) Verification of sound quality index for 100 kph



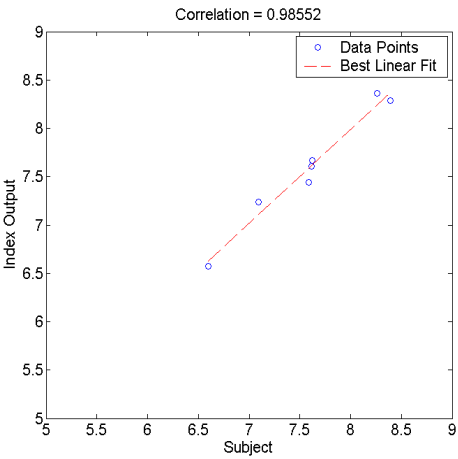
(c) Verification of sound quality index for 2wot cluster No.1



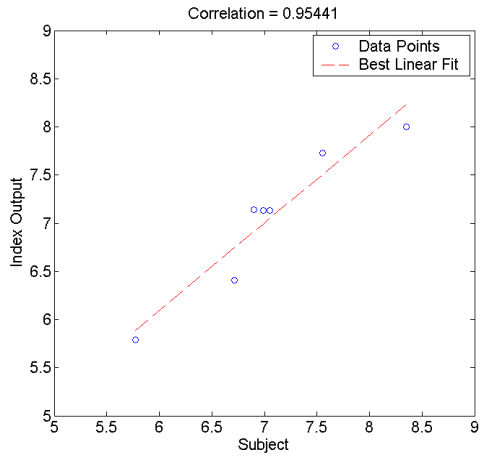
(d) Verification of sound quality index for 2wot cluster No.2



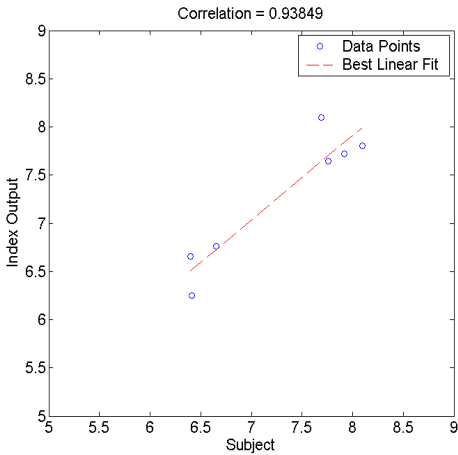
(g) Verification of sound quality index for turn signal



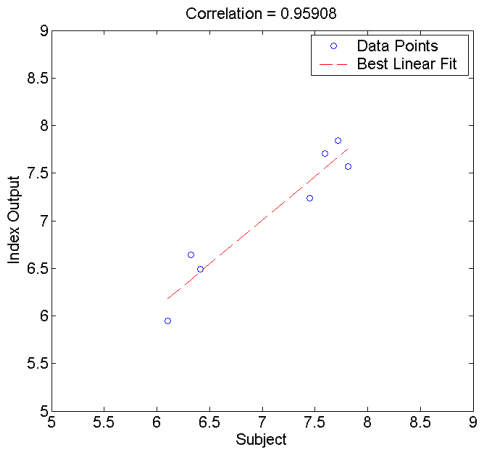
(e) Verification of sound quality index for 3wot cluster No.1



(h) Verification of sound quality index for sun roof



(f) Verification of sound quality index for 3wot cluster No.2



(i) Verification of sound quality index for door lock

Fig. 13 Verification of sound quality index

은 해당 인덱스의 가장 좋은 직선형을 나타낸다. 원형의 데이터는 7가지 차량에 대한 청음평가결과와 인덱스를 통한 결과의 위치를 나타낸다.

5. 결 론

음질 인덱스를 개발하기 위하여, 주관적인 수치인 청음평가 결과와 객관적인 수치인 음질 인덱스와의 상관도 분석을 하였다. 실내 소음에 대한 상관도 분석을 통하여, 승용차 음질 고급감을 위한 음질요소가 무엇인지 파악하였다. 차량 내부 전장음은 방향지시등, 도어락, 쉐루프의 소리를 선정하였고, 주행 중 소음은 60 km/h 거친노면 정속, 100 km/h 정속, 2단 가속, 3단 가속 소리를 선정하였다. 청음평가 결과 가속소음의 경우, 평가자 개인의 기준이 다르기 때문에 평가 결과를 군집 분석하였다. 각 실험의 평균치와 음질요소 수치를 이용하여 인덱스를 구성하였다. 구성된 인덱스의 검증결과 모두 우수한 수치의 상관도를 나타내며, 이를 통하여 현재 개발중인 고급 승용차량의 음질 향상을 위한 기반이 마련되었다. 청음평가 없이도 차량 실내 소음 녹음 후, 음질요소의 계산만으로 소비자 만족도를 예측할 수 있기 때문에 시간적, 경제적으로 많은 이익을 얻게 된다.

후 기

이 연구는 현대기아자동차(주)와 미래형 자동차의 핵심기반기술(과제번호10023237) 연구비로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

(1) Lee, S. K., Choi, B. U. and Yeo, S. D., 1993, "A Study on Improvement of the Power Plant

Vibration for the Noise Reduction and the Sound Quality Improvement in the Compartment," Transactions of Korea Society of Automotive Engineers, Vol. 1, No. 2, pp.77~88.

(2) Heo, D. J., et al., 2000, "Model Development and Analysis of the Car Interior Sound Quality," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 10, No. 2, pp. 254~260.

(3) Senji, K., et al., 2006, "Relation between Sound Quality of Car Interior Noise at Acceleration and the Order Spectrum Profile," INTER-NOISE 2006, 2006-259.

(4) Masaru, S. and Kazuhiro, N., 2007, "Human Auditory Models and Sound Quality Evaluation Method for Diesel Noise," SAE, 2007-01-2219.

(5) Zwicker, E. and Fastl, H., 1999, Psychoacoustics; Facts and Models 2nd Updated Edition, Springer, Berlin.

(6) Zwicker, E., Fastl, H. and Dallmayr, C., 1984, "Basic-program for Calculating the Loudness of Sounds from Their 1/3-oct Band Spectra According to ISO 532 B," Acustica, Vol. 55, pp. 63~67.

(7) An, D. G., et al., 2007, "Statistical Analysis : SPSS Application," Dae Jin Publish, Seoul, Korea.

(8) Lee, S. K., Park, D. C. and Jung, S. G., 2003, "Booming Index Development for Sound Quality Evaluation of a Passenger Car," SAE, 2003-01-1497.

(9) Noumura, K. and Junji, Y., 2003, "Perception Modeling and Quantification of Sound Quality in Cabin," SAE, 2003-01-1514.

(10) Lee, S. K., et al., 2005, "Sound Quality Analysis of a Passenger Car Based on Rumbling Index," SAE, 2005-01-2481.