한국음향학회지 제23권 제1호 pp. 54~60 (2004)

DWT영역에서 LMS를 이용한 저 샘플링 비율 오디오 신호의 음질 향상

Sound Enhancement of low Sample rate Audio Using LMS in DWT Domain

백 수 진*, 윤 원 중*, 박 규 식*
(Su-Jin Paek*, Won-Jung Yoon*, Kyu-Sik Park*)

*단국대학교 정보 · 컴퓨터학부, 컴퓨터과학 전공

(접수일자: 2003년 11월 19일; 수정일자: 2003년 12월 9일; 채택일자: 2003년 12월 26일)

44.1 kHz 샘플링 비율의 표준 CD 음질의 오디오 신호를 인터넷 상에서 전송 및 분배하기 위해서 네트워크 대역폭과 저장 공간의 제한점을 고려해야 한다. 이러한 제한은 오디오 신호의 샘플링 비율을 낮추거나 MP3와 같은 오디오 데이터 압축 기법을 이용하여 해결할 수 있지만, 공통적으로 고 주파수 (High frequency) 대역의 정보가 손실 된다는 문제가 발생한다. 이러한 고 주파수 손실은 결국 저 샘플링 비율의 오디오 신호를 생성하게 되며 표준 CD음질을 가지는 오디오 신호보다 제한된 저 주파수 대역만을 재생할 수 있게 된다. 일반적으로 오디오 신호의 고주파 성분은 위치정보 와 명료도, 재생 환경 등에 대한 음의 풍부한 정보를 제공한다. 본 논문의 목적은 LMS 적응 필터링과 DWT 분석/합성을 이용하여 저 샘플링 비율을 가지는 오디오 신호로부터 고 주파수 대역의 정보를 효과적으로 추정하는 것이다. 제안된 알고리즘은 DWT 영역에서 LMS 적응 알고리즘을 이용하여 고 주파수 정보를 추정하고 DWT 합성을 이용하여 고 주파수 정보가 강화된 고음질의 오디오 신호를 재생한다. 제안된 알고리즘의 성능 평가를 위해 실제 음성신호와 음악 신호를 이용하여 컴퓨터 모의 실험과 청취 평가를 수행하여 기존 알고리즘과 비교하였으며, 실험 결과 제안된 알고리즘의 우수성을 확인하였다.

핵심용어: 저 샘플링 비율 오디오, DWT 분석/합성, 고주파 성분 추정, 음질 향상
투고분야: 음향 신호처리 분야 (1.1)

In order to mitigate the problems in storage space and network bandwidth for the full CD quality audio, current digital audio is always restricted by sampling rate and bandwidth. This restriction normally results in low sample rate audio or calls for the data compression scheme such as MP3. However, they can only reproduce a lower frequency range than a regular CD quality because of the Nyquist sampling theory. Consequently they lose rich spatial information embedded in high frequency. The purpose of this paper is to propose efficient high frequency enhancement of low sample rate audio using LMS adaptive filtering and DWT analysis and synthesis. The proposed algorithm uses the LMS adaptive algorithm to estimate the missing high frequency contents in DWT domain and it then reconstructs the spectrally enhanced audio by using the DWT synthesis procedure. Several experiments with real speech and audio are performed and compared with other algorithm. From the experimental results of spectrogram and sonic test, we confirm that the proposed algorithm outperforms the other algorithm and reasonably works well for the most of audio cases.

Keywords: *Low sample rate audio, DWT analysis/synthesis, High frequency compensation, Audio quality enhancement*
ASK subject classification: *Acoustic signal processing (1.1)*

I. 서 론

오늘날 인터넷 패러다임은 거대한 음악 산업에 획기적인 구조 변화를 가져오고 있으며 인터넷 사용자들은 보다 쉬운 방법과 적은 비용으로 오디오를 다운로드받고 공유할 수 있게 되었다. 그러나 표준 CD음질의 오디오 신호를 인터넷 상에서 분배하기 위해서는 44.1 kHz 샘플링 비율의 큰 용량을 가지는 디지털 데이터를 처리할 수 있어야 한다. 이러한 문제는 일반적으로 네트워크 대역폭과 저장

책임저자: 박규식 (kspark@dankook.ac.kr)
140-714 서울시 용산구 한남동 산 8번지
단국대학교 정보 · 컴퓨터학부, 컴퓨터과학 전공
(전화: 02-709-2728; 팩스: 02-796-2970)

