

음 감쇠 측정에서의 IIR 필터와 웨이블릿 필터의 영향에 대한 수치 계산, 비교

Comparison of IIR Filter and Wavelet Filter on Acoustic Decay Measurements

이 상 권*, 이 민 성*, 김 봉 기**
(Sang-Kwon Lee*, Min-Sung Lee*, Bong-Ki Kim**)

*인하대학교 기계공학과, **한국기계연구원
(접수일자: 2001년 3월 12일; 채택일자: 2001년 4월 12일)

본 논문에서는 음 감쇠 측정에서 실험 오차 발생의 원인 중 하나인 대역 통과 필터의 'ringing'에 대하여 조사하였다. 이는 모든 감쇠 측정의 근본적인 제한으로서 이러한 필터의 영향을 줄이기 위해서는 필터의 대역폭 B (3dB bandwidth)와 시스템의 잔향시간 T_{60} 의 곱이 최소 16이상여 되어야 한다. 그리고 감쇠 곡선의 초기 부분이 필요한 경우에는 필요 조건이 64 이상으로 더욱 증가한다. 이에 비하여 웨이블릿 필터를 사용하는 경우 이러한 제한은 4 이상으로 완화되고 초기 부분의 사용 또한 16이상으로 조건이 크게 완화된다. 그러므로 웨이블릿 필터를 사용하여 음 감쇠 신호를 측정할 경우 저주파수 영역에서 짧은 잔향시간의 음 감쇠 신호에 대하여 더욱 정확한 측정이 가능하다.

핵심용어: 음 감쇠 측정, 초기 감쇠 비율, 웨이블릿 변환, 필터의 충격 응답, 필터의 영향

투고분야: 음향 신호처리 분야 (1.6), 건축음향 분야 (7.1)

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 investigated in detail. To minimize the influence of the filter, the product of the filter bandwidth B (3dB bandwidth) and the reverberation time T_{60} of the room under test should be 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 a result, the influence of filter is reduced and then the value of BT_{60} required for obtaining an acceptable decay curve becomes at least 4. The strong requirement for the initial part of a decay curve is also replaced by the $BT_{60} > 16$ instead of $BT_{60} > 64$.

Keywords: Acoustic decay measurement, Initial decay rates, Wavelet transform, Impulse response of a filter

ASK subject classification: Acoustic signal processing (1.6), Architectural acoustics (7.1)

I. 서론

건축 음향학과 구조 동역학에서 시스템에 대한 잔

책임저자: 이상권 (sangkwon@inha.ac.kr)
402-751 인천시 남구 용현동 253 인하대학교 기계공학과
(전화: 032-860-7305; 팩스: 032-868-1716)

향 감쇠 비율 (reverberation decay rates)의 측정은 대상의 감쇠 특성 (damping characteristics)을 정의하기 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 대역폭이 좁아서 정확한 측정이 불가능해진다[8]. 따라서 저주파수 영역에서 음 감쇠 측정 (acoustic decay measurement)시, 필터에 의한 실험 오차를 개선하기 위한 방법이 요구된다. 본 논문에서는 감쇠 신호의 측정 과정에서 실험 오차를 개선하기 위해서 기존의 디지털 필터보다 지역 정보 (local information)를 충분히 나타낼 수 있는 웨이블릿 필터를 사용하는 방법에 대해서 연구했다.

II. 이론

2.1. 음 감쇠 측정에서의 필터에 의한 실험 오차의 발생

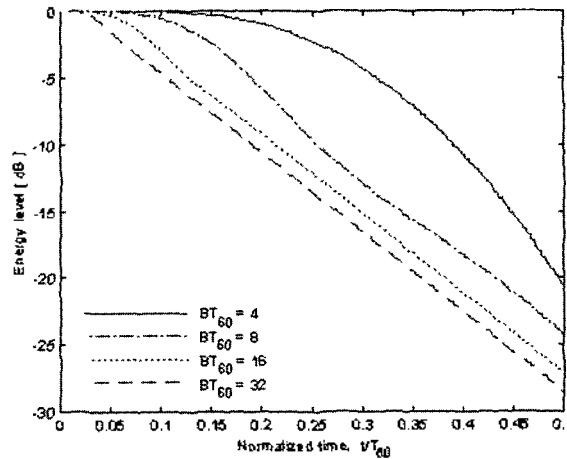
음 감쇠 신호의 측정 과정에서 디지털 필터와 웨이블릿 필터의 영향을 계산하기 위해 이상적인 감쇠 함수 $d(t)$ 를 구성하여 사용하였다.

