

급가속시 차량의 흡기소음에 대한 음질지수 개발

Development of a Sound Quality Index for the Evaluation of an Intake Noise of a Passenger Car

이종규† · 박영원 · 채장범**
J. K. Lee, Y. W. Park and J. B. Chai

(2005년 4월 11일 접수 : 2005년 7월 14일 심사완료)

Key Words : Sound Quality Index(음질지수), Multiple Factor Regression(다중회귀), Correlation Analysis(상관 분석), Acoustic Transfer Function(음향전달함수)

ABSTRACT

In this paper, a sound quality index for the evaluation of the vehicle intake noise was developed through a correlation analysis of the objective measurement and the subjective evaluation. First, intake orifice noise was measured at the wide-open throttle sweep condition. And then, the acoustic transfer function between intake orifice noise and interior noise was measured. Simultaneously, subjective evaluation was carried out with a 10-scale score by 8 special engineers. The correlation analysis between the psychoacoustic parameters derived from the measurement and the subjective evaluation was performed. The most critical factor was determined and the corresponding sound quality index for intake noise was obtained from the multiple factor regression analysis method. Finally, the effectiveness of the proposed index was validated.

기 호 설 명

1. 서 론

d_i : 순위 편차(deviation of rank)
 n : 평가대상의 수(number of sample)
 r_s : 순위상관계수(rank correlation coefficient)
 R^2 : 결정계수(determination coefficient)
 $\rho_o c$: 특성 임피던스(characteristic impedance)
 v : 속도(velocity)
VIF : 분산팽창계수(variance inflation factor)
 Z : 검정통계량(statistical value)

일반적으로 차량내의 흡기소음은 여러 전달경로를 통해 차실내로 전달되어 부밍소음의 원인이 될 뿐만 아니라 차량내의 음질을 저해하는 주 요인으로 작용되고 있어 안락성 측면에서 이에 대한 대책이 시급한 상황이다^(1,2).

최근까지 차량의 흡기계 개발시 흡기소음을 정량적으로 평가하기 위한 일환으로 주로 흡기계 입구 끝단에서의 오리피스소음을 측정하는 방법을 사용해왔다. 그러나 이 방법은 소음진동 전문가들에 의해 행해지는 주관평가치를 충분히 대변해 주지 못하고 있어 흡기부밍소음을 정량적으로 평가하기에는 어려움이 있는 것이 사실이다. 그래서 이 연구에서는 차량의 급가속 주행조건(WOT, wide-open throttle sweep condition)에서의 흡기소음에 대한 음질을 소음진동 전문가들의 관점에서 정량화하기 위하여, 주관평가치

† 책임저자 : 정희원, GM Daewoo Auto & Tech.
E-mail : jongkyu.b.lee@gmdat.com
Tel : (032) 520-5267, Fax : (032) 520-4623

* 아주대학교 시스템공학과

** 정희원, 아주대학교 기계 및 산업공학부

를 대체할 수 있는 흡기 음질지수를 개발하고자 하였다. 이를 위하여 먼저 무향실에서 흡기계 입구 끝단에서의 오리피스소음을 측정하고, 입구의 끝단부분과 운전자 귀 위치에서의 음향전달함수(acoustic transfer function)를 측정 한 후 이들로부터 결정된 인자들과 다수의 소음진동 전문 평가자들에 의한 주관평가 결과에 대해 상관분석(correlation analysis)과 다중회귀분석(multiple factor regression analysis)^(3,10)을 각각 수행하였다. 그리고 이를 통하여 급가속의 주행조건에 대한 흡기소음에 대한 음질지수를 도출하였다.

2. 흡기소음에 대한 객관적 데이터 및 주관평가 데이터 확보

2.1 객관적 데이터 결정

(1) 오리피스소음 측정

우선 흡기계에 대한 소음을 얻기 위하여 사시 다이노모가 구동되는 반무향실에서 오리피스소음을 측정하였는데, 이때 측정위치는 입구 끝단의 중앙으로부터 10 mm 떨어진 곳에서 측정하였다.

