

# 웨이블릿 필터를 이용한 자동차 실내공간의 잔향시간측정에 관한 연구

## Measurement of Reverberation Times in the Compartment of Vehicles Using Wavelet Filter Bank

이 상 권<sup>†</sup> · 유 동 준\* · 이 승 영\*\* · 박 동 철\*

Sang-Kwon Lee, Dong-Joon Ryu Seung Young Lee, and Dong-Chul Park

(2003년 8월 5일 접수 : 2004년 1월 26일 심사완료)

**Key Words** : Vehicle(자동차), Wavelet(웨이블릿), Reverberation Time (잔향시간)

### ABSTRACT

A number of researchers have attempted to measure the reverberation time of a passenger car, but the reverberation time of passenger car is too short to measure with the traditional band pass filter. And if the reverberation time is very short, the product of the reverberation time (T) and the bandwidth (B) of the traditional band pass filter becomes small. The low limit of BT product required for the measurement of reverberation time with the traditional band pass filter is 16. In order to overcome this problem, the wavelet filter bank was developed. In this study, this new wavelet filter was employed to measure the reverberation times of five different classes of passenger cars. The low limit of BT product required for the measurement of reverberation time with the wavelet filter is 4. The reverberation times of five passenger cars were measured successfully with the new wavelet filter bank. The reverberation times measured in most passenger cars was found to be around 0.04. Compared with general acoustic rooms like concert halls, this is a very short reverberation time

### 1. 서 론

자동차의 실내공간에서 잔향시간은 오디오시스템에 대한 영향과 내장재의 흡음특성을 평가하는데 중요한 역할을 한다.<sup>(1,2)</sup> 따라서 자동차의 잔향시간을 정확히 측정하기위해서 많은 노력이 진행되어 왔다.<sup>(3,4)</sup> 그러

나 승용차 실내에서의 잔향시간은 매우 짧아서 BT떡 (bandwidth time product)의 영향을 받는다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 앞선 연구에서는 시간주파수 기법의 하나인 위그너분포 (Wigner distribution)의 기술을 이용하였다.<sup>(3)</sup> 그러나 이 방법은 기본적으로 간섭항(cross terms)의 존재로 불가능하다.<sup>(4)</sup> 또 다른 방법으로는 간접적인 방법으로서 차체의 진동 감쇠율 (loss factor)를 측정하여 실내공간의 에너지 감소를 이용하여 잔향시간을 예측하는 방법도 있었다.<sup>(5)</sup> 이 방법은 간접적이 방법으로서 실제 ISO에서 추천하는 잔향시간의 측정방법과 다르다. 기존의 대역필터를

† 책임저자 : 정희원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : sangkwon@inha.ac.kr

Tel : (032) 860-7305, Fax : (032) 868-1716

\* 인하대학교 대학원 기계공학과

\*\* LMS-Korea

\*\*\* 현대자동차 남양연구소 기능시험2팀

이용하여 잔향시간을 측정하는 경우에는 BT 값이 16보다 큰 값을 가져야 한다.<sup>(6)</sup> 그러나 최근에 개발된 웨이블릿 필터를 이용한 잔향시간의 측정법은 BT 값이 4보다 크면 된다.<sup>(7-9)</sup> 따라서 본 연구에서는 웨이블릿 필터를 이용하여 5대 각기 다른 승용차의 실내에서의 잔향시간을 측정 비교하고, 그 특성에 대하여 연구한다.

## 2. 대역필터 및 웨이블릿 필터들의 BT역 (BT product)에 대한 영향 비교

선형시스템의 충격응답함수 (impulse response)를  $h(t)$ 라고 하면 실 음향에서의 충격응답함수는 무지향성스피커, 장난감 풍선, 화약총 등을 이용하여 음향공간을 가진 하여 마이크로폰으로 발생된 음에 대한 음압을 측정하여 실 음향에 대한 충격응답함수를 구한다. 이러한 실음향의 충격 응답함수는 주파수 특성별

