

자동차 배기 소음의 주관적 평가 기법 연구

The Subjective Assessment of the Passenger Vehicle's Muffler Noise

유 승 국*, 김 관 주**
Seung-Kuk Yu, Kwan-Ju Kim

ABSTRACT

In order to improve the sound quality and reduce the noise of engines and vehicles efficiently, it is important to quantify the subjective noise characteristics objectively. The exhaust noises of the passenger vehicles have been measured for the subjective assessments. This paper outlines the objective data by which engine noise can be assessed and the salient features of subjective assessments before proposing an approach by which targets for internal vehicle noise may be set. The method to objectify the subjective assessments has been proposed considering three components - Loudness, Harmonic content, Impulsiveness - which have influence on the subjective assessments.

기 호 설 명

SIL	: (SPL _{1kHz} +SPL _{2kHz} +SPL _{4kHz})/3
HF	: High Frequency Factor (L _A -SIL)
SB	: LF-SIL
LF	: 폭발 주파수 아래의 옥타브 밴드중에 보정하지 않은 SPL값을 산술평균한 값
L _{f-tone}	: f에 해당하는 주파수대역에서 가장 강한 SPL
L _f	: f에 해당하는 주파수 대역을 평균한 SPL
f=1	: 20Hz to 125Hz
f=2	: 125Hz to 630Hz
f=3	: 630Hz to 3.15KHz
L _{LF}	: 폭발 주파수를 중심주파수로 하는 대역폭을 통과하는 SPL평균
E(x)	: 평균값
σ	: 표준편차
N	: 샘플링 갯수

1. 서 론

'더 성능이 좋은 동력이 더 낮은 소음과 진동을 갖게 하 고자 하는 문제'는 인간이 더 나은 생활과 더 안락한 환경 을 요구하는 욕구로써, 산업혁명이후 동력의 발달과 더불어 끊임없이 요구되어져 왔다. 현재의 많은 과학분야에서는 ' 더 안락한 환경'의 중요성을 인식하여 많은 투자와 연구가 행해지고 있다. 특히 전세계적인 경제적 공업화 및 문명사 회의 급속한 고층화에 따라 운송수단으로써의 자동차산업 은 운송수단이라는 종래의 개념에서 벗어나 한 개인만으로 의 사생활공간 및 더욱 윤택한 생활을 추구하는 여가용 수 단과 쉬는 공간으로써의 개념으로 확대되고 있으며 더욱이

자동차산업의 기계적 측면(다양한 작동과 다양한 기능)에서 인간이 모든것을 쓰기 쉽고 편리하며 안전하고 안락하게 물건, 기구 혹은 환경 등을 개선하고자 노력하는 인간공학 적 측면으로 그 비중을 높여가고 있는 것이다. 일반대중에 게 이용되는 차량의 경우에 온도, 공기순환, 먼지, 조명, 공 간 활용성뿐만 아니라 주행시의 엔진소음, 타이어 소음등 각종 소음의 감소와 진동의 감쇄로 환경 안락도 및 내부 정숙도라는 기본적인 요소에 점점 더 관심이 높아지고 있 으며 이런 차들이 인기를 끌고 있음이 자명한 사실이다. 또 한 차량 내부 소음의 감소라는 문제는 이것 자체만의 문제 가 아니라 차체의 경량화 및 엔진의 고효율화와 고속 주행 시의 안전화동의 성능 문제와 밀접적으로 상충된 관계를 갖고 있는 것으로 알려져 있고, 이러한 문제점들을 해결하 기 위해 자동차 제작 회사와 자동차연구소 등의 연구 분야 에서 종래의 기계적 측면에서의 개발 방식을 과감하게 탈 피하여 인간공학적인 측면의 환경문제에 과감한 투자와 우수 한 인력들을 배치하고 있다. 또한 차량내부의 소음 절대량 저감이라는 소음 감소뿐만 아니라 더 나아가 '원하지 않는 소리의음이라는 소음의 개념'을 탈피하여 인간이 들어서 기분 이 나쁘지 않고 듣기좋은 음향의 질적수준의 향상을 위해 연구하는 방향으로 나아가고 있다. 보통 엔진과 차체의 소 음 감쇄뿐만 아니라 질적 향상이라는 연구를 위해서는 소 음의 주관적 평가에 많은 영향을 주는 주관적 소음 특성을 객관적으로 정량화 할 수 있는 방법을 모색해야만 한다.

