

특정 주파수계수를 이용한 오디오 워터마킹

Audio Watermarking Using Specific Frequency Coefficients

우 동 훈*, 정 의 필*
(Dong-Hoon Woo*, Ui-Pil Chong*)

*울산대학교 컴퓨터·정보통신공학부

(접수일자: 2003년 1월 17일; 수정일자: 2003년 5월 12일; 채택일자: 2003년 5월 19일)

본 논문에서는 공격에 강인하면서 원본 데이터의 변형을 작게 하는 워터마크 삽입 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 스프레드 스펙트럼 방법을 이용하여 워터마크를 삽입시 주파수 계수가 큰 값 순이 아닌 특정 범위의 값에 워터마크를 삽입함으로써 고음질의 워터마크가 삽입된 데이터를 얻을 수 있었으며, 워터마크가 삽입된 데이터에 MP3 압축, FFT 필터링, Cropping 및 Echo 등의 공격을 가한 후 워터마크 추출실험을 해 본 결과 모든 공격에 대해 α 가 0.5이상인 경우에는 워터마크 추출이 가능하였다. Cox가 제안한 방법보다 SNR면에서 훨씬 좋은 성능을 보였다.

핵심용어: 워터마크, 오디오, 스프레드 스펙트럼, 저작권 보호

부고분야: 음향 신호처리 분야 (1,2)

In this paper, we proposed the robust watermark diminishing distortion of the original data inserting the watermark in specific coefficients of the frequency domain. In case the alpha is more than 0.5, we found that proposed watermark is detected by experiment of MP3, FFT, Cropping and Echo attack. Our proposed method improved the Cox's method in the SNR aspect.

Keywords: Watermark, Audio, Spread spectrum, Copyright protection

ASK subject classification: Acoustics signal processing (1,2)

I. 서 론

인터넷과 디지털 기술의 발달로 콘텐츠는 아날로그에서 디지털로 변화되었다. 콘텐츠의 디지털화로 인하여 고화질, 고음질의 영상과 음향을 접할 수 있게 되었고, 인터넷이라는 거대한 네트워크 망을 통해 전세계 어느 곳에서나 콘텐츠들을 이용할 수 있게 되었고, 이러한 콘텐츠들은 창조적인 아이디어와 지식이 부가가치를 창출하는 중요한 문화산업 혹은 콘텐츠 산업이 되었다[1,2]. 디지털화된 콘텐츠는 손쉽게 복사가 가능하며 이에 따른 비용 역시 비싸지 않다. 또한 복사된 콘텐츠와 원본 콘텐츠간의 차이는 전혀 없고, 재사용과 조작이 용이하여 인터넷으로 콘텐츠의 배포가 쉽고 빠르다. 이와 같은 디지털 콘텐츠의 특성으로 인하여 디지털 콘텐츠의 불법 복사 및 배포에 있어서 큰 문제가 발생하고 있고, 이로

인해 디지털 콘텐츠에 대한 소유권이 불분명하게 되므로 새로운 저작권 시비를 야기시킬 수 있다. 이러한 저작권 문제를 해결하기 위한 대안으로 워터마킹 기술이 나타났다. 워터마킹은 디지털 콘텐츠 자체에 사람이 인지할 수 없는 저작권 정보를 삽입하는 기술로 콘텐츠에 삽입된 저작권 정보를 추출하여 불법 유통되었거나, 불법 조작된 콘텐츠에 대해서 저작권을 주장할 수 있다.