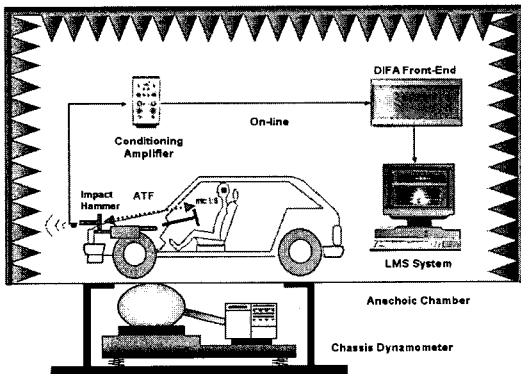


Fig.1 Test setup for the measurement of the intake orifice noise at the anechoic chamber

Table 1 Specification of the test vehicles

Vehicle	Displacement	T/M	Class
A	1.1 D	M/T	Mini Compact
B	0.8 S	M/T	Mini Compact
C	1.5 S	M/T	Subcompact
D	2.0 D	M/T	Compact
E	1.6 D	M/T	Compact
F	1.8 LPG	A/T	Compact
G	2.5 L6	A/T	Intermediate

또한 분석은 소음진동 측정 및 분석시스템인 LMS 시스템을 이용하여 분석하였고, 측정조건은 자동변속기 차량의 경우 2단, 수동변속기의 경우 3단에 기어를 고정시킨 후 가속페달을 전 가속(full throttle) 상태로 2000 RPM에서 6000 RPM까지 급격히 올리는 급가속 조건이었다. 시험차량은 흡기소음의 편차가 있는 차량 7대를 선정하였다. Fig.1은 차량 상태에서 흡기계의 오리피스소음에 대한 객관적 데이터 측정 과정에 대해 나타낸 것이다. 다음의 Table 1은 시험차량의 상세도를 나타낸 것이다.

(2) 음향전달함수의 측정

Fig.2는 흡기계 소음중 공기기인소음이 차량 실내소음에 대해 미치는 음향특성을 파악하기 위하여 오리피스소음과 운전자 귀 위치에서의 실내소음과의 음향전달함수를 측정 한 것이다. 시험조건은 우선 흡기계 입구 위의 홀(hole) 주위에 검 테이프를 원형으로 부착하고 그 위에 홀 크기보다 약간 큰 철판을 붙여 홀방향으로의 유연한 움직임을 만든 후, 철판 중앙부에 가속도계를 바깥쪽으로 부착하였다. 이때 흡기계의 각 부분들의 상대유동이나 소리의 유출이 없도록 연결부위를 확인한 후 차량의 가속밸브를 완전히 개방하였다. 그런 다음 해머로 가속도계와 가장 가까운 부근을 가진하였다. 이때 실내의 마이크로폰 위치는 인간의 청각을 보다 잘 표현하는 두 귀의(binaural) 형태의 데이터를 얻고자 운전석의 좌우측을 동시에 측정하였다. 그리고 측정된 데이터를 가지고 흡기계의 입구에서의 음압과 차량 실내에서의 음압에 대한 음향전달함수를 구하였다. 다음은 앞서 구한 흡기소음과 실내소음과의 관계를 나타낸 것이다⁽⁴⁾.

$$\begin{aligned}
 P_{total} &= P_{ci} + P_{other} \\
 P_{ci} &= P_{intake} \times ATF_{intake} \\
 ATF_{intake} &= \frac{P_{interior}}{P_{orifice}}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서 P_{total} 은 차량내의 운전자 귀 위치에서의 전체 실내소음을 나타내고, P_{ci} 는 전체 실내소음중에서 흡기소음만의 기여도를 나타낸 것이며, P_{other} 은 흡기소음을 제외한 다른 소음원들의 기여도를 나타낸 것이다. 또한 P_{intake} 는 급가속시 흡기계의 오리피스소음을 나타낸 것이며, ATF_{intake} 는 흡기계 오리피스소음($P_{orifice}$)과 실내소음($P_{interior}$)과의 음향전달함수를 나타낸 것이다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 전체 실

