

## 차량의 흡기부밍소음 평가지수 개발

### Development of an Index for the Evaluation of Intake Booming Noise of a Passenger Car

이종규<sup>†</sup> · 박영원\* · 채장범\*\* · 장한기\*\*\*

J. K. Lee, Y. W. Park, J. B. Chai and H. K. Jang

(2004년 6월 17일 접수 : 2004년 8월 3일 심사완료)

**Key Words** : Intake Booming Noise(흡기부밍소음), Multiple Factor Regression(다중회귀), Correlation Analysis(상관분석), Acoustic Transfer Function(음향전달함수)

#### ABSTRACT

In this paper, an index for the evaluation of vehicle intake booming noise is developed through a correlation analysis of objective measurement data and subjective evaluation data. First, intake orifice noise is measured at the wide-open test condition. And then, acoustic transfer function between intake orifice noise and interior noise at the steady state condition is estimated. Simultaneously, subjective evaluation was carried out with a ten-scale score by 8 engineers. Next, the correlation analysis between the psycho-acoustic parameters derived from the measured data and the subjective evaluation is performed. The most critical factor was determined and the corresponding index for the intake booming noise is obtained from the multiple factor regression method. At last, the effectiveness of the proposed index is validated.

#### 기 호 설 명

- $\alpha$  : 유의수준(level of significance)
- $H_o$  : 귀무가설(null hypothesis)
- $H_1$  : 대립가설(alternative hypothesis)
- $n$  : 샘플수(number of sample)
- $R^2$  : 상관계수(correlation coefficient)
- $s$  : 분산(variance)
- $t$  : 검정통계량(statistical value)

- $\bar{x}$  : 샘플의 평균(average of sample)
- $\mu$  : 모평균(mean of population)

#### 1. 서 론

자동차의 전체 소음원중에 약 30 % 정도를 차지하는 주요 소음원인 흡기소음을 줄이기 위해서 자동차 산업현장에서는 소음진동 전문가들이 많은 노력을 기울이고 있다.<sup>(1,2)</sup> 일반적으로 흡기소음은 차실내로 전달되어 흡기부밍소음의 원인이 될 뿐만아니라 차량내의 안락성을 저해하는 주 요인으로 작용되고 있어 이에 대한 대책이 시급한 상황이다.

최근까지 차량의 흡기계 개발시 흡기부밍소음(intake booming noise)을 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 정량

<sup>†</sup> 책임저자 : 정회원, GM Daewoo Auto & Tech, 아주대학교 대학원 시스템공학과  
E-mail : jongkyu.b.lee@gmdat.com  
Tel : (032) 520-5267, Fax : (032) 520-4623

\* 아주대학교 시스템공학과

\*\* 정회원, 아주대학교 기계 및 산업공학부

\*\*\* 정회원, 고등기술연구원 제품기술연구센터

적으로 평가하기에는 어려움이 있는 것이 사실이다. 그래서 본 연구에서는 차량의 급가속 조건(WOT, wide-open throttle valve)에서의 흡기부밍소음을 소음진동 전문가들의 관점에서 정량화하기 위하여, 주관평가를 대체할 수 있는 흡기부밍소음 평가지수를 개발하고자 하였다. 이를 위하여 먼저 부향실에서 흡기계 입구 끝단에서의 오리피스소음을 측정하고, 입구의 끝단부분과 운전자 귀 위치에서의 음향전달함수(acoustic transfer function)를 측정 후 이들로부터 결정된 인자들과 다수의 소음진동 전문 평가자들에 의한 주관평가 결과에 대해 상관분석(correlation analysis)과 다중회귀분석(multiple factor regression analysis)<sup>(3)</sup>을 각각 수행하였다. 그리고 이를 통하여 급가속의 주행조건에 대한 흡기부밍소음을 평가하는 지수를 도출하였으며, 또한 평가지수를 개발할 때 활용한 차량과 다른 여러 차종에 대한 재평가를 통해 도출된 지수의 타당성을 검증하였다.