공간의 축소를 위해 오디오 신호의 샘플링 비율을 낮추거나 MP3와 같은 오디오 데이터 압축 기법을 이용하여 해결할 수 있지만, 공통적으로 고 주파수 (High frequency) 대역의 정보가 손실된다는 문제가 발생한다. 예를 들어 MP3로 압축된 오디오 신호는 자체 프로토콜에 의하여 16Khz까지의 대역 제한된 오디오 신호를 재생할 수 있으며 이는 저 샘플링 비율 (low sampling rate)의 오디오 신호로 해석될 수 있다. 또 다른 예로 표준 CD 음질의 오디오 신호를 22.05 kHz의 샘플링 비율로 낮춘다면 오디오 신호는 나이퀴스트 샘플링 이론에 의해 11.025 kHz ~ 22.05 kHz 범위의 고 주파수 성분이 손실된다. 즉, 저 샘플링 비율의 오디오 신호는 표준 CD음질을 가지는 오디오 신호보다 제한된 저 주파수 대역만을 재생할 수 있게 된다. 오디오 신호의 저 주파수 성분은 높은 에너지를 형성하고 있으므로 고 주파수 성분보다 중요하게 처리된다. 하지만 고 주파수 성분은 오디오 신호에 포함된 위치 정보 와 명료도, 재생 환경 등의 다양한 정보를 제공한다. 만약 저 샘플링 비율의 오디오 신호에서 제거된 고 주파수 대역의 정보를 비교적 정확히 추정하고 보상할 수 있다면 표준 CD음질의 오디오 신호에 존재하는 풍부한 공간 정보를 제공할 수 있을 것이다.

고 주파수 대역의 오디오 정보를 추정하고 보상하기 위한 기존의 연구 내용으로는 이미 녹음되어 있는 오디오 신호에서 고 주파수 대역의 오디오 정보를 강조하는 EQ 기반 메커니즘을 이용하는 방법, 음성신호에 국한되어 협대역 주파수 성분을 기반으로 광대역 오디오 신호를 생성하는 방법 등[1-3]이 제시되었다. 논문[4]에서는 대역폭이 제한된 오디오 신호로부터 최소 제곱 법을 기반으로하여 고 주파수 성분을 복구하는 방법을 제안하였으며 논문[5]에서 Corey는 저 샘플링 비율을 가지는 오디오 신호로부터 존재하지 않는 고 주파수 성분을 추정하는 방법을 제안하였다. Corey 알고리즘은 웨이블렛 영역에서 DWT (Discrete Wavelet Transform) 분석/합성을 기반으로 입력된 저 샘플링 비율의 오디오 신호에 대한 DWT 분석 계수들을 지수함수적으로 합산하여 고 주파수 성분을 추정하고 최종적으로 입력신호와 추정된 신호를 DWT 합성함으로서 고 주파수 성분이 강화된 고 음질의 오디오 신호를 재생한다. 그러나 이 방법은 고 주파수 성분 추정을 위해 DWT 계수값이 지수 함수적으로 감소[6]한다는 실험적인 사실만을 이용하고 있으며 다양한 오디오 입력 신호에 대한 범용성이 떨어진다는 문제점을 가지고 있다.

본 논문의 목적은 저 샘플링 비율을 가지는 오디오 신호로부터 고 주파수 대역의 정보를 효과적으로 추정하는 것이다. 기존의 Corey 알고리즘[5] 과의 차이점은 DWT 영역에서 적응 알고리즘을 이용한 고 주파수 정보의 추정으로서 본 논문에서는 LMS 알고리즘[7]을 이용하여 고 주파수 정보를 적응적으로 추정하고 추정된 신호와 입력 신호를 DWT 합성하여 고 주파수 정보가 강화된 고음질의 오디오 신호를 재생한다. 이러한 방법은 대역 제한되거나 저 샘플링 비율의 음성, 음악등의 일반적인 오디오 신호에 적용 가능한 범용 알고리즘을 제공할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 DWT의 분석 및 합성에 관한 간략한 소개와 선행 연구 방법에 대해 간략히 설명하고 제 3장에서는 선행 연구의 문제점을 해결하고 보다 높은 성능과 범용성을 제공할 수 있는 제안된 알고리즘을 설명한다. 제 4장에서는 제안된 알고리즘의 성능 평가를 위해 실제 음성신호와 음악 신호를 이용하여 컴퓨터 모의 실험 결과를 기존 알고리즘과 비교, 설명하고 마지막 장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. DWT 분석/합성 및 선행 연구

