

## 음질 지수를 이용한 자동차 실내 소음의 분석 A analysis on the Sound of Passenger Cars by Sound Metrics

이해승\*·변연섭\*·강구태\*  
H.S. Lee , U.S. Byun and G.T. Kang

Key Words : Sound quality(음질), Sound Metrics(음질 지수), PCA(주성분 분석)  
Masking Effect(마스킹 효과), Modulation(변조)

### ABSTRACT

Previously, we have analyzed Vehicle interior noise by dBA based analysis. However, dBA based analysis can not describe the various sound phenomenon that consumer hear. Sound quality metrics can describe various sound phenomenon that dBA based analysis could not explain. In this paper, we will demonstrate the difference of between dBA based analysis and real sound feeling, and analyze sound examples by sound metrics and Principle Component Analysis. In this way we can analyze vehicle interior noise more effectively.

### 1. 서론

기존의 차량의 실내 소음은 dBA 중심으로 소음의 크기를 비교 평가하였다. 그러나 dBA 에 의한 분석은 실제 차량에서 소비자가 느끼는 다양한 음질적 요소를 충분히 반영하지 못하는 단점이 있다.

차량의 실내 소음의 청감 음향학[1]에 대한 적용은 1960 년대부터 시작되었는데 지금은 유럽을 중심으로 차량소음의 개발과정에서 활발히 사용되고 있다. [3-5]

그러나 청감 음향학 자체는 차량을 고려하여 개발한 모델이 아니고 유럽인들을 기준으로 개발되어서 차량에 적용하거나 동양인의 적용에는 수정된 지수의 개발이 필요한 시점이다. Hashimoto 는 이런 두 가지 문제를 해결하기 위해 Modified Sound Metrics[2]를 제안하였지만 좀더 정확하고 표준화된 Model 이 필요하다.

본 논문에서는 기존의 dBA 방법의 문제점과 dBA 분석에서 나타내지 못하는 차량 실내 소음의 특성을 객관평가 방법인 음질 지수를 통해 분석하는 다양한 기법의 실례를 제시하고자 한다.

### 2. 음질 지수와 그 활용의 예

#### 2.1 Loudness

일반적으로 음질 분석에 가장 많이 사용되는 Zwicker Loudness 는 24 개의 Critical Band 에서 구한 partial loudness 를 기초로 계산하여 구한 값이다. Zwicker Loudness 는 근접한 Critical Band 에 의한 Spectral Masking Effect 를 고려하여 구하고 다른 음질 지수의 기초로서 사용되어진다. 이 때 Spectral Masking 은 저주파쪽보다 고주파쪽으로 Masking 이 훨씬 넓게 이루어지는 특성이 있다. 이 Masking Effect 는 mp3 의 파일압축 기술에도 사용되었다.

다음은 두 가지 Sound 의 소음의 예이다.

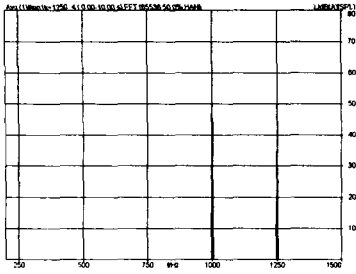
A Sound 은 1000 Hz 70 dB 와 1250 Hz 50 dB 의 소리가 합하여진 Sound 이고 B Sound 는 1000 Hz 70 dB 와 500 Hz 50 dB 의 Sound 가 합하여진 Sound 이다.

두 소리의 dB, dBA, Loudness 값을 구하면 표 1 과 같다.

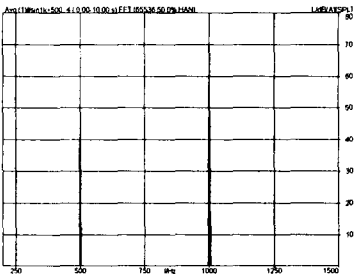
표와 같이 dB 는 두 소리의 크기가 일치하고 dBA 로는 A sound 가 Loudness 로는 B Sound 가 유리하다. 이와 같이 dBA 와 Loudness 가 역전하는 현상이 나타나는데 이는 Masking Effect 에 기인한다.