## 2. 흡기부밍소음에 대한 객관적 데이터 및 주관평가 데이터 확보

### 2.1 객관적 데이터 결정

#### (1) 오리피스소음 측정

우선 흡기계에 대한 소음을 얻기 위하여 사시 다이 나모가 구동되는 반부향실에서 오리피스소음을 측정하였는데, 이때 측정위치는 입구 끝단의 중앙으로부터 10 mm 떨어진 곳에서 측정하였다. 또한 분석은 LMS 시스템을 이용하여 분석하였고, 측정조건은 자

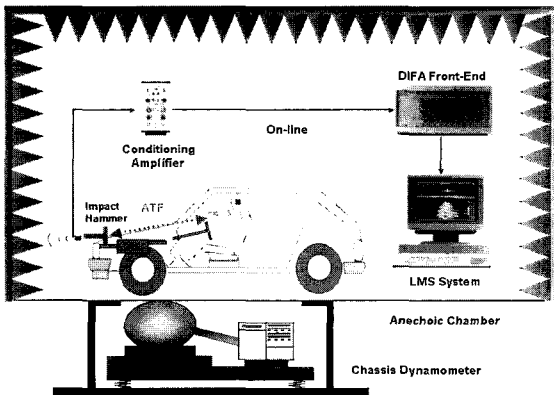


Fig. 1 Test setup for the measurement of intake orifice noise at the chassis dynamometer

동변속기 차량의 경우 2단, 수동변속기의 경우 3단에 기어를 고정시킨 후 가속페달을 전 가속(full throttle) 상태로 2000 RPM에서 6000 RPM까지 급격히 올리는 급가속 조건이었다. 시험차량은 자사에서 생산하고 있는 차량 4대(A, B, C, D)를 선정하였다. Fig. 1은 차량 상태에서 흡기계의 오리피스소음에 대한 객관적 데이터 측정 과정에 대해 나타낸 것이다.

그리고 Table 1은 시험차량의 상세도를 나타낸 것이다.

#### (2) 음향전달함수의 측정

Fig. 2는 흡기계 소음중 공기기인소음이 차량 실내 소음에 대해 미치는 음향특성을 파악하기 위하여 오리피스소음과 운전자 귀 위치에서의 실내소음과의 음향전달함수를 측정된 것이다. 시험조건은 우선 흡기계 입구 위의 홀(hole) 주위에 껌 테이프를 원형으로 부착하고 그 위에 홀 크기보다 약간 큰 철판을 붙여 홀 방향으로의 유연한 움직임을 만든 후, 철판 중앙부에 가속도계를 바깥쪽으로 부착하였다. 이때 흡기계의 각 부분들의 상대유동이나 소리의 유출이 없도록 연결부위를 확인한 후 차량의 가속밸브(throttle valve)를 완전히 개방하였다. 그런 다음 해머로 가속도계와 가장 가까운 부근을 가진하였다. 이때 실내의 마이크로폰 위치는 인간의 청각을 보다 잘 표현하는

Table 1 Specification of test vehicles

Vehicles	Displacement(cc)	Gear
A	1.6 D	M/T
B	1.6 D	A/T
C	1.8 D	A/T
D	2.0 D L6	A/T

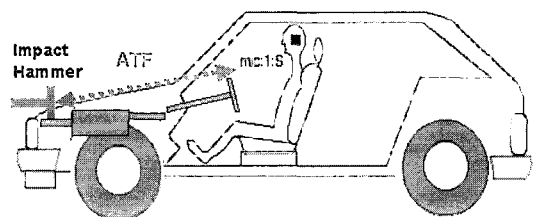


Fig. 2 Test setup for the measurement of acoustic transfer function

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.