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

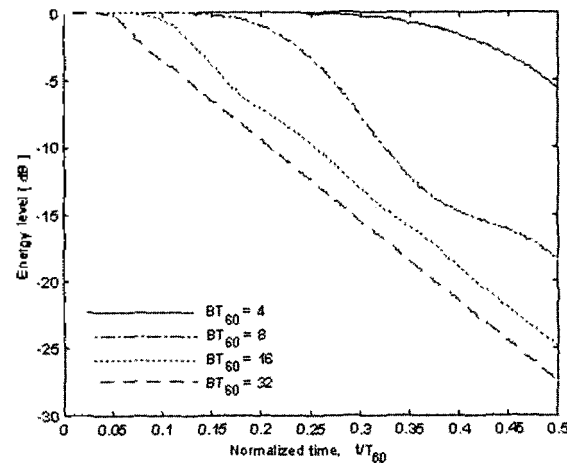
여기서 α 는 감쇠 계수 (decay modulus)로 시스템의 감쇠 특성에 따라서 정의되는 계수이다. ω_0 는 감쇠 신호의 주파수 성분이다. 이러한 감쇠 함수 $d(t)$ 는 음압의 변화를 나타내고, 음압레벨(SPL)이 T_{60} 의 시간동안 60dB 감소하는 신호로 정의하였다. 이에 따라서 시스템의 감쇠 특성 α 와 잔향 시간 T_{60} 사이에는 다음의 관계식이 성립한다[1].

$$T_{60} = 61.4 \ln(10) \tau \quad (2)$$

필터를 거친 감쇠 신호 $x(t)$ 는 감쇠 함수 $d(t)$ 와 필터의 충격 응답 함수 $h(t)$ 의 승적으로 나타난다. 따라서



(a) 3극 IIR 디지털 필터의 경우
(a) 3-pole IIR digital filter



(b) 6극 IIR 디지털 필터의 경우
(b) 6-pole IIR digital filter

그림 1. 감쇠 곡선에 대한 디지털 필터의 영향
Fig. 1. Influence on decays of bandwidth of digital filter.

필터를 통과한 감쇠 신호 $x(t)$ 는 필터 충격 응답 함수 $h(t)$ 와 감쇠 함수 $d(t)$ 에 의해서 나타난다. 이 때 $h(t)$ 는 필터 대역폭 B 에 의해서 결정되고 감쇠 함수는 $d(t)$ 식 (1), (2)로부터 음향 감쇠 특성 T_{60} 에 의하여 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 곡선의 형태는 뒤틀리게 된다. 그리고 BT_{60} 의 값이 16 이하로 내려가는 경우 뒤틀림의 정도는 더욱 심해진다. 따라서 감쇠 신호 측정시 신용할만한 결과를 얻기 위해서는 다음의 조건이 만족되어야 한다.

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

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. 그러므로 실제 가청 주파수 범위인 20 Hz에서 20 kHz사이의 영역에서 감쇠 신호를 측정시 옥타브 밴드에 비하여 대역폭이 좁은 1/3 옥타브 밴드의 경우, 감쇠 신호의 정확한 측정을 어렵게 한다. 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 음향학에서의 저주파수 영역에 대한 잔향 시간의 측정에서 큰 문제로 작용한다[7]. 즉 잔향 시간의 계산을 위한 감쇠 곡선의 작성에서, 저주파수 영역의 경우 측정된 감쇠 신호는 필터에 의해 뒤뜰리게 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 지속 등의 많은 공간의 음향 정보를 포함하고 있는 부분이다[2]. 그러므로 이 부분에 대해서 정상 레벨 아래로 -10dB까지의 감쇠 구간에 대한 초기 감쇠 비율을 측정하여 초기 잔향 시간(EDT: early decay time)을 정의하여 사용한다. 그러나 필터에 의한 뒤뜰림이 발생하는 부분이 초기 부분이기 때문에 BT_{60} 의 값이 적은 영역에서 정확한 EDT를 구하기는 어렵다.

2.2. 웨이블릿 변환에 의한 웨이블릿 필터 뱅크의 구성

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 신호(elementary function or basis function)인 모(母) 웨이블릿 $\Psi(t)$ 의 주파수 축에 대한 스케일링과 시간 축에 대한 이동을 통하여 변조된 기본 요소 신호 $\Psi(a^{-1}(t-b))$ 을 구할 수 있다. 여기서 a 는 스케일링 값으로 모(母) 웨이블릿의 주파수 f_0 와 다음의 관계를 가진다.

$$f = f_0/a \quad (4)$$

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

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int x(t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad a \neq 0 \quad (5)$$

여기서 $\Psi(t)$ 는 모(母) 웨이블릿이고 a 는 주파수에 대한 스케일링 값, b 는 시간 축에 대한 이동 값을 나타낸다. 특히 웨이블릿 b 변환에 의한 값은 $1/\sqrt{|a|}$ 에 의해 에너지의 평균화(normalizing)가 된다. $CWT(a, b)$ 는 위의 계산식에 나타난 바와 같이 신호 $x(t)$ 와 모(母) 웨이블릿 $\Psi(a^{-1}(t-b))$ 의 내적의 적분으로 계산이 가능하다. 따라서 신호의 웨이블릿 변환 값은 $f(b, w_0/w)$ 로 나타낼 수 있고, 이를 통해서 $CWT(a, b)$ 가 시간과 주파수의 함수임을 알 수 있다.

$$CWT(a, b) \Big|_{a = \frac{w_0}{w}, b = t = f \left(\frac{w_0}{w}, t \right)} \quad (6)$$

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 non-orthogonal 웨이블릿의 특징을 지니고 있으며 복소수의 값을 가진다. 그러므로 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 뱅크를 구성하였다. 구성 범위는 가청 주파수 대역으로 총 33-채널(33-밴드)의 1/3 옥타브 필터 뱅크를 구성하였다. 이는 그림 2에 나타난 바와 같다.