내소음에서 흡기소음만의 기여도는 급가속시 흡기계의 오리피스소음에 흡기계 오리피스소음과 실내소음과의 음향전달함수를 곱하면 구할 수 있다. 여기서 흡기계 오리피스소음은 오리피스 입력단에서의 가속도를 적분하여 속도(v)를 얻고, 여기에 $\rho_0 c$ (air: 428 Pas/m)를 곱하면 오리피스소음을 얻을 수 있다. 또한 앞서 가속도 신호를 이용하여 음향전달함수를 측정할 이유는 급가속 주행상태에서 측정된 오리피스소음을 실내 운전자 위치에서의 소음으로 모사화하기 위한 것이다.

Fig. 2는 B차량의 실내소음에 대한 흡기소음의 기여도를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)는 급가속시 흡기계 입구 끝단에서의 오리피스소음을 나타낸 것이고, Fig. 2(b)는 오리피스소음과 실내소음과의 음향전달함수를 나타낸 것이며, Fig. 2(c)는 실내소음에서 흡기소음 성분만을 추출하여 나타낸 것이다.

(3) 평가 파라미터에 대한 검토

흡기계의 오리피스소음에 흡기계의 음향특성이 포함된 음향전달함수를 곱하면 실내소음에 대한 흡기소음의 기여도를 나타낼 수 있는데, 이렇게 계산된 흡기소음을 가지고 다양한 평가 파라미터들에 대한 분석작업을 수행하였다.

분석작업은 측정된 객관적 데이터를 가지고 음압레벨을 기초로 한 파라미터들과 청감 음향인자들⁽⁵⁾을 기초한 파라미터들로 나누어 주파수별 요소, 가중치별 요소 그리고 통계적인 요소들^(6,7)을 포함한 총 100

여개의 인자들에 대해서 수행하였다.

이 논문에서는 우선 흡기소음의 평가시 주파수 구간을 전체적인 음원, 20~200 Hz의 주파수 대역, 200~510 Hz의 주파수 대역, 510~920 Hz의 주파수 대역, 920 Hz 이상의 주파수 대역으로 나누어 계산하였다. 여기서 주파수를 4가지로 나누어 평가한 이유는 각각의 주파수가 부밍소음(20~200 Hz), 럼블소음(200~510 Hz), 로얼소음(510~920 Hz) 등을 대변하고 있고, 마지막 920 Hz 이상은 일반적인 음질에 민감한 고주파수를 대변하기 있기 때문에 각각 나누어 계산하였다. 또한 이 논문에서 다루는 것이 시간에 따라 신호가 변하는 과도신호에 관한 것이므로 주관평가치와 비교하기 위해서 먼저 가속시 조건에서 계산된 흡기소

Table 2 Psychoacoustic parameters of the objective measurements

Categories	Definition
Index based on the sound pressure level	SPL(Linear, A, B, C, D-weighted) ⁽²⁾
	Mean value SPL(Linear, A-wei.) ⁽²⁾
	Standard deviation SPL(Linear) ⁽²⁾
	Standard deviation SPL(A-wei.) ⁽²⁾
	Weighted SPL(Linear) ⁽²⁾
	Weighted SPL(A-weighted) ⁽²⁾
	Weighted engine firing order (Linear) ⁽²⁾
	Weighted engine firing order (A-weighted) ⁽²⁾
	1/1 octave(Linear, A-wei.)
	1/3 octave(Linear, A-wei.)
	Low frequency factor(LF, Linear)
	Low frequency factor(LF, A-wei.)
	Spectrum balance(SB) ⁽²⁾
Index based on the psycho-acoustic parameters	Original CRP ⁽²⁾
	Weighted CRP ⁽²⁾
	Steven's loudness ⁽¹⁾
	Zwicker's loudness ⁽²⁾
	Weighted loudness(Steven's) ^{(1), (2)}
	Weighted loudness(Zwicker's) ^{(1), (2)}