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

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 오리피스 소음을 나타낸 것이며,  $ATF_{intake}$ 는 흡기계 오리피스소음( $P_{orifice}$ )과 실내소음( $P_{interior}$ )과의 음향전달함수를 나타낸 것이다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 전체 실내소음에서 흡기소음만의 기여도는 급가속시 흡기계의 오리피스소음에 흡기계 오리피스소음과 실내

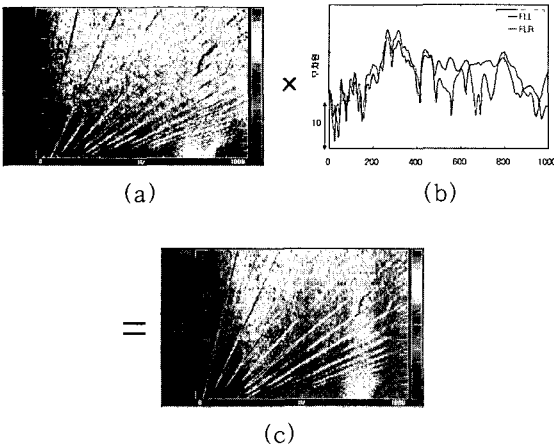
소음과의 음향전달함수를 곱하면 구할 수 있다. 여기서 흡기계 오리피스소음은 오리피스 입력단에서의 가속도를 적분하여 속도( $v$ )를 얻고, 여기에  $\rho_0 c(\text{air} : 428 \text{ Pa} \cdot \text{s/m})$ 를 곱하면 오리피스소음을 얻을 수 있다. 또한 앞서 가속도 신호를 이용하여 음향전달함수를 측정할 이유는 급가속 주행상태에서 측정된 오리피스소음을 실내 운전자 위치에서의 소음으로 모사하기 위한 것이다.

Fig. 3은 B차량의 실내소음에 대한 흡기소음의 기여도를 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 급가속시 흡기계 입구 끝단에서의 오리피스소음을 나타낸 것이고, Fig. 3(b)는 오리피스소음과 실내소음과의 음향전달함수를 나타낸 것이며, Fig. 3(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<sup>(4)</sup>을 기초한 파라미터들로 나누어 주파수별 요소, 가중치별 요소 그리고 통계적인 요소들<sup>(5)</sup>을 포함한 총 50여 개의 인자들에 대해서 수행하였다.



**Fig. 3** Contribution of intake noise to the interior noise at vehicle B  
 (a) Intake noise near the orifice  
 (b) Acoustic transfer function between intake orifice noise and interior noise  
 (c) Calculated intake noise

**Table 2** Psycho-acoustic parameters of objective measurements

Categories	Definition
Index based on the sound pressure level	SPL(linear,A,B,C,D-weighted)
	Mean value SPL(linear,A-wei.)
	Standard deviation SPL(linear)
	Standard deviation SPL(A-wei.)
	Weighted SPL(linear, A-wei.)
	Weighted engine firing order (linear, A-weighted)
	1/1 or 1/3 octave(linear,A-wei.)
	Low frequency factor(LF)
	Spectrum balance(SB)
	CRP(original and weighted)
Index based on the psycho-acoustic parameters	Loudness(steven's & zwicker's)
	Weighted loudness(steven's)
	Weighted loudness(zwicker's)

본 논문에서는 우선 흡기부밍소음의 대부분이 엔진의 폭발 주파수 성분에서 나온다는 점을 감안하여 300 Hz이하의 엔진 폭발주파수 성분의 소음 레벨들에 대해서 검토하였다. 또한 기존의 음압에 대한 데이터분석에 가장 많이 사용되고 있는 라우드니스(loudness)인자에 대해서 검토하였다. 라우드니스 중에서도 특히 자유음장 뿐만아니라 확산음장에서도 적용 가능한 Zwicker의 라우드니스를 사용하였고, 실내소음의 중저주파수음들의 레벨 특성 차이를 잘 나타내주는 CRP(composite rate of preference)와 음원간의 차이를 잘 나타내고 있는 1/3 옥타브 스펙트럼에 대해서도 검토하였다. 또한 본 논문에서 다루는 것이 시간에 따라 신호가 변하는 과도신호(transient signal)에 관한 것이라 주관평가지와 비교하기 위해서는 객관측정치를 정량화된 하나의 값으로 나타내는 것이 필요하다. 이러한 개념을 바탕으로 먼저 급가속시 조건에서 앞서 계산된 흡기소음에 대한 추세선을 구한 후 흡기소음의 선형성<sup>(6)</sup>에 대한 가중치를 구하기 위해 계산된 흡기소음의 데이터들과 추세선과의 차이에 대한 표준편차를 구한다. 그런 다음 여기에 기울기와 절편을 보정하면 RPM의 변동에 따른 과도신호 데이터들을 하나의 값으로 표현할 수 있는데, 이 값이 주관평가지(중속변수)와의 회귀분석에 사용