Input signal

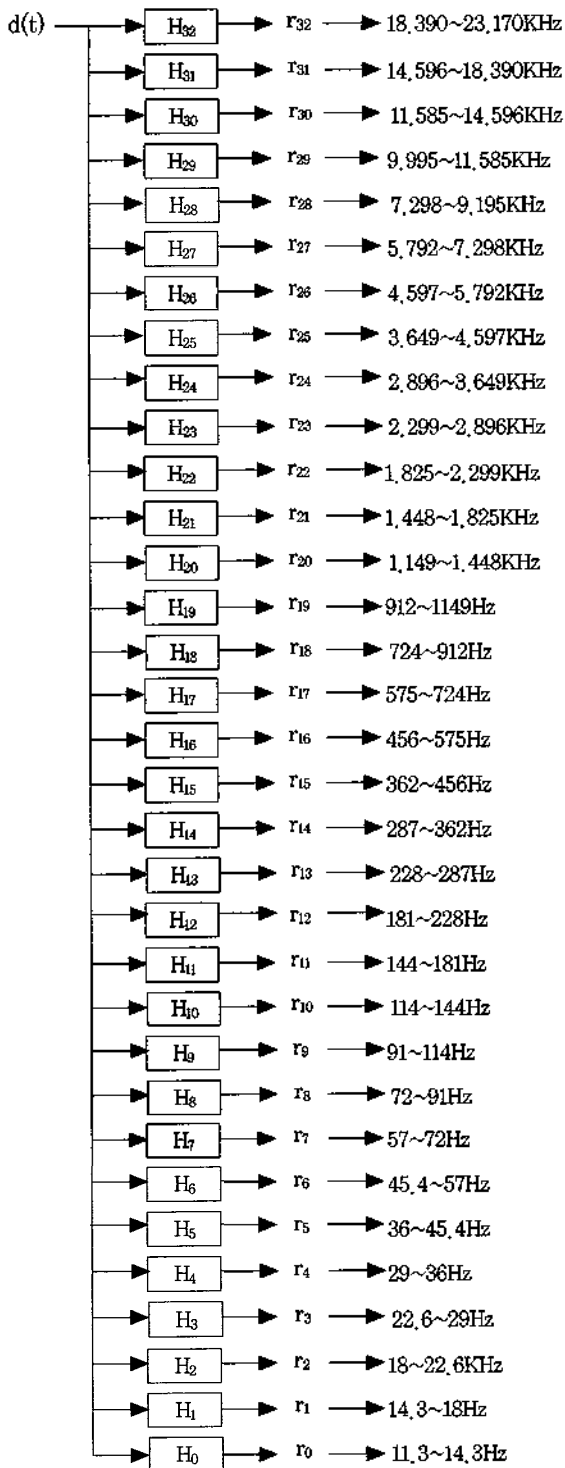


그림 2. 1/3 옥타브 웨이블릿 필터 뱅크의 구조도
Fig. 2. Structural diagram of 1/3 octave wavelet filter bank.

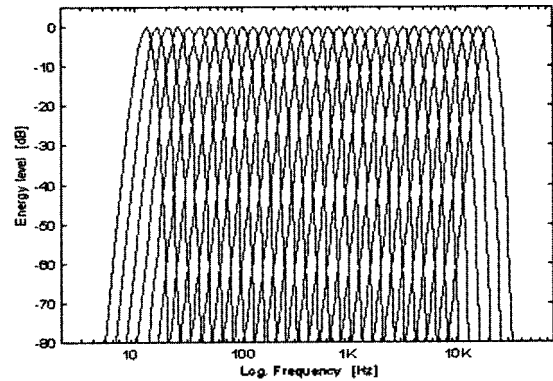
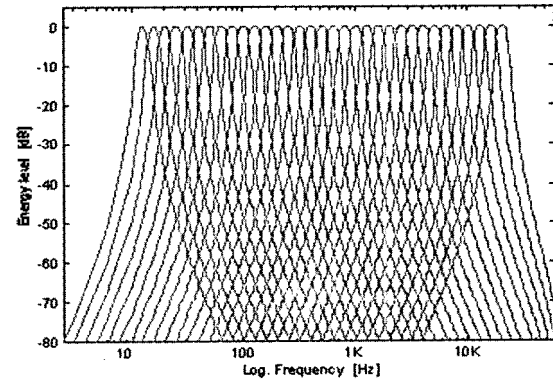
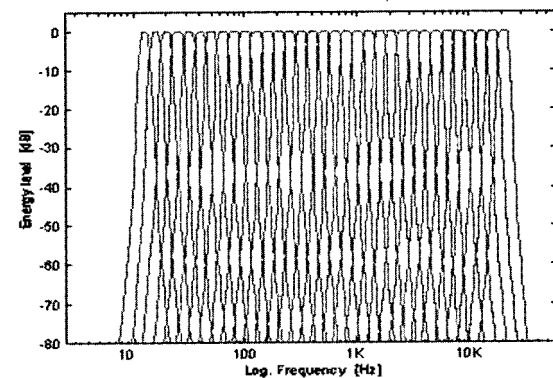


그림 3. 1/3 옥타브 웨이블릿 필터 뱅크
Fig. 3. 1/3 Octave wavelet filter bank.



(a) 3극 1/3 옥타브 IIR 디지털 필터 뱅크
(a) 3-pole 1/3 octave IIR digital filter bank.