스프레드 스펙트럼 (Spread Spectrum) 통신 기술은 기밀 통신을 위해 군사적인 목적으로 사용되었다. 전송할 신호를 스프레딩 코드를 이용하여 광대역으로 확대하여 전송하고, 수신측에서 이를 원래 주파수 대역으로 전환하여 수신하여 전파방해 또는 간섭을 최대한 배제한 기법이다. 1997년 I. Cox[3,4]가 이 기술을 워터마킹에 적용하여 삽입할 워터마크를 의사잡음 (Pseudo-Noise) 코드를 통해 대역 확산시킨 후 적절한 가중치를 주어 워터마크를 삽입하였다. 워터마크에 대한 대부분의 공격은 원신호에 큰 변형을 주지 않고 워터마크만을 제거하는데 그 목적이 있기 때문에 신호의 중요 부분에 워터마크를

책임저자: 정의필 (upchong@mail.ulsan.ac.kr)
680-749 울산시 무거동 산 29번지
울산대학교 컴퓨터정보통신공학부
(전화: 052-259-2220; 팩스: 052-259-1687)

삽입하여, 워터마크를 제거하면 원신호에 큰 변형을 가져오게 하였다. 일반적으로 오디오나 이미지의 중요 정보는 저주파수 대역에 존재하며 I. Cox는 원신호를 주파수 대역으로 변환 후 주파수 계수가 큰 값 순으로 워터마크를 삽입함으로써 공격에 강인하게 하였다. 원신호의 중요 정보에 워터마크를 삽입하므로 삽입시 사용되는 가중치 값의 결정이 중요하며, 적절한 가중치 값을 결정하기 위해 심리음향 모델링을 이용하여 마스킹 한계 곡선을 계산하여 최적의 가중치 값을 결정하여 삽입하였다[5, 7, 8, 10, 11].

일 오디오 신호를 3단계의 웨이브렛 변환을 하여 주파수 대역별로 분리하고 분리된 대역별로 워터마크 삽입 후, 특정 공격을 가하고 워터마크를 추출해 본 결과 꼭 중요한 정보가 있는 저주파수 대역이 아니라라도 공격에 강인한 대역이 있음을 알았다. 공격에 강인한 대역을 조사해 본 결과 대역의 주파수 계수 값의 변화가 적은 부분이 공격에 강인한 면을 보였다[8]. 이에 착안하여 본 논문에서는 오디오 신호의 주파수 변환후 주파수 계수값 중 특정 범위 내의 값을 추출하여 워터마크를 삽입함으로써, 원본 데이터의 변형을 적게 가져오면서 공격에도 강인한 워터마킹을 제안하고자 한다. 이 제안한 방법에 MP3압축, Cropping, FFT 필터링, Echo 삽입 등과 같은 공격을 가한 후 워터마크의 추출 가능여부와 SNR (Signal To Noise Ratio)을 계산하여 원본의 손상여부를 Cox방법의 결과와 비교하였다. 제 2절에서 I. Cox가 개발한 스프레드 스펙트럼 (spread spectrum) 워터마킹 기법에 대해 알아보고, 3절에서 제안한 방식의 워터마크 삽입방법에 대해 설명하며, 4절에서 I. Cox가 개발한 방식과 본 논문에서 제시한 방법과의 실험결과를 통하여 비교 분석하였으며, 5절에서 논문의 결론과 향후 과제를 기술하였다.

II. Cox가 제안한 방법

2.1. 워터마킹 삽입방법

오 미지나 사운드와 같은 데이터의 주파수 분석을 해 보면 대부분의 중요한 정보는 저주파수 대역에 존재한다. 워터마크에 대한 대부분의 공격은 원신호에 큰 변형을 주지 않고 워터마크만을 제거하려는데 그 목적이 있기 때문에 신호의 중요 부분에 워터마크를 삽입함으로써 워터마크를 제거하면 원신호의 큰 변형으로 사용할 수 없게 하는데 있다.

원신호 D를 DCT (Discrete Cosine Transform)하여 주

파수 영역으로 변환한다. 변환된 주파수 계수값들 중 큰 값 순으로 n개의 주파수 계수를 추출한다. 여기서 DC값은 제외한다. DC값에 변형을 가할 경우 원신호에 너무 큰 변형을 가져오기 때문에 쉽게 워터마크를 인지할 수 있게 된다. 추출한 계수값을 V로 두면

$$V = v_1, \dots, v_i, \dots, v_n \quad (1)$$

이며, n개의 삽입될 워터마크 X는

$$X = x_1, \dots, x_n \quad (2)$$

가 된다.