될 독립변수가 된다. 여기서 기울기와 절편을 보정시 평가차량들의 평균치를 기준으로 각 차량의 기울기와 절편에 대한 비를 계산하였다. Table 2는 분석작업에 사용된 청감음향인자들을 나타낸 것이다.

### 2.2 흡기부밍소음의 주관평가

흡기부밍소음에 대한 주관평가는 객관측정과 달리 반무향실이 아닌 평평한 주행로에서 실시하였는데, 이는 차량 운전시 주관평가에 무시할 수 없는 요소로 작용하고 있는 감각(feel)과 시야(view)등을 포함시키기 위함이었다. 시험조건은 급가속 시험을 기본으로 하되 수동변속기나 자동변속기 모두 2000~6000 RPM 구간의 흡기부밍소음을 평가하게 하였고, 평가척도는 아래의 Table 3과 같이 SAE J1060에 준한 10 scale의 등간척도<sup>(7, 8)</sup>를 사용하였다.

또한 평가인원은 8명의 소음진동 전문 평가자들을 대상으로 하였으며, 평가시 평가시간(30분)과 주행거리(30 km)는 동일하게 유지하였다. 아울러 평가된 데이터를 상용 패키지인 MINITAB<sup>(9)</sup>을 이용하여 통계적인 분석을 수행하였다. 앞의 Fig. 4는 4대의 시험차량에 대한 소음진동 전문 평가자들의 주관평가 결과를 나타낸 것이며, 점수는 평가자들의 평균치를 나타낸 것이다.

Table 3 Evaluation scale of subjective evaluation

Rating Scale (Customer Oriented Scale)	
Bad ↙ ↘ Good	1 - Unable to operate
	2 - Difficult to operate
	3 - Everybody notice as big fault
	4 - Everybody notice as fault
	5 - Everybody complain but usable
	6 - Some people complain but usable
	7 - Everybody recognize but not complain
	8 - Sensitive customer can notice
	9 - Expert can notice
	10 - Even expert cannot recognise

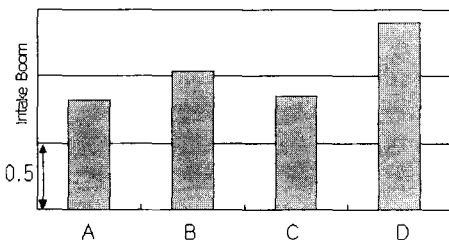


Fig. 4 Subjective ratings of intake boom noise at the wide-open test condition

### 3. 흡기소음 평가지수의 개발

#### 3.1 정규성 검토(Normality Test)

주관평가지에 대한 평가가 어느 정도의 안정성(stability)과 신뢰성(reliability)을 지니고 있는지를 보기 위해 평가 데이터들의 정규성그림(normality

