

## 디지털 필터를 이용한 오디오 워터마킹 기술

신승원, 김종원, 최종욱

마크애니 부설 연구소

### Audio Watermarking Technique Based on Digital Filter

Seungwon Shin, Jongweon Kim, and Jonguk Choi

MarkAny Research Institute

#### 요 약

In this paper, we propose a robust watermarking technique that accepts time scaling, pitch shift, add noise and a lot of lossy compression such as MP3, AAC, WMA. The technique is developed based on digital filtering. Being designed according to critical band of HAS (human auditory system), the digital filters nearly affect audio quality. Furthermore, before implementing digital filtering, wavelet transform decomposes the audio signal into several signals that is composed of specific frequencies. Designed digital filters scan the decomposed signal. The designed digital filter, band-stop filter, distorts and eliminates specific frequencies of audio signals.

Watermarking detection can be accomplished by FFT (Fast Fourier Transform). Firstly, segments of audio signal are transformed by FFT. Then, the obtained amplitude spectrum by FFT is summed repeatedly. Finally the watermark detector can find filters used to watermark encoding based on eliminating frequencies. The suggested technique can embed 4bits/s in a robust manner.

#### I. 서론

디지털 워터마킹 기술은 디지털로 제작된 저작물에 저작권의 고유 정보를 삽입하여 자신의 권리를 추후에 주장할 수 있도록 하는 기술로 온라인 멀티미디어 시장에 핵심적인 기술로 자리잡고 있다. 워터마킹 기술과 함께 멀티미디어 저작물 보호를 위해서 활용하고 있는 암호화(encryption) 기술이나 스크램블링(scrambling) 기술도 워터마킹 기술과 함께 널리 이용되고 있으나, 일단 저작물을 보거나 듣기 위해서는 복호화된 상태이거나 또는 정상적인 포맷으로 되돌린 상태에서만 가능하기 때문에 디지털 저작물을 플레이하는 도중에는 이와 같은 기술로 보호받을 수 없게 된다. 따라서, D/A, A/D변환을 통해서 쉽게 원래의 저작물을 얻어 불법 복사 또는 배포가 가능하게 된다. 이러한 상황을 방지하기 위한 기술이 저작물내에 이용자들이 모르게 워터마크를 삽입하는 기술이다[1].

오디오 워터마킹 기술은 대부분 불완전한 인간의 청각 시스템 (HAS: Human Auditory System)을 이용한다. 우리가 매일 접하고 있는 MP3, WMA, AAC 등과 같은 파일 포맷 역시 바로 이런 인간의 청각 시스템을 이용한 손실 압축방법이다.

최근 연구에서는 스프레드 스펙트럼 기법 (Spread Spectrum Technique)을 이용한 워터마킹 기술이 널리 활용되었는데[2-4], 이 기술은 비동기화 공격(desynchronization attack)에 치명적으로 약한 약점을 갖고 있다. 최근에는 이와 같은 비동기화 공격에 대비하여 워터마크를 설계하고 삽입할 때 비동기화가 발생하더라도 상관도가 나타나도록 워터마크 설계하거나[5], 워터마크를 삽입할 때, 미리 설정된 간격으로 단순히 반복 삽입하지 않고 오디오 신호의 특성을 분석하여 오디오를 여러 개의 작은 블록으로 구분하여 삽입하는 방법 [6]을 시도하기도 하였다. 이 두가지 방법은 그동안 스프레드 스펙트럼이 갖고 있는 가장 큰 문제점을 해결하는 중요한 연구로 생각된다. 그러나,

이러한 노력에도 불구하고 비동기화 공격에 취약한 특징은 실시간 워터마킹 추출 시스템을 구현하는데에 큰 걸림돌로 작용한다. 예를 들어 플레이 도중에 일정 부분을 건너뛰거나 빨리 진행시키면 일부 데이터를 손실하게 되고, 일부 정보를 오검지하게 된다.