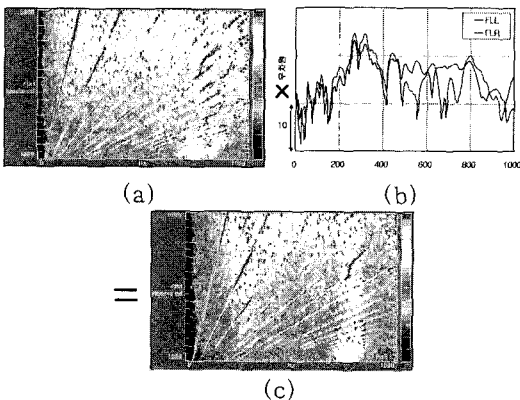


Fig. 2 Contribution of intake noise to the interior noise at the vehicle B (a) Intake noise near the orifice (b) Acoustic transfer function between the intake orifice noise and the interior noise (c) Calculated intake noise

$$1) N_B = (N_L^{1/0.669} + N_R^{1/0.669})^{0.669}$$

N_B : Loudness(binaural)

N_L : Loudness(left ear)

N_R : Loudness(right ear)

- 2) 주파수 구간을 original, 20~200 Hz bandpass, 200~510 Hz bandpass, 200~920 Hz bandpass, 920 Hz highpass 구간으로 나누어 계산함.

* CRP : Composite rate preference

음에 대한 추세선을 구한 후 흡기소음의 선형성에 대한 가중치를 구하기 위해 계산된 흡기소음의 데이터들과 추세선과의 차이에 대한 표준편차를 구하였다. 그런 다음 여기에 기울기와 절편을 보정하여 과도신호 데이터들을 하나의 값으로 표현하였다. Table 2는 흡기음질의 분석작업에 사용된 청감음향인자들을 나타낸 것이다.

2.2 흡기부밍소음의 주관평가

흡기소음의 음질에 대한 주관평가는 앞서 제작된 평가음원들을 가지고 청음실에서 흡기시스템을 주로 개발한 6명의 전문 평가자들을 위주로 재생시스템을 이용한 주관평가를 실시하였다. 평가순서는 처음에 주관평가치가 R7.0 정도의 기준 신호(base)를 들려주고, 이어 A, B, C ... G의 순서로 3번씩 반복하여 들려줌으로써 급가속시 흡기소음의 음질을 15분간 평가하게 하였고, 평가 척도는 5-scale로 하였다^(8,9). 아울러 평가시간 평가된 데이터를 상용 패키지인 MINITAB⁽¹⁰⁾을 이용하여 통계적인 분석을 수행하였다. 그리고 Fig. 3는 7대의 시험차량에 대한 소음진동 전문 평가자들의 주관평가 결과를 나타낸 것이며, 점수는 평가자들의 평균치를 나타낸 것이다.

Table 3은 급가속 주행시험시 흡기소음에 대한 6명의 주관평가자들의 평균치와 각 평가자들과의 일치

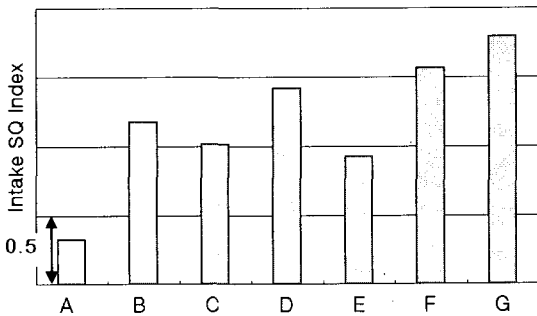


Fig. 3 Subjective evaluations for the sound quality of the intake noise

Table 3 Consistency of concordance and rank correlation coefficient of spearman

	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Consistency of concordance	0.950	0.968	0.929	0.975	0.955	0.974
r_s	0.929	0.893	0.964	0.821	0.964	0.929
Z	0.003	0.007	0.000	0.023	0.000	0.003