워터마크 X를 추출된 주파수 계수값 V에 삽입하기 위한 방법들로서 식 (3, 4, 5)를 사용한다. 워터마크 삽입시 가중치 α 를 변경함으로써 워터마크의 삽입강도를 조절할 수 있다. 워터마크가 삽입된 주파수 계수를 V' 라 하면,

$$v'_i = v_i + \alpha x_i \quad (3)$$

$$v'_i = v_i(1 + \alpha x_i) \quad (4)$$

$$v'_i = v_i(e^{\alpha x_i}) \quad (5)$$

식 (3)의 경우 v_i 값의 변화가 클 경우 워터마크를 삽입시 원본 데이터의 변형이 일정치가 않으므로 사용하기가 적당하지 못하다. 식 (4)와 (5)는 v_i 값을 워터마크 x_i 에 곱함으로써 주파수 계수 값의 변화가 크더라도 일정한 스케일로 워터마크가 삽입되도록 하였다. 그러나 식 (5)의 경우는 원래 값의 로그값이 사용될 경우,

$$\log(v'_i) = \log(v_i) + \alpha x_i \quad (6)$$

식 (6)과 같이 변형이 되고, 식 (3)과 유사한 형태가 되므로 v_i 의 값의 변화가 클 경우 마찬가지로 원본데이터의 변형이 일정치 못하므로 워터마크 삽입에 적당하지 못하다. 따라서 일반적으로 워터마크 삽입시 식 (4)를 이용하여 삽입을 하게 되며, α 값을 적절하게 조절하여 사람이 인지하지 못하게 삽입한다. 조금 더 사람이 인지하지 못하게 하기 위하여 가중치 α 값을 한 개의 값이 아닌 여러 개의 값을 이용하여 삽입하기도 한다. 가중치 값을 $\alpha_1, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n$ 으로 정하고,

$$v'_i = v_i(1 + \alpha_i x_i) \quad (7)$$

식 (7)과 같이 워터마크를 삽입한다.

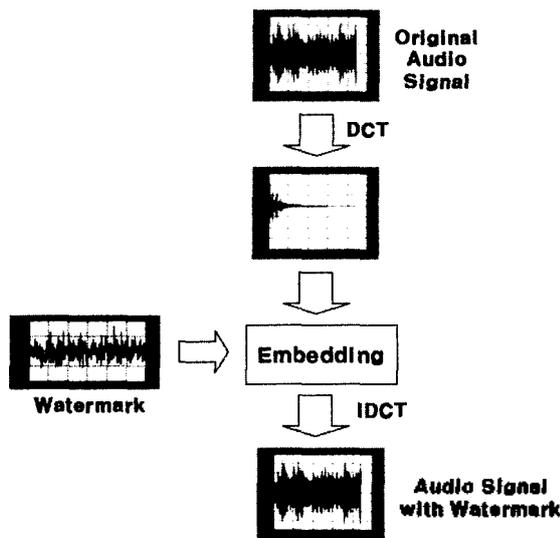


그림 1. I. Cox의 워터마크 삽입 과정
Fig. 1. Watermark embedding of I. Cox's method.

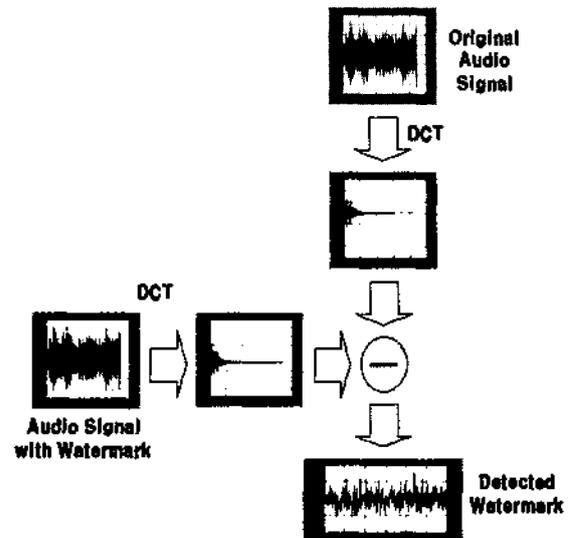


그림 2. I. Cox의 워터마크 추출과정
Fig. 2. Watermark extracting of I. Cox's method.