디지털 필터를 이용한 방법으로는 [7-8]에서 찾아 볼 수 있는데, [7]에서는 All pass filter를 이용하여 위상 변조를 이용한 워터마킹 방법을 제시하였으나, 이 방법도 워터마크를 검출하기 위해서는 동기를 맞추어야 하며 일반적인 신호처리 공격에도 매우 취약한 단점을 나타내었다. 또, [8]에서는 이미지 워터마킹 알고리즘으로 임의의 두 지점에 위상변화를 가하여 그 위상 변화를 찾아서 워터마킹을 식별하는 방법을 이용하였으나, 다양한 공격에는 취약한 것으로 드러났다.

본 논문에서 제안한 방법은 디지털 필터를 이용하여 비동기화 공격뿐만 아니라 time scaling, pitch shift, 손실 압축과 같은 다양한 공격에 강인한 특성을 갖는 워터마킹 기술이다. 먼저 우리는 디지털 필터에 의한 오디오 음원 변화를 최소화할 수 있도록 HAS의 임계 대역(critical band)을 고려하여 필터를 설계하는 방법을 제안한다. 워터마크를 삽입하기 전과 삽입한 후에 음질 변화를 느끼지 못하도록 하기 위해서는 사람의 청각 시스템의 신호 해상도를 고려한 디지털 필터를 설계해야 한다. 우리가 본 연구에서 이용한 디지털 필터는 대역 저지 필터로 특정 대역의 신호 성분을 제거 또는 왜곡하는 방법으로 대역 저지폭이 100Hz이하로 설계하였다.

또한, 필터링 과정에서 필터링을 하는 대상 주파수 영역 이외의 주파수 대역에 미치는 음질 저하를 최소화하기 위하여 대상 주파수 영역만을 웨이브렛으로 분해하여 필터링하도록 설계하였으며, 필터링 과정에서는 위상변화가 발생하지 않도록 zero phase filtering을 이용하였다.

마지막으로 추출과정에서 효율적으로 워터마크 정보를 검출하기 위하여 윈도우 푸리에 변환으로 구한 진폭 스펙트럼을 수정된 로그 스케일로 변환하는 방법을 소개한다.

## II. 워터마킹 기술

본 논문에서 오디오 신호에 어떤 정보를 삽입하는 방법으로 이용된 기술은 필터링이다. 필터링은 필터를 어떻게 설계하고 운용하느냐에 따라 오디오 신호에 다양한 영향을 줄 수 있다. 필터는 저역통과필터 (low-pass filter), 고역통과필터

(high-pass filter), 대역통과필터(band-pass filter), 대역저지필터(band-stop filter) 등으로 설계 특성에 따른 구분된다.

본 논문에서 제시하는 워터마킹 알고리즘의 기본 개념은 매우 간단하고 분명하다. 만약 임의의 필터  $H$  로 오디오 신호  $S$ 를 필터링하여 필터링된 오디오 신호  $S^*$ 를 만들었다면, 이 필터링된 오디오 신호는 스스로 어떤 필터로 필터링되었는지 구별할 수 있게 된다. 예를 들어, 만약 우리가 4개의 필터를 설계하였다면 <표 1>과 같이 각각 4bit 정보를 표현하는데에 서로 다른 2개의 필터가 필요하게 된다. 즉, 우리는 오디오 신호에 2개의 필터 정보를 각인시켜, 그 오디오 신호에 어떤 변형이 가해지더라도 삽입된 정보를 추출할 수 있게 된다.

표 1 : 필터 조합에 따른 워터마크 정보에

삽입정보	필터 조합	삽입정보	필터 조합
00	NONE	01	1,4
10	1,3	11	2,4

본 논문에서 제안한 알고리즘은 사전에 디지털 필터를 설계해 두어야 한다. 앞서 설명한 바와 같이 <표 1>에서는 4개의 디지털 필터를 이용하여 4bit 정보를 표현하고 있다. 따라서, 먼저 4개의 대역 저지 필터를 설계해야 한다. 이 디지털 필터는 특정 대역의 주파수 성분을 제거 또는 완화시키는 기능을 한다. 본 논문에서 적용한 IIR 필터들은 차단 대역의 중심 주파수가 5.35kHz, 6.15kHz, 6.95kHz, 7.65kHz인 필터이고, 해당 차단대역(stopband)의 진폭 dB를 주변에 비해서 약 30dB 감소시킨다. 우리는 MATLAB SIGNAL TOOLBOX의 필터설계 함수를 이용하였다.

