

# 음 감쇠 측정에서 측정 오차 개선을 위한 웨이블릿 필터 설계

<sup>0</sup>이민성\*, 이상권\*\*, 김봉기\*\*\*

## Design of a Wavelet Filter for Experimental Error Improvement on Acoustic Decay Measurements

<sup>0</sup>Min Sung Lee\*, Sang Kwon Lee\*\*, Bong Gi Kim\*\*\*

### ABSTRACT

It is well known that there are two experimental errors on acoustic decay measurements. One is due to the influence of the band pass filter the other one is that of an averaging device. In this paper the influence of the filter is in detail investigated. To minimize the influence of filter, the product of the filter bandwidth  $B$  (3dB bandwidth) and the reverberation time  $T_{60}$  of the room under test is at least 16. Moreover, if the initial part of an acoustic decay curve is important, the strong requirement, i.e.  $BT_{60} > 64$ , must be satisfied. In this paper, the wavelet filter bank instead of the band pass filter bank is applied to obtain an acoustic decay curve. As results, the influence of filter is reduced and then the value of  $BT_{60}$  required for obtaining an acceptable decay curve is at least 4. The strong requirement for the initial part of a decay curve is also replaced by the  $BT_{60} > 16$  instead of  $BT_{60} > 64$ .

### 1. 서론

건축 음향학과 구조 동역학에서 시스템에 대한 잔향 감쇠 비율(reverberation decay rates)의 측정은 대상의 감쇠 특성(damping characteristics)을 정의 하기 위한 중요한 과정이다[1].

일반적으로 공간의 음향 특성을 나타내기 위해서 잔향 시간  $T_{60}$ 을 측정하여 이용한다[2]. 공간의 잔향 시간을 측정하는 방법으로는 대표적으로 음 감쇠 평균법(decay curve averaging method)과 역 적분법(integrated impulse response method)이 있다[3-5]. 이 방법들은 옥타브 또는 1/3 옥타브 밴드의 중심 주파수에서 음 감쇠 비율을 측정하여  $T_{60}$ 을 계산한다. 따라서 공간상의 측정된 음압은 음 감쇠 비율을 구하기 위해서 옥타브, 1/3 옥타브 필터를 통과하게 된다. 이 때 필터의 영향에 의한 실험 오차를 수반하게 된다 [1,6-7]. 그러므로 측정시 필터의 영향을 최소로 감소시키기 위해서는 필터의 대역폭  $B$  (3dB bandwidth)와 시스템의 잔향 시간  $T_{60}$ 의 곱이 최소 16 이상이 되어야 한다[1]. 그러나 이러한 조건에 의하면 저주파수 영역에서는 필터의 대역

폭이 좁아서 정확한 측정이 불가능해진다[8]. 따라서 저주파수 영역에서 음 감쇠 측정(acoustic decay measurement)시, 필터에 의한 실험 오차를 개선하기 위한 방법이 요구 된다. 본 논문에서는 감쇠 신호의 측정 과정에서 실험 오차를 개선하기 위해서 기존의 디지털 필터 보다 지역 정보(local information)를 충분히 나타낼 수 있는 웨이블릿 필터를 사용하는 방법에 대해서 연구했다.

### 2. 이론

#### 2.1 음 감쇠 측정에서의 필터에 의한 실험 오차의 발생

음 감쇠 신호의 측정 과정에서 디지털 필터와 웨이블릿 필터의 영향을 계산하기 위해 이상적인 감쇠 함수  $d(t)$ 를 구성하여 사용하였다.

$$d(t) = \begin{cases} e^{-t/\tau} \sin(\omega_0 t) & \text{for } t > 0 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (1)$$

여기서  $\tau$ 는 감쇠 계수(decay modulus)이고  $\omega_0$ 는 감쇠 신호의 주파수 성분이다. 이러한 감쇠 함수  $d(t)$ 는 음압레벨(SPL)이  $T_{60}$ 의 시간 동안 60dB 감소하는 신호로 정의 하였다. 따라서 시스템의

\*인하대학교 기계공학과 대학원

\*\*인하대학교 기계공학과 교수, 정회원

\*\*\*한국기계연구원 음향연구그룹

감쇠 특성  $\tau$ 와 잔향 시간  $T_{60}$  사이에는 다음의 관계식이 성립한다[1].