2.1. DWT (Discrete Wavelet Transform)

DWT는 웨이블렛 변환의 특별한 경우로서, 시간과 주파수 영역에서 연속적인 표현이 가능하고 멀티레이트 필터뱅크 (multirate filterbanks)의 피라미드 구조로서 빠르고 효율적인 연산이 가능하다[8]. DWT 분석은 입력 신호를 LPF (Low Pass Filter)와 HPF (High Pass Filter)로 필터링하여 근사계수 (approximation coefficient)와 상세계수 (detail coefficient)로 분해하고 근사계수에 대해 반복적인 필터링을 수행하여 신호의 주파수 대역을 서로 다른 주파수 밴드로 분해하는 방법이다. DWT 분석으로 생성된 근사계수 및 상세계수는 전송이나 저장을 위해 유용하게 이용될 수 있으며 DWT 합성은 원 입력 신호를 복원하기 위한 DWT 분석의 역 연산이다. 다음 그림 1은 예를 들어 레벨 3인 경우의 웨이블렛 분석과 합성을 나타낸 것이다. DWT 분석 결과 형성된 c_j와 d_j는 입력 신호의 DWT계수를 의미한다.

2.2. 선행 연구: Corey's 알고리즘[5]

저 샘플링 비율의 오디오 신호에서 고 주파수 정보 추정 및 보상 문제는 DWT 분석/합성으로 해석될 수 있다. DWT 분석은 저 샘플링 비율의 오디오 신호를 분석하여 고 주파수 대역의 DWT 계수를 추정하고, DWT 합성은 입력 오디오 신호와 추정된 고 주파수 대역의 DWT 계수

를 합성하여 고 주파수 정보가 강화된 오디오 신호를 복원할 수 있다. 논문[5]에서 Corey는 저 샘플링 비율을 가지는 오디오 신호의 품질 향상을 위해 DWT 계수 값이 지수 함수적으로 감소한다는 특성[6]을 이용하여 고 주파수 성분을 추정하여 저 샘플링 비율의 오디오 신호에 삽입하기 위한 접근 방법을 제시하였다. Corey 알고리즘은 입력된 저 샘플링 비율의 오디오 신호 $x(n)$을 그림 1의 레벨 1 저주파 DWT 계수인 $c_0(n)$으로 해석하고 이를 분석한 DWT 계수값들이 지수 함수적으로 변화한다는 사실을 이용하여 레벨 1의 고주파 계수 $d_0(n)$를 다음과 같이 추정한다[5,6]. 여기서 $d_p(n)$은 p레벨의 상세 계수(detailed coefficient)를 나타낸다.

$$\hat{d}_0(n) = 2^{-p} d_1(n) + 2^{-2p} d_2(n) + 2^{-3p} d_3(n) \cdots + 2^{-(p+1)p} d_p(n) \quad (1)$$

추정된 고주파 계수 $\hat{d}_0(n)$은 입력 신호 $x(n) = c_0(n)$와 함께 DWT 합성을 수행하여 고 주파수 정보가 강화된 오디오 신호 $\hat{s}(n)$을 획득하게 된다. 하지만 Corey의 알고리즘은 고 주파수 성분의 추정을 위해 웨이블렛계수 값이 지수 함수적으로 변화한다는 사실 (수식 (1))만을 이용하고, 추정된 계수의 정확도가 웨이블렛 변환의 레벨 값에 반비례하기 때문에 입력 오디오 신호의 특성과 레벨 수에 의해 성능이 크게 저하될 수 있으며 다양한 오디오 입력 신호에 대한 범용성이 없으므로 안정적인 알고리즘 성능을 기대하기 어렵다.

III. 제안된 알고리즘

본 장에서는 기존 알고리즘의 범용성과 안전성 문제를 해결하기 위해 저 샘플링 비율 오디오 신호의 고 주파수 성분을 추정하기 위한 새로운 접근 방법을 제시한다.

그림 2는 주어진 저 샘플링 비율의 오디오 신호 $x(n)$에 존재하지 않는 고 주파수 성분 $d_0(n)$을 추정하기 위한 DWT 분석과 합성 과정을 구체적으로 표현한 것이다. 시스템의 입력신호인 $x(n)$은 그림의 DWT계수 $c_0(n)$으로 가정할 수 있고, $c(n)$과 $d(n)$은 각각 $c_0(n)$과 $\hat{d}_0(n)$을 2배 보간한 결과이며, 추정된 고 주파수 성분인 $\hat{d}_0(n)$은 $d(n)$의 2배 다운샘플링한 결과이다.

제안된 알고리즘은 저 샘플링 비율의 오디오 입력신호 $x(n)$을 그림 2의 DWT계수 $c_0(n)$으로 가정하고 다음 두 단계의 수행 과정을 거쳐 고 주파수 성분이 포함된 오디오 신호를 생성한다.

(1) $c(n)$을 참조값으로 하여 $d(n)$을 적응적으로 추정하고 추정된 $d(n)$을 2배 다운샘플링하여 고 주파수 성분의 DWT계수인 $\hat{d}_0(n)$을 구한다.