A Sound 에서 1250 Hz 는 그림에서 보듯이 1000 Hz 의 고주파 방향 Masking 영역에 포함되어 실제 귀에는 거의 인식되지 않는다. 그러나 Sound B 는 500 Hz 성분이 Masking 영역의 저주파 바깥에 존재하여 귀에 선명하게 소리가 들린다. 따라서 Sound B 의 Loudness 가 Sound A 보다 크게 발생한다. 또한 실제 청감에서도 Sound A 는 거의 Pure tone 으로 들리게 된다. 위의 결과로 미루어 볼 때 일반적인 소음에 대해 dBA 보다 Loudness 로 분석하는 것이 더 적합함을 알 수 있다.

\* 현대자동차 소음진동팀  
E-mail : praise77@hanmail.net  
Tel : (031) 369-6208, Fax : (031) 369-6095

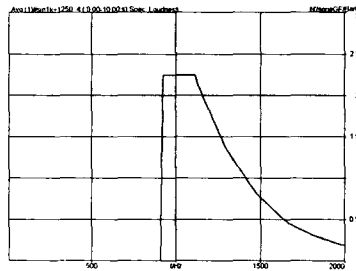


(a) Sound A

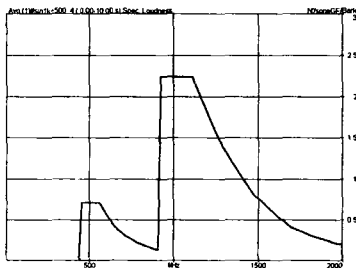


(b) Sound B

그림 1. Sound A 와 Sound B 의 dBA 비교



(a) Sound A



(b) Sound B

그림 2. Sound A 와 Sound B 의 Loudness 비교

표 1. Sound A 와 Sound B 의 비교

	dB(Linear)	dBA	Loudness
Sound A	70.04 dB	70.05 dBA	6.83 score
Sound B	70.04 dB	70.02 dBA	8.36 score

## 2.2 Modulation sound

Steady-State 상태인 Idle 에서와 Transient-state 인 rpm Sweep 상태에서 Modulation Sound 는 음질 분석에서 매우 중요한 비중을 차지한다. 왜냐하면 Modulation Frequency 의 변화에 따라 귀에 들리는 현상이 다르게 나타나기 때문이다. Modulation Frequency 가 15 Hz 미만일 때 소리는 Fluctuation Strength 로 평가할 수 있는 맥동음 으로 들리고 Modulation Frequency 가 대체적으로 15Hz 에서 150 Hz 사이일 때에는 Roughness 로 평가하는 귀에 거스르는 불쾌한 소리가 들린다. Modulation Frequency 가 150 Hz 이상일 때는 소리가 분리되어서 저음과 고음의 구분이 확실하게 들리게 된다.

IDLE 에서 발생하는 여러 맥동성 이음은 대개 Fluctuation Strength 로 평가할 수 있고 Run-up 상태의 Rumble noise 는 분석하면 Roughness 가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

그림 3 은 Fluctuation Strength 의 선도이다. 그림에서와 같이 Fluctuation Strength 는 4 Hz 에서 제일 효과가 크고 Modulation 이 이보다 크거나 작게 되면 그 효과가 작아지게 된다.

다음은 Zwicker 가 구한 Roughness 의 특성도이다. 일반적으로 1kHz 의 70 Hz 의 Modulation 일 때 가장 값이 크게 되고 Center Frequency 와 Modulation Frequency 의 변화에 따라 다르게 나타난다. 250 Hz 대역에서는 약 30-40 Hz 정도에서 최대가 나타나는데 이는 엔진의 Half order 의 주파수 분포에 해당된다. 이 이유로 인해 엔진의 Half order 가 불쾌한 느낌을 주는 Rumble 의 주요한 소음이 되는 것이다.

표 2 는 Sound C 와 Sound D 의 IDLE 에서 Loudness 와 Fluctuation Strength 의 값이다. 음의 크기에서는 Sound D 가 우수하지만 Fluctuation Strength 의 불리로 전체 음감에서 동등해지는 불리의 가능성이 존재하게 된다.