본 연구에서는 차량의 내부 정숙도 및 소음에 대한 주관 적 판단을 객관화 시킬 수 있도록 소음의 중요 요소간의 관계를 식으로 만든 객관적 비를 이용하여 정량화 하는 방 법을 알아 보았으며 이러한 객관적 비에서 가장 중요하게 다루어야 하는 요소는 무엇인가를 알아보려 했다.

2. 소음특성의 객관적 평가를 위한 측정인자

자동차에서는 엔진의 구동력으로 인한 소음뿐만 아니라 주행중의 바람의 저항에 의한 소음, 타이어의 노면 마찰에

* 홍익대학교 대학원
** 홍익대학교 기계공학과

의한 소음과 배기계 및 흡기계에서 나는 소음등, 여러 소음의 복합적 형태로 운전자 또는 탑승자에게 전달된다. 이런 소음원중에 대략적인 경우, 2단의 엔진 소음은 40%, 배기계 소음은 25%의 주요 소음 비율이 나타나는데 이 소음의 크기를 측정하기 위한 기존의 방법은 보통 소음 측정기로 SPL(sound pressure level)을 구하여 소음의 정도를 나타내는 것이었다. 즉, 인간이 소음의 정도를 느끼는 주관적 평가의 경우에 A보정을 수행한 SPL값만을 주요 평가 인자로 다루었던 것이다.¹⁾ 그러나 1970년 이후에 많은 연구자들은 같은 소리를 들어도 인간은 개별적으로 각각 다르게 평가한다는 것을 밝혀내고 사람마다 느끼는 주관적 평가에 중요하게 영향을 미치는 것은 무엇이겠는가를 연구해 왔다. 자동차에서 나는 소음을 운전자나 탑승자가 주관적으로 각기 다른 느낌을 갖게하는 인자는 다음과 같다.²⁾

- 1) 전체 소음 크기 : A보정 SPL, B보정 SPL 등
: 선호 인자비(CRP)
- 2) 조화음 : 강한톤 (Strong tones)
- 3) 'Boom'과 저주파 : 22.4Hz에서 224Hz대의 SPL
: 250Hz이하의 조화엔진 소음
- 4) 충격음 : 최고조 인자 (Crest factor)
: 돌출인자 (Saliency)
: Kurtosis(4차 모멘트)
- 5) 불규칙음 : RMS에 의해 구해진 신호의
이탈된 최고 압력의 음.
- 6) 고주파 : 고주파수대의 SPL
: 고주파 옥타브대의 소비비

2.1 선호 인자비(The composite rating of preference)

기본적으로 소음의 크기는 A-B-C 또는 D보정을 수행한 SPL값과 Sone이나 Phone에서 total loudness로 나타낼 수 있다. 하지만 인간이 항상 추구하는 편리함과 안락감의 문제를 다루는 인간공학적 측면에서 단지 보정만을 수행한 SPL값은 같은 소음이라 하더라도 다르게 평가하는 인간의 감성을 객관화하기 위한 인자로 활용하기엔 어려움이 있다. 특히 자동차 엔진의 소음을 측정하기 위해서는 다음의 음량을 적절히 배합한 CRP로 문제점을 보완하고 있다.

본 논문에서는 Overall Level을 정의하는 두가지 방법. 즉, A보정을 dB_A와 특별히 선택된 음량으로 조합된 식인 CRP를 이용하여 객관적 비율을 계산하였다. CRP는 선호 인자비로써 다음 식 (1)과 같이 정의된다.