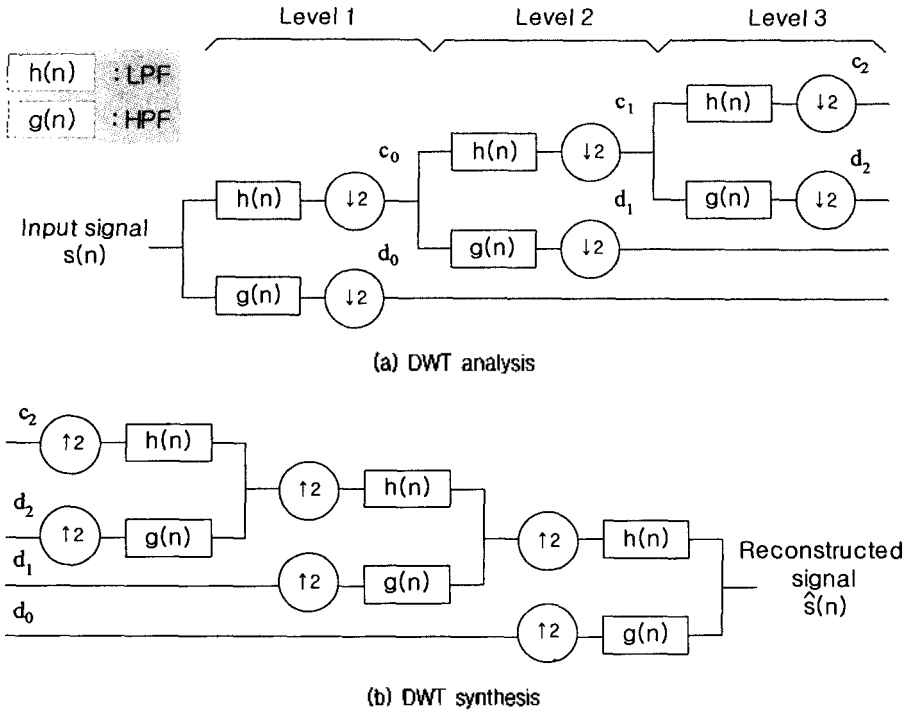


그림 1. 레벨 3 DWT 분석과 합성 과정 예
Fig. 1. DWT analysis and synthesis procedure for level 3.

(2) 최종적으로 고 주파수 성분이 포함된 향상된 음질의 오디오 신호 $\hat{s}(n)$은 그림 2와 같이 DWT 합성을 수행하여 획득한다.

1 단계에서 $d(n)$의 적응적인 추정을 목적으로 제안된 시스템은 다운 샘플링 이전까지 선형성과 시불변성을 만족한다고 가정한다. 이러한 시스템은 시간 n에서 다음과 같은 수식을 만족시킬 수 있다[9].

$$s(n)*h(n)*g(n)=s(n)*g(n)*h(n) \quad (2)$$

$s(n)$은 입력신호를, $h(n)$과 $g(n)$은 각각 웨이블렛 저역 통과 필터와 고역 통과 필터의 임펄스 응답을 나타낸다. 여기에서 $s(n)*h(n)=c(n)$과 $s(n)*h(n)=d(n)$라는 사실을 이용하여 수식 (1)을 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$e(n)=c(n)*g(n)-d(n)*h(n)=0 \quad (3)$$

수식 (3)의 $c(n)$은 주어진 저 샘플링 비율 오디오 신호 $x(n)=c_0(n)$를 단순히 보간한 것이다. 적절한 보간 방법을 이용하여 $c_0(n)$을 $c(n)$에 $c(n)=s(n)*h(n)\cong[c_0(n)]_{int\ p_by\ 2}$로 근사화 시킬 수 있고 수식 (3)는 다음과 같이 재표현될 수 있다.

$$e(n)=[c_0(n)]_{int\ p_by\ 2}*g(n)-d(n)*h(n)=0 \quad (4)$$

제안된 알고리즘은 수식 (4)의 $e(n)$을 최소화할 수 있는 $d(n)$의 추정된 형태인 $\hat{d}(n)$을 구하기 위해 LMS (Least Mean Square) 적응 알고리즘을 이용한다. LMS 적응 알고리즘을 위한 에러 신호와 적응 수식은 다음과 같다.

$$e(n)=[c_0(n)]_{int\ p_by\ 2}*g(n)-\hat{d}(n)*h(n)=0,$$
$$\hat{d}(n+1)=\hat{d}(n)+2\mu e(n)h(n) \quad (5)$$

여기서 $c_0(n)$은 $x(n)$을 의미하고 $\mu=\frac{u}{L\sigma^2}$, $0<u<1$는 적응 스텝 크기를 의미한다. L과 σ^2은 각각 적응 필터의 길이와 웨이블렛 저역 통과 필터인 $h(n)$의 에너지를 의미한다. 그림 3은 제안된 알고리즘에서 $\hat{d}(n)$을 추정하기 위한 적응 동작과 고 주파수 성분이 강화된 오디오 신호 $\hat{s}(n)$를 획득하기 위한 시스템 전체 구성도이다.