그림 5 와 그림 6 은 Modulation Frequency 가 발생하는 주파수를 표현한 그림이다. 이 때 세로축은 Center Frequency 이고 가로축은 Modulation

Frequency 이다.

그림 6 에서 Center Frequency 110 Hz 의 13 Hz Modulation 음이 크게 발생하여 체적으로 Sound D 에서 Fluctuation Strength 를 일으키는 Modulation 이 Sound C 보다 크게 발생함을 알 수 있다.

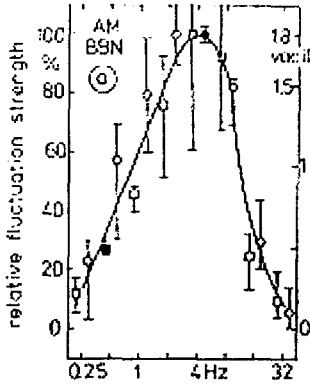


그림 3. Fluctuation Strength 특성도

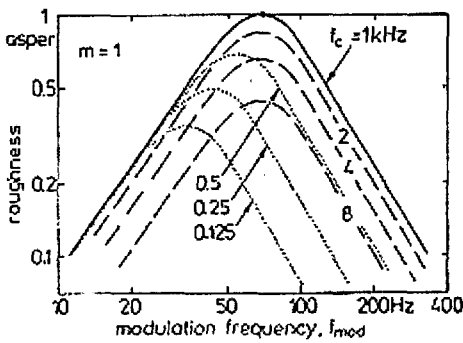


그림 4. Roughness 특성도

표 2. Sound C 와 Sound D 의 Loudness 와 Fluctuation Strength

	Loud	Fluctuation Strength
Sound C	3.50	1.24
Sound D	3.06	8.91

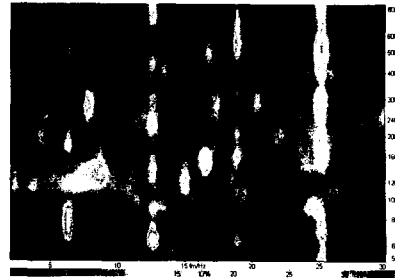


그림 5. Sound C 차량의 Modulation Frequency



그림 6. Sound D 차량의 Modulation Frequency

### 2.3 Sharpness

Sharpness 는 16 Bark 이상의 고주파에 Weighting 을 주어 고주파음의 포함여부를 평가하는 지수이다.

그림 7 은 일반적인 차량의 Loudness 분석인데 레벨이 높은 두 차량은 유럽차량이고 레벨이 낮은 두 차량은 한국과 일본의 차량이다. 그림 8 은 Sharpness 선도인데 Loudness 에서 Level 이 높던 유럽차들의 Sharpness 값들이 현저히 낮아짐을 알 수 있다.

한국과 일본등의 동양에서는 고주파음에 대해 거부감이 적고 저주파 부밍에는 민감한 반면에 유럽에서는 저주파 부밍에 대해 관대하고 고주파음에 대하여는 엄격하게 관리하고 있음을 부분적으로 알 수 있다.