(b) 6극 1/3 옥타브 IIR 디지털 필터 뱅크
(b) 6-pole 1/3 octave IIR digital filter bank

그림 4. 1/3 옥타브 디지털 필터 뱅크
Fig. 4. 1/3 Octave digital filter bank.

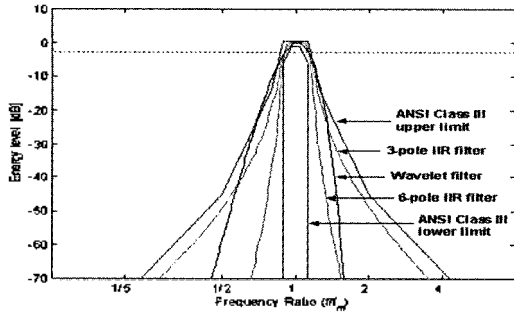


그림 5. 필터 규격
Fig. 5. Filter specification.

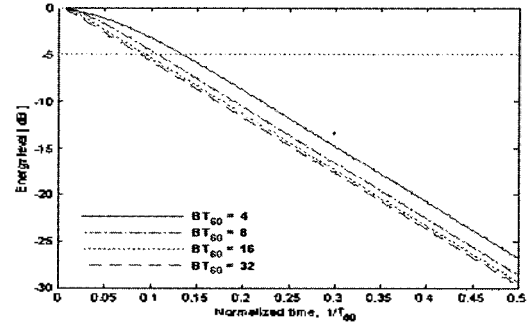
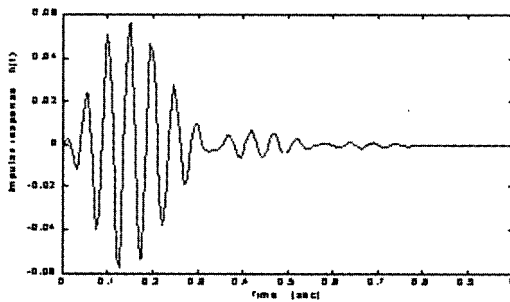
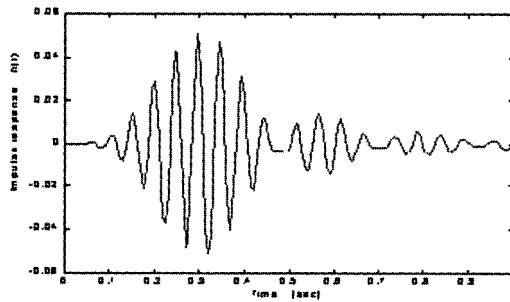


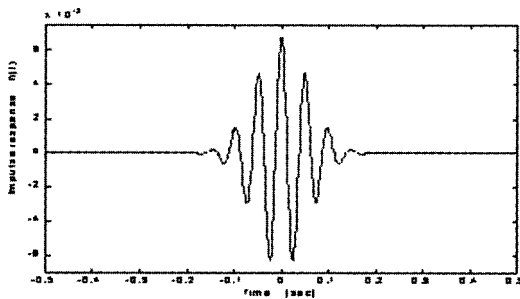
그림 7. 감쇠 곡선에 대한 웨이블릿 필터의 영향
Fig. 7. Influence of wavelet filter.