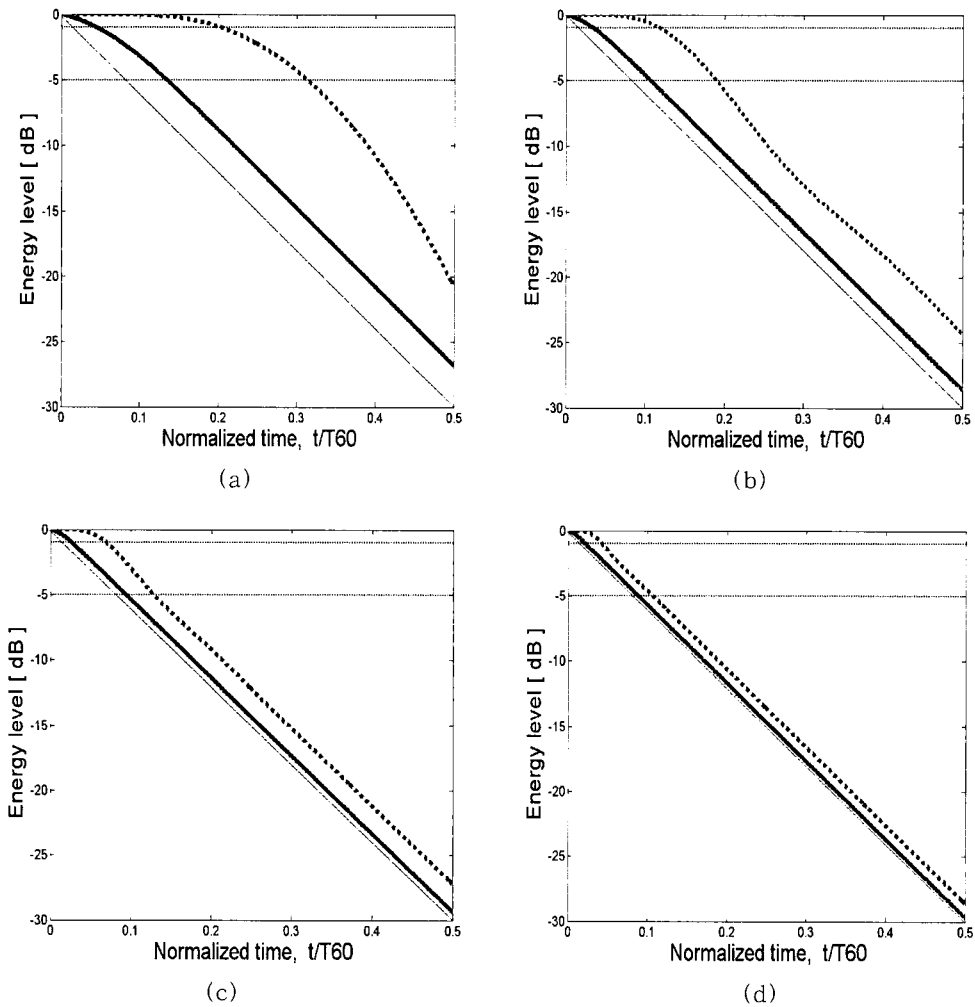


Fig. 1 Comparison of acoustic decay curves calculated by applying the third-octave band passfilter and the third-octave wavelet filter bank to the exponential decay function with the frequency 125 Hz : — ideal decay curve : — third- octave band pass filter: third-octave wavelet filter (a)  $BT_{60} = 4$  (b)  $BT_{60} = 8$  (c)  $BT_{60} = 16$  (d)  $BT_{60} = 32$

로 그 공간에서의 음향 특성에 대한 정보를 내포하고 있다. 따라서 각 주파수별충격응답함수는 다른 특성을 가진다. 일반적인 실 음향에서의 충격 응답함수는 지수함수로 감소하는 형태를 가진다.<sup>(10)</sup> 따라서 실 음향에서의 이상적인 충격 응답함수는 식 (1)과 같이 표현 할 수 있다.

$$h(t) = \sum_{i=1}^L h_i(t) \quad (1.1)$$

$$h_i(t) = \begin{cases} e^{i/2\lambda} \cos\omega_i t & \text{for } t > 0 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (1.2)$$

여기서  $h_i(t)$ 는  $i$ \_th 중심주파수에서의 충격응답함수이며,  $\omega_i$ 는  $i$ \_th중시주파수 이며  $\lambda$ 는 잔향시간과 관계하는 변수로서  $T=6\ln(10)\lambda$ 로 표현된다.<sup>(7,8)</sup>  $h(t)$ 는 전체 주파수를 고려한 실 공간에서의 충격응답함수이다.