도(consistency of concordance)를 나타낸 것으로 두 변수간의 선형성의 정도를 평가하는 상관계수가 95%의 신뢰구간에서 모두 0.9 이상의 높은 상관도를 나타내고 있는데, 이는 평가지수 개발에 사용된 전문 평가자들의 데이터 신뢰도가 매우 높다는 것을 의미한다. 또한 차량별 순위처럼 상대적인 순위로 표현할 수 있는 질적 변수(정성적 변수)인 경우에는 순위에 의한 상관계수를 이용하는데 이것이 순위 상관계수이다. 즉 이는 두 변수의 평가에 의한 순위가 어느 정도 일치하는지를 보는 것으로 일반적으로 스피어맨(spearman)의 순위 상관계수를 가장 많이 사용한다. 다음은 스피어맨의 순위 상관계수 r_s 와 검정통계량 Z 를 나타낸 것이다. 다음의 n 은 평가대상의 수이고, d_i 는 두 변수의 순위 편차를 의미한다.

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n}, \quad Z = r_s \sqrt{n-1} \quad (2)$$

이 논문에서는 차량별 순위에 대한 스피어맨의 순위상관계수가 평가자 모두 0.8 이상의 비교적 높은 상관도를 나타내고 있으며, 검정통계량 Z 도 모두 0.05보다 작은 수이므로 대립가설(두 변수는 서로 상관성을 가지고 있다)을 채택한다.

3. 흡기소음 평가지수의 개발

3.1 평가지수의 도출

이 논문에서는 앞서 제시한 파라미터들을 사용하여 각각 기울기, 절편, 데이터와 추세선의 표준편차를 구하고 이를 주관평가에 대한 상관분석을 통해 상관도가 높은 주요 인자들을 추출하였다. 상관분석 결과 엔진 폭발주파수와 관련된 음압레벨과 라우드니스 성분등이 매우 높은 상관성을 나타냄을 알 수 있었다. 또한 주관평가 인자들과 객관측정 인자들간의 다중회귀분석을 수행한 결과 모든 상관도가 96%정도($R^2 = 0.96$)이고, 상관함수가 아래와 같은 직선 형태의 흡기소음의 음질지수(intake SQ index)를 얻을 수 있었다.

$$\text{Intake SQ Index} = \alpha - \beta \times dBA^* - \gamma \times ZLS^* \quad (3)$$

식 (3)에서 dBA^* 은 엔진 급가속시 A-보정 음압성분의 추세선에 대한 추정치에 기울기와 절편을 보

정하여 구한 음압 레벨을 의미하고, ZLS*는 엔진 급가속시 차량의 200~510 Hz 주파수 대역의 라우드니스 추세선에 대한 추정치에 기울기와 절편을 보정한 Zwicker의 라우드니스 레벨을 의미한다. 여기서 보정값은 기울기와 절편 그리고 선형성의 3가지 조건에 대해 수행하였으며 최종 보정값은 이 3가지를 평균하여 구하였다⁽¹³⁾.

Fig. 4는 앞에서 검증된 주관평가지치와 도출된 흡기소음의 음질지수를 이용하여 상관도 분석 및 다중회귀분석을 수행한 결과이다. 급가속 시험의 주행조건에서 주관평가지치와 음질지수가 매우 잘 일치하고 있으며, 두 인자간의 상관계수가 0.95 이상의 매우 높은 신뢰도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

3.2 평가지수의 타당성 검증

이 논문에서 음질지수를 도출하기 위해 수행한 회귀분석이 가설의 검증이나 추정을 하기 위한 전제조건들을 만족시키는지 살펴보면 다음과 같다. 우선 주관평가와 상관성이 높은 두 인자에 분산분석과 회귀분석을 수행하였다. 분석결과 결정계수(R^2)는 96.1%로 높은 편이었고, 유의성 검정인 P-값이 0.05보다 매우 작은 수(0.002)로 회귀식이 매우 유의하였으며, 회귀모형의 적합도를 측정하는 기준인 s도 0.1183으로 매우 좋은 수준을 보였다.

