

주행중 차실 내부 소음의 평가

Objective Evaluation of Vehicle Interior Noise in Transient Operation

정 혁* · 이 정 권**

Hyuk Jeong and Jeong-Guon Ih

(1996년 5월 10일 접수 ; 1996년 6월 14일 심사완료)

Key Words : Transient Signal Analysis(과도신호해석법), Sound Quality(음질), Spectrogram(스펙트로그램), Wavelet Transform(웨이브렛 변환), Loudness(라우드니스), Sharpness(샤프니스), AI(Articulation Index)

ABSTRACT

Interior noise, engine speed and vehicle speed are measured under transient road-load condition and interior noise signal is transformed by using the transient signal analysis methods, such as the spectrogram and wavelet transform. Using the analyzed results, subjective noise metrics such as the loudness, sharpness and articulation index at each vehicle speed can be estimated and characteristics of interior noise for various running modes can be discussed in the viewpoint of noise quality.

1. 서 론

차실내부 소음은 엔진의 운동 및 차량의 주행에 따라, 엔진소음, 흡-배기계소음, 구동계소음, 도로 및 타이어 소음, 바람소리 등 다양한 소음원의 복합된 결과로서 나타난다. 특히 가속 또는 감속 주행모드에서는 시간에 따라 차실내부 소음의 주파수 특성이 변화하는 더욱 복잡한 형태의 소음 현상을 관찰할 수 있다. 이와 같은 과도적인 차실 내부 소음의 변화 형태를 분석하기 위해서는 스펙트로그램(spectrogram), Wigner-Ville변환 또는 웨이브렛 변환(wavelet transform)과 같은 시간-주파수 해석법을 이용할 수 있다^(1,2).

한편, 스펙트로그램이나 Wigner-Ville방법은 많은 양의 계산시간과 메모리가 필요하기 때문에 가속모드와 같은 차실 내부 소음의 해석에 있어서는 실용적이지 못하다⁽³⁾. 반면, 웨이브렛 변환은 스펙트로그램이나 Wigner-Ville방법에 비해 훨씬 작은 계산량

과 메모리가 요구되고, 라우드니스(loudness), 샤프니스(sharpness), AI(articulation index) 또는 러프니스(roughness)와 같은 소음의 심리음향적 평가의 기본 자료가 되는 1/3 옥타브 해석이 가능하기 때문에 가속 모드와 같은 과도적인 차실 내부 소음의 해석에 적합하다. 본 연구에서는 하모닉 웨이브렛 변환(harmonic wavelet transform)을 이용하여 1/3 옥타브 해석을 하고, 웨이브렛 변환 결과로부터 라우드니스 값과 비라우드니스(specific loudness)를 구하여 소음제어의 대상이 되는 주파수 밴드 및 엔진 회전수 대역을 찾아내고자 한다.

2. 본 론

2.1 웨이브렛 변환에 의한 1/3 옥타브 해석

기존의 1/3 옥타브 해석은 아나로그 또는 디지털 필터를 이용한 방법이 사용되고 있으며, N개의 시간 영역 데이터로부터 라우드니스 해석에 필요한 28개의 1/3 옥타브 밴드에 대해 나타내려면 28×N인 행렬이 필요하다. 즉, 차실 소음의 음질 평가를 위한 샘플링 주파수를 고려하면, 급가속 주행 모드에

*한국과학기술원 기계공학과

**정회원, 한국과학기술원 기계공학과

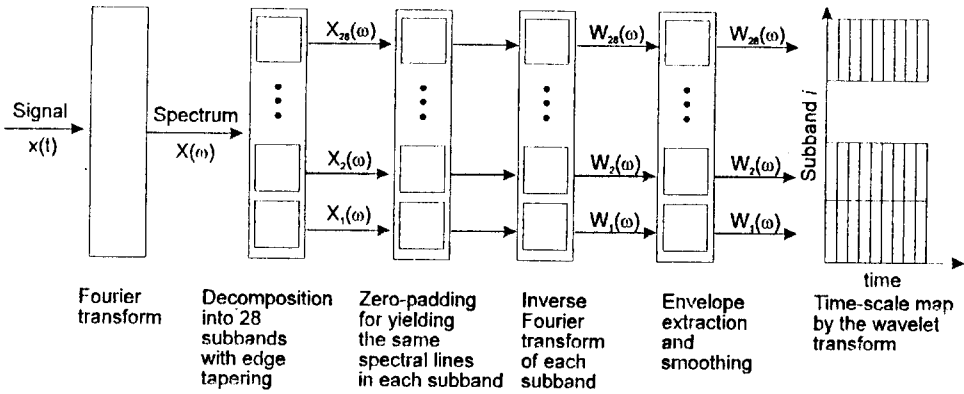


Fig. 1 1/3 octave analysis procedure using wavelet transform

서 얻은 차실내부 음압의 시간 영역 데이터의 개수가 $10^5 \sim 10^6$ 개 정도이므로, 일반 PC에서 처리하기 힘든 많은 기억 메모리와 계산 시간이 필요하게 된다.

