

# 실 음향에서의 잔향 시간 측정 개선에 관한 연구

<sup>0</sup>이상권\*, 이민성\*\*\*, 김 봉 기\*\*\*

## A New Method for the Reverberation Time Measurement on Acoustic Rooms

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

### ABSTRACT

It is a difficult and important task to measure the reverberation time of an acoustic room with a short reverberation time. This paper presents a new technique to measure the reverberation time of an acoustic room with low value of BT60. The digital signal processing technique used to do this is the wavelet filter which is very flexible to design the 1/n octave band filter and has no delay problem compared with the conventional IIR digital filter. This method is successfully applied to the measurement of the reverberation time at low frequency band of famous concert halls in Korea.

### 1. 서 론

잔향시간의 올바른 측정은 흡음재의 예측과 음악당 및 각종 오디오 설비가 요구되는 공간의 성능예측에 중요한 인자 이다. 특히 흡음의 특성이 요구되는 음악당과 여객선, 차량등의 실내공간의 음향에서의 잔향 시간의 측정은 중요한데 비해 잔향시간이 충분하지 않아서 BT<sub>60</sub>의 값이 64 이하를 유지함으로 기존의 장비에서 사용되는 IIR 필터를 이용한 옥타브 필터로서는 음악당의 저주파 영역의 잔향 시간과, 좁은 공간에서의 중간 주파수 잔향시간을 정확히 예측하기는 어렵다. 이러한 문제를 해결하기위해서 웨이브렛을 이용한 옥타브 및 1/3 옥타브 웨이브렛 필터가 설계되었다 [1]. 본 연구에서는 실제 국내에 있는 음악공연장에 대한 저주파 잔향시간의 측정을 웨이브렛 필터를 사용하여 정확히 구하는 과정에 대하여 연구하였다.

### 2. 웨이브렛 필터

웨이브렛 변환은 신호에 포함되어 있는 지역 정보를 시간-주파수 영역으로 분해하는 기법으

로 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)에 의한 영향을 받지 않고 시간-주파수 분해능을 조정할 수 있다. 그러나 STFT는 고정된 분해능을 사용한다. 웨이브렛 변환은 기본 요소 신호인 모(母) 웨이브렛  $\psi(t)$ 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 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 웨이브렛 변환에는 연속 웨이브렛 변환과 이산 웨이브렛 변환이 있다. 본 연구에서 사용된 연속 웨이브렛 변환은 다음과 같이 정의할 수 있다.

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

$CWT(a,b)$ 는 위의 계산식에 나타난 바와 같이 신호  $x(t)$ 와 모(母) 웨이브렛  $\psi(a^{-1}(t-b))$ 의 내적의 적분으로 계산이 가능하다. 이렇게 구성된

\*인하대학교 기계공학과 대학원 정회원

\*\*인하대학교 기계공학과

\*\* 한국기계연구원

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. 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 구성하였다. 구성 범위는 가청 주파수 대역으로 총 33-채널(33-밴드)의 1/3 옥타브 필터 बैं크를 구성하였다 [1]. 앞 절에서 설명한 웨이블릿 이론에 따라서 1/3 옥타브 밴드의 웨이블릿 필터를 설계하였다. 이는 ANSI의 필터 규격에 따라서 설계하였고, 대역폭은 가청 주파수 범위를 포함하는 11.3Hz에서 23.17KHz로 33개의 필터로 बैं크를 구성하였다. 그림 1 이러한 1/3 옥타브 웨이블릿 필터 बैं크를 도시하였다.

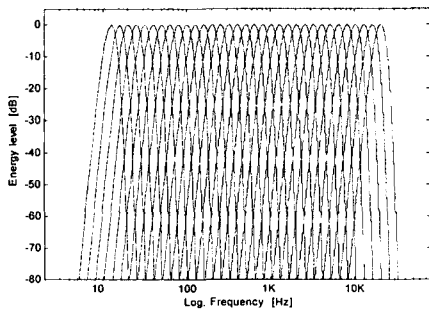


Fig. 1 1/3 octave wavelet filter bank.