또한 본 회귀분석에서 독립변수들간에 다중공선성이 존재하는지를 알아보기 위해 우선 분산팽창요인을 보면 분산팽창요인(VIF)이 3.4의 값을 나타내므로 다중공선성이 존재하지 않는다고 할 수 있다. 두 번째로 자동상관과 관계된 더빈-왓슨 계수(ω)도 2에 가까운 2.71로 독립변수들간에는 다중공선성이 존재하

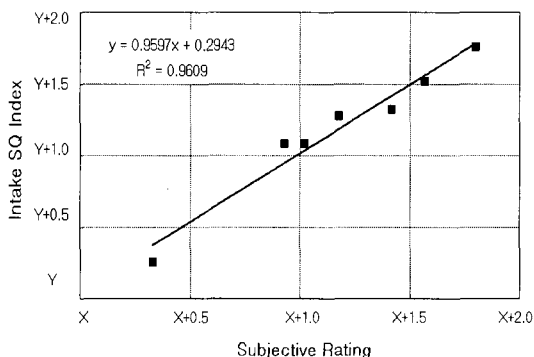


Fig. 4 Correlation of the subjective evaluations and index of the intake sound quality at the wide-open throttle sweep condition

지 않음을 알 수 있다. 여기서 자동상관은 주요한 독립변수가 모형에 누락되었거나 적용한 함수형태가 자료에 적합하지 않을 경우에 주로 발생하는 것을 말한다. 다음은 잔차분석 결과로서 잔차의 평균은 0에 가까운 값(1.52E-15)을 보이고 있고, 잔차와 예측값에 대한 등분산성 검정결과 F-값이 0.05보다 큰 값이 나오므로 귀무가설(두 변수의 분산이 같다)을 기각할 수 없다. 즉 이것은 잔차가 등분산성이 갖는다는 것을 의미한다.

그리고 마지막으로 오차항의 확률분포를 보면 평균이 0이고, 분산이 σ^2 인 정규분포를 따르고 있음을 알 수 있다. 이로써 오차항에 대한 가정의 타당성이 검증되었다. 다음의 Table 4는 다중공선성을 평가하는 기준을 나타내고 있다.

또한 이 논문에서 추출된 흡기소음의 음질지수에 대한 신뢰성을 검증하기 위해 다른 6대의 차량을 이용하여 객관적으로 측정된 데이터를 8명의 소음진동 전문 평가자가 평가한 선호도 평가결과와 비교하였다. Fig. 5은 급가속 시험시 차량에 대한 주관평가지치와 객관 데이터로부터 흡기소음의 음질을 예측한 음질

Table 4 Judgment standard of the multicollinearity

Evaluation variable	Judgment standard
Collinearity diagnostics	Eigenvalue $\lambda \leq 0.01$ or condition number $n \geq 100$ (No problem)
Tolerance	Tolerance $\tau \leq 0.1$ (existence of multicollinearity)
Variance inflation factor(VIF)	VIF ≥ 10 (existence of multicollinearity)
Durbin-watson coefficient(ω)	$1.5 \leq \text{coefficient } \omega \leq 2.5$ (No problem)