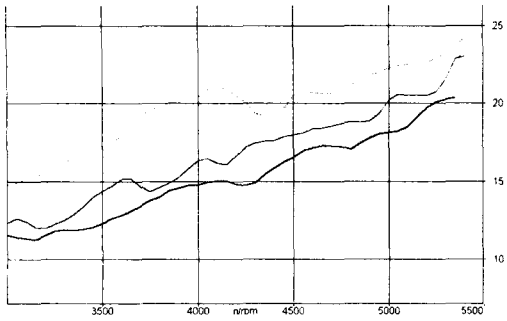


그림 7. 차량 실내 소음의 Loudness

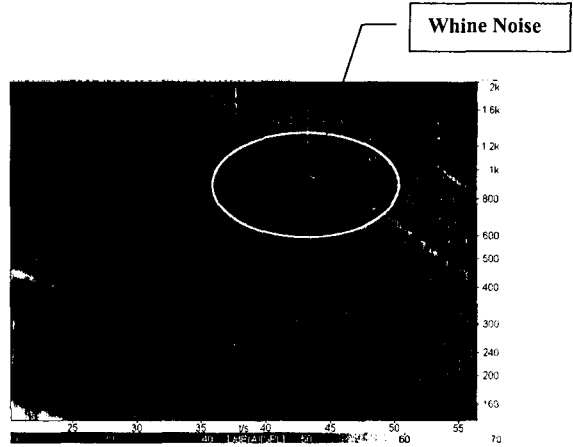


그림 9. Time-fft 로 분석한 Whine Noise

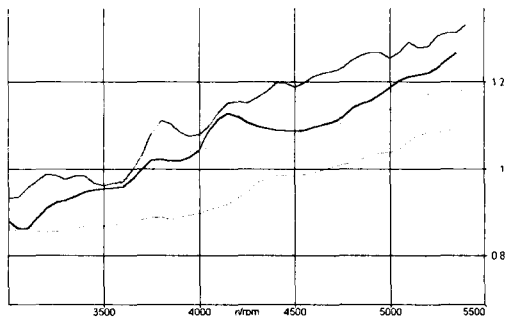


그림 8. 차량 실내 소음의 Sharpness

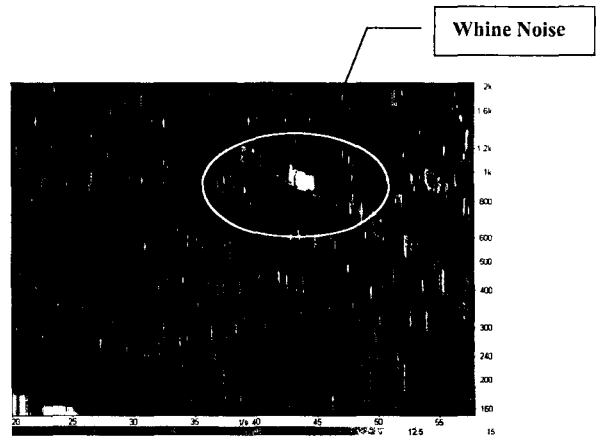


그림 10. Tonality로 분석한 Whine Noise

## 2.4 Tonality

Tonality 는 순음의 정도를 나타내는 지수로서 Sound 의 Random 한 성격이 강할수록 Tonality 는 낮아지게 된다. 그러나 순음의 성격이 강할수록 Tonality 는 높아지게 된다. 다음은 차량에서 발생하는 Whine Noise 를 기존의 Time-fft 와 Tonality 로 분석한 결과이다. 두 번째 그림을 통해서 Level 이 상대적으로 낮아도 귀에 거슬리게 들리는 순음성 소음의 정도를 Tonality 를 통해서 더 자세히 분석할 수 있음을 알 수 있다.

## 3. 소음 분석

표 3 은 가솔린 차량에 대한 IDLE 실내소음의 음질 값들이다. IDLE 의 차량소음의 음질을 잘 나타낼 수 있는 Loudness, Roughness, Sharpness, Fluctuation Strength 을 선정하여 음질을 분석하였다. 음질 지수중 Fluctuation Strength 의 산포가 가장 크게 발생함을 알 수 있다.

표 3. IDLE 실내소음 음질분석

	Loudness (sone)	Roughness (Asper)	Sharpness (acum)	Fluct. (mVacil)
A	3.50	0.41	0.74	1.24
B	3.06	0.41	0.60	8.91
C	2.88	0.28	0.69	1.25
D	3.96	0.39	0.79	2.76
E	3.97	0.49	0.75	6.53
F	3.51	0.29	0.73	1.29

주성분 분석(Principal Component Analysis)은 상호연관된 다수개의 양적변수들간의 공분산관계로부터 소수개(보통 2~3 개)의 원변수들의 선형결합으로 표현하는 분석이다.

위의 값들을 분석하기 위하여 주성분 분석을 실시하면 주요한 두개의 독립된 축으로 차량의 음질을 표현할 수 있다.

주성분 분석을 실시한 결과는 그림 11과 같다.

분석결과 1 사분면에 있는 차량 F 와 C 의 음질이 비교적 우수하고 차량 E 의 음질은 가장 열악한 특성을 가지고 있다. 두개의 축중 첫번째 축이 전체 인자의 51%정도의 특성을 나타내고 두번째 축이 45% 정도의 특성을 반영하고 있다.