$$CRP = \sqrt{L_A^2 - 1.5(HF)^2 + 0.5(SB)^2} \quad (1)$$

2.2 'Boom'과 저주파

'Boom'소음 인자는 4기통, 4행정을 갖는 기관에서의 대표적인 소음원 중의 하나이고, 이것은 엔진의 폭발과 직접적인 관계가 있다. 조화음은 보통 강한톤이라고도 하는데 혹자는 조화음과 강한톤을 서로 분리하여 정의하기도 한다. 이 음은 1/3옥타브의 부분 주파수 대역중에 가장 강한톤의 SPL값에서 1/3옥타브의 부분 주파수대의 평균 SPL값을 뺀것으로 정의한다. 또한 조화음의 크기나 짝수 조화음에 대한 홀수 조화음의 비로 표현하기도 한다. 조화음의 'Boom'의 측정방법은 보통 3가지가 존재하는데 첫째는 소음의 양을 그대로 1/3옥타브로 나타내는 방법이고 둘째는

중심 주파수 31.5Hz와 63Hz의 대역을 가진 22.4-89Hz의 주파수범위의 SPL값으로 나타내는 방법, 셋째는 중심주파수 31.5Hz, 63Hz, 125Hz의 대역을 가진 22.4-178Hz의 주파수 범위의 SPL값으로 나타내는 방법이다. 본 연구에서는 엔진 소음의 폭발주파수인 26Hz와 100Hz에 초점을 맞춰 이 폭발주파수를 포함하는 대역폭인 22.4-44.7Hz와 55.2-178Hz를 사용하여 조화음을 계산해 주었다.

2.3 충격음

엔진의 충격음을 측정하기 위해서 보통 4차 모멘트로 정의되는 Kurtosis와 Crest Factor를 이용한다. Crest Factor는 RMS값에서 peak의 절대값의 비로 정의한다. Kurtosis에 대해서는 뒤에 자세히 다루었다. 본 연구에선 Kurtosis와 5*log(kurtosis)의 두가지 방법을 이용해 계산을 했는데 5*log(Kurtosis)는 Gaussian random signal에 대해 '0'값의 표준에 맞추는 단위 dB값을 갖게 해준다. 이처럼 자동차 실내 소음의 운전자와 탑승자에 의한 주관적 평가를 좀더 객관화하기 위해 전체소음, 조화음, 충격음 인자들을 고려 하였다. 본 논문에서는 자동차 실내 소음의 운전자와 탑승자에 의한 주관적 평가를 좀더 객관화 하기 위해 전체소음, 조화음, 충격음 인자들을 고려하여 적당한 실험식을 만들어 객관화 작업을 수행하였다. 식 (2)는 전체소음 크기인자의 L_A와 조화음의 강한톤, 충격음의 Kurtosis를 이용한 식이다.

$$Rating = \text{전체소음} + \text{조화음} + \text{충격음} \\ = a * L_A + \sum(b * f * L_{f-tone} - L_f) + \sum(c * f * kurtosis_f) \quad (2)$$

식 (3)은 전체 소음크기 인자의 CRP와 조화음의 강한톤, 충격음의 Kurtosis를 이용한 식이다.

$$Rating = a * CRP + \sum(b * f * L_{f-tone} - L_f) + \sum(c * f * kurtosis_f) \quad (3)$$

식 (4)는 조화음에 특히 관심을 가지고 이루어진 식인데 자동차 엔진 가동시 엔진의 폭발 주파수를 중심 주파수로 하는 대역폭을 만들어 이 대역에 해당하는 주파수의 SPL값을 이용하고 충격음은 Kurtosis값을 로그스케일로 계산하였다.

$$Rating = a * CRP + b * L_{L_f} + c * (5 * \text{Log}_{10} K) - d \quad (4)$$

3. 4차 모멘트의 정의

데이터의 통계해석에서 흔히 사용되는 '모멘트'는 데이터의 특성을 표현한다. 평균값 E(x)는 식 (5)와 같이 p(x)에 대한 x의 1차 모멘트로 나타내어 진다.

$$E(x) = \bar{x} = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} x(t) dt = \sum_{i=1}^N \frac{x(t)}{N} \quad (5)$$

그리고 데이터의 산포된 정도를 나타내기 위해 분산을 사용하는데 (x - \bar{x})의 2차 모멘트, 즉 식 (6)으로 표현한다.