이러한 충격응답함수에 대한 잔향시간의 측정은 기존의 대역통과 필터를 이용할 경우, 각 중심 주파수에 대한충격응답함수를 구하고 이것에 대한 역적분<sup>(11)</sup>을 통하여 음향에너지 감쇠곡선을 구한다. 이 경우 얻어지는 관계식은 다음과 같다.

$$d(t) = \int_t^{\infty} \left( \int_{-\infty}^{\infty} e^{3\lambda \ln(10)/T} \cos\omega_i \lambda (h_b(\eta - \lambda)) d\lambda \right)^2 d\eta \quad (2)$$

여기서  $h_b(t)$ 는 대역통과 필터의 충격 응답함수이다.<sup>(7)</sup> 웨이블렛 필터를 이용하는 경우에는 다음 음향감쇠곡선은 다음과 같이 표현된다.

$$d(t) = \int_{-\infty}^t \left[ \frac{1}{\sqrt{a}} \int_b^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi B}} \exp \left( j(\tau - \eta) \left( \frac{\omega_0 - \omega_i + 1/2\lambda}{a} \right) - \frac{1}{B} \left( \frac{\tau - \eta}{a} \right)^2 \right) d\tau \right] d\eta \quad (3)$$

이 웨이블렛 필터는 ANSI규격<sup>(12)</sup>을 만족한다. 잔향시간은 음향감쇠곡선이 60 dB 감소하는데 걸리는 시간을 잔향시간으로 정의된다.<sup>(13)</sup> 식(1)에서 표현된 이상적인 충격 응답신호에 대한 잔향을 시간을 대역통과 필터와 웨이블렛 필터를 이용하여 비교하면

Fig. 1과 같은 결과를 얻을 수가 있다.

Fig. 1 은 잔향시간을  $T=1$ 로 두고 1/3 옥타브 밴드에 대한 잔향시간을 계산한 것으로서 중심주파수가 증가 할수록 필터의 통과대역 (bandwidth)가 증가하여 BT의 값이 점점 증가한다. Fig. 1 에서 세가지 선이 있는데, 가는 실선은 이상적인 음향에너지 감쇠곡선이고, 굵은 실선은 웨이블렛 필터를 이용한 것이며 점선은 대역통과 필터를 이용한 결과이다. Fig. 1 (a)와 Fig. 1(b)에서 음향감쇠곡선은 많은 왜곡현상을 볼 수 있으며 또한 IIR필터 특성상 초기 시간 지연이 존재한다.<sup>(6)</sup> 그러나 웨이블렛 필터를 이용하는 경우에는 음향감쇠곡선의 왜곡 현상은 없다. 따라서 웨이블렛 필터는 BT값이 4이상이면 정확한 잔향시간을 측정할 수 있음을 알 수가 있다. 그러나 대역통과 필터를 이용하는 경우에는 BT값이 16이상 되어야 정확한 잔향시간을 예측할 수 있음을 알 수가 있다.

### 3. 대역필터 및 웨이브렛 필터의 잔향시간 계산에 대한 영향 비교

본 절에서는 대역필터 및 웨이블렛 필터를 이용하여 식 (1)에서 보여주는 합성된 충격응답함수에 대한 잔향시간을 계산하여 두 필터의 잔향시간 계산 성능을 비교하였다. 먼저 컴퓨터를 이용하여 Fig. 2에서 보여준 합성된 충격함수를 구하였다.