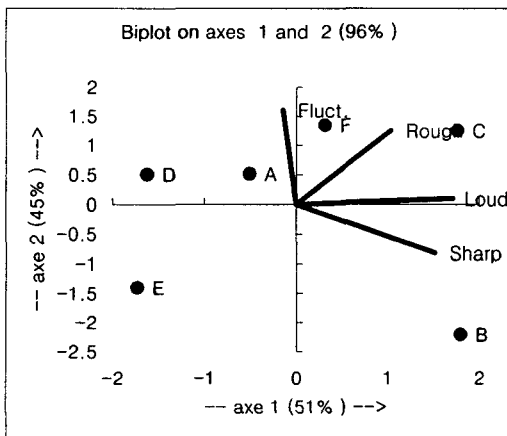


그림 11. 주성분 분석에 의한 음질 분석 결과

표 4. 주성분 분석으로 구한 Eigenvalue 와 Weighting Ratio

Eigenvalues	1	2	3	4
Value	2.0512	1.7918	0.1387	0.0182
% of variability	0.5128	0.4480	0.0347	0.0045
Cumulative %	0.5128	0.9608	0.9955	1.0000

표 4 에서 두개의 축의 Eigenvalue 값이 1 이상이고 나머지는 1 보다 극히 작아 두개의 주요한 독립된 축으로 차량의 음질 성향을 표현할 수 있음을 보여준다. 두개의 축으로 차량음질의 96%이상의 성격을 나타내준다.

또 그림 11 을 통해 Loudness 를 기초로 한 Roughness 와 Sharpness 는 Loudness 와 상관관계를 일정부분 가지지만 Fluctuation 과 Loudness 는 거의 독립적인 지표특성을 나타냄을 알 수 있다.

두개의 독립된 특성의 가중치를 곱하여 차량 실내 소음의 순위를 매기면 다음과 같다.

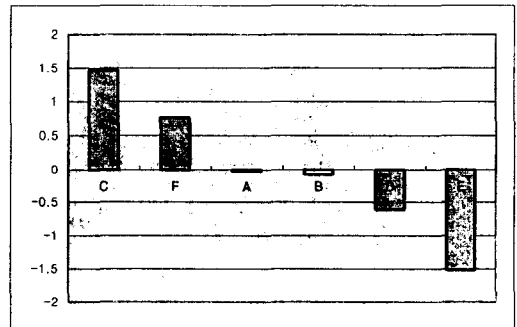


그림 12 주성분 분석에 의해 분석된 실내 소음의 Ranking

위의 객관 분석의 결과를 통해 차량 C 와 F 가 우수하고 그 다음 A,B,D,E 의 순서로 음질의 순위를 Ranking 할 수 있었다.

#### 4. 결론

- (1) dBA 분석과 실제침감이 Masking Effect 와 일치하지 않는 경우를 제시하여 Loudness 분석의 필요성을 제시하고 Modulation 에 의하여 발생하는 차량소음의 특성을 분석하는 방법을 제시하였다.
- (2) 고주파성 순음의 분석에 Tonality 가 효과적으로 사용될 수 있음을 확인하였다.
- (3) 음질지수와 PCA 를 통해 차량의 객관분석을 실시하고 그 순위를 제시하였다.

#### 참고문헌

- (1) Zwicker, E., and Fastle, H., **Psychoacoustics-Facts and Models**, Springer-Varlag, Berlin, Heidelberg, 1990.
- (2) Takoe Hashimoto, “**Modification of Roughness Level for Higher Correlation with Unpleasantness -Weighted Roughness Level due to Modulation Frequencies**”, JSAE paper 9735132
- (3) 김정우, 최종대 등 1998, “**자동차 실내 소음의 음질 연구**”, 춘계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, pp. 94~101.
- (4) Toshihiro Wakita “**Visualization of Vehicle Sound Quality Using Human Hearing Model**” SAE 940604
- (5) Norman Otto and John Feng “**Linearity of Powertrain Acceleration Sound**” SAE 971982