그림 3에서 $\hat{d}(n)$을 추정한 이후, 이 값을 2배 다운샘플링 함으로서 실질적인 고 주파수 성분의 DWT계수 $\hat{d}_0(n)=\hat{d}(2n)$를 획득할 수 있다. 저 샘플링 비율을 가지는 오디오 신호 $x(n)$과 추정된 높은 주파수 성분의 웨이블렛계수 $\hat{d}_0(n)$는 완벽한 DWT의 계수 집합을 형성한다. 시스템은 최종적으로 두 신호에 대한 DWT 합성

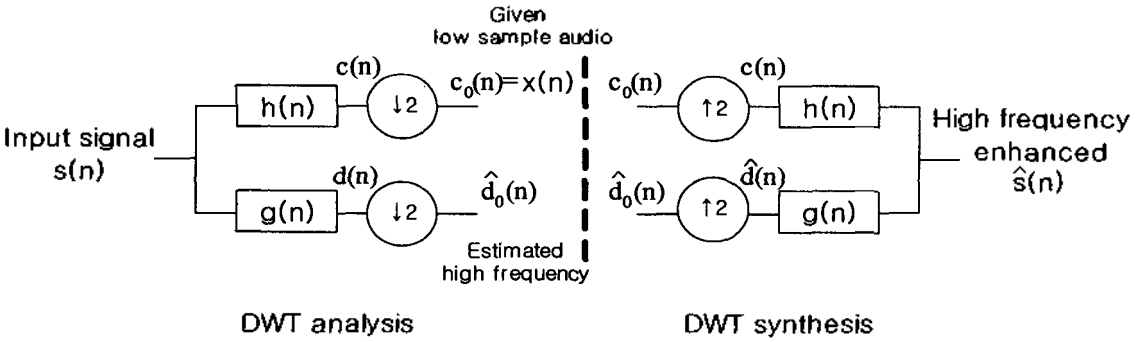


그림 2. 고 주파수 성분이 강화된 오디오 신호를 생성하기 위한 DWT 분석과 합성
Fig. 2. DWT analysis and synthesis for high frequency spectral enhancement.

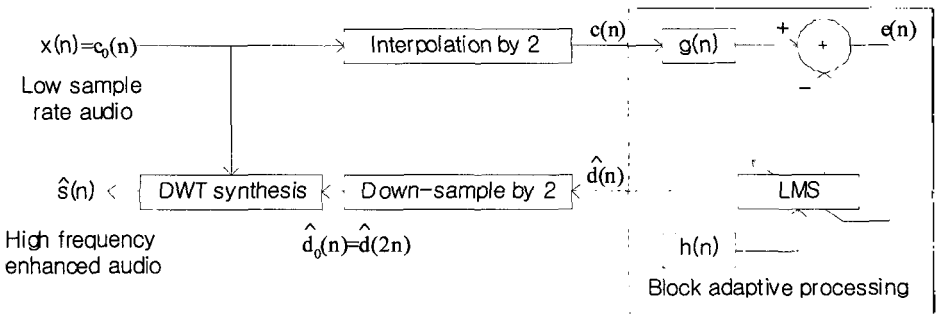


그림 3. $\hat{d}_0(n)$의 추정과 $\hat{s}(n)$의 획득을 위한 LMS적응 알고리즘 구성도
Fig. 3. LMS adaptive block diagram for estimation of $\hat{d}_0(n)$ and reconstruction of $\hat{s}(n)$.

절차를 수행함으로서 고 주파수 성분이 포함된 향상된 음질의 오디오 신호 $\hat{s}(n)$를 획득하게 된다. 다음의 표 1은 제안된 알고리즘을 요약한 것이다.