이 실험에서 대역 저지 필터의 대상 주파수 영역을 5-8kHz 대역으로 선택한 것은 음질과 강인성을 동시에 고려하여 선택하였다. 5kHz안쪽 주파수 대역은 오디오 신호의 대부분을 차지하고 있으며 사람의 귀에 매우 민감한 영역이기 때문에 미세한 주파수 변화도 쉽게 발견될 수 있기 때문이다. 물론, 5kHz대역 안쪽을 이용하게 되면 강인성은 증가될 수 있으나, 압축(compression), 주파수 변환(re-sampling)을 고려하여 최소 64kbps, 16kHz 정도의 음질을 보존하는 오디오 신호에서는 검출이 가능한 범위를 필터링 대상으로 설정하였다.

### 1. 디지털 필터

일반적인 디지털 필터는 식(1)과 같은 차분 방정식으로 표현 가능하다.

$$y_k = \sum_{m=0}^M a_m x_{k-m} + \sum_{n=1}^N b_n y_{k-n} \text{ ----- (1)}$$

위 (1)식으로부터 우리는 원하는 주파수 성분만을 추출하여 사용하게 된다. 필터의 주파수 특성을 알아보기 위해서는 우선 (1)식의 양변을  $z$  변환을 하고  $z = e^{j\omega T}$ 을 대입하여 진폭특성과 위상특성을 구하여 필터의 주파수 특성을 분석하게 된다[9].

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{m=0}^M a_m z^{-m}}{1 - \sum_{n=1}^N b_n z^{-n}} \text{ -----(2)}$$

$$|H(e^{j\omega T})| = \sqrt{\{H_R(e^{j\omega T})\}^2 + \{H_I(e^{j\omega T})\}^2}$$

디지털 필터를 이용하여 오디오 신호에 정보를 삽입하는 데에 모든 디지털 필터가 가능한 것은 아니다. 특히, 워터마킹 기술에서 원래 오디오 신호와 정보가 삽입된 신호 사이의 차이가 발생하지 않으려면 필터에 대한 효과가 지극히 부분적이고 국소적이어야만 한다. 따라서, 본 논문에서도 가급적 오디오 신호에 미치는 영향을 최소화하고, 필터에 의한 음질 변화를 거의 느끼지 못할 수 있는 필터로 대역 저지 필터를 이용하였다.

대역 저지 필터로 오디오 신호를 필터링 하게 되면, 특정 대역  $R$ 의 주파수 성분이 제거되는데 이때 대역폭  $R$ 이 사람의 귀로 구분할 수 있는 임계 대역(critical band)보다 훨씬 작으면 필터링하기 전과 후의 오디오 신호의 차이를 구분할 수 없게 된다. Zwicker[10]가 분석한 임계 대역에 따르면, 1kHz대역에서는 임계 대역은 190Hz 정도로 매우 작으나 4kHz대역에서는 900Hz로 대역 폭이 넓은 것을 알 수 있다. 즉, 임계대역은 고주파일수록 더 넓고 그 만큼 오디오 신호의 주파수를 사람의 귀로 세밀하게 구분해낼 수 없음을 의미한다.

## 2. 정보 삽입 방법

오디오 신호에 정보를 삽입하는 절차는 <그림 1>과 같다. 여기서, Cover Signal은 정보를 삽입하지 않은 원본 오디오 신호를, Stego Signal은 Cover Signal에 삽입 정보가 포함된 워터마크된 신호를 의미한다.

<그림 1>에서 삽입 절차를 살펴 보면, 첫번째 단계로 입력된 Cover Signal을 웨이블릿 변환으로 필터링 대상 대역 주파수를 추출한다. Cover signal을 웨이블릿으로 분해된 여러 신호중에 대

상 주파수를 포함하는 신호만 필터링하는 것은 디지털 필터링에 의해서 주변 주파수에 미치는 side effect를 최소화하기 위해서이다. 이상적인 디지털 필터를 설계하는 것은 불가능하기 때문에 아무리 정교하게 필터가 설계되었다고 하더라도, 필터링에 의한 주변 신호와 위상 변화는 발생할 수 밖에 없다. 특히, 고주파 성분은 상대적으로 적은 에너지를 갖고 있는데, 이 부분에 발생하는 변화는 고주파를 왜곡시킬 가능성이 크다. 이런 변화를 사전에 막기 위한 작업으로, 시간-주파수 영역에서 신호의 분해능이 뛰어난 웨이블릿[11]을 이용하여 필터링되는 주파수 대역 신호를 얻어서 필터링하였다.