반면, 하모닉 웨이브렛 변환과 같은 직교 웨이브렛(orthogonal wavelet)을 이용하면 시간 영역 데이터와 같은 수의 시간-주파수 데이터가 존재하게 된다. 그러나 Chen과 Wang⁽⁴⁾이 지적했듯이 하모닉 웨이브렛 변환과 같은 직교 웨이브렛 변환을 이용하여 얻은 시간 및 웨이브렛 스케일(wavelet scale)에 대한 등음압선도는 각 스케일마다 시간 간격이 다르므로 인해, 소음 성분의 분포 형태가 발생 시각에 따라 원신호와 다른 형태로 보일 수 있다. 이러한 웨이브렛 변환의 문제를 개선하기 위하여, 각 서브밴드(subband)의 스펙트럴 라인(spectral line)의 개수가 같도록 제로-패딩(zero-padding)을 하여 각 서브밴드의 스펙트럼(spectrum)을 역 푸리에 변환(inverse Fourier transform)하였다.

한편, 하모닉 웨이브렛 변환의 경우 주파수 영역에 대해서는 콤팩트(compact) 반면, 시간축에 대해서는 시간 t 에 대해 $1/t$ 의 낮은 비율로 감소하여서 시간축의 해상도(localization)가 떨어지게 되며, 각 서브밴드의 스펙트럼을 역 푸리에 변환하는 과정에서 에지 효과(edge effect)가 발생한다⁽³⁾. 이와 같은 시간축의 해상도와 에지효과를 개선하기 위하여 각 서브밴드의 양끝 데이터를 테이퍼링(tapering)하는 방법을 이용하였다. 한편, Fig. 1은 하모닉 웨이브렛 변환을 이용하여 1/3 옥타브 해석을 하는 과정을 간략히 나타낸 것이다. Fig. 1의 개선된 과정에 의해 가속주행 중의 차실 내부 소음을 웨이브렛 변환한 결과가 Fig. 2에 나타나있다.

Fig. 2로부터 차실내부 소음의 주관적 평가와 관계되는 물리적 요인들인 L_A (A보정치), 라우드니스,

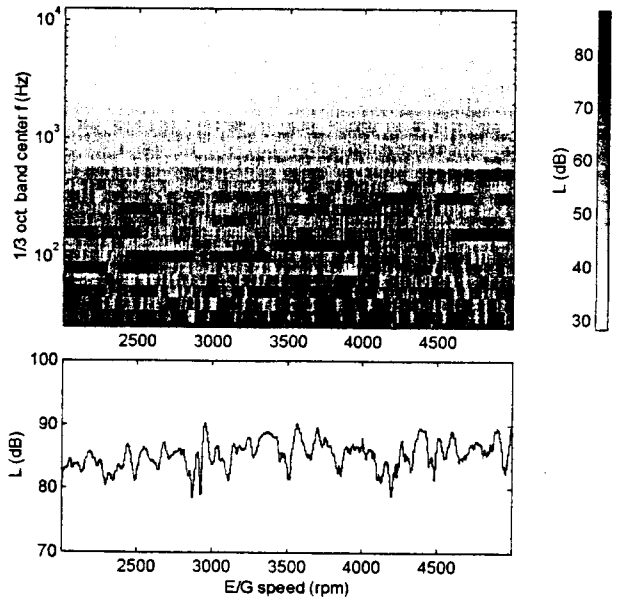


Fig. 2 Time-scale map by wavelet transform

샤프니스, 러프니스 등을 구할 수 있다. Schiffbänker⁽⁵⁾는 라우드니스가 소음의 주관적 평가에 80~85% 정도의 영향을 주고 있으며, 샤프니스, 러프니스 등은 각각 10% 미만의 영향을 주는 것으로 해석했다. 본 연구에서는 일단 소음의 주관적 평가에 가장 큰 영향을 미치는 라우드니스만을 차실내부 소음의 해석에 적용하였다.