(a) 3극 IIR 디지털 필터
(a) 3-pole IIR digital filter



(b) 6극 IIR 디지털 필터
(b) 6-pole IIR digital filter



(c) 웨이블릿 필터
(c) Wavelet filter

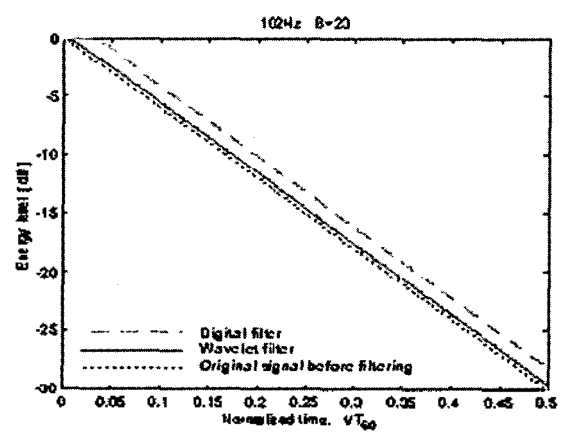
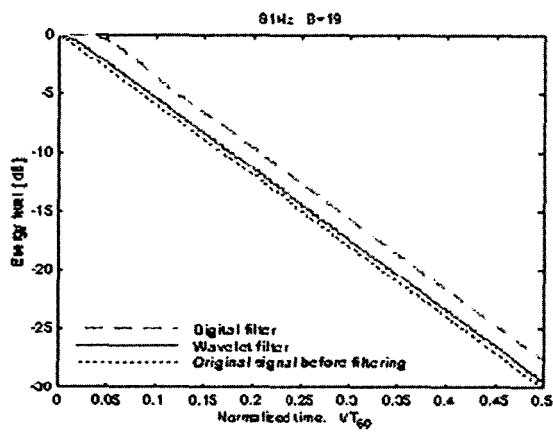
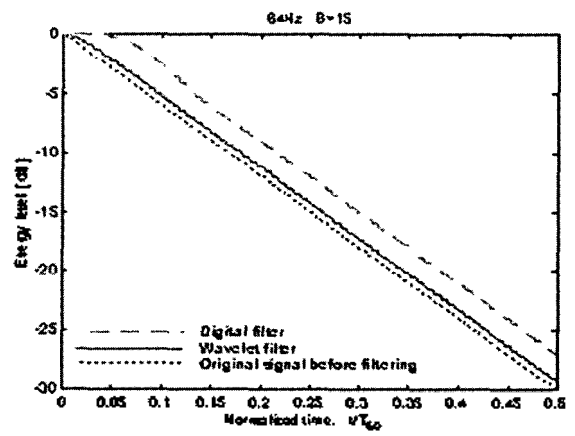
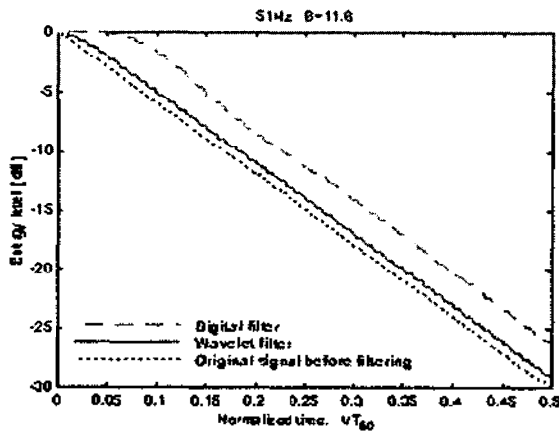
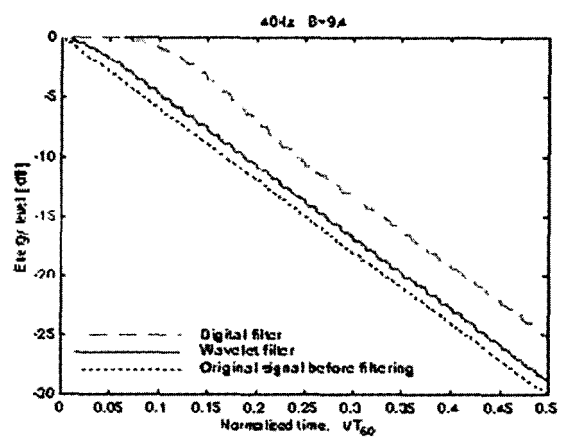
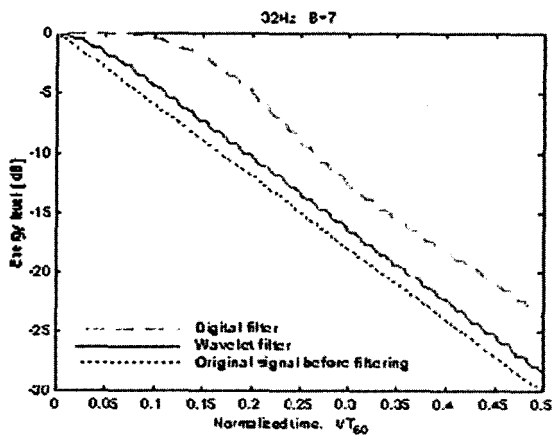
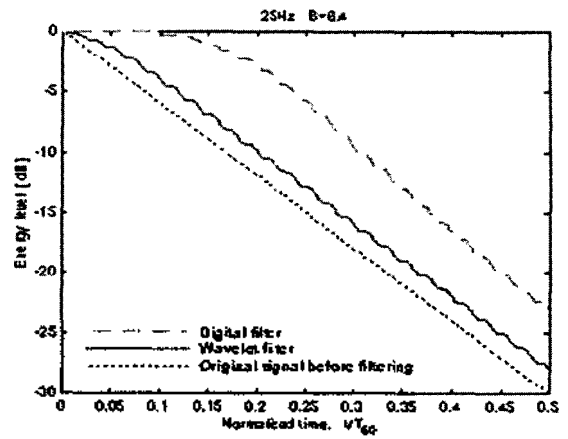
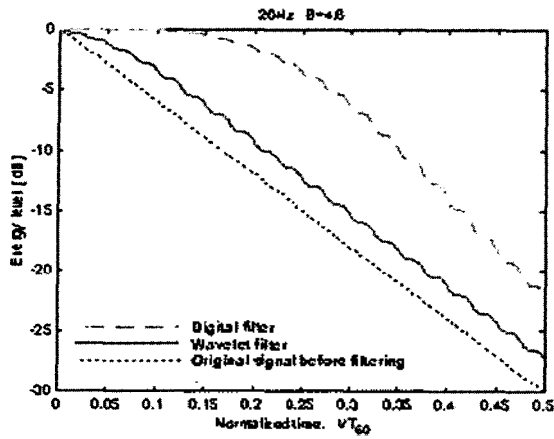
그림 6. 필터의 충격 응답
Fig. 6. Impulse response of filter.