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} [x(t) - E(x)]^2 p(x) dx = \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - E(x))^2}{N} \quad (6)$$

그러므로 N개의 수집된 데이터의 특성을 알기 위해 통계적 모멘트를 계산한다면 1차 모멘트라는 평균치, 2차 모멘트라는 분산 그리고 3, 4차 모멘트라는 Skewness, Kurtosis를 구하여야 한다. 4차 모멘트 혹은 kurtosis에 대한 정의는 다음 식(7)와 같다.

$$\begin{aligned} \text{kurtosis} &= \frac{E[y^4]}{[E[y^2]]^2} = \frac{\int y^4 p(y) dy}{\left[\int y^2 p(y) dy \right]^2} \\ &= \frac{\sum (P_f(y) - \bar{p})^2 / N}{\{\sum (P_f(y) - \bar{p}) / N\}^2} \\ &= \frac{N \sum (P_f(t) - \bar{p})^4}{\{\sum (P_f(t) - \bar{p})\}^2} \quad (7) \end{aligned}$$

이 값은 정규화된 값으로 정의되므로 신호의 진폭과 무관하며 신호의 패턴에 의해 결정된다. 예를들면 정현파 신호의 경우 1.5, Gaussian 랜덤신호의 경우는 3을 각각 나타낸다.⁶⁾ Kurtosis는 입력신호의 'spiky'한 정도를 나타내고 Skewness는 신호의 확률밀도 함수에서 peak 위치가 중심에서 얼마나 벗어나 있는지를 나타낸다.

4. 실험 및 결과

4.1 실험 장치 및 실험 방법

실험에 사용되는 엔진소음은 H사의 S차종과 K사의 S차종, 그리고 H사의 E차종을 선택했다. 각 차량마다 운전자가 운전시 가장 많이 경험하는 Idle rpm과 3000rpm일 경우를 측정한다. 차량의 실내 소음은 운전석에 성인이 앉았을 경우의 귀높이에 해당하는 80cm위치에서 소음을 측정하였으며 차의 소음은 배기계 뒤에서 측정하였다. 측정된 엔진의 신호는 소음측정계를 사용하여 순간적인 SPL값과 평균적인 SPL값을 기록한다. 그리고 소음 측정계를 통한 엔진의 신호를 DAT(Digital Audio Tape)에 녹음되도록 한다. 이때 DAT에 보정신호를 녹음하는 것을 잊지 않는다. 외부소음 측정시 배기계형상에 따른 측정방법은 SAE J1169 FEB887에 따라 Fig. 1과 같이 수행했다.

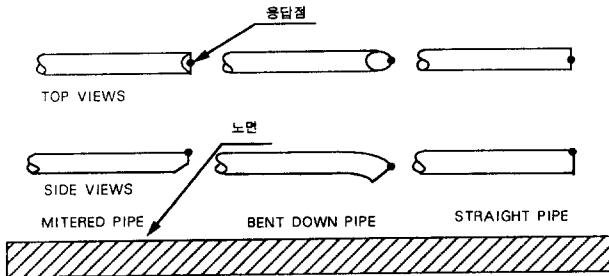


Fig. 1 배기계 형상에 따른 소음 측정점

DAT에 녹음된 신호는 신호 분석기(HP type 3565EA)를 이용하여 관심 주파수 0-3200Hz까지 모니터링하였다. 이 실험을 위한 측정장치의 연결 상태측정 방법은 다음 Fig. 2에서 보여준다.

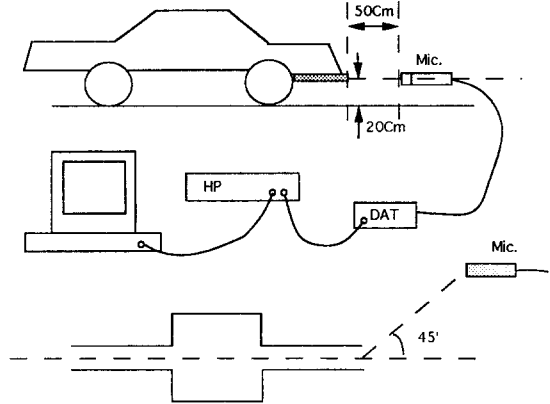


Fig. 2 엔진측정방법

4.2 객관적 실험 분석을 위한 알고리즘

가) A/D변환

실험시 녹음된 소음 신호는 12비트 A/D변환기로 사용하여 디지털 데이터로 만들어 분석하였다. 샘플링 주파수를 2Hz로 하여 주파수분석이 3200Hz까지 가능하도록 했으며 샘플수는 4096개로 500msec동안의 신호를 수집하였다.