라우드니스 계산법으로는 ISO 532에 나타나 있는 바와 같이 Steven⁽⁶⁾에 의한 방법과 Zwicker⁽⁶⁾에 의한 두 가지 방법이 있으나, Zwicker에 의한 방법이 좀더 주관적 평가와 밀접하다고 여겨지고 있다. Fig. 3은 Zwicker에 의해 제안된 방법으로 비라우드니스와 라우드니스 값을 계산한 것이다. 한편, 충격 소

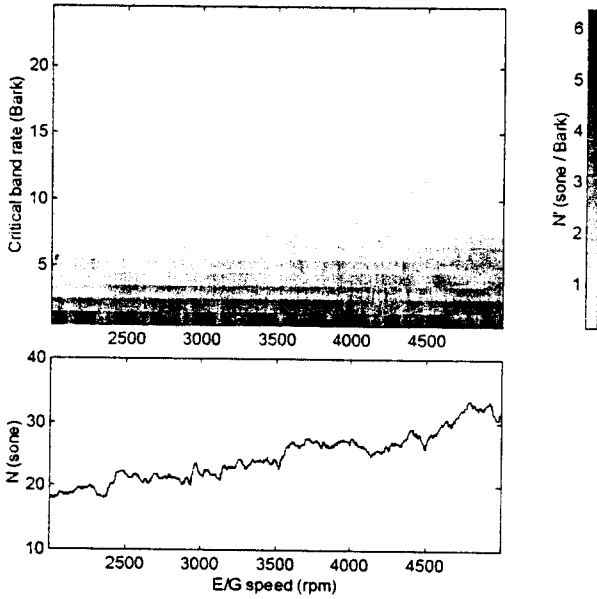


Fig. 3 Loudness and specific loudness

음의 경우, 반드시 시간에 대한 마스킹 효과가 고려되어야 하지만, 본 연구에서는 고려하지 않았다. 시간에 대한 마스킹 효과는 차후에 고려할 예정이다.

Fig. 3으로부터 엔진 속도가 4850 rpm 부근에서 가장 큰 라우드니스 레벨(level)이 나타나는 것을 알 수 있었으며, 이때 가장 큰 기여를 하는 1/3 옥타브 밴드는 중심 주파수가 160 Hz인 1/3 옥타브 밴드임을 확인하였다. 이로부터, 차량의 음질을 개선하기 위해 우선적으로 제어되어야 할 엔진 회전수 대역과 주파수 대역을 알 수 있다.

2.2 스펙트로그램에 의한 하모닉 성분의 해석

차실내부 소음은 엔진의 가진에 의한 하모닉 성분과 비하모닉(nonharmonic) 성분으로 구분할 수 있다. 웨이브렛 변환에 의한 1/3 옥타브 해석은 엔진 회전속도와 관련된 하모닉 성분의 관찰에는 적합하지 못하다. 본 연구에서는 4기통 엔진의 엔진 회전수 2000~5000 rpm을 고려했기 때문에 일반적으로 자동차 소음 해석에서 고려되는 10차 하모닉 성분까지의 주파수 범위는 1000 Hz 미만이 된다. 많은 계산 시간과 메모리가 요구되는 전 주파수 영역의 스펙트로그램을 구할 필요없이 32 Hz로 샘플링된 데이터를 2000 Hz로 리샘플링(reasampling)하여 스펙트로그램을 구하였다. Fig. 4는 엔진의 회전수와 주파수를 각각 20 rpm, 2 Hz 간격으로 해석했을 때의 스펙트로그램으로, 각 하모닉 성분이 잘 나타나 있다.