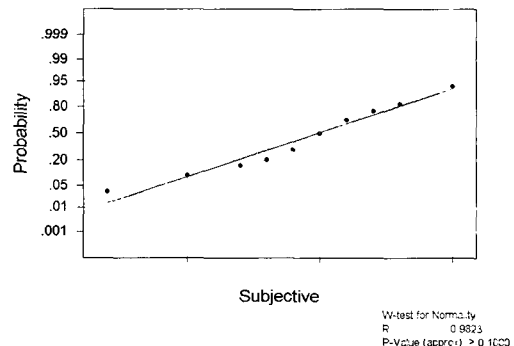


Fig. 5 Normality test for the wide-open test condition

plot)을 그려보면 Fig. 5와 같은 그림을 얻을 수 있다. Fig. 5는 실험 데이터들에 대한 정규성 검토를 상관관계에 기초한 테스트 방법인 Ryan-Joiner test를 이용하여 수행한 결과이다. 이 경우 정규검정을 위한 확률값인 P-value가 0.1이상이 나오고 있는데, 여기서 P-value는 가설검정에서 귀무가설( $H_0$ : 정규성을 따른다)을 기각하기 위한 최소의 유의수준으로 이 값이 0.05보다 큰 값을 나타내므로 귀무가설을 기각하지 못한다. 따라서 본 데이터들은 정규성을 띄고 있다고 할 수 있겠다. 다음은 신뢰성 체크를 위해서 모평균의 표준편차를 모르는 경우에 사용되는 t-검정(양측검정)에 대한 것이다.

$$\text{귀무가설}(H_0) : \mu = \mu_0$$

$$\text{대립가설}(H_1) : \mu \neq \mu_0$$

$$\text{검정통계량 } t = \frac{x - \mu_0}{s/\sqrt{n}} \quad (\alpha = 0.95) \quad (2)$$

여기서,  $\mu$ 는 모평균을 나타내고,  $\mu_0$ 는 모평균의 기준치를 나타내며,  $s$ 와  $x$ 와  $n$ 은 각각 샘플의 분산, 샘플의 평균과 샘플수를 나타내며,  $\alpha$ 는 유의수준(significance level) 95%를 나타낸다.

Table 4는 급가속 시험시 흡기부밍소음에 대한 8명의 주관평가자들의 평균치와 각 평가자들과의 일치도(CC, consistency of concordance)를 나타낸 것으로 이는 아래와 같이 표준편차의 비와 샘플수의 함수로 나타낼 수 있다.

$$CC = 1 - \frac{1}{n} \times \left( \frac{\sigma_{person}}{\sigma_{sum}} \right) \quad (3)$$

위의 수식에서  $n$ 은 시험 샘플수를 의미하고,

**Table 4** Consistency of concordance between averaged subjective and each subjective at the wide-open test condition

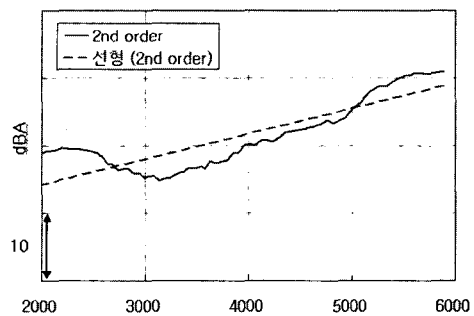
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
Consistency of concordance	0.96	0.99	0.97	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97

$\sigma_{person}$ 은 각 평가자 개개인의 표준편차를 나타내며,  $\sigma_{sum}$ 은 전체의 표준편차를 나타낸다. Table 4를 보면 두 변수간의 선형성의 정도를 평가하는 상관계수( $R^2$ , correlation coefficient)가 모두 0.95 이상의 높은 상관도를 나타내고 있는데, 이는 평가지수 개발에 사용된 전문 평가자들의 데이터 신뢰도가 매우 높다는 것을 의미한다.

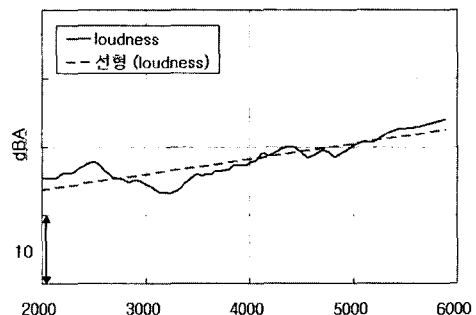
### 3.2 평가지수의 도출

본 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 폭발주파수 성분의 소음 레벨과 라우드니스 성분등이 매우 높은 상관성을 나타낼 수 있었다. Fig. 6과 Fig. 7은 차량간의 편차가 확실히 구분되는 인자 중에 주관평가치와 상관도가 높은 인자들의 특성 곡선을 그린 것이다. Fig. 6은 엔진 급가속시 B차량의 엔진 폭발주파수 성분의 소음 레벨을 나타낸 것이고, Fig. 7은 동일조건에서의 라우드