나) 스펙트럼 분석

파워 스펙트럼과 옥타브 스펙트럼을 이용하여 분석하는데 옥타브 스펙트럼은 객관적 비를 구하기 위해 반드시 거쳐야 하는 과정이다. - Kurtosis값과 옥타브 스펙트럼을 구해 L_f -tone과 L_f 를 구하는 과정 -

다) 필터링

엔진 소음 상태에 따른 신호의 각 주파수대역별 특성을 조사하고자 측정 신호를 대역별로 필터링하였다. 여기서는 Window용 Matlab에서 Chebyshev Filter를 이용하여 3개의 부분 주파수대역을 갖는 Filter를 고려했다. 필터 1은 20Hz-125Hz, 필터 2는 125Hz-630Hz, 그리고 필터 3은 630Hz-3150Hz로 설정하였다.

라) 전체 순서도

객관적 평가와 주관적평가의 일치성을 보기 위해 다음 Fig. 3와 같은 순서도 프로그램을 작성하였다. 입력신호의 전체적인 특성을 파악하기 위해 시간영역에서의 신호를 기록하였으며 이 신호를 옥타브 스펙트럼에서 전체 대역에 대한 각 변수값들을 구했다. 또한 부분 주파수대역에 대한 정보를 계산하여 kurtosis를 구한다.

4.3 실험 결과 및 고찰

4.3.1 Spectrum 분석 결과

4실린더 4행정을 갖는 자동차에서는 크랭크축이 1회전할 때마다 폭발이 2회씩 일어난다. 즉, 4행정 기관은 4π 의 크랭크각 중에 1회의 폭발행정을 갖게 되므로 이때의 주기를 T라 하면 주파수 대역은 $1/T$ 의 간격으로 peak를 관측할 수 있다. 그러므로 4기통 4행정기관은 주기 T의 1/4배만큼 좁아진 시간간격으로 엔진의 연소가 일어나므로 주파수 대역에서는 $4/T$ 에 해당하는 주파수마다 peak이 나타

나게 된다. 따라서, 원래 4행정 기관에선 식 (8)와 같은 주기를 갖는데 4기통 4행정 기관이므로 주기가 4배로 짧아지게 되고 주파수는 4배로 빨라지는데 360° 에 폭발이 2번 일어나므로 $N/30\text{Hz}$ 마다 peak을 볼 수 있다.

$$N_{rpm} = N \cdot \frac{\text{round}}{60\text{sec}} = \frac{N}{60} \text{ Hz} \quad (8)$$

다음 그림들은 H사의 S차종과 K사의 S종의 그리고 H사의 E차종의 3000rpm과 idle일때의 power spectrum이다. Fig. 4와 Fig. 5에서 보면 알 수 있듯이 idle상태에서는 약 26Hz마다 peak이 생기며 Fig. 6과 Fig. 7에서 보듯이 3000rpm에서는 100Hz마다 peak이 생김을 알 수 있다. 3000rpm의 Power Spectrum을 보면 peak과 peak사이엔 50Hz씩 뛰는 peak을 볼 수 있는데 이것은 구동 기관의 회전수에 기인한다. 구동 기관의 회전수를 나타내는 odd order는 차 밖에서 소음을 측정할 신호보다 차 안에서 소음을 측정할 신호에서 더욱 명확하게 눈에 띄게 나타난다. 이것은 차내소음에서 구동기관의 회전으로 인한 소음의 영향을 무시할 수 없음을 보여준다.