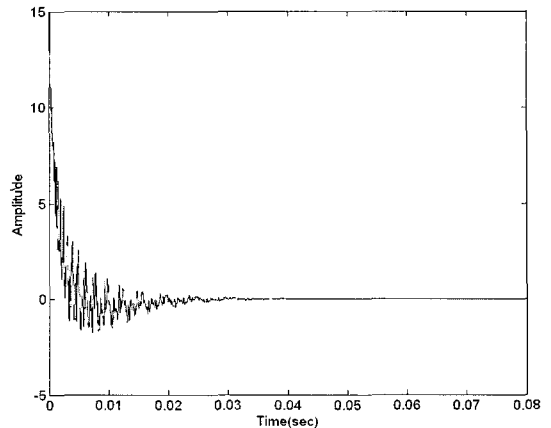


Fig. 2 Benchmarked synthetic signal with reverberation time of 0.05

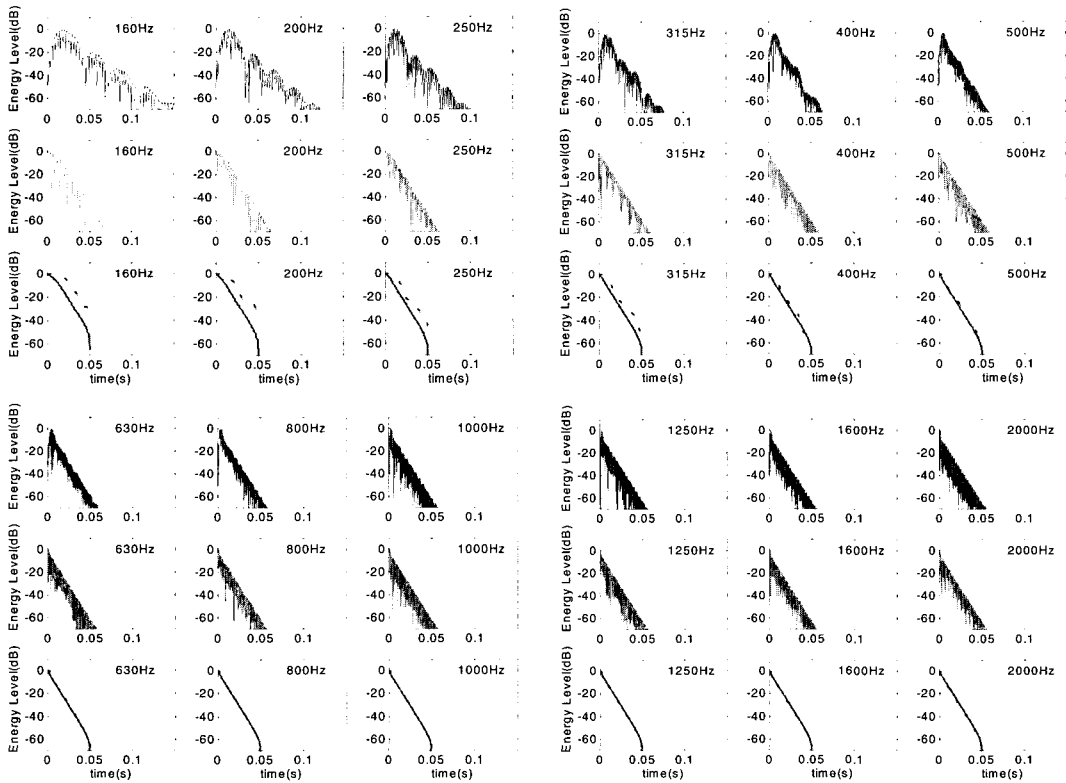


Fig. 3 Comparison of acoustic decay curves calculated by applying the band pass filter bank and the wavelet filter bank to the exponential decay function with the frequency from 80 Hz to 1000 Hz. First row is calculated by using the third-octave band pass filter. Second row is calculated by using the third-octave wavelet filter. The last row is comparison between acoustic decay curve calculated by the back integration method which is suggested by Schroeder, band pass filter:-----, wavelet filter:————