$$T_{60} = 6 \ln(10) \tau \quad (2)$$

필터를 거친 감쇠 신호  $r(t)$ 는 감쇠 함수  $d(t)$ 와 필터의 충격 응답 함수  $h(t)$ 의 승적으로 나타난다. 따라서 필터를 통과한 감쇠 신호  $r(t)$ 는 필터 충격 응답 함수  $h(t)$ 와 감쇠 함수  $d(t)$ 에 의해 나타난다. 이 때  $h(t)$ 는 필터 대역폭  $B$ 에 의해서 결정되고 감쇠 함수  $d(t)$ 는 식 (1), (2)로부터 음향 감쇠 특성  $T_{60}$ 에 의해 얻게 된다. 필터의 사용에 의한 실험 오차는 필터의 대역폭  $B$ 와 시스템의 잔향 시간  $T_{60}$ 의 곱으로 나타낼 수 있다. 이는 그림 1에서 제시된 바와 같이  $BT_{60}$ 의 값이 16의 경우 감쇠 곡선은 뒤틀리게 된다. 그리고  $BT_{60}$ 의 값이 16 이하로 내려가는 경우 뒤틀림의 정도는 더욱 심해진다. 따라서 감쇠 신호 측정시 신호할 만한 결과를 얻기 위해서는 다음의 조건이 만족되어야 한다.

$$BT_{60} > 16 \quad (3)$$

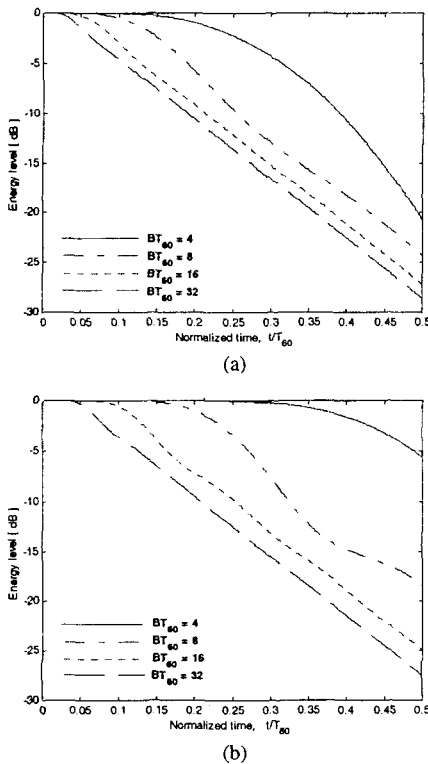


Fig. 1. Influence on decays of bandwidth of digital filter.  
(a) 3-pole IIR digital filter  
(b) 6-pole IIR digital filter

이러한 제한에 의하여 옥타브 또는 1/3 옥타브 밴드에서 협대역 폭을 가지는 저주파수 영역에서는 감쇠 신호의 측정시 필터의 영향에 의해 측정값은 많은 오차를 포함하게 된다. 또한 이러한  $BT_{60}$  값에 의한 제한은 짧은 지속 시간을 가지는 감쇠 신호의 경우에 더욱 큰 한계 값으로 작용한다[8]. 그러므로 이에 대한 정확한 측정은 기대할 수 없게 된다.

실제 이러한 감쇠 신호에 대한 필터의 영향은 건축 음향학에서 저주파수 영역에 대한 잔향 시간의 측정시 큰 문제로 작용한다[7]. 즉 잔향 시간 계산을 위한 감쇠 곡선의 작성에서, 저주파수 영역의 경우 측정된 감쇠 신호는 필터에 의해 뒤틀리게 된다. 따라서 일률적인 감쇠 곡선을 얻을 수 없고, 이로부터 잔향 시간 계산을 위한 감쇠 비율의 계산 또한 어렵다. 특히 잔향 시간의 측정시 감쇠 곡선의 초기 부분은 잔향에 대한 주관적 느낌(subject impression)과 잔향의 지속등의 많은 공간의 음향 정보를 포함하고 있는 부분이다[2]. 그러므로 이 부분에 대해서 정상 레벨 아래로 -10dB 까지의 감쇠 구간에 대한 초기 감쇠 비율을 측정하여 초기 잔향 시간(EDT: early decay time)을 정의하여 사용한다. 그러나 필터에 의한 뒤틀림이 발생하는 부분이 초기 부분이기 때문에  $BT_{60}$ 의 값이 적은 영역에서 정확한 EDT를 구하기는 어렵다.