2.2. 워터마크 추출방법

워터마크의 추출은 삽입의 역 과정이며 워터마크된 신호로부터 워터마크를 추출하기 위해서 원 신호를 필요로 한다. 워터마크가 삽입된 신호 D' 에 공격자가 1회 이상의 공격을 가한 신호를 D^* 라하고, D^* 의 DCT 변환 삽입시와 같은 n 개의 주파수 계수 값 $V^* = v_1^*, \dots, v_i^*, \dots, v_n^*$ 를 추출한다. 추출한 V^* 와 원 신호의 V 를 식 (8)을 이용하여 삽입된 워터마크 x_i^* 를 추출한다.

$$x_i^* = \frac{v_i^* - v_i}{\alpha} v_i \quad (8)$$

α : 가중치
 v_i : 원본에서 추출한 주파수 계수
 v_i^* : 워터마크가 삽입된 주파수 계수

2.3. 유사도 측정

추출된 워터마크 X^* 와 원본 워터마크 X 와의 유사도 (similarity)를 측정하여 워터마크의 존재여부를 판별한다. 유사도를 측정하기 위해 식 (9)를 사용한다.

$$\text{sim}(X, X^*) = \frac{X^* \cdot X}{\sqrt{X^* \cdot X^* \cdot X \cdot X}} \quad (9)$$

유사도 $\text{sim}(X, X^*)$ 값이 6보다 크면 워터마크가 존재한다고 판단할 수 있다[11].

III. 제안한 방법

워터마크의 삽입과 추출은 I. Cox가 제안한 방법과 유

사하며 차이점은 DCT 변환 후 주파수 계수를 큰 값 순서대로 추출하지 않고, 중간정도의 계수값을 추출하여 이용한 것이다. 주파수 대역에 따른 워터마크의 강인성[8]에 의하면 중요정보가 있는 저주파 대역이 아닌 다른 주파수 대역 중 일정한 주파수 계수값을 가지는 대역에서 공격에 강인한 특성을 보였다.

3.1. 워터마크 삽입 방법

워터마크의 삽입은 I. Cox가 제안한 방법과 유사하며 삽입시 식 (4)를 이용하여 삽입하였다. 삽입시 원본데이터의 DCT 변환 후 일정한 주파수 계수값을 추출함으로써 저주파 대역에만 워터마크가 존재하지 않고 여러 대역으로 분산되고, 중간정도의 계수값을 이용함으로써 원본데이터에 작은 변형을 가져오는 효과를 얻을 수 있었다. 실제로 삽입시 사용한 주파수 계수값의 범위는 0.3에서 0.4 사이 값을 추출하여 워터마크를 그림 3과 같이 삽입하였다.

3.2. 워터마크 추출과 유사도 측정

워터마크의 추출은 삽입과정의 역순이며 삽입시 특정 대역에만 워터마크를 삽입하였으므로, 추출시에도 똑같은 대역을 추출하여 원본과의 차를 이용하여 워터마크를 추출하였다.

추출된 워터마크 X^* 와 원본 워터마크 X 의 유사도 측정은 식 (8)을 이용하여 계산하였다.

Cox의 방법과 본 논문에서 제시한 방법을 비교하기 위하여 디지털 오디오 데이터에 대한 SNR (Signal to Noise Ratio)을 식 (10)과 같이 계산하였다.