이상의 제안된 알고리즘으로부터 몇 가지 다음과 같은 논의가 가능하다. 첫째 본 논문에서 제안한 알고리즘은 입력 오디오 신호의 특성에 근거하여 고 주파수 대역의 신호 성분을 적응적으로 추정하는 수학적 분석 방법을 이용한다. 그러므로 음성 및 음악등 다양한 종류의 오디오 신호에 대해 범용적인 동작이 가능하다. 이것은 기존 알고리즘[6]이 고 주파수 성분의 추정 절차 과정에서 엘리어싱이 발생한다는 점과 DWT계수의 정적인 지수 함수적 모델링을 기반으로 하기 때문에 입력되는 오디오 신호의 특성을 적절히 반영할 수 없다는 점을 고려하였을 때, 큰 장점이 될 수 있다. 둘째 제안된 알고리즘은 입력된 저 샘플링 비율의 오디오 신호를 레벨 1의 가장 낮은 주파수 성분의 DWT계수로 설정하고 추정 및 합성을 수행하기 때문에 입력신호의 샘플링 비율에 무관하게 동작할 수 있다. 마지막으로 제안된 알고리즘은 대역폭이 제안된 어떠한 압축 오디오 신호에서도 동작이 가능하다. 특히 DWT 압축 오디오의 경우는 DWT 합성을 이용하여 레벨 1의 DWT 저주파 계수 $c_0(n)$만 획득하여 본 장에서 언급했던 절차를 그대로 적용할 수 있어 보다 쉬운 접근이 가능하다.

표 1. 제안된 알고리즘
Table 1. Proposed algorithm.

Step 1: Interpolation by 2.
$c(n) = [x(n)]_{\text{intp_by 2}}$
$where,\ x(n) = c_0(n)$
$x(n) = [x(n), x(n-1), x(n-2), \cdots, x(n-L+1)]^T$
Step 2: Adaptive high frequency estimation : LMS algorithm.
$e(n) = c(n)^T g(n) - d(n)^T h(n)$
$\hat{d}(n+1) = \hat{d}(n) + 2\mu e(n) h(n)$
$where,\ \hat{d}(n) = [d_0^n, d_1^n, d_2^n, \cdots, d_{L-1}^n]^T$
step size: $\mu = \frac{u}{L\sigma^2}\quad 0 < u < 1, d\ \sigma^2 = \sum_{k=0}^{L-1} h_k^2$
Step 3: Downsampling by 2
$\hat{d}(n) = \sum_{k=0}^{L/2-1} d_{2k+1}^n,\ \hat{d}_0(n) = \hat{d}(2n)$
Step 4: DWT synthesis for reconstruction of $\hat{s}(n)$
$\hat{s} = DWT_{syn}[c_0(n), \hat{d}_0(n)]$

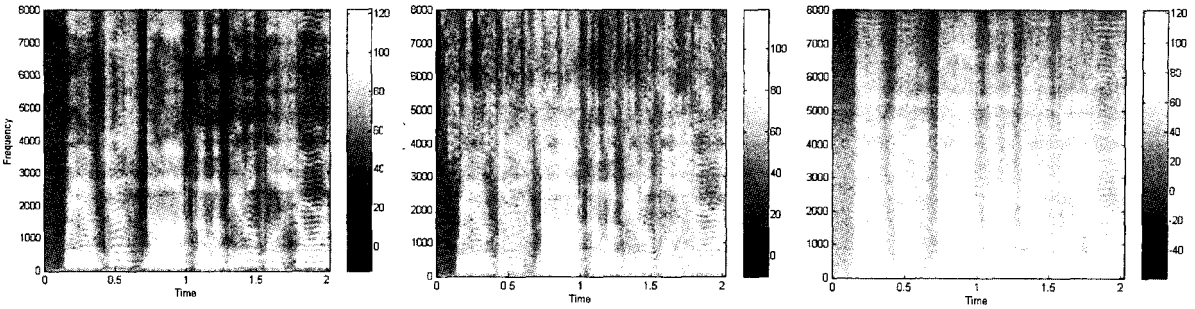
IV. 컴퓨터 모의 실험

본 장에서는 제안된 알고리즘의 성능 평가를 위한 컴퓨터 모의 실험 결과를 보인다. 성능 평가를 위한 비교 대상 알고리즘으로는 Corey의 알고리즘[5]을 사용하였고, 실험을 위한 샘플 오디오로 여성 음성신호와 전자기타 음악을 선택하였다. 여성 음성 신호는 모노, "We have just dock and a beautiful sores"를 16 kHz샘플링 주파수로 2.048초 녹음한 것이며, 전자기타음은 스테레오, 44.1 kHz의 샘플링 주파수를 가지는 신호의 일부 (2.972초)를 채취한 것이다. 두 신호는 실험을 위하여 고 주파수 성분을 제거하기 위해 각각 8 kHz, 22.05 kHz로 다운샘플링되어 시스템에 입력되고 시스템에서는 제거된 고 주파수 성분을 복원하기 위해 Corey 알고리즘과 제안된 알고리즘을 이용하여 각각 16 kHz와 44.1 kHz의 샘플링 비율을 가지는 오디오 신호를 복원한다. 두 알고리즘의 성능 비교는 다운 샘플링되기 이전의 원 오디오 신호와 각각의 알고리즘을 이용하여 복원된 오디오 신호간 음질을 비교함으로서 가능하다.