## 2.2. 웨이블릿 변환에 의한 웨이블릿 필터뱅크의 설계

### 2.2.1 웨이블릿 변환 이론

웨이블릿 변환은 신호에 포함되어 있는 지역 정보를 시간-주파수 영역으로 분해하는 기법으로 STFT (Short Time Fourier Transform)와 위그너 분포(Wigner-distribution)와 더불어 많이 사용되는 시간-주파수 해석 기법이다. 이 방법은 위그너 분포에서 발생하는 간섭항(cross-term)[9]에 의한 영향을 받지 않고 시간-주파수 분해능을 조정할 수 있다. 그러나 STFT는 고정된 분해능을 사용한다[10]. 웨이블릿 변환은 기본 요소 신호인 모(母) 웨이블릿  $\psi(t)$ 의 주파수 축에 대한 스케일링과 시간 축에 대한 이동을 통하여 변조된 기본 요소 신호  $\psi(a^{-1}(t-b))$ 를 구할 수 있다. 여기서  $a$ 는 스케일링 값이고  $b$ 는 시간에 대한 이동 값이다. 이렇게 구한 기본 요소 신호를 사용하여 입력 신호에 대한 선형 조합으로서 신호에 대한 선형 급수 전개(linear series expansion)를 구할 수 있다. 이러한 웨이블릿 변환에는 연속 웨이블릿 변환과 이산 웨이블릿 변환이 있다[9-13].

본 연구에서 사용된 연속 웨이블릿 변환은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$CWT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad a \neq 0 \quad (4)$$

$CWT(a,b)$ 는 위의 계산식에 나타난 바와 같이 신호  $x(t)$ 와 모(母) 웨이블릿  $\psi(a^{-1}(t-b))$ 의 내적의 적분으로 계산이 가능하다. 이렇게 구성된 CWT는 Heisenberg의 불확실성의 원리를 따른다. 즉 웨이블릿 기본 요소 신호  $\psi(a^{-1}(t-b))$ 에서 시간-분해능  $a\Delta t$ 와 주파수-분해능  $\Delta w/a$ 의 곱은  $\Delta t\Delta w$ 로, 이는 스케일 값  $a$ 에 무관한 상수 값을 가지게 된다[9,11].

본 연구에서는 옥타브 및 1/3 옥타브 밴드의 디지털 필터와 동일한 형태의 웨이블릿 필터를 구성하기 위해서 변조된 가우시안(modulated Gaussian) 형태의 Morlet 웨이블릿을 사용하여 웨이블릿 필터를 구성하였다. Morlet 웨이블릿은 복소수의 값을 가지므로 다른 실수 값을 가지는 웨이블릿에 비하여 신호의 분해 과정에서 분리된 신호의 진폭 변조 정보와 위상 정보를 얻을 수 있다. 따라서 신호의 특이성(singularities)을 얻는데 유리한 장점을 가지고 있다. 이러한 장점을 지니고 있는 Morlet 웨이블릿을 사용하여 웨이블릿 필터 बैं크를 구성 하였다. 구성 범위는 가정 주파수 대역으로 총 33-채널(33-밴드)의 1/3 옥타브 필터 बैं크를 구성 하였다.

### 2.2.2 웨이블릿 필터 बैं크의 작성과 디지털 필터와의 비교

앞 절에서 설명한 웨이블릿 이론에 따라서 1/3 옥타브 밴드의 웨이블릿 필터를 설계하였다. 이는 ANSI의 필터 규격에 따라서 설계하였고, 대역폭은 가정 주파수 범위를 포함하는 11.3Hz에서 23.17KHz로 33개의 필터로 बैं크를 구성 하였다. 그림 2는 이러한 1/3 옥타브 웨이블릿 필터

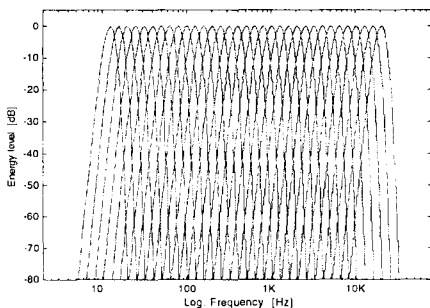
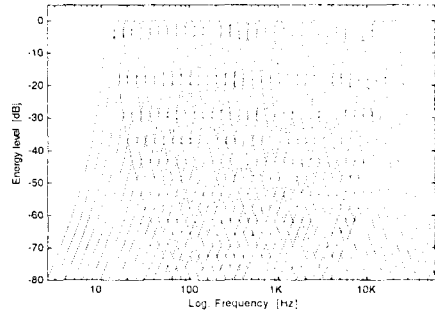
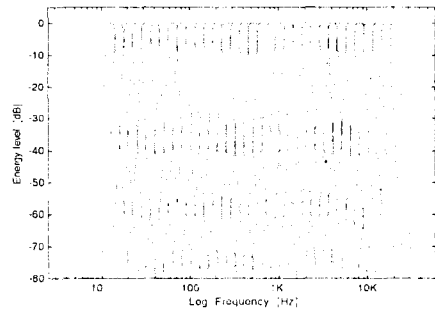