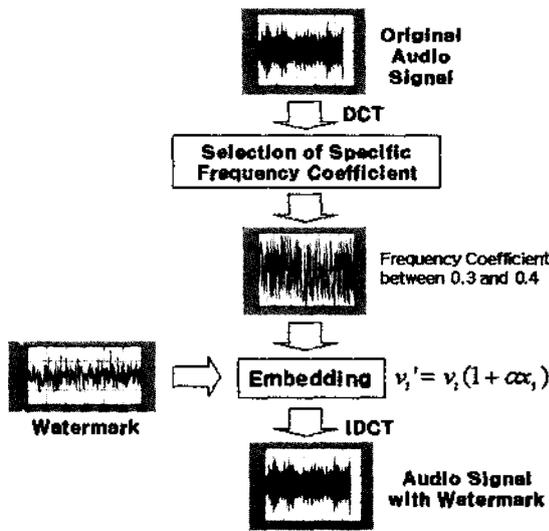


그림 3. 제안된 방식의 워터마크 삽입과정
Fig. 3. Watermark embedding of proposed method.

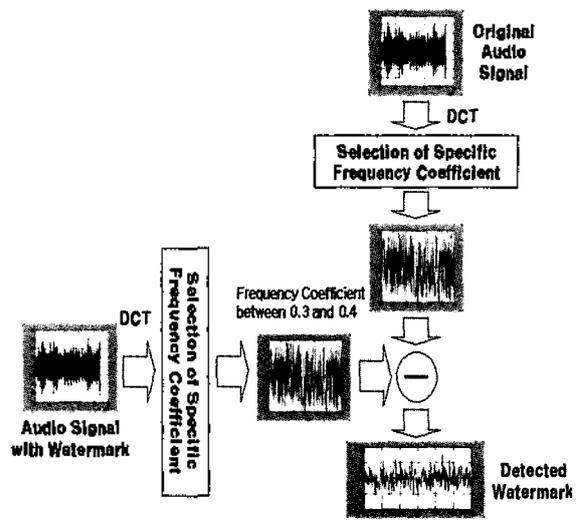


그림 4. 제안된 방식의 워터마크 추출과정
Fig. 4. Watermark extracting of proposed method.

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{Original Audio}}{\text{Noise}} \right) \quad (10)$$

Noise = Original Audio - Watermarked Audio

IV. 실험 결과

다양한 디지털 오디오에 대한 결과를 얻기 위해 4종류, 5개의 샘플을 사용하였다. 양방언의 “Frontier”, 모차르트의 “터키행진곡”, 박정현의 “꿈에”, SM타운의 “Summer Vacation”, 음성-EBS 수능 모의고사 5개의 실험용 데이터셋을 사용하였으며, 샘플링 주파수는 44100 Hz, 양자화 비트수는 16 bit, Mono로 샘플링된 디지털 오디오를 사용하였다. 음악의 연주시간은 5초이며 양방언의 음악은 국악과 서양악기가 조화를 이룬 연주곡, 클래식 음악으로 모차르트의 “터키행진곡”을 사용하였으며, 박정현의 곡은 일반 대중가요로 발라드 풍의 음악이며, SM타운의 곡은 일반 대중가요 중 댄스음악을 사용하였고, 음성의 경우는 EBS 수능 모의고사 중 국어듣기평가 부분을 사용하였다. 다양한 음악에서도 제안된 방식이 적용될 수 있음을 알기 위해 여러 종류의 음악 샘플을 가지고 실험하였다. 삽입한 워터마크는 길이가 300인 의사잡음코드를 사용하였으며, 키값은 120을 사용하였다. 생성된 워터마크를 원본 디지털 오디오에 삽입시 사용된 식 (4)의 α 값은 1.3, 0.5, 0.7 세 개의 값으로 실험하였다.

4.1. 워터마크에 대한 공격

워터마크가 삽입된 오디오 샘플에 대해서 공격을 가하지 않은 경우와 4가지의 공격을 가한 후, 워터마크를 추출하여 원본 워터마크와 추출된 워터마크 사이의 유사도를 측정하여 존재여부를 판단하였다. 유사도가 6이상이면 워터마크가 존재한다고 말할 수 있다.

사용한 공격으로는 MP3, Cropping, FFT (Fast Fourier Transform), Echo 공격을 하였다. 공격을 가하기 위해 사용한 소프트웨어로는 MP3 인코딩을 위해 “Wave To MP3 Maker 1.23”, MP3 디코딩을 위해 “MP3 To Wave Maker 1.23”, Cropping, FFT, Echo 공격을 위해 “CoolEdit Pro V1.0”을 사용하여 오디오 샘플을 편집하였다.