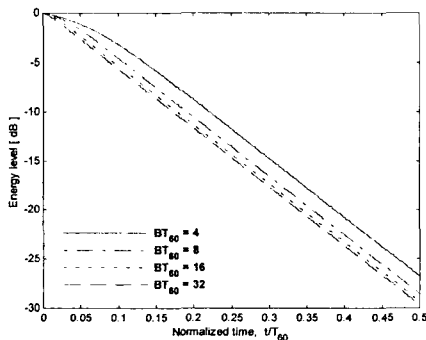


Fig. 2 Influence of wavelet filter.

지수함수로 감쇠하는 신호에 대한  $BT_{50}$  값에 따른 웨이블릿 필터에 의한 영향을 그림 2에 도시하였다. 일반적으로 IIR 필터를 사용하는 경우  $BT_{50}$  값이 64보다 커야 한다고 알려져 있다[2]. 그러나 그림 2의 결과를 보면 이에 비하여 웨이블릿 필터의 경우  $BT_{50}$  값이 16보다 커면 필터에 의한 영향 음향 감쇠곡선의 왜곡현상이 적어짐을 알 수 있다[1,3].

### 3. 실 공간에서의 잔향측정

본 연구에서는 웨이블릿 필터의 효과를 실 음향에 적용하기 위해서 국내 유명한 예술공연장에 대한 잔향시간을 측정하여 기존 필터의 경우와 비교 하였다. 편의상 측정에 이용된 예술공연장을 A 음향실이라 하자. 잔향시간의 측정은 충격음을 이용하여 측정하였으며 MLS 방법을 이용하여 공연장을 가진 하였다. 음향감쇠곡선은 역적분 [4]을 이용하여 잔향시간을 계산하였다. 그림 3은 A 음향실에 대한 충격 응답이다.

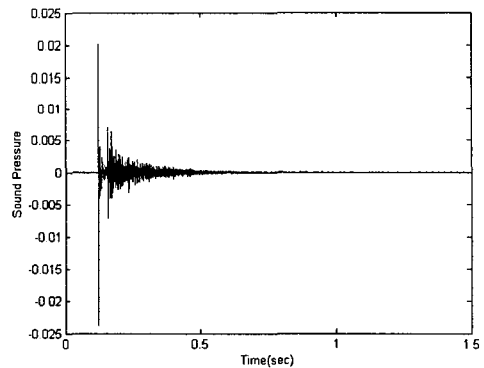
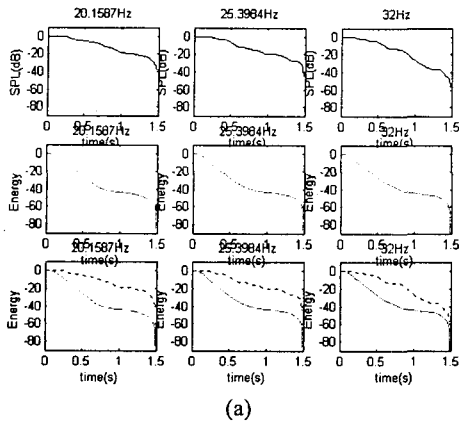
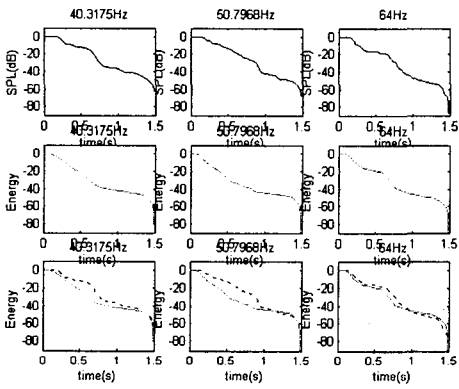


Fig. 3 Impulse response of a room A

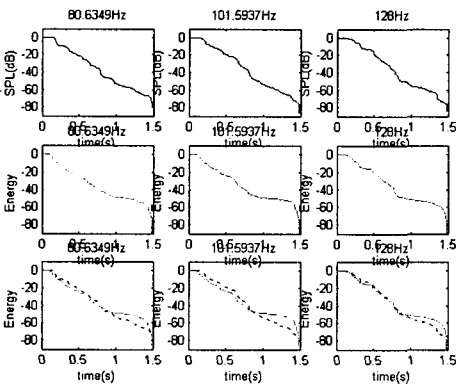
충격음에 대한 음향감쇠곡선을 IIR 필터와 웨이블릿 필터를 이용하여 구한 결과는 그림 4와 같다. 각 그림의 첫번째 줄은 IIR 필터를 이용한 것이고 두 번째 줄은 웨이블릿 필터를 이용한 것이다. 세 번째 줄은 두 방법을 비교한 것으로 실선이 웨이블릿에 의한 것이고 점선은 IIR 필터에 의한 결과이다. 이 결과에서 주파수밴드 B 값이 적은 저주파영역에서 IIR 필터를 이용한 감쇠곡선의 왜곡현상은 심한 것을 알 수 있다 그러나 125Hz 이상부터는 두 가지 방법이 유사한 결과를 보여준다. 이 두 방법에 감쇠곡선을 이용하여 잔향시간을 계산하기 위해 감쇠곡선의 기울기를 구하면 그림 5와 그림 6과 같다.



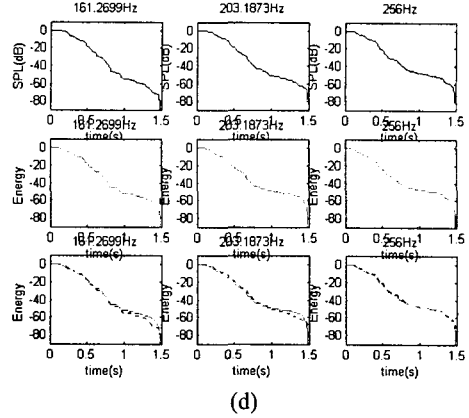
(a)



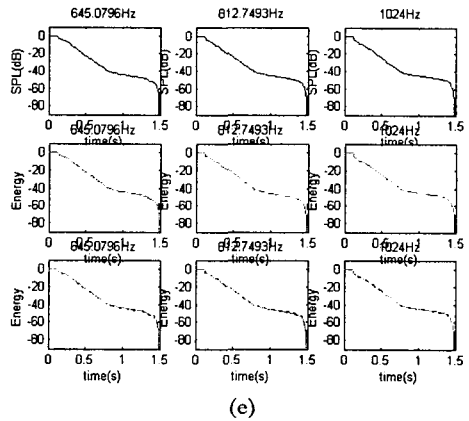
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig.4 Comparison of acoustic decay curves estimated by IIR filter and wavelet filter

이들 결과에서 첫 번째 줄은 EDT(early decay curve)를 나타내며 두번째 줄은  $T_{20}$ , 세번째줄은  $T_{30}$ 을 나타낸다. 일반적으로 ISO 3382[5]에서 추천하는 잔향시간에 사용되는 곡선은  $T_{30}$ 이며 암소음의 영향이 커서 경우 감쇠곡선이 45dB 이상 확보 되지 않으면  $T_{20}$ 을 추천한다. 저주파에서는 IIR 필터에 의한 감쇠곡선 왜곡현상으로 Linear Fitting이 어렵다. 그러나 웨이브렛 필터에 의한 감쇠곡선은 선형적이며 Liner Fitting이 작 적용된다. 따라서 IIR 필터를 이용하여 저주파 영역에서 구한 잔향시간은 오차가 심하게 된다. 그러나 그림.6에서 나타난 결과에 의하면 고주파에서는 두가지 방법이 모두 일치하며 기울기가 모두 선형적이며 음향감쇠곡선의 왜곡 현상이 심하지 않다. 즉 100Hz 이하에서는 IIR 필터를 이용한 잔향시간 계산은 오차가 심각하므로 웨이

브릿 필터를 이용하여 잔향시간을 예측하는 것이 더욱 정확하다. 그림.4는 두가지 방법을 이용하여 구한 잔향시간을 1/3 옥타브 밴드로 계산한 결과를 나타낸다. 이 결과는 앞에서 논의된 것과 같이 100Hz 이하에서 잔향시간의 예측에 대한 차이가 심하게 나타남을 알 수 있다. 그림.8은 음향실 A에 대한 최종의 잔향시간을 Wavelet 필터로 구한 결과이다. 여기서 특이한 사실은 63Hz 부근에서 잔향 시간이 갑자기 증가함을 알 수 있다. 이것의 원인을 분석하기 위해서 음향 감쇠곡선을 확인한 결과 그림. 9와 같다. 이 결과에 의하면 감쇠곡선이 선형이 아님을 알 수 있다. 따라서 그림 4에서 다시 살펴보면 감쇠 곡선이 두 가지 기울기를 가지고 있음을 알 수 있다. 음향실에서 잔향시간이 한 주파수에 두개가 존재함을 Schroeder [6]가 역적분을 이용하여 설명하였다. 특히 콘서트 홀에서는 흔히 존재하는 현상이다. 이 경우는 새로운 방법으로 기울기를 계산하여 잔향 시간을 구해야 한다

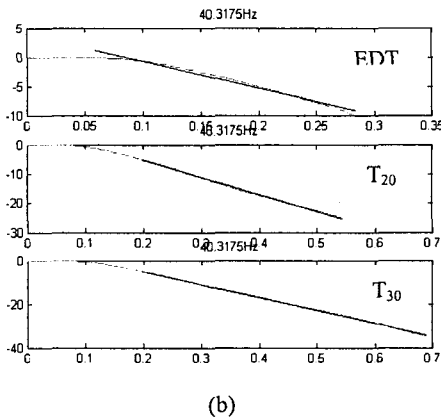
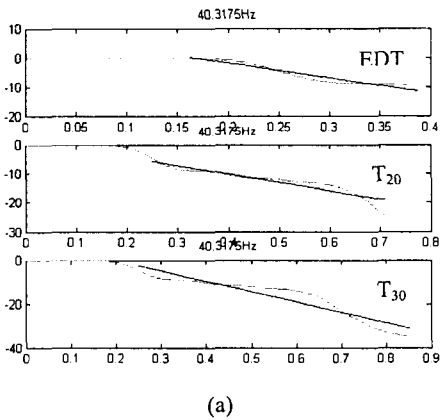


Fig.5 Linear curve fitting for calculation of slope of acoustic decay curves at low frequency (a) IIR filter (b) wavelet filter

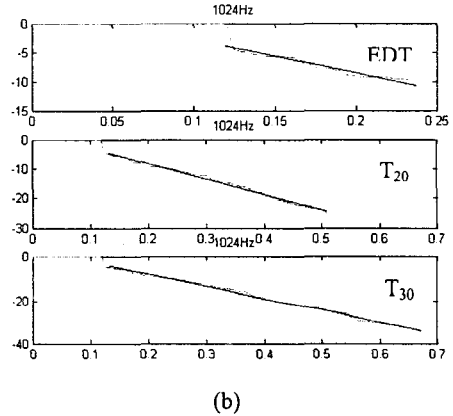
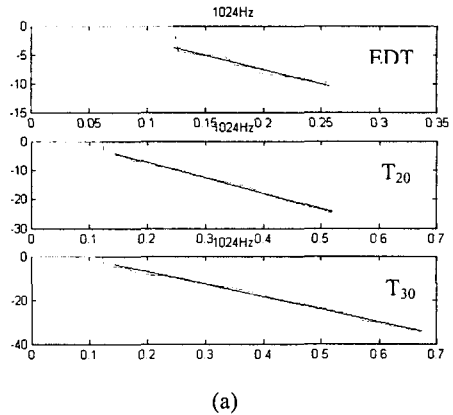


Fig.6 Linear curve fitting for calculation of slope of acoustic decay curves at high frequency (a) IIR filter (b) wavelet filter

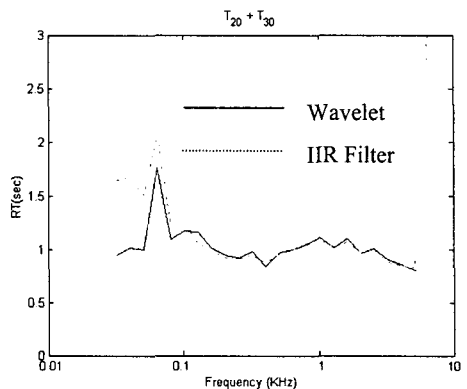


Fig.7 Comparison of reverberant time calculated by IIR filter and Wavelet Filter

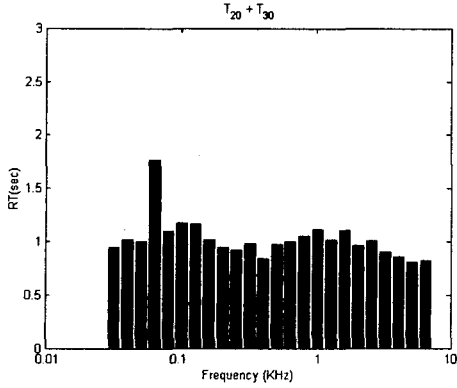


Fig.8 Reverberant Time of a room A calculated by Wavelet filter

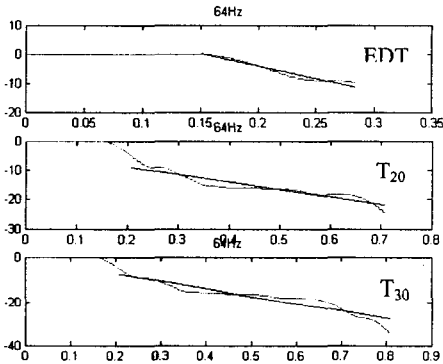


Fig.9 Linear curve fitting for calculation of slope of acoustic decay curves at 63Hz

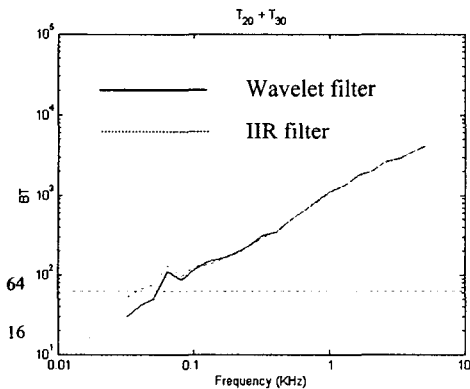


Fig.10 Comparison of  $BT_{60}$  calculated by IIR filter and wavelet filter

마지막으로  $BT_{60}$ 의 값을 각 방법에 대하여 비교해보면 그림.10과 같으며 저주파에서는 IIR 필터를 이용한 값이  $BT_{60} > 64$ 의 조건을 만족하지 못하면서 약 100Hz 가지 영향을 미친다. 그러나 wavelet filter의 경우  $BT_{60} > 16$ 의 값을 잘 만족시킨다. 따라서 잔향시간이 짧은 실 공간의 잔향시간을 계산할 경우에는 wavelet 필터를 이용하는 것이 유리하다.

#### 4. 결론

본 연구는 실 공간의 잔향시간 개선에 관한 연구를 다루었다. 잔향시간은 실내 공간에서의 음질의 향상을 위해서 혹은 음향학적 성능을 예측하기 위해서 매우 중요하다. 이 결과에 의하면 저주파 영역에서 잔향시간의 정확한 예측은 웨이브릿 필터를 이용해야 한다

#### 5. 후기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-2-30400-004-3) 지원으로 수행되었음.  
본 연구에 사용된 음향실 실험 데이터를 제공해 주신 전진용 교수님께 감사 드립니다.

#### 참고 문헌

1. Jacobsen, F., 1987, "A Note on Acoustic Decay Measurements," J. sound vib., Vol. 115(1), pp.163-170.
2. 이상권 이민성, 2001, "음 감쇠 측정에서의 IIR 필터와 웨이블릿 필터의 영향에 대한 수치 계산, 비교, 한국음향학회지, 제 20 권 제 5 호 PP5 ~ 13.
3. S. K. Lee, 2001, "A Acoustic Decay Measurement Based on Time-Frequency Analysis Using Wavelet Transform", Journal of Sound and Vibration. Accepted Paper.
4. S. Vorländer, M., Bietz, H., 1994, "Comparison of Method for Measuring Reverberation Time," Acustica, Vol. 80, pp.205-215.
5. ISO 3382, 1997, Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters.
6. M. R. Schroeder, 1965 "New Method of Measuring Reverberation Time," J. Acoust. Soc. Am. 37, 409-412.