두번째 단계로 대상 주파수 신호를 미리 설계된 필터를 이용해서 필터링한다. 이때 여기서 설계된 디지털 필터가 IIR(infinite impulse response) 필터이기 때문에 비선형 위상 변화가 발생하고, 비선형 위상 변화는 음질 변화를 야기시키게 된다. 또, 이런 필터 과정을 반복하게 되므로 인해서 위상의 불규칙한 변화는 왜곡된 음을 만들기도 한다. 이런 위상 변화에 대한 문제를 해결하기 위하여 우리는 필터링을 거치는 동안 위상 변화가 발생하지 않도록 Zero-phase filtering[9,12]을 이용하였다. Fredrik[12]은 IIR 필터링을 전방향, 후방향으로 실시함으로써 위상이 변하지 않는 필터를 제안하였으며, 아울러 디지털 필터의 안정적인 초기값을 결정하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 위상변화를 제거할 뿐만 아니라, 필터링된 신호간에 자칫 발생할 수 있는 불연속점의 발생을 막는데 효과적이다.

마지막으로, 웨이블릿으로 분해된 각각의 신호들과 필터링된 신호를 다시 합성하여 원래의 오디오 신호로 변환하면 정보가 삽입된 Stego signal이 만들어진다.

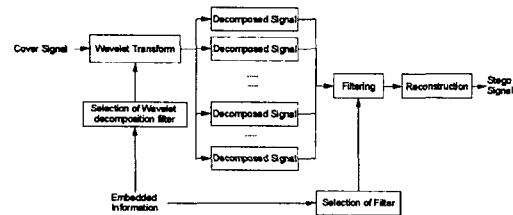


그림 1 : 오디오 신호에 워터마크 삽입 절차

위 과정을 일정 길이의 오디오 신호 단위로 반복적으로 진행하여, 정보를 삽입한다. 만약, 64bit 정보를 삽입한다면, 위 과정을 16반복해야 모든 정보를 한번 삽입하게 된다. 많은 정보를 삽입할 때는 정보단위를 구분하기 위하여 추가 정보를 삽입한 다음에 반복적인 sync 비트 정보를 삽입하여 추출시에 전체 정보의 크기를 판단할 수도 있다.

또한, 적은 비트 정보를 삽입할 경우에는 오디오의 일부 신호에만 삽입해도 충분히 검출이 가능하므로 난수 발생기를 이용해서 난수값이 '0'일 경우에는 삽입하지 않고, '1'일 경우에는 삽입하는 과정을 반복하여 정보가 오디오 신호의 어느 부분에 삽입되어 있는지 감출 수도 있다.

### 3. 정보 추출 방법

위터마크의 추출과정은 오디오의 진폭 스펙트럼을 분석해서 찾아낸다. 삽입과정에서 설명하였듯이 필터링은 오디오의 특정 대역 주파수 성분을 제거 또는 왜곡시키는 효과를 주기 때문에 주파수 성분을 계속해서 합산하게 되면, 제거된 신호가 상대적으로 낮은 에너지량을 보이기 때문에 점점 더 뚜렷하게 차이를 나타내게 된다.