MP3 압축은 심리 음향 모델링을 사용한 손실 압축으로 데이터 압축시 높은 압축률을 가지지만 많은 정보를 잃어버리게 된다. 이러한 데이터 손실에서도 워터마크가 제거되지 않아야 하며 현재 인터넷을 통해 전송되는 오디오 파일 대부분이 MP3로 압축이 되어 있어, MP3압축 공격을 시행하였다. Cropping 공격은 연주시간이 5초인 워터마크된 샘플에 2초간의 워터마크가 전혀 삽입되어 있지 않은 원본 데이터를 삽입하여, 워터마크에 대해 직접적인 손실을 주었다. FFT 공격은 쿨에디트에 미리 설정된 ‘Sub-Woofers Boost’ 라는 필터를 사용하여 저주파 부분에 변형을 가하였다. 워터마크가 주로 중요정보가 있는 저주파 대역에 존재하므로 워터마크가 존재할 가능성이 높은 저주파 대역을 FFT필터를 통과시켜 직접 변형을 가함으로써 워터마크를 파괴하려는 공격을 시행하였다. 마지막 공격으로 Echo 공격은 Initial Volume 70%, Decay

75%, Delay 100 ms로 설정하여 Echo를 삽입함으로써 전체적으로 똑같은 오디오 데이터가 에코(Echo)형태로 삽입되면서 워터마크에 변형을 가는 공격을 하였다.

4.2. 결과 분석

각 샘플 데이터에 대한 실험 결과 표 1에서 표 5를 보면 MP3와 Cropping 공격에 대해서는 가중치 값의 크기에 상관없이 두 방법에서 모두 워터마크를 확인할 수 있었

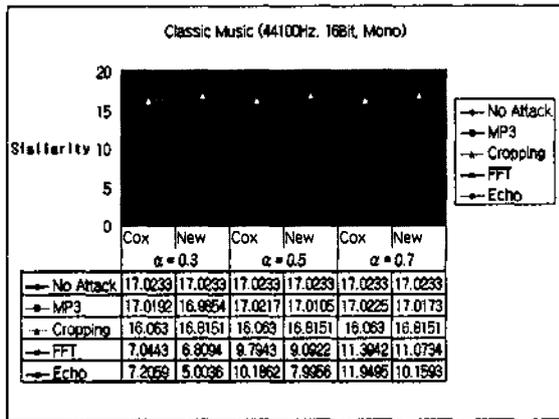


표 1. 클래식 음악에 대한 실험 결과
Table 1. Experiment result of a classic music.

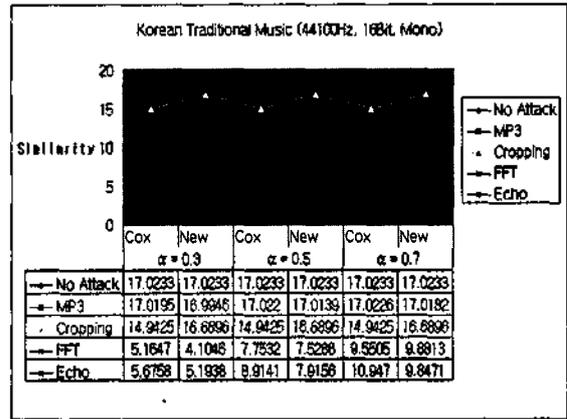


표 2. 국악 음악에 대한 실험 결과
Table 2. Experiment result of a Korean Classical music.

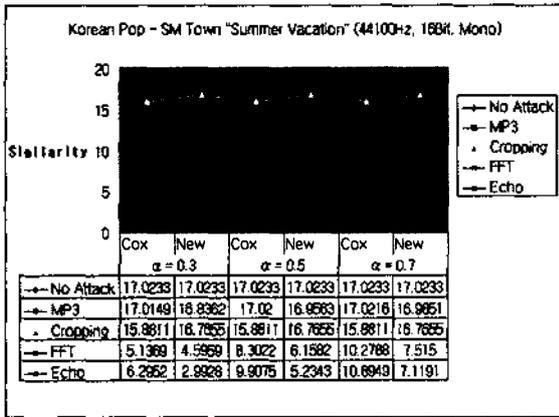


표 3. 대중가요(댄스) 음악에 대한 실험 결과
Table 3. Experiment result of a dance music.