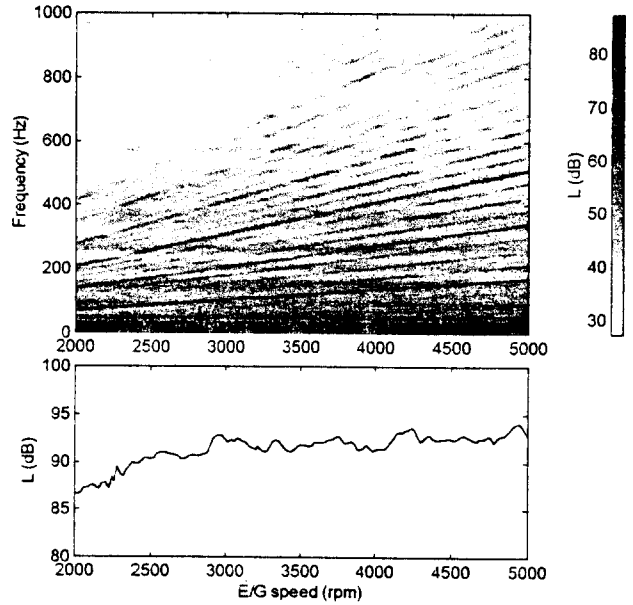


Fig. 4 Spectrogram of interior noise below 1 kHz

Fig. 4는 차량의 평균적인 특성을 나타내기 위하여, 각 엔진 회전수에 대해 평균한 값으로부터 구하였다. Fig. 4로부터 2차, 4차, 6차 외의 많은 하모닉 성분들도 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 청감이론에 따르면 낮은 주파수 대역의 큰 자극은 높은 주파수 대역의 작은 자극을 마스킹(masking)하기 때문에 소음제어 측면에서 모든 하모닉 성분이 고려될 필요는 없다⁽⁷⁾. 라우드니스가 가장 클 때의 스펙트럼에 대해 마스킹 곡선⁽⁷⁾을 구하여 Fig. 5에 나타내었다. 라우드니스가 가장 클 때의 스펙트럼에 대한 결과로부터 2차, 4차, 5차, 6차 및 10차와 같은 몇몇 하모닉 성분만이 라우드니스에 크게

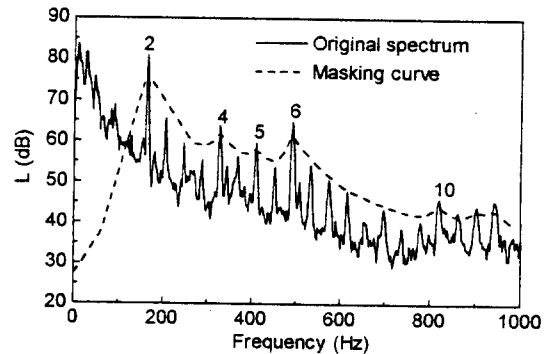


Fig. 5 Original spectrum and masking curve of interior noise at maximum loudness condition

기여하는 것을 볼 수 있다. 특히, 라우드니스에 가장 크게 기여하는 1/3 옥타브 밴드의 소음 성분은 Fig. 5로부터 2차 하모닉 성분임을 알 수 있다. 차후 이러한 2차 및 고차 성분의 크기 변화로부터 소음의 음색에 관한 평가에 대해 연구가 수행될 예정이다.

3. 결 론

급가속 주행 모드와 과도적인 상태의 자동차 주행에서 발생하는 차실 내부 소음의 크기나 음질을 평가하기 위해 웨이브렛 변환을 이용하였고, 웨이브렛 변환 결과로부터 각 엔진 회전수에 대한 비라우드니스를 구했으며, 이로부터 소음의 주관적인 평가를 개선할 수 있는 엔진 회전수 대역과 주파수 대역을 알 수 있었다. 또한, 저주파 대역에서 소음의 주관적 평가를 결정하는 엔진회전수에 따른 하모닉 성분들을 관찰하기 위하여, 스펙트로그램을 이용했으며, 이로부터 문제 회전수 대역에서 청감에 기여하는 하모닉 성분들을 찾아낼 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Shin, Y. S. and Jeon, J. J., 1994, "Wavelet Analysis vs. Wigner-Ville Distribution for Time-Frequency Domain Representation of Signatures," Proc. of 3rd Int. Congress on Air- and Structure-Borne Sound and Vibration, Montreal, Canada, pp. 725~742.
- (2) Leuridan, J., Auweraer, H. V. and Vold, H., 1994, "The Analysis of Nonstationary Dynamic Signals," Sound and Vibration, Vol. 28, No. 8, pp. 14~26.
- (3) Newland, D. E., 1993, "Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis," Longman, Harlow and John Wiley, New York.
- (4) Chen, D. J. and Wang, W. J., 1995, "Pattern Changes of Time-Shifted Vibration Signals on Wavelet Time-Scale Maps," ASME Design Engineering Technical Conferences, DE-Vol. 84-1, pp. 1345~1349.
- (5) Schiffbänker, H., Brandl, F. K. and Thien, G. E., 1991, "Development and Application of an Evaluation Technique to Assess the Subjective Character of Engine Noise," SAE 911081, Noise and Vibration Conference, Traverse City, MI, pp. 369~379.
- (6) ISO 532, 1975, "Acoustics-Method for Calculating Loudness Level."
- (7) ISO/IEC IS11172-3, 1992, "Coding of Moving Pictures and Associated Audio for Digital Storage Media at up to about 1.5Mbit/s-Audio Part."
- (1) Shin, Y. S. and Jeon, J. J., 1994, "Wavelet Analysis vs. Wigner-Ville Distribution for Time-Frequency Domain Representation of Signatures,"