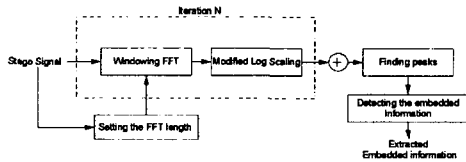


그림 2 : 삽입된 위터마크 추출 절차

<그림 2>은 추출 절차를 보여주고 있는데, 우선 정보가 삽입된 오디오 신호(Stego signal)의 샘플링 주파수, 채널 수 등을 고려하여 충분히 필터링된 주파수 신호가 주파수 변환에 의해서 보일 수 있도록 분석 길이를 설정해야 한다. 우리가 필터링할 때 대역 차단된 주파수 범위가 80Hz이므로, 44.1kHz인 경우에는 1024, 또는 2048 데이터 샘플 단위로 분석해야만이 필터링 효과를 뚜렷이 관찰할 수 있다. 또, 필터링 효과는 로그 스케일로 변환된 상태에서만 정확하게 관찰할 수 있기 때문에 오디오 신호에 윈도우를 곱하여 Gibbs현상을 제거하고 진폭 스펙트럼을 dB단위로 표현한다. 이 과정을 미리 설정한 반복횟수 N회 실시하여 합산된 신호로부터 우리는 위터마크가 삽입된 위치를 식별할 수 있으며, 식별된 위치로부터 어떤 필터에 의해서 생겨난 피크인지 알수 있기 때문에 <표 1>과 같이 정의된 lookup table을 이용하여 정보를 복원할 수 있다.

<그림 2>에서 수정된 로그 스케일링 과정은 일반적인 로그 변환에 문턱치를 적용해서 신호의 평균 음량 이상의 경우에는 문턱치로 변경하는 방식이다. 문턱치는 진폭 스펙트럼의 평균값을 이용하였다.

### III. 기술 평가

기술 평가는 대중 가요 2곡, 클래식 1, 효과음 1

곡에 각각 위터마크 정보를 삽입하고, 15초 이내에 삽입된 위터마크를 반복적으로 추출하여 정확한 값을 찾은 경우의 수를 추출 횟수로 나누어서 검지율을 측정하였다.

#### 1. 음질 평가

오디오 음질의 평가는 ABX 음질 테스트 절차 [13]에 따라 오디오 전문가(golden ear)들이 원음과 위터마크가 삽입된 음원을 얼마나 구별할 수 있는가를 확률적으로 평가하였다. 각 곡당 8번씩 원곡(A), 위터마크된 곡(B) 그리고 원곡과 위터마크된 곡중에서 임의의 곡(X)을 들려주고, 세번째 들려준 곡(X)이 앞서 들려준 A, B중에 어느 곡과 일치하는 지를 찾는 테스트이다.

표 2 : 위터마크 음질 테스트 결과 (ABX Test)

음악 \ 전문가	A	B	C
1	3/8	5/8	6/8
2	5/8	5/8	5/8
3	5/8	4/8	3/8
4	4/8	5/8	5/8
검지율(%)	53%	59%	56%

<표 2>는 3명의 전문가에 의해서 평가된 결과로 56% 원음을 정확히 찾아냈음을 알 수 있다. 그러나, 우연히 원음을 발견할 수 있는 확률이 50%라고 했을 때, 오디오 전문가들에 의해서 56% 찾아낼 수 있다는 것은 일반인들에 의해서는 거의 구별이 될 수 없다는 것을 의미한다.

#### 2. 강인성 테스트(Robustness test)

우리는 <표 3>에 제시된 6가지의 신호처리와 3가지의 오디오 압축에 대한 강인성 테스트를 실시하였다. 이 실험은 총 4곡으로 15초마다 위터마크 정보를 검출하였고, 전체 검지횟수는 68번이다.

표 3 : 신호처리 공격후 위터마크 검출 정확도 (4bit, %)

Signal Processing	Pop-1	Pop-2	Classic	Effect	Detection rate
No attack	21	18	11	16	66
Amplitude compression	21	14	0	1	36
Channel conversion	20	17	11	16	64
Down sampling	21	18	12	16	67
Pitch shift +10%	20	16	11	14	61
-10%	21	17	11	15	64
Time scaling +10%	21	17	12	15	65
-10%	21	17	12	15	65
Add noise 36dB	21	17	11	15	64
MPEG1 MP3 128kbps	21	17	10	16	64
96kbps	21	17	9	15	62
MPEG2 AAC 128kbps	21	16	11	16	64
96kbps	21	16	9	16	62
WMA 64kbps	21	16	10	12	59

<표3>에서 보여지듯이, Amplitude compression 공격과 WMA 64kbps에 가장 검지율이 낮게 나타났으며, 그 이외의 공격에 대해서는 모두 90%이상