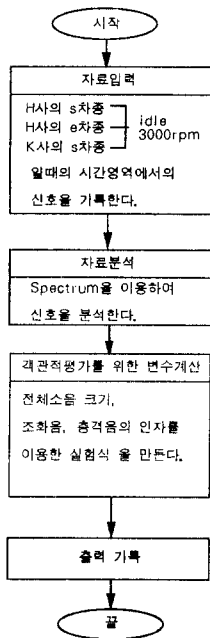


Fig. 3 전체 순서도

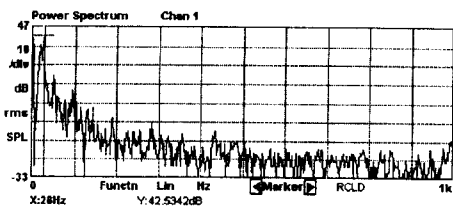


Fig. 4 H사의 S차종 idle (차내 소음)

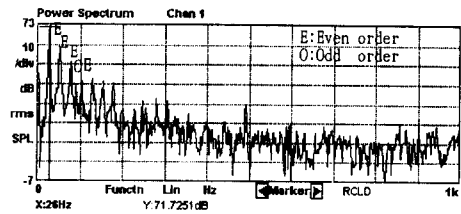


Fig. 5 H사의 S차종 idle (차외 소음)

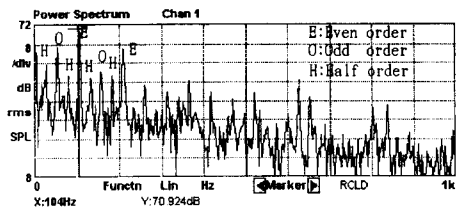


Fig. 6 K사의 S차종 3000rpm (차내 소음)

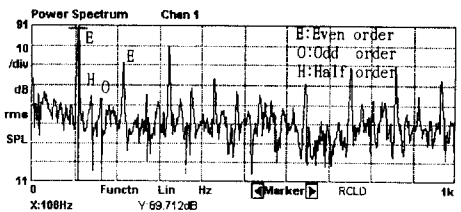


Fig. 7 K사의 S차종 3000rpm (차외 소음)

4.3.2 주관적 평가 결과

소음기의 주관적 평가 연구에서는 소음의 주관적인 평가를 위하여 20여명에게 서로 다른 차량의 엔진 소음을 12개로 녹음하여 각각 Random하게 들려졌다. 평가자로 하여금 소음 등급을 10단계로 나누어 평가하여 평균한 데이터가 Table 1에서와 같이 나타났다.

Table 1 소음의 주관적 평가 값

	H사의 S차종	K사의 S차종	H사의 E차종
idle (in)	2	1.6	3.6
3000rpm (in)	4.3	4	7
idle (out)	5	4	5
3000rpm (out)	7.3	8	9.7

객관적인 평가를 위하여 각 엔진의 소음에 대한 분석을 소음의 주요인자들 가운데 하나인 전체소음크기와 조화음, 충격음을 이용하여 만들어진 식에 의해 얻어진 데이터는 다음과 같다.

Rating

$$= a*CRP + \sum(b_f * L_{f-tone} - L_f) + \sum(c_f * kurtosis_f) \quad (9)$$

$$a=4.81 \quad b_1=4.64 \quad b_2=-3.27 \quad b_3=-1.16 \\ c_1=7.03 \quad c_2=1.52 \quad c_3=-44.21$$

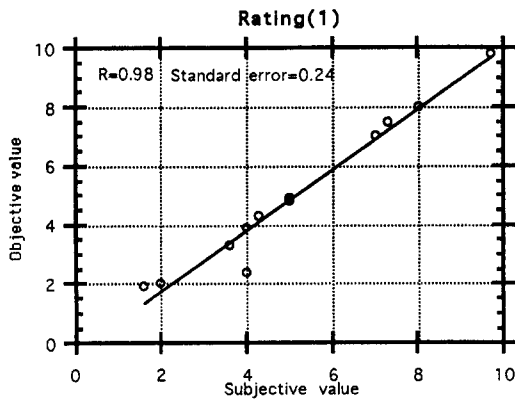


Fig. 8 식 (9)을 이용한 일치도

Table 2 식 (9)을 이용한 객관적 평가치

	H사의 S차종	K사의 S차종	H사의 E차종
idle (in)	2	1.9	3.3
3000rpm (in)	4.3	3.9	7
idle (out)	4.8	2.4	4.9
3000rpm (out)	7.5	8	9.8