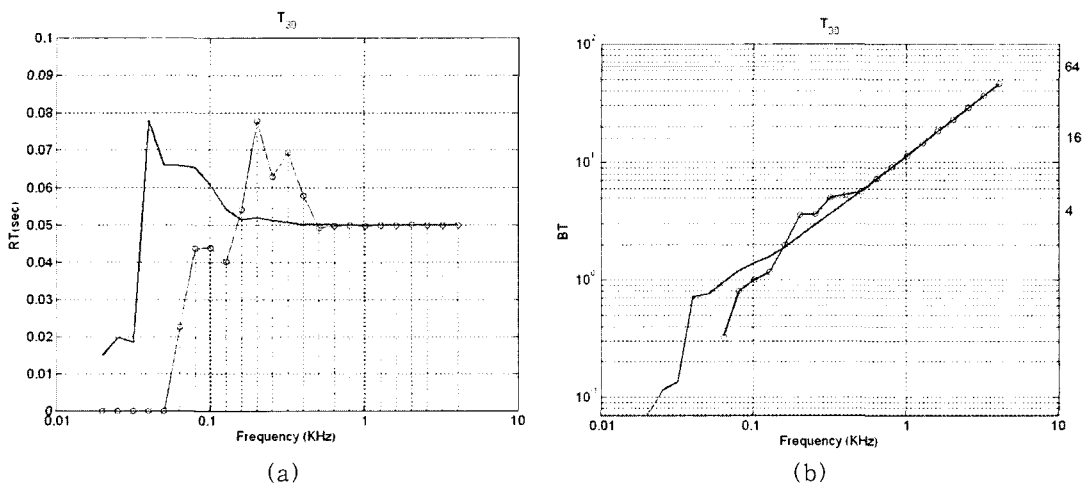


Fig. 4 Reverberation times and values of  $BT$  product for a synthetic signal with reverberation time of 0.1 measured by the wavelet filter bank:———— and by band pass filter bank:—○—. (a) Reverberation times (b)  $BT$  product

합성신호의 샘플링 주파수는 46.32 kHz 이며, 데이터수는 185364개이며 25 H부터 4 kHz까지 중심주파수를 이용하여 만들었다.

또한 각 중심주파수에 대한 잔향시간은 일정하게 0.05를 두고 만들었다. 식 (2) 과 식 (3)을 이용하여 각 중심주파수에 대한 음향감쇠곡선을 계산하여 나타내면 Fig. 3과 같다. 각 그림에서 첫째 행은 대역통과 필터를 이용한 것이며, 둘째 행은 웨이블릿 필터를 이용한 것이다. 그리고 각각의 결과를 역 적분하면 세 번째 열에서 보여주는 음향에너지감쇠곡선을 얻을 수가 있다.

Fig. 3의 결과에서 중심 주파수가 낮아지는 저주파에서는 BT 먹의 값이 작아지므로 대역통과 필터의 왜곡현상은 심하게 나타남을 알 수가 있다. Fig. 4(a)에서는 30 dB의 음향에너지가 감소하는  $T_{30}$  을 이용

산하기 위해서 Fig. 4(a)를 확장하여 보면 중심주파

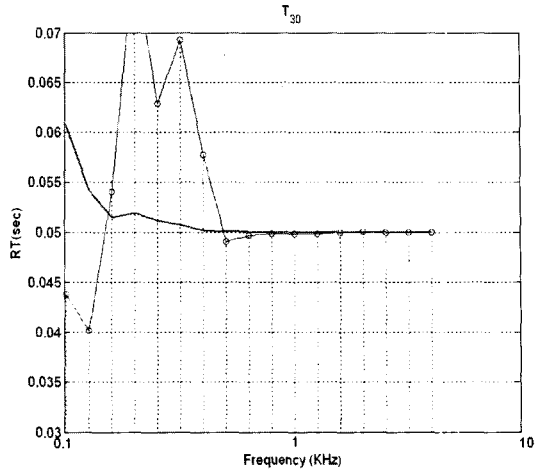


Fig. 5 Zoomed version of reverberation times as shown in Fig. 4(a)