2.2.2. 웨이블릿 필터의 작성과 디지털 필터와의 비교

앞 절에서 설명한 웨이블릿 이론에 따라서 1/3 옥타브 밴드의 웨이블릿 필터를 설계하였다. 이는 ANSI의 필터 규격에 따라서 설계하였고, 대역폭은 가청 주파수 범위를 포함하는 11.3 Hz에서 23.17 kHz로 33개의 필터로 बैं크를 구성하였다. 그림 3은 이러한 1/3 옥타브 웨이블릿 필터 बैं크를 도시하였고, 그림 4는 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 사이 부분에서 다소 협대역의 특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 그러나 이는 -3dB을 기준으로 대역폭을 결정시에 디지털 필터와 웨이블릿 필터가 동일한 대역폭을 가짐을 알 수 있다.

그림 5는 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 비교외에 시간 영역에서 웨이블릿 필터와 디지털 필터의 충격 응답을 계산, 그림 6에 제시하였다. 그림 6에서 보여지듯이 디지털 필터의 충격 응답이 웨이블릿 필터의 충격 응답에 비하여 ringing이 존재한다. 특히 이는 필터의 차수가 증가할수록 더욱 증가한다. 이에 반하여 웨이블릿 필터는 가우시안 형태로서 빠르게 0값으로 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 필터의 영향에 의한 초기 부분에서의 뒤틀림은 측정하고자 하는 신호의 길이에 비하여 필터의 충격 응답의 길이가 매우 짧지



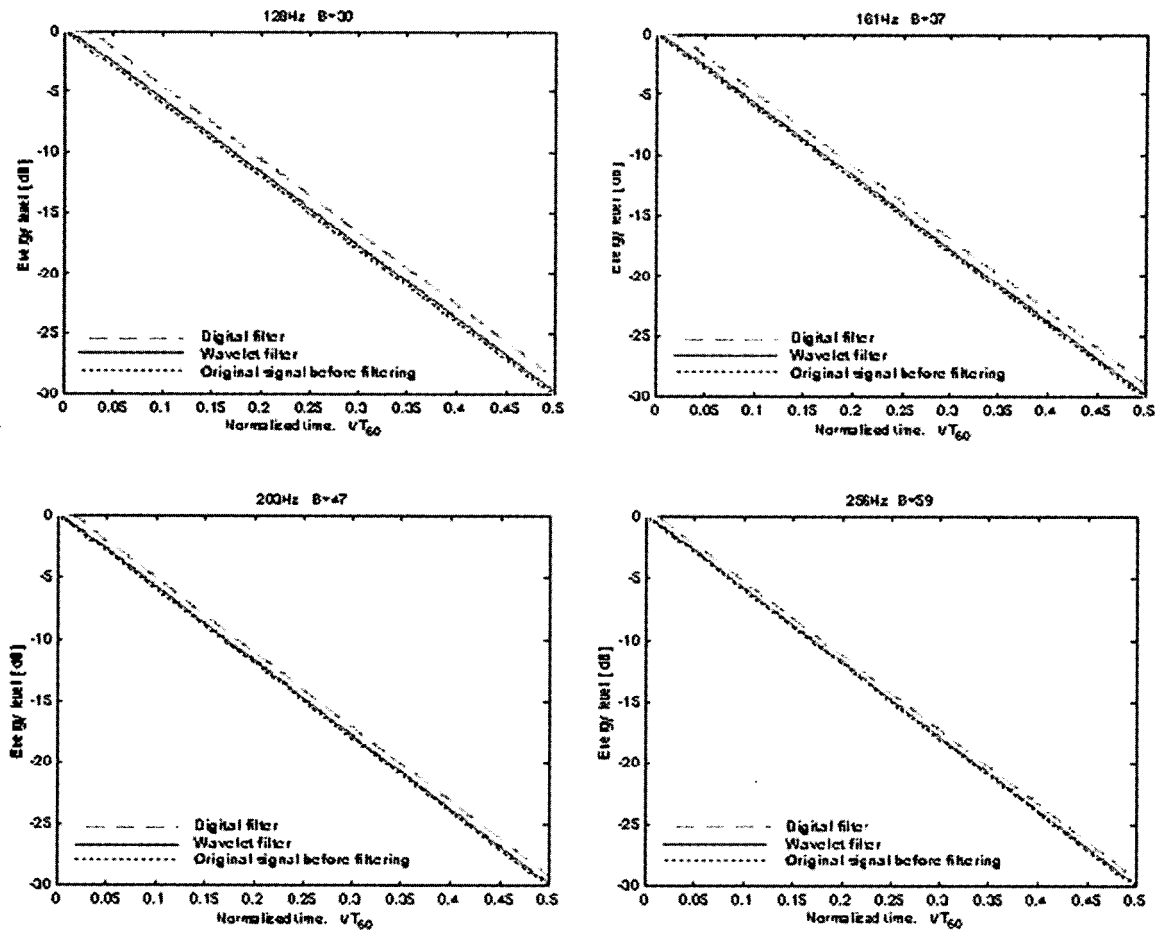


그림 8. 옥타브 밴드에서의 디지털 필터와 웨이블릿 필터의 감쇠 신호에 대한 영향 ($T_{60}=1\text{sec}$)
 Fig. 8. Comparison between the decay curve obtained by the digital and the decay curve obtained by wavelet filter. ($T_{60}=1\text{sec}$)