Fig. 2. 1/3 octave wavelet filter bank.

터 बैं크를 도시하였고, 그림 3는 동일한 주파수 범위에 대한 1/3 옥타브 밴드의 3-극 IIR 디지털 필터 बैं크와 6-극 IIR 디지털 필터 बैं크이다. ANSI의 필터 규격에 따라서 설계된 각각의 웨이블릿 필터와 디지털 필터를 비교하면 웨이블릿 필터가 디지털 필터에 비하여 초기 0dB에서 -3dB 사이에서 다소 협대역의 특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 그러나 이는 -3dB을 기준으로 대역폭을 결정시에 디지털 필터와 웨이블릿 필터가 동일한 대역폭을 가짐을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 3. 1/3 octave digital filter bank.  
(a) 3-pole 1/3 octave IIR digital filter bank  
(b) 6-pole 1/3 octave IIR digital filter bank

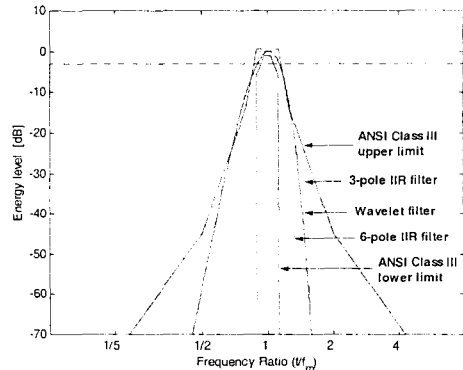


Fig. 4. Filter specification.

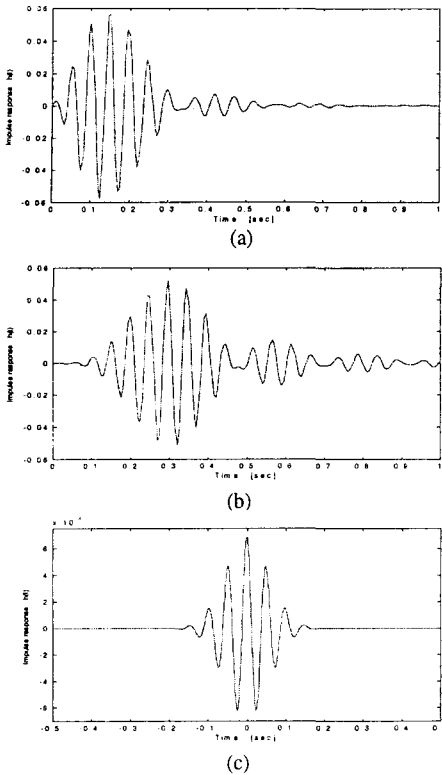


Fig. 5. Impulse response of filter.  
 (a) 3-pole IIR digital filter  
 (b) 6-pole IIR digital filter  
 (c) wavelet filter

그림 4는 ANSI의 필터 규격에서 웨이블릿 필터와 3극과 6극의 IIR 디지털 필터를 비교, 제시하였다. 위에서 설계된 웨이블릿 필터가 디지털 필터와 비교해서 ANSI의 규격에 적합함을 보여주고 있다.