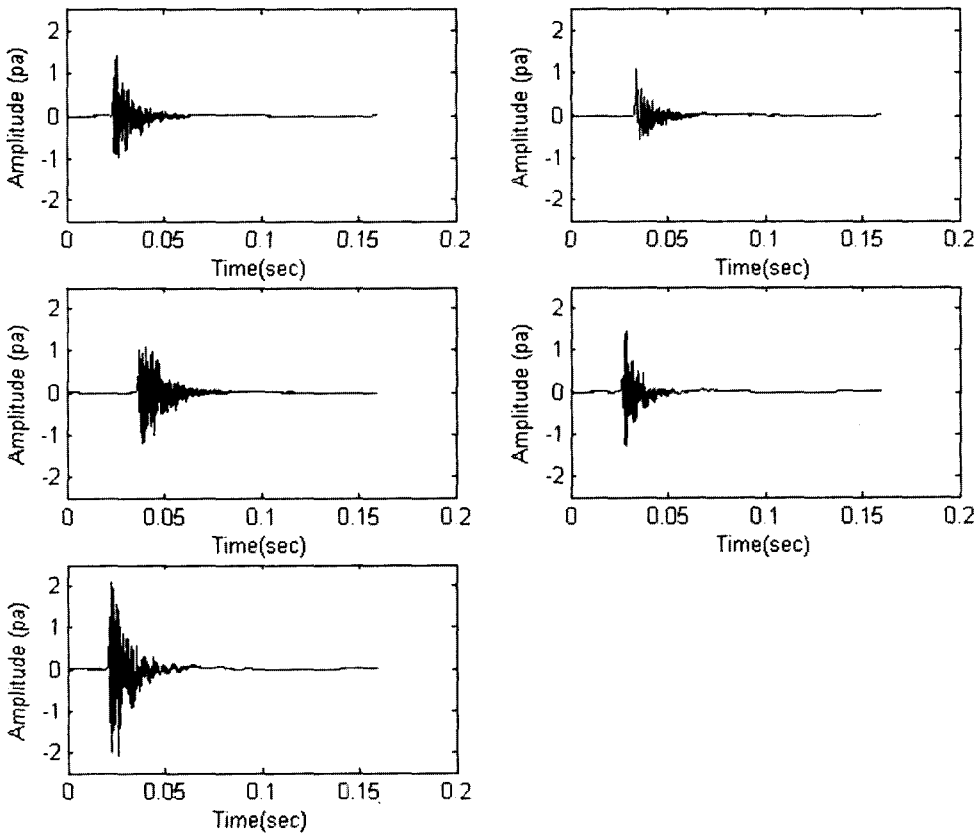


Fig. 6 Impulse responses measured in the compartments of 5 passengercars: (a) SUV car (b) Luxury car (c) Full size car (d) Compact size car (e) economy size car

하여 잔향시간을 계산 한 결과를 보여 주는 것으로서 실선은 웨이블릿 필터를 이용한 것이고 원을 가진 실선은 대역통과 필터를 이용한 것이다. 또한 이러한 잔향 시간을 이용하여 BT역을 계산하면 Fig. 4(b)와 같은 결과를 얻었다. 난다. 정확한 잔향시간을 계수가 1.6 kHz부터 두 필터의 잔향시간은 정확히 0.05가 되며 이것은 합성신호의 주어진 잔향시간과 일치한다. 또한 Fig. 4(b)에서 BT역의 값은 16 이상이 된다. 웨이블릿 필터를 이용하는 경우는 Fig. 5로부터 중심주파수가 500 Hz 부터 정확히 0.05에 일치하며 이때의 BT 역의 값은 Fig. 4(b)에서 보여 주듯이 4 이상을 갖는다. 따라서 웨이블릿 필터를 이용하는 경우는 BT역의 값이 4 이상이며 정확한 잔향시간을 측정할 수가 있다.

Fig. 3의 결과에서 중심 주파수가 낮아지는 저주파에서는 BT 역의 값이 작아지므로 대역통과 필터의 왜곡현상은 심하게 나타남을 알 수가 있다. Fig. 4(a)에서는 30 dB의 음향에너지가 감소하는  $T_{30}$  을 이용하여 잔향시간을 계산 한 결과를 보여 주는 것으로서 실선은 웨이블릿 필터를 이용한 것이고 원을 가진 실선은 대역통과 필터를 이용한 것이다. 또한 이러한 잔향 시간을 이용하여 BT역을 계산하면 Fig. 4(b)와 같은 결과를 얻었다.