않는 경우 승적 과정에서 발생하는 문제이다[1]. 그러므로 디지털 필터에 비하여 충격 응답의 길이가 짧은 웨이블릿 필터를 사용하는 경우 기존의 필터 사용에 의한 식 (3)의 제한을 완화시킬 수 있다. 따라서 64 Hz 이하의 더 좁은 대역폭을 가지는 저주파수 영역에 대해서도 정확한 측정을 할 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 7에 도시하였다. 음 감쇠 측정 과정에서 디지털 필터를 사용하는 경우 식 (3)의 조건에서 필터에 의한 뒤틀림이 감소한다. 그러나 이에 비하여 웨이블릿 필터를 사용하는 경우 BT_{60} 값이 4보다 큰 경우에 필터에 의한 영향이 적어짐을 알 수 있다. 이러한 감쇠 신호에 대한 웨이블릿 필터의 영향을 디지털 필터와 비교하여 알아보

기 위해서 앞에서 설계된 1/3 옥타브 밴드의 웨이블릿 필터 बैं크와 디지털 필터 बैं크를 사용하였다. 즉 가장 주파수 범위에서 필터에 의해 문제가 발생하는 저주파수 영역 중 20 Hz ~ 256 Hz에 대해 감쇠 신호 측정 과정에서 필터의 영향을 계산하여 그림 8에 도시하였다. 여기서 비교 대상의 디지털 필터 बैं크로는 감쇠 신호의 보다 정확한 측정을 위해서 3극 IIR 디지털 필터 बैं크를 사용하였다 [12]. 이 때 T_{60} 은 1초로 하였다.

그림 8에 나타난 결과를 보면 웨이블릿 필터를 사용하여 감쇠 신호에 대한 필터링을 한 경우 기존의 1/3 옥타브 밴드에서 중심 주파수 64 Hz의 대역에 비하여 더 낮은 주파수 영역의 측정이 가능하다. 즉 대역폭 4.6 Hz를 가지는 중심 주파수 20 Hz의 대역에서도 감쇠 신호에 대한 필터의 영향이 극히 적어짐을 확인할 수 있다. 이로부터 그림 7에 나타난 바와 같이 $BT_{60} > 4$ 이상인 영역에서부터 감쇠 신호에 대한 필터의 영향이 적어짐을 알 수 있다. 그러나 이에 비하여 디지털 필터를 사용하는 경우 20 Hz

대역에서는 감쇠 곡선의 초기 부분에서의 뒤틀림이 극히 심하고, 이러한 필터의 영향은 BT_{60} 이 약 16정도인 64Hz 대역에 이르러서야 감소하는 결과를 얻을 수 있었다.

이러한 기존의 1/3 옥타브 디지털 필터를 사용하는 경우의 측정 한계 값이었던 64 Hz 대역에서 웨이블릿 필터와 디지털 필터의 감쇠 신호에 대한 영향을 알아보면, 디지털 필터의 경우 구간 $0 < t < 1/B$ 에 대해 필터의 영향에 의하여 정상 레벨 아래로 약 5dB 정도까지 뒤틀림이 발생하였다. 반면, 웨이블릿 필터의 경우에는 정상 레벨 아래 약 1dB 이후로는 원래의 감쇠 신호와 동일한 감쇠 비율을 얻을 수 있었다. 따라서 64 Hz 대역에서 디지털 필터를 사용하는 경우 감쇠 곡선의 평균 감쇠 비율만을 정의하는 것보다 웨이블릿 필터를 사용하는 경우 초기 감쇠 비율의 정의 또한 가능하다. 이러한 감쇠 곡선의 초기 감쇠 비율을 디지털 필터를 사용하여 정의하기 위해서는 식 (3)의 조건보다 더욱 엄격한 $BT_{60} > 64$ 의 조건을 만족시켜 주어야 한다. 따라서 256 Hz 대역 이상의 영역에서부터 초기 감쇠 비율의 정의가 가능하다. 이러한 초기 감쇠 비율을 정의하기 위한 디지털 필터와 웨이블릿 필터의 조건을 그림 9에 나타내었다. 그러므로 웨이블릿 필터를 사용하여 감쇠 곡선의 평균 감쇠 비율을 정의를 하고자 할 때는 다음의 조건을 만족시켜 주어야 하고

$$BT_{60} > 4 \tag{7}$$

감쇠 곡선의 초기 감쇠 비율을 정의할 경우 위의 조건은 다음과 같이 된다.

$$BT_{60} > 16 \tag{8}$$

따라서 기존의 디지털 필터에 비하여 그 조건이 크게 완화됨을 알 수 있다.

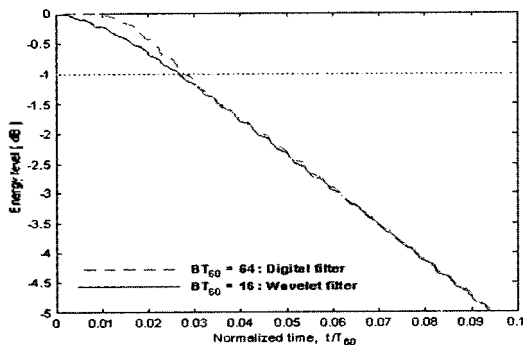


그림 9. 초기 감쇠 비율을 얻기 위한 디지털 필터와 웨이블릿 필터의 조건 비교
Fig. 9. Wavelet filter and digital filters requirements for obtaining initial decay rates.