이러한 주파수 영역에서의 필터의 형상 비교 외에 시간 영역에서 웨이블릿 필터와 디지털 필터의 충격 응답을 계산, 그림 5에 제시하였다. 그림 5에서 보여지듯이 디지털 필터의 충격 응답은 웨이블릿 필터의 충격 응답에 비하여 ringing이 존재한다. 특히 이는 필터의 차수가 증가할수록 더욱 증가한다. 이에 반하여 웨이블릿 필터는 가우시안 형태로서 빠르게 0 값으로 수렴한다. 이런 웨이블릿 필터의 충격 응답 형상의 특징은 기존의 디지털 필터로 감쇠 신호 측정시 발생하는 측정 오차 문제를 개선 가능하도록 한다. 즉 감쇠 신호 측정 과정에서 필터에 의한 초기 부분에서의 뒤틀림은 측정하고자 하는 신호의 길이에 비해 필터의 충격 응답의 길이가 매우 짧지 않는 경우 승적 과정에서 발생하는 문제이다[1]. 그러므로 디지털 필터에 비하여 충

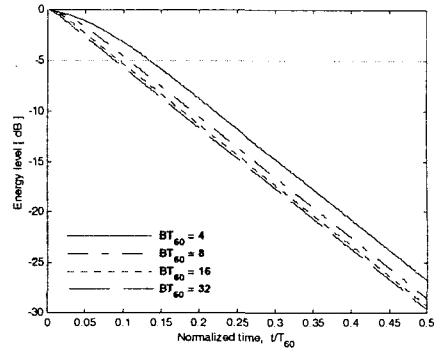


Fig. 6. Influence of wavelet filter.

격 응답의 길이가 짧은 웨이블릿 필터를 사용하는 경우 기존의 필터 사용에 의한 식 (3)의 제한을 완화시킬 수 있다.

### 2.3 웨이블릿 필터에 의한 계산

앞 절의 그림 1의 감쇠 신호에 대한  $BT_{60}$  값에 따른 디지털 필터의 영향과 비교하여 웨이블릿 필터에 의한 영향을 그림 6에 도시하였다. 디지털 필터를 사용하는 경우 식 (3)의 조건에서 필터에 의한 뒤틀림이 감소한다. 그러나 이에 비하여 웨이블릿 필터의 경우  $BT_{60}$  값이 4보다 큰 경우에 필터에 의한 영향이 적어짐을 알 수 있다. 이러한 감쇠 신호에 대한 웨이블릿 필터의 영향을 디지털 필터와 비교하여 알아보기 위해서 앞에서 설계된 1/3 옥타브 밴드의 웨이블릿 필터뱅크와 디지털 필터뱅크를 사용하였다. 즉 가청 주파수 범위에서 필터에 의해 문제가 발생하는 저주파수 영역 중 20Hz ~ 256Hz에 대해 감쇠 신호 측정 과정에서 필터의 영향을 계산하여 그림 8에 도시하였다. 여기서 비교 대상의 디지털 필터뱅크로는 감쇠 신호의 보다 정확한 측정을 위해서 3극 IIR 디지털 필터뱅크를 사용하였다[14]. 이 때  $T_{60}$ 은 1초로 하였다.

그림 7에 나타난 결과를 보면 웨이블릿 필터를 사용한 경우 대역폭 4.6Hz를 가지는 중심 주파수 20Hz의 대역에서도 감쇠 신호에 대한 필터의 영향이 극히 적음을 확인할 수 있다. 즉  $BT_{60} > 4$  이상인 영역에서부터 감쇠 신호에 대한 필터의 영향이 감소한다. 그러나 이에 비하여 디지털 필터를 사용하는 경우 필터의 영향은  $BT_{60}$ 이 약 16 정도인 64Hz 대역에 이르러서야 감소하는 결과를 얻을 수 있었다.

이러한 기존의 1/3 옥타브 디지털 필터를 사용하는 경우의 측정 한계 값이었던 64Hz 대역에서 웨이블릿 필터와 디지털 필터의 감쇠 신호에 대한 영향을 알아 보면, 디지털 필터의 경우 필터의 영향에 의하여 정상 레벨 아래로 약 5dB 정

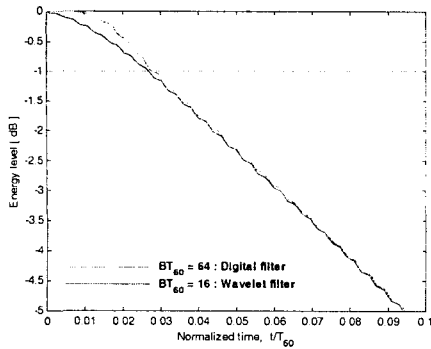


Fig. 8. Comparison of the initial part of a decay curve.