정확한 잔향시간을 계산하기위해서 Fig. 4(a)를 확장하여 보면 중심주파수가 1.6 kHz부터 두 필터의 잔향시간은 정확히 0.05가 되며 이것은 합성신호의 주어진 잔향시간과 일치한다. 또한 Fig. 4(b)에서 BT 역의 값은 16 이상이 된다.

웨이블릿 필터를 이용하는 경우는 Fig. 5로부터 중심주파수가 500 Hz 부터 정확히 0.05에 일치하며 이때의 BT 역의 값은 Fig. 4(b)에서 보여 주듯이 4 이상을 갖는다. 따라서 웨이블릿 필터를 이용하는 경우는 BT역의 값이 4 이상이며 정확한 잔향시간을 측정할 수가 있다.d

#### 4. 웨이블릿 필터이용 실차의 잔향시간 계산

본 연구에 사용된 실차는 5대의 종류로 서로 등급이 다른 차량으로서 이 들차량의 실내에서의 충격응

답함수를 실험적으로 구하면 Fig. 6과 같다. 이때 자동차실내공간의 음향 기진기로는 장난감 풍선을 이용하였다.<sup>(14)</sup>

Fig. 6에서 보여주는 자동차의 실내 공간에서의 충격응답함수는 매우 짧게 감쇠하는 지수함수의 형태이다. 여기서 Fig. 6(a)는 SUV차량에 대한 충격응답함수 이고, Fig. 6(b)는 대형고급세단차량에 대한 충격응답함수 이다. Fig. 6(c)는 준 대형 고급세단차량에 대한 충격응답함수이며, Fig. 6(d)는 중형 세단 차량에 대한 충격응답함수 이다. 마지막으로 Fig. 6(e)는 소형 세단 차량에 대한 충격응답함수 이다. 각각의 충격응답함수에 대한 잔향시간을 웨이블릿 필터를 이용하여 측정하면 Fig. 7과 같다. 이 잔향 시간들을 이용하여 BT역을 계산하면 Fig. 8과 같으며 BT역이 4보다 큰 중심주파수는 400 Hz 이상이다.

따라서 Fig. 7에 보여주는 잔향시간에서 400 Hz미만은 정확한 잔향시간이 아니면 의 미만은 의 중심주파수에서는 잔향시간의 측정이 불가능하다. 400 Hz 이상의 중심 주파수에서 5대 차량에 대한 잔향 시간은 0.05에서 0.08사이이며, 특히 중형 세단의 경우 잔향시간은 0.05로 매우 낮다. 이 차량은 국산차량 가운데 국내외로 현재 가장 많이 판매되고 있는 차량이다.

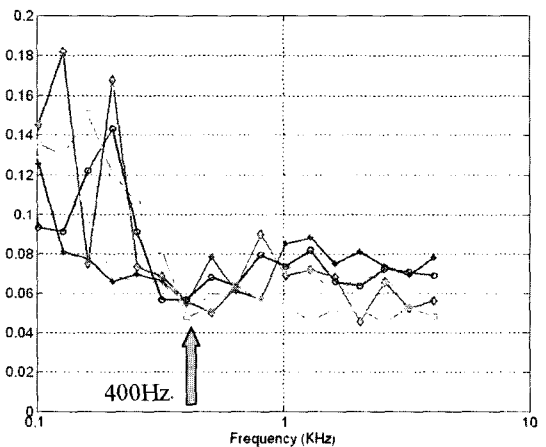
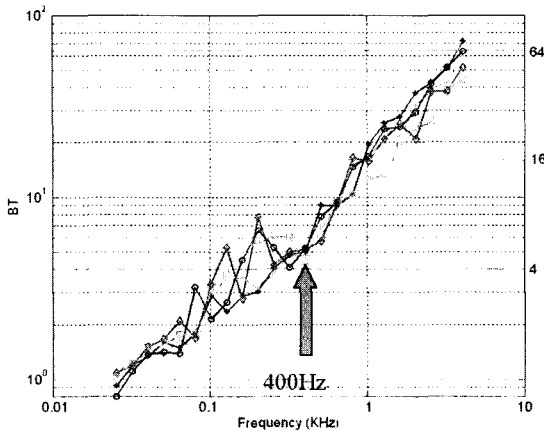