DWT의 분석과 합성을 위해 이용되는 저역 통과 필터와 고역 통과 필터는 필터길이가 30인 Daubechie ('db15')를 이용하였다. 알고리즘의 전반적인 성능 평가를 위해 Harr, Biothogonal등 다른 종류의 웨이블렛 필터를 사용하였지만 별다른 성능의 차이를 발견할 수 없었다.

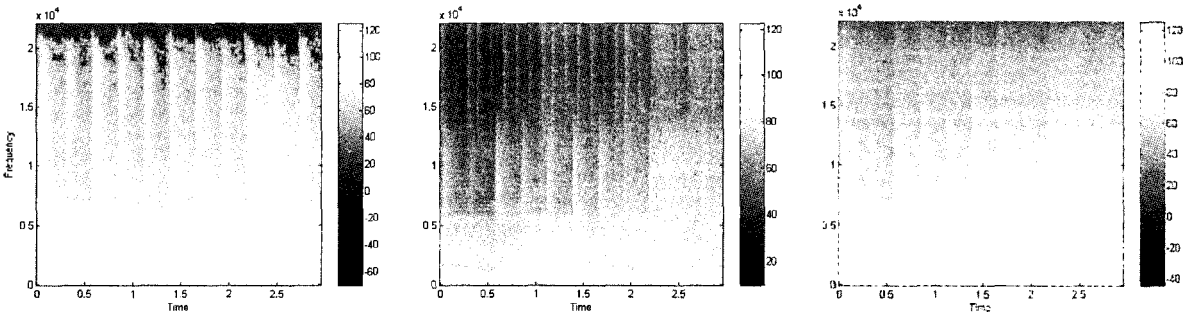
그림 4와 5는 여성 음성과 전자기타음 경우의 모의 실험 결과를 나타낸다. 두 그림의 (a)는 16 kHz와 44.1 kHz의 샘플링 비율을 가지는 원 오디오 신호의 스펙트로그램을 나타내고 (b)와 (c)는 각각 Corey의 알고리즘과 제안된 알고리즘을 이용하여 고 주파수 성분이 강화된 향상된 음질의 오디오 신호를 생성한 결과이다.

그림 4에서 Corey 알고리즘을 이용하여 복원된 오디오 스펙트로그램(b)을 원 신호(a)와 비교한 결과 5 kHz이상의 높은 주파수 성분은 매우 불연속적인 모양을 가지며 복원 특성이 불안정함을 확인할 수 있다. 반면 제안된 알고리즘은 원 음성신호와 고 주파수 영역을 비교한 결과 좋은 복원 성능을 보였다. 전자 기타 음악을 이용한 경우에도 유사한 결과를 확인할 수 있다. 그리고 그림 5에서 저 주파수 대역을 비교한 결과 제안된 알고리즘은 원 신호의 신호 특성과 매우 유사하지만 Corey의 방법을 이용한 경우 약간의 왜곡이 발생하였다. 이상의 스펙트로그램 실험 결과로부터 제안된 알고리즘이 저 샘플링 비율의 오디오 신호로부터 고 주파수 신호 성분을 매우 안정적으로 추정하여 고 음질의 오디오 신호를 재생할 수 있음을



(a) Original signal (b) Reconstructed signal using Corey's method (c) Reconstructed signal using the proposed method

그림 4. 기존 알고리즘과 제안된 알고리즘의 컴퓨터 모의 실험 결과 (음성 신호)
Fig. 4. Spectrogram of original signal and reconstructed signals using Corey's method and proposed method (case of speech).



(a) Original signal (b) Reconstructed signal using Corey's method (c) Reconstructed signal using the proposed method

그림 5. 기존 알고리즘과 제안된 알고리즘의 컴퓨터 모의 실험 결과 (음악 신호)
Fig. 5. Spectrogram of original signal and reconstructed signals using Corey's method and proposed method (case of music).

확인할 수 있다.