도까지 뒤틀림이 발생하였다. 반면, 웨이블릿 필터의 경우에는 정상 레벨 아래 약 1dB 이후로는 원래의 감쇠 신호와 동일한 감쇠 비율을 얻을 수 있었다. 따라서 64Hz 대역에서 디지털 필터를 사용하는 경우 감쇠 곡선의 평균 감쇠 비율만을 정의 가능한데 비하여 웨이블릿 필터를 사용하는 경우 초기 감쇠 비율의 정의 또한 가능하다. 이러한 감쇠 곡선의 초기 감쇠 비율을 디지털 필터를 사용하여 정의하기 위해서는 식 (3)의 조건 보다 더욱 엄격한  $BT_{\infty} > 64$ 의 조건을 만족시켜 주어야 한다. 따라서 256Hz 대역 이상의 영역에서부터 초기 감쇠 비율의 정의가 가능하다. 이러한 초기 감쇠 비율을 정의하기 위한 디지털 필터와 웨이블릿 필터의 조건을 그림 8에 나타내었다. 따라서 웨이블릿 필터를 사용하여 감쇠 곡선의 평균 감쇠 비율을 정의를 하고자 할 때는  $BT_{\infty} > 4$ 의 조건을 만족시켜 주어야 하고 감쇠 곡선의 초기 감쇠 비율을 정의할 경우 조건은  $BT_{\infty} > 16$ 이 된다. 결과적으로 기존의 디지털 필터에 비하여 그 조건이 크게 완화됨을 알 수 있다.

### 3. 결론

본 연구에서는 음 감쇠 측정에서 감쇠 신호에 대한 디지털 필터와 웨이블릿 필터의 영향을 계산, 비교하였다. 디지털 필터의 경우 기존의 조건이었던  $BT_{\infty} > 16$ 을 만족시킬 경우 필터의 감쇠 신호에 대한 영향이 감소하는 것을 확인할 수 있었고, 웨이블릿 필터를 사용할 경우 이 제한은  $BT_{\infty} > 4$ 로 완화 되었다. 이러한 필터의  $BT_{\infty}$ 에 대한 요구 조건은 특히 감쇠 곡선의 초기 감쇠 비율을 정의하고자 하는 경우 더욱 엄격해진다. 즉 정상 레벨 아래의 1dB 이후의 감쇠 비율을 정의하고자 하는 경우  $BT_{\infty}$ 의 제한은 디지털 필터의 경우  $BT_{\infty} > 64$  이상이 되어야 한다. 그러나 웨이블릿 필터를 사용하는 경우 초기

감쇠 비율의 정의는  $BT_{\infty} > 16$ 을 만족시킬 경우 가능하다. 그러므로 디지털 필터에 비하여 웨이블릿 필터를 사용하는 경우 디지털 필터 보다 더 낮은 주파수 영역에 대해서, 그리고 더 짧은 지속 시간을 가지는 감쇠 신호에 대한 정확한 잔향 감쇠 비율의 측정을 가능토록 한다.

### 참고 문헌

- Jacobsen, F., 1987, "A Note on Acoustic Decay Measurements," J. sound vib., Vol. 115(1), pp.163-170.
- Kuttruff, H., 1991, Room Acoustics, Elsevier Science Publishers, London.
- Schroeder, M. R., 1965, "New Method of Measuring Reverberation Time," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 37, pp.409-412.
- Chu, W. T., 1978, "Comparison of reverberation measurements using Schroeder's impulse method and decay-curve averaging method," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 63(5), pp.1444-1450.
- Vorländer, M., Bietz, H., 1994, "Comparison of Method for Measuring Reverberation Time," Acustica, Vol. 80, pp.205-215.
- ISO 3382, 1997, Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters.
- Lundebj, A., Vigran, T. E., 1995, "Uncertainties of Measurements in Room Acoustics," Acustica, Vol. 81, pp.344-355.
- Sorenson, S., 1997, "Steady State Reverberation Time Measurement," SAE paper 972032, pp.3139-3143.
- Qian, S., Chen, D., 1996, Joint Time-Frequency Analysis, Prentice-Hall, chap. 4, pp.75-99.
- Vaidyanathan, P. P., 1993, Multirate Systems and Filter Banks, Prentice-Hall, chap.11, pp.457-544.
- Strang, G., Ngquyen, T., 1997, Wavelets and Filter Banks, Wellesley-Cambridge Press.
- Daubechies, I., 1992, Ten Lectures on Wavelets, Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Guo, Y., Li, C., 1998, Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms, Prentice-Hall.
- ANSI. S1.11, 1986, Specification for Octave-Band and Fractional-Octave-Band Analog and Digital Filters.
- Jacobsen, F., Rindel, J. H., 1987, "Time Reversed Decay Measurements," J. sound vib., Vol. 117(1), pp.187-190.
- Morse, P. M., Ingard, K. U., 1986, Theoretical Acoustics, McGraw-Hall, New York.