III. 결론

본 연구에서는 음 감쇠 측정에서 감쇠 신호에 대한 디지털 필터와 웨이블릿 필터의 영향을 계산, 비교하였다. 디지털 필터의 경우 기존의 조건이었던 $BT_{60} > 16$ 을 만족시킬 경우 필터의 감쇠 신호에 대한 영향이 감소하는 것을 확인할 수 있었고, 웨이블릿 필터를 사용할 경우 이 제한은 $BT_{60} > 4$ 으로 완화되었다. 이러한 필터의 BT_{60} 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_{60} 의 제한은 디지털 필터의 경우 $BT_{60} > 64$ 이상이 되어야 한다. 가령 1/3 옥타브 밴드의 중심 주파수 100 Hz 대역에서 초기 감쇠 비율을 정의하고자 하는 경우 대역폭 23 Hz에 대해 2.8초 이상의 감쇠 지속 시간이 필요하다. (전체 평균 감쇠 비율을 정의하고자 하는 경우 0.7초의 감쇠 지속 시간이 필요하다.) 그러나 웨이블릿 필터를 사용하는 경우 초기 감쇠 비율의 정의는 $BT_{60} > 16$ 을 만족시킬 경우 가능하다. 따라서 위의 예에서 초기 감쇠 비율의 정의는 0.7초 이상의 잔향 시간을 필요로 하고 전체 평균 감쇠 비율의 정의는 0.2초 이상으로 크게 감소한다. 그러므로 디지털 필터에 비하여 웨이블릿 필터를 사용하는 경우 디지털 필터보다 더 낮은 주파수 영역에 대해서, 그리고 더 짧은 지속 시간을 가지는 감쇠 신호에 대한 정확한 잔향 감쇠 비율의 측정을 가능토록 한다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (2000-2-30400-004-3) 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. F. Jacobsen, "A Note on Acoustic Decay Measurements," *J. sound vib.*, 115(1), 163-170, 1987.
2. H. Kuttruff, *Room Acoustics*, Elsevier Science Publishers, London, 1991.
3. M. R. Schroeder, "New Method of Measuring Reverberation Time," *J. Acoust. Soc. Am.*, 37, 409-412, 1965.
4. W. T. Chu, "Comparison of reverberation measurements using Schroeder's impulse method and decay-curve averaging method," *J. Acoust. Soc. Am.*, 63(5), 1444-1450, 1978.
5. M. Vorlander, H. Bietz, "Comparison of Method for Measuring Reverberation Time," *Acustica*, 80, 205-215, 1994.

6. ISO 3382, "Acoustics—Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters," 1997.
7. A. Lundeby, T. E. Vigran, "Uncertainties of Measurements in Room Acoustics," *Acustica*, **81**, 344–355, 1995.
8. S. Sorenson, "Steady State Reverberation Time Measurement," SAE paper 972032, 3139–3143, 1997.
9. S. Qian, D. Chen, *Joint Time–Frequency Analysis*, Prentice–Hall, Chap. 4, pp. 75–99, 1996.
10. P. P. Vaidyanathan, *Multirate Systems and Filter Banks*, Prentice–Hall, Chap. 11, pp. 457–544, 1993.
11. G. Strang, T. Nguyen, *Wavelets and Filter Banks*, Wellesley–Cambridge Press, 1997.
12. ANSI, S1.11, "Specification for Octave–Band and Fractional–Octave–Band Analog and Digital Filters," 1986.
13. I. Daubechies, *Ten Lectures on Wavelets*, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992.
14. F. Jacobsen, J. H. Rindel, "Time Reversed Decay Measurements," *J. sound vib.*, **117**(1), 187–190, 1987.
15. Y. Guo, C. Li, *Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms*, Prentice–Hall, 1998.
16. P. M. Morse, K. U. Ingard, *Theoretical Acoustics*, McGraw–Hall, New York, 1968.

저자 약력

● 이 상 권 (Sang–Kwon Lee)



1959년 1월 17일생
 1982년 2월: 부산대학교 기계공학과 학사
 1984년 2월: 부산대학교 기계공학과 석사
 1998년 2월: University of Southampton(ISVR) 박사
 1984년 3월~1984년 7월: LG전자 연구소
 1984년 8월~1985년 2월: 예비역 사관 4기
 1985년 3월~1994년 8월: 현대자동차 마북리 연구소
 1998년 3월~1999년 2월: 삼성자동차 중앙연구소(기총 소재)
 1999년 3월~현재: 인하대학교 기계공학과 교수

※ 주관심 분야: 음향 신호처리, 자동차 소음진동제어, 기계설비고장진단, 방음벽

● 이 민 성 (Min–Sung Lee)

1977년 11월 5일생
 2000년 2월: 인하대학교 기계항공자동화공학부 기계공학전공 학사
 2000년 3월~현재: 인하대학교 기계공학과 석사과정

※ 주관심 분야: 음향 신호처리, 건축 음향, 방음벽

● 김 봉 기 (Bong–Ki Kim)



1967년 12월 1일생
 1990년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 학사
 1992년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 석사
 1997년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 박사
 1997년 2월~1998년 10월: 삼성자동차 중앙연구소(기총 소재)
 1999년 4월~2000년 4월: ARVIN Industries, INC., USA

현재: 한국기계연구원 음향연구 그룹