**Fig. 6** Noise level of engine firing order component



**Fig. 7** Level of zwicker's loudness

드니스 수준을 나타낸 것이다.

또한 주관평가 인자들과 객관측정 인자들간의 다중 회귀분석을 수행한 결과 모든 상관도가 96 %정도 ( $R^2=0.96$ )이고, 상관함수가 아래와 같은 직선 형태의 흡기부밍소음 평가지수(intake booming noise index)를 얻을 수 있었다.

$$\text{Intake-Boom} = 8.69 - 0.342 \times \text{FIR}^* - 0.25 \times \text{LOUD}^* \quad (4)$$

식 (4)에서  $\text{FIR}^*$ 은 엔진의 폭발주파수 성분 소음 레벨의 추세선에 기울기와 절편을 보정하여 구한 음압 레벨을 의미하고,  $\text{LOUD}^*$ 는 추세선에 기울기와 절편을 보정한 라우드니스 레벨을 의미한다. 본문에서 사용된 보정방법은 선형성(linearity)에 대한 보정과 기울기에 대한 보정 그리고 절편에 대한 보정으로 나누어 이들의 산술 평균값을 최종 보정값으로 하였다. 선형성에 대한 보정은 측정데이터들에 대해 추세선을 구한 후 이 추세선이 측정데이터들과 얼마나 떨어져 있는지 평가하기 위해 표준편차 개념을 도입하여 선형성에 대한 보정값을 구하였다. 또한

기울기에 대한 보정은 각 차량의 추세선에 대한 기울기를 구한 후 이를 차량에 대한 benchmarking을 통해 얻은 기준 기울기에 대한 dB scale의 비로 나타내었다. 마지막으로 절편에 대한 보정은 기울기에 대한 보정과 마찬가지로 각 차량의 추세선에 대한 기울기를 구한 후 이를 기준 절편에 대한 dB scale의 비로 나타내었다.

여기서 기울기와 절편을 보정하는 이유는 음원이 과도신호라 특성상 하나의 수치로 표현하기가 어려워 본 논문에서는 이를 극복하고자 음원의 선형성과 시끄러움을 하나의 수치로 표현하기 위해 음원을 보정한 것이다. 아울러 본 보정방법은 일반적인 승용차에 적용이 가능하다.

Fig. 8은 앞에서 검증된 주관평가치와 도출된 흡기부밍소음 평가지수를 이용하여 상관도 분석 및 다중회귀분석을 수행한 결과이다. 급가속 시험의 주행조건에서 주관평가치와 평가지수가 매우 잘 일치하고 있으며, 두 인자간의 상관계수가 0.95이상의 매우 높은 신뢰도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

### 3.3 평가지수의 타당성 검증

4대의 차량에서 얻은 데이터들로부터 도출된 흡기부밍소음 평가지수가 얼마나 타당성을 지니고 있는지 검증하기 위해 다른 3대의 차량을 이용하여 객관적으로 측정된 데이터를 흡기부밍소음 평가지수에 대입한 후 8명의 소음진동 전문 평가자가 평가한 주관평가결과와 비교하였다. Fig. 9는 급가속 시험시 흡기부밍소음에 대한 주관평가치와 객관측정치로부터 주관평가치를 예측한 평가지수에 대한 선형회귀식을 나타낸 것이다. 주관평가치들과 흡기부밍소음 평가지수에 대한 상관도가 0.9이상(상관계수가 0.96)으로 매우 우수함을 알 수 있다.