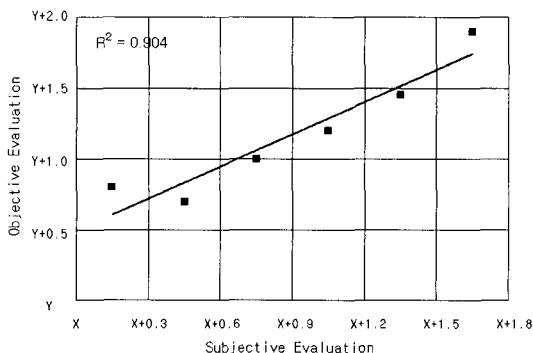


Fig. 5 Verification of intake sound quality

평가지수에 대한 선형회귀식을 나타낸 것이다. 결과를 보면 결정계수가 각각 90.4% 비교적 높은 상관도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

앞서의 결과들로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 흡기소음에 대한 음질을 평가하기 위하여 기존의 음질 파라미터들을 사용하여 각각 기울기, 절편, 데이터와 추세선의 표준편차를 구한 후, 이를 주관평가에 대한 상관분석을 통해 상관도가 높은 주요 인자들을 추출하였다. 상관분석 결과 엔진 폭발주파수 성분과 라우드니스 성분 등이 매우 높은 상관성을 나타냄을 알 수 있었으며, 회귀분석을 통해 흡기소음에 대한 음질지수를 도출할 수 있었다.

(2) 과도신호의 경우 정상신호와 달리 기존의 음질지수들의 조합으로는 인간의 복잡한 청감을 대변하기에는 역부족이 있으며, 주관평가치와도 상관성이 적다. 그러나 이 논문에서 제시한 음질지수는 기존의 음질지수들의 추세선에 대한 편차와 기울기, 그리고 절편등을 보정한 응용지수로 기존 지수들보다 인간의 청감을 잘 대변할 뿐만아니라 주관평가치와도 높은 상관성을 보이고 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

(1) 이종규, 박영원, 채장범, 장한기, 2004, "두 음향 탐측자법과 다구찌방법을 이용한 흡기계의 최적 설계에 관한 연구", 한국소음진동공학회논문집, 제 14 권, 제 2 호, pp. 87~94.
 (2) 이종규, 박영원, 채장범, 장한기, 2003, "강건 설계 방법을 이용한 흡기 소음의 성능향상에 대한 연구", 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, pp. 713~719.

(3) Weisberg, S., 1985, "Applied Linear Regression" Wiley, New York.

(4) Terazawa, N., 2004, "A New Method of Engine Sound Design for Car Interior Noise using a Psychoacoustic Index", SAE Paper 2004-01-0406.

(5) Zwicker, E. and Fastle, H. 1990, "Psychoacoustics-Facts and Models", Springer-Verlag, Berlin.

(6) Hussain, M., Golles, J. and Ronacher, A., 1991, "Statistical Evaluation of an Annoyance Index for Engine Noise Recordings", SAE Paper 911080, pp. 359~367.

(7) Otto, N., Cheng, R. and Wisniewski, E., 1997, "Linearity of Powertrain Acceleration Sound", SAE Paper 971982, pp. 887~890.

(8) Bispring, R., Giehl, S. and Vogt, M., 1997, "A Standardized Scale for the Assessment of Car Interior Sound Quality", SAE Paper 971976.

(9) Otto, N., Eaton, C. and Lake, S., 1999, "Guidelines for Jury Evaluations of Automotives Sounds", SAE Paper 1999-01-1822.

(10) Minitab Inc, 2000, "Minitab User's Guide #2 : Data Analysis and Quality Tools".

(11) Schiffbanker, H., Brandl, F. W. and Thien, G. E., 1991, "Development and Application of an Evaluation Technique to Assess the Subjective Character of Engine Noise", SAE Paper 911081, pp. 369~379.

(12) Hashimoto, T., 1997, "Modification of Roughness Level for Higher Correlation with Unpleasantness~Weighted Roughness Level due to Modulation Frequencies", JSAE Paper 9735132.

(13) 이종규, 박영원, 채장범, 장한기, 2004, "급가속 주행시 차량의 실내소음에 대한 음질지수 개발", 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, pp. 1225~1230.