Rating

$$= a * L_A + \sum(b_f * L_f - tone - L_f) + \sum(c_f * kurtosis_f) \quad (10)$$

$$a=4.81 \quad b1=5.2 \quad b2=-3.27 \quad b3=-1.18$$

$$c1=7.03 \quad c2=1.52 \quad c3=-44.21$$

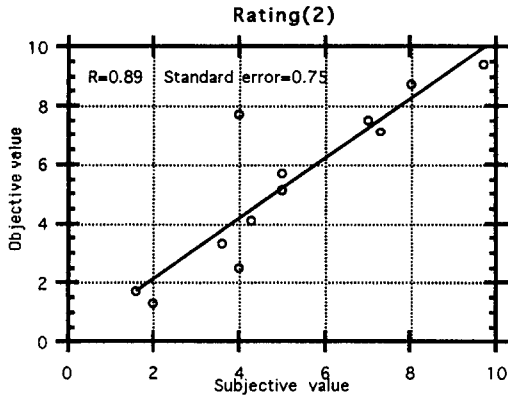


Fig. 9 식 (10)를 이용한 일치도

Table 3 식 (10)를 이용한 객관적 평가치

	H사의 S차종	K사의 S차종	H사의 e차종
idle (in)	1.3	1.7	3.3
3000rpm (in)	4.1	7.7	7.5
idle (out)	5.1	2.5	5.7
3000rpm (out)	7.1	8.7	9.4

$$\text{Rating} = a * CRP + b * L_{L_f} + c * (5 * \log_{10} K) - d \quad (11)$$

a) rating
 $= a * CRP + b * L_{(22.4-44.7)} + c * (5 * \log_{10} K) - d \quad (11-a)$

b) rating
 $= a * CRP + b * L_{(55.2-178)} + c * (5 * \log_{10} K) - d \quad (11-b)$
 $a=0.27 \quad b=0.04 \text{ or } b=0.02 \quad c=0.38 \quad d=15$

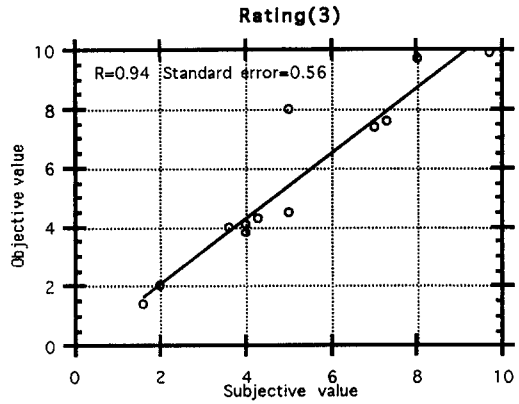


Fig. 10 식 (11-a)와 식 (11-b)를 이용한 일치도

Table 4 식 (11-a)와 식 (11-b)를 이용한 객관적 평가치

	H사의 s차종	K사의 s차종	H사의 E차종
idle (in)	2	1.4	4
3000rpm (in)	4.3	4.1	7.4
idle (out)	4.5	3.8	8
3000rpm (out)	7.6	9.7	9.9

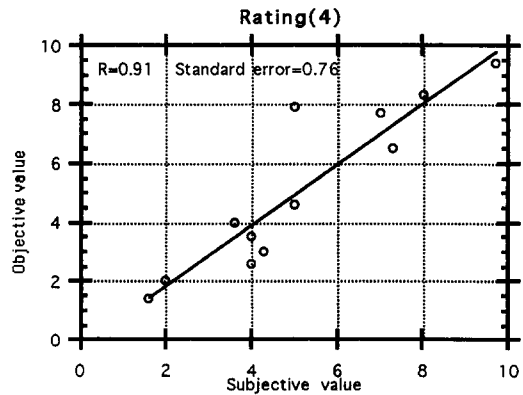


Fig. 11 식 (11-a)만을 이용한 일치도

Table 5 식 (11-a)만을 이용한 객관적 평가치

	H사의 S차종	K사의 S차종	H사의 E차종
idle (in)	2	1.4	4
3000rpm (in)	3	2.6	7.7
idle (out)	4.6	3.5	7.9
3000rpm (out)	6.5	8.3	9.4