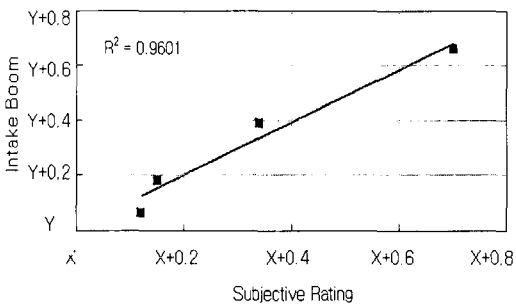


Fig. 8 Correlation of subjective evaluations and overall of intake booming noise index at the wide-open test condition

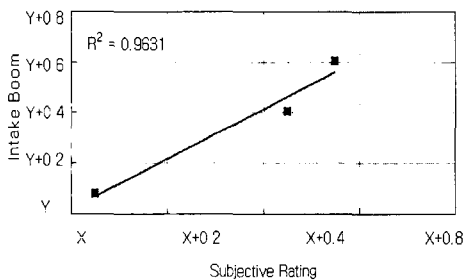


Fig. 9 Verification of intake booming noise index at the wide-open test condition

### 4. 결론

앞서의 결과들로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 검증된 주관평가치(주관평가자들의 평균치와 각 평가자와의 상관관계가 매우 높은 상관도를 보임)와 객관측정 결과를 가지고 상관도 분석 및 다중회귀분석을 수행한 결과 급가속 시험의 주행조건에서 상관도가 96 % 이상의 매우 높은 신뢰도를 가지는 흡기부밍소음 평가지수를 도출해 낼 수 있었다.

(2) 과도신호의 경우 정상신호와 달리 기존 지수들의 조합으로는 인간의 복잡한 청감을 감안한 부밍소음을 분석, 평가하기에 역부족이 있으며, 주관평가치와도 상관성이 적은 것이 사실이다. 그러나 본 논문에서 제시한 흡기부밍소음 평가지수는 기존의 청감음향 평가지수들의 추세선에 대한 편차와 기울기, 그리고 절편등을 보정한 응용지수로 흡기계의 부밍소음을 잘 대변할 뿐만아니라 주관평가치와도 높은 상관성을 보이고 있음을 알 수 있었다.

### 참고 문헌

- (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) Zwicker, E., Fastle, H., 1990, "Psychoacoustics-Facts and Models," Springer-Verlag, Berlin.
- (5) Hussain, M., Golles J. and Ronacher, A., 1991, "Statistical Evaluation of an Annoyance Index for Engine Noise Recordings," SAE Paper 911080, pp. 359~367.
- (6) Otto, N., Cheng R. and Wisniewski, E., 1997, "Linearity of Powertrain Acceleration Sound," SAE Paper 971982, pp. 887~890.
- (7) Bispring R., Giehl S. and Vogt, M., 1997, "A Standardized Scale for the Assessment of Car Interior Sound Quality," SAE Paper 971976.
- (8) Otto, N., Eaton C. and Lake, S., 1999, "Guidelines for Jury Evaluations of Automotives Sounds," SAE Paper 1999-01-1822.
- (9) Minitab Inc, 2000, "Minitab User's Guide #2 : Data Analysis and Quality Tools".
- (10) 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.
- (11) Hashimoto, T., 1997, "Modification of Roughness Level for Higher Correlation with Unpleasantness-Weighted Roughness Level due to Modulation Frequencies," JSAE Paper 9735132.
- (12) 이종규, 박영원, 채장범, 장한기, 2004, "급가속 주행시 차량의 실내소음에 대한 음질지수 개발," 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, pp. 1225~1230.
- (13) 장한기, 국두윤, 이종규, 최준호, 2001, "지게차의 출발감각 평가지수 개발," 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 1094~1099.
- (14) 이상권, 채희창, 박동철, 정승균, 2003, "신경망회로를 이용한 부밍음질의 인덱스 개발에 관한 연구," 한국소음진동공학회논문집, 제 13 권, 제 6 호, pp. 445~451.