Fig. 7 Reverberation time measured by using the wavelet filter bank inside of cars. SUV size: +, Luxury Car: o, Full Size Car: ◇, Compact size car: □, Economy size car: ■



**Fig. 8** Reverberation time measured by using the wavelet filter bank inside of cars.: SUV size: +---+, Luxury Car: o---o, Full Size Car: ◇---◇, Compact size car: □---□, Economy size car: +---+

### 5. 결론

본 연구에서는 웨이블릿 필터<sup>(7)</sup>를 이용하여 5대의 승용차에 대한 잔향시간을 측정하여 비교하였다. 본 연구에 사용된 차량은 SUV, 대형고급, 준대형 고급, 중형 고급 및 소형 승용차량이다. 대부분의 승용차량에 대한 잔향시간은 약 0.07 정도이며 이 값은 매우 짧다. 따라서 본 연구의 결과에 의하면 측정가능한 중심 주파수는 400 Hz 이상이며 이 미만의 중심 주파수에서는 잔향 시간의 측정이 불가능하다. 기존의 밴드통과 필터의 경우는 1250 Hz 이하에서는 정확한 잔향시간의 측정이 불가능하다. 따라서 승용차의 경우 잔향시간이 짧으므로 기존 방법 보다 웨이블릿 필터의 적용이 필요하며 이 경우 측정 가능한 저 주파수 범위는 400 Hz 이상이다. 이것은 기존의 밴드통과 필터 보다 잔향 시간 측정 범위가 넓어지는 유리한 면이 있다.

### 후 기

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2002-003-D0016)

### 참 고 문 헌

- (1) Lee, S. K. 2003, Application of Wavelet Transform to Measurement of Short Reverberation Times in Car Compartment, Proceedings of 2003 Noise and Vibration Conference, SAE 2003-01-1634
- (2) Czyzewski, 1990 A. A Method of Artificial Reverberation Quality Testing, J. Audio Eng. Soc., Vol. 38, pp. 129~141.
- (3) Ebbitt, G and Rauf, N. 1996 Measuring Absorption in Vehicles the Possible and Impossible, Internoise96, Vol. 4, pp. 2753~2756.
- (4) Lee, S. K. and White, P. R. Fault Diagnosis of Rotating Machinery Using Wigner Higher Order Moment Spectra, Mechanical Systems and Signal Processing, 1997, 11, 637~650.
- (5) Sorenson, S. 1997, Steady State Reverberation Time Measurement, Proceedings of 1997 Noise and Vibration Conference, SAE 972032.
- (6) Jacobsen, F. A Note on Acoustic Decay Measurement, Journal of Sound and Vibration, 1987, 115, 163~170
- (7) Lee, S. K. An Acoustic Decay Measurement Based on Time-frequency Analysis Using Wavelet Transform. Journal of Sound and Vibration 252, 2002, 141~153.
- (8) Lee S. K. Measurement of Short Reverberation Times at Low Frequencies Using Wavelet Filter Bank, KSME International Journal, Vol. 17 No. 4, pp. 511~520, 2003
- (9) 이상권, 1999, 웨이블릿 변환을 이용한 감쇠율 예측과 승용차하쉬니스 평가에의 응용, 한국소음진동 공학회논문집, 제 9 권, 제 3 호, pp. 577~586
- (10) Kuttruff, H. 1991, Room Acoustics, Elsevier Applied Science Publisher Limited, London.
- (11) Broch, J. T. and Jensen, V. N. 1966, On the Measurement of Reverberation, Bruel & Kjaer Technical Report, Rev. 4, 3-29.

(12) ANSI S1.11-1986. Specification for Octave-band and Fractional-octave Band Analog and Digital Filters. 1986

(13) ISO 354. Acoustics - Measurement of Sound Absorption in a Reverberation room, Int.

Standards Org., Geneva, Switzerland, 1985

(14) MacWilliams, F. S. and Sloan, N. J. 1976  
84, Pseudo-random sequences and array," Proc. of IEEE, 1715~1728.