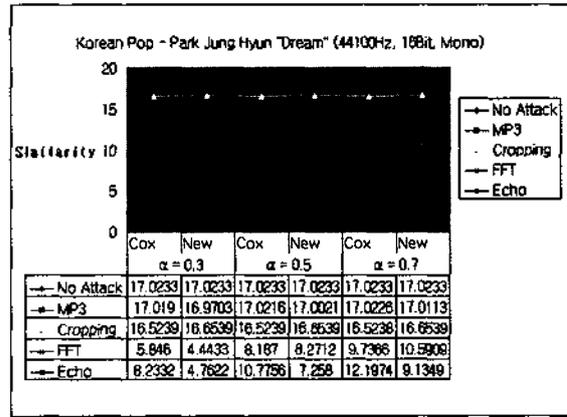


표 4. 대중가요 (발라드) 음악에 대한 실험 결과
Table 4. Experiment result of a ballad music.

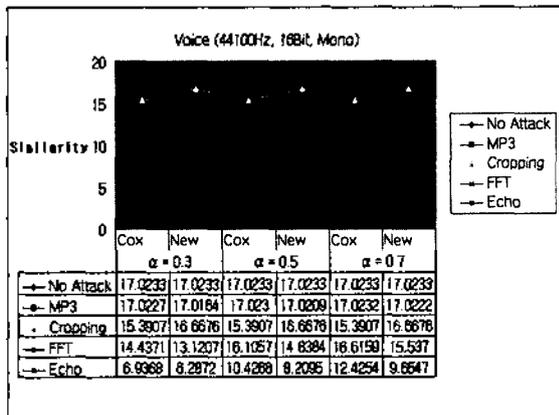


표 5. 음성에 대한 실험 결과
Table 5. Experiment result of a voice.

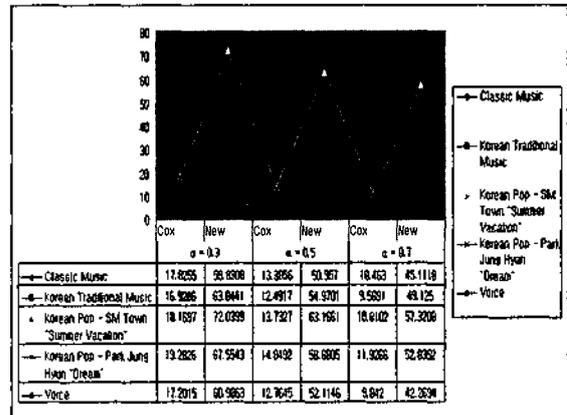


표 6. 각 종류별 음악의 가중치별 SNR
Table 6. SNR by scaling parameter of each kind music.

다. 그러나 FFT나 Echo 공격의 경우 Cox방법에서는 클리시 음악 (표 1)과 음성 (표 5)에 대해서는 모든 가중치 값에서 워터마크 추출이 가능하였고, 가중치 값이 0.5 이상이면 모든 음악에 대해서 워터마크를 확인할 수 있었다. 제안한 방법에서는 가중치가 0.5 이상이면 대중가요 즉 댄스음악 (표 3)을 제외하고는 모든 음악에서 워터마크를 추출할 수 있었고, 가중치를 0.7로 준 경우에는 모든 공격에 대해서 워터마크를 추출할 수 있었다.

제안된 방식에서는 가중치가 0.7 이상이면 모든 공격에 대해서 워터마크를 추출할 수 있었고, Cox가 제안한 방식은 가중치가 0.5 이상일 때 모든 공격에 대해서 워터마크를 추출할 수 있었다. 그러나 제안된 방식과 Cox방식의 각 음악에 