의 높은 검지결과를 보였다. Amplitude Compression은 16비트 오디오 음원을 8비트 음원으로 변형하는 공격으로 오디오의 질적 저하로 인해서 일반 오디오에서는 거의 사용하지 않기 때문에 크게 문제되지 않을 것으로 판단된다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 오디오 신호에 오디오 저작권 정보 또는 오디오에 대한 복사 제어 코드 등을 삽입 및 추출할 수 있는 기법을 소개하였다. 본 논문에서 제안한 이 기술은 매우 강인할 뿐만 아니라 음질 테스트 결과 원음과 정보가 삽입된 음을 거의 구별할 수 없는 것으로 분석되었다. 또한, 이 기술은 1~2비트에서부터 64비트 이상까지 많은 정보를 삽입할 수 있기 때문에 저작물의 고유 코드번호를 부여하여 삽입하여 추후에 어떤 음악이 누구에 의해서 사용되고 있는가를 식별할 수 있을 뿐만 아니라, 사후 저작물의 관리와 저작권자에게 정당한 이용료 지불 등에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 이 기술은 광고방송에 고유 식별 코드를 삽입하여 광고방송 모니터링 시스템이나 방송 동기화 장비에도 활용될 수 있다.

본 기술은 삽입과정과 추출과정에서 반복적인 신호처리 기술을 이용하고 있기 때문에 PC에서 뿐만 아니라 TI 또는 ARM 프로세서를 이용한 하드웨어 구현장치에서도 뛰어난 성능을 발휘할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서, 향후 TI 또는 ARM 프로세서를 이용한 실험을 통한 성능 평가가 추가로 이루어져야 할 것이며, 추가적으로 초당 4비트씩 대량 정보의 삽입 및 추출을 위한 구체적인 구현 및 실험이 요구된다.

#### Acknowledgment

본 논문은 국가지정 연구실 사업(과제번호: 2000N-NL-01-C-286)의 지원으로 수행되었음.

#### 참고문헌

- [1] Katzenbeisser S., Petitcolas, F.A.P., Information Hiding Techniques for Steganography and Digital Watermarking, Artech House, Boston (2000).
- [2] Bassia, P., Pitas, I., Robust audio watermarking in the time domain, In Proc. EUSIPCO 98, vol. 1. Rodos, Greece, IEEE (1998) 25-28.
- [3] Cox. I. J., Kilian, J., Leighton, T., Shamoan, T., A secure robust watermark for multimedia, In Anderson, R. Information Hiding, Cambridge, UK. Lecture Notes in Computer Science, vol. 1174, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg (1996) 185-206.
- [4] Swanson, M.D., Zhu, B., Tewfik, A.H., Boney, L., Robust audio watermarking using perceptual masking, Signal Processing 66, 337-355, 1998.
- [5] Darko Kirovski and Henrique Malvar, Robust Covert Communication over a Public Audio Channel Using Spread Spectrum, Pre-proceedings of the 4th Information Hiding Workshop, Holiday Inn Select Pittsburgh University Center, 2001.
- [6] Chung-Ping Wu, Po-Chyi Su, C. -C. Jay Kuo, Robust and Efficient Digital Audio Watermarking Using Audio Content Analysis, Security and Watermarking of Multimedia Contents II, 382-392, 2000. 12. 4.
- [7] Tolga Ciloglu, S. Utku Karaaslan, An Improved All-Pass Watermarking Scheme for Speech and Audio, Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Multimedia and Expo vol. 2, 1017-1020.
- [8] Faisal Alturki, Russell Mersereau, An Oblivious Robust Digital Watermark Technique for Still Images Using DCT Phase Modulation, Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Volume 4, 1975-1978.
- [9] Oppenheim, A.V., and R.W. Schaffer, Discrete-Time Signal Processing, Prentice-Hall, 1989, pp.311-312.
- [10] E.Zwicker, Psychoacoustics, Springer-Verlag, Berlin, 1990.
- [11] Yang Yan, Zhang Dong, Enhancement of Angiograms via M-Band Wavelet Transform, Proceedings of SPIE Biomedical Photonics and Optoelectronic Imaging, 165-169, 2000.
- [12] Fredrik Gustafsson, Determining the Initial States in Forward-Backward Filtering, Transactions on Signal Processing, V.44 N. 4, 1996. 4. 1.
- [13] Burlington, R., and May, D. Jr., Handbook of Probability and Statistics with Tables, Second Edition, McGraw Hill NY, 1970.