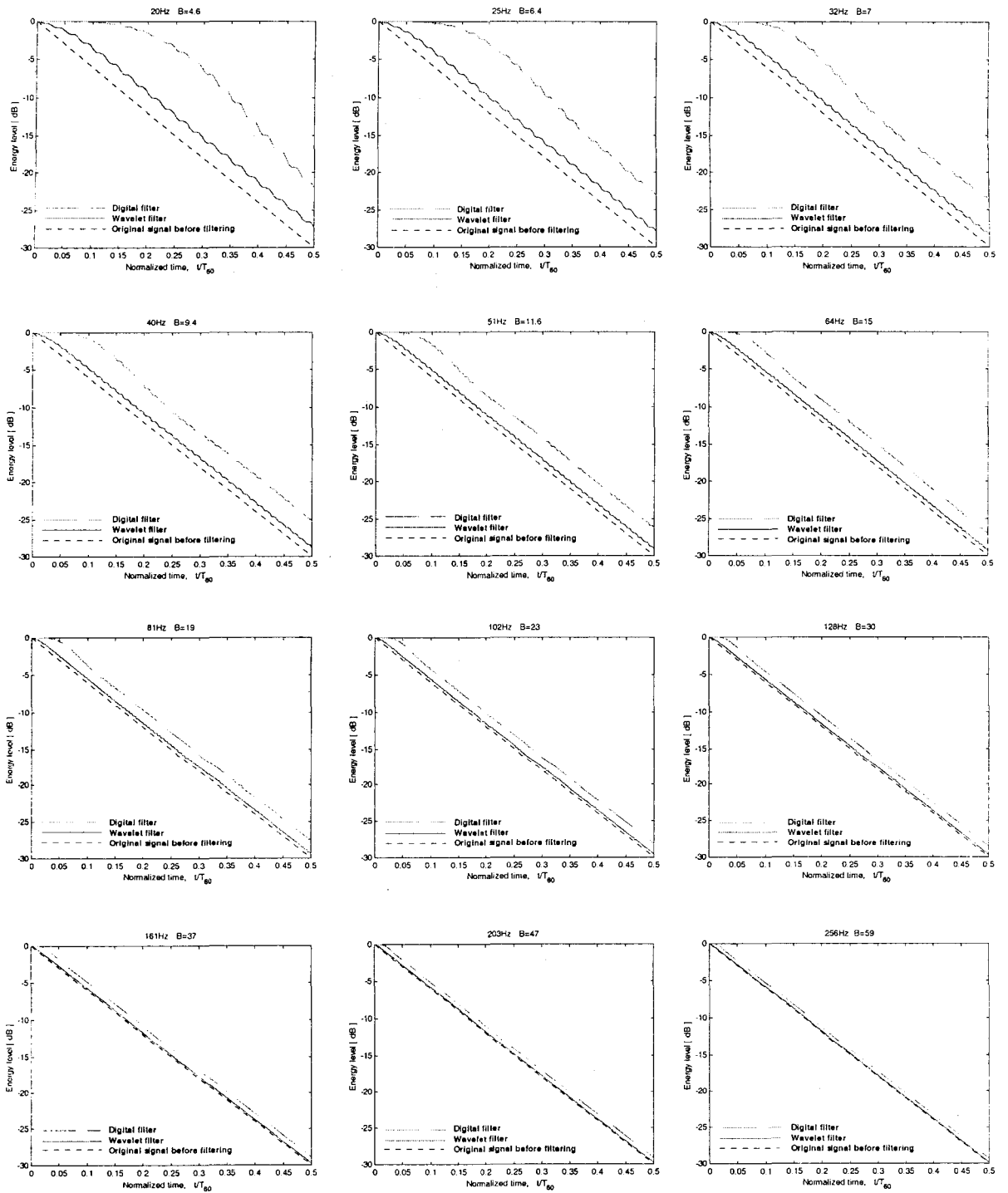


Fig. 7. Comparison between the decay curve obtained by the digital filter and the decay curve obtained by wavelet filter. ( $T_{90} = 1 \text{ sec}$ )