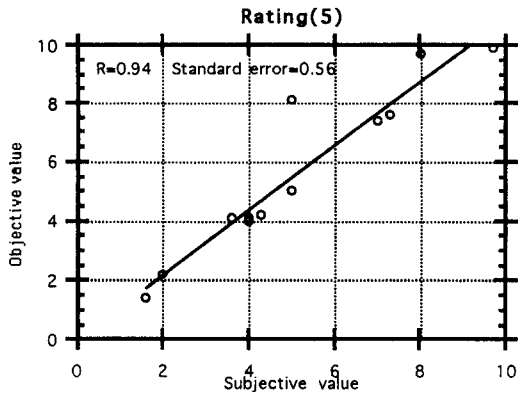


Fig. 12 식 (11-b)만을 이용한 일치도

Table 6 식 (11-b)만을 이용한 주관적 평가치

	H사의 S차종	K사의 S차종	H사의 B차종
idle (in)	2.2	1.4	4.1
3000rpm (in)	4.2	4	7.4
idle (out)	5	4.1	8.1
3000rpm (out)	7.6	9.7	9.9

5. 결론 및 고찰

본 연구는 차량내부의 소음 절대량 저감이라는 단순한 소음감소의 차원에서 벗어나 원하지 않는 소리의 탈피 뿐만 아니라 소리를 들어서 기분 나쁘지 않고 듣기 좋은 음향의 질적 수준의 향상을 위하여 주관적 소음을 객관화하는 중요 인자들을 알아보았고 이러한 중요인자들을 이용해 적절한 실험식을 만들어 계산하여 본 결과 다음과 같은 몇가지 결론을 얻었다.

- (1) 차내소음 측정시 구동 주기의 회전 주기로 보이는 Odd order의 peak이 차의 소음 측정때보다 크게 나타남을 볼 수 있다. 그러므로 차내 소음의 주관적평가를 위해서는 구동 기관의 회전영향도 고려해 주어야 한다.
- (2) 소음 특성의 객관적 평가를 위한 측정 인자중 전체소음 측정 인자인 CRP를 사용했을때 좀더 좋은 결과를 얻을 수 있음을 볼 수 있다.
- (3) 객관적 평가를 위한 측정 인자중 조화음 부분에서 소음의 결정적 양향을 주는 폭발 주파수 대역으로 필터링하여 얻은 L_{LF} 의 값은 폭발 주파수 대역을 고려하지 않고 필터링한 값보다 좀더 좋은 결과를 보이는 경향이 있다.
- (4) 본 연구에서 제시된 주관적 평가의 객관화 기법은 자동차의 배기 소음 뿐만 아니라 동력을 전달하는 여러 기계에서 나오는 소음의 분석에 적용, 활용함으로써 음향의 질적 수준의 향상을 도모함에 유용할 것이다.

참고문헌

- 1) M. F. Russell, "Noise Quality in Small Diesel Engined Vehicles", ATA International Conference on Vehicle Comfort ; ergonomic vibration noise and thermal aspects, Bologna, 14-16, October 1992
- 2) M. F. Russell, "An Objective Approach to Vehicle Internal Noise Assessments", paper C462/205, Autotech 93
- 3) M. F. Russell, "Subjective Assessment of Diesel Vehicle Noise", paper C386/044, presented to FISITA 92 congress as part of the theme Engineering for the customer, June 7-11 1992
- 4) M. F. Russell, "Towards an Objective Estimate of the Subjective Reaction to Diesel Engine Noise", SAE paper 870958
- 5) 전 오성, "배어링 마모 실험을 이용한 진동 신호의 통계적 파라미터 특성 연구", 한국음향학회지 제 8권 1호 별첨, 1989
- 6) 장 한기, "4차 모멘트를 이용한 비선형성의 탐색", 한국소음진동학회지 제 4권 제 3호, pp 307-318, 1994
- 7) 이 정권, "자동차 실내 소음에 대하여", 한국소음진동공학회지 제 3권 제 1호, pp 11-21, 1993