주관적인 음질 평가를 위해 본교 대학원생 중 여성 과 남성 30명을 선발하여 MOS 평가를 수행하였다. 각 청취자는 여성 음성, 전자 기타, 드럼 음, 피아노 음에 대한 Corey 알고리즘 과 제안 알고리즘의 결과 음을 듣고 0부터 4까지 5단계로 음질을 평가하게 하였다. 음질 평가는 원음과 각 알고리즘을 사용하여 고주파 영역이 복원된 음을 비교하여 얼마나 유사한지를 평가하게 하였으며 이를 그림 6에 도시하였다. 그림에서 보듯이 각 오디오 음원에 대하여 본 논문에서 제안된 알고리즘이 전반적으로 좋은 음질 재생 성능을 보였으며 특히 원음에 고주파 성분이 풍부한 여성 음성, 전자 기타, 드럼 음 등에 대하여 좋은 성능을 보이고 있다. 그러나 청취자들은 각 알고리즘으로 재생된 결과음의 고주파 영역이 원음에 비해 약간 거칠다는 점을 공통적으로 지적 하였는데 이는 고주파 성분을 인공적으로 추정하여 재생하기 때문으로 분석된다.

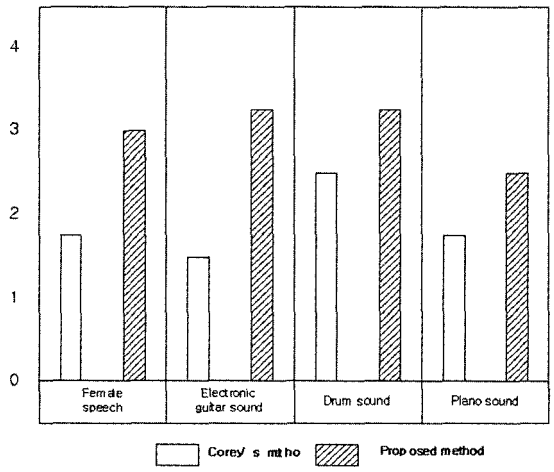


그림 6. Coreys 알고리즘과 제안 알고리즘 결과 음에 대한 청취 평가 결과
Fig. 6. Sonic listening tests for audio quality between Coreys and the proposed method.

V. 결 론

본 논문은 LMS 적응 필터링과 DWT 분석/합성을 이용하여 저 샘플링 비율을 가지는 오디오 신호로부터 고 주파수 대역의 정보를 효과적으로 추정하는 새로운 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 DWT 영역에서 LMS 적응 알고리즘을 이용하여 고 주파수 정보를 추정하고 DWT 합성을 이용하여 고 주파수 정보가 강화된 고음질의 오디오 신호를 재생한다. 제안한 알고리즘은 입력 오디오 신호의 특성에 근거하여 고 주파수 대역의 신호 성분을 적응적으로 추정하는 수학적 분석 방법을 이용하여 음성 및 음악 등 다양한 종류의 오디오 신호에 대해 범용적인 동작이 가능하다. 실제 음성 신호와 음악 신호를 이용한 컴퓨터 모의 실험과 청취 평가 실험으로부터 제안된 알고리즘의 우수성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 단국대학교 교내 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. C. Avendaro, et. al., "Beyond nyquist: towards to recovery of broad-bandwidth speech from narrow-bandwidth speech," in Proc. Eurospeech, (Madrid), 165-168, 1995.
2. Y. M. Cheong, et., al, "Statistical recovery of wideband speech from narrowband speech," *IEEE Trans. Speech Audio Process.*, 2, 544-548, 1994.
3. J. Epps et. al., "A new technique for wideband enhancement of coded narrowband speech," *Proc. IEEE Speech Coding Workshop* (Porvoo Finland), 174-176, 1999.
4. Chi-Min Liu, et. al., "High frequency reconstruction for band-limited audio signals," Proc. of 6th Conf. on Digital Audio Effects, London, UK, Sep. 8-11, 2003.
5. Corey, C., "Wavelet signal processing of digital audio with applications in electro-acoustic music," Dartmouth College Master's Thesis, Dartmouth College, Hanover, New Hampshire: 1996.
6. Strang, G. and Nguyen, T., Wavelets and filter banks, Wellesley-Cambridge, Wellesley, MA, 1996.
7. B. Widrow and M. E. Hoff, Jr., "Adaptive switching circuits," in IRE WESCON Conv., Rec., 96-104, 1960.
8. Ali N. Akansu and Richard A. Haddad, Multi-resolution signal decomposition, Academic Press, 2001.
9. 최영근, 김기만, 박규식, "음향 채널 추정을 이용한 음질향상," 한국음향학회지, 22 (7), 573-578, 2003.

저자 약력

● 백 수 진 (Su-Jin Paek)
한국음향학회지 제22권 제6호 참조

● 윤 원 중 (Won-Jung Yoon)

2003년 2월: 상명대학교 컴퓨터 정보통신 학부 정보통신학과 (이학사)
2003년 3월~현재: 단국대학교 컴퓨터과학 및 통계학과 (석사과정)

● 박 규 식 (Kyu-Sik Park)
한국음향학회지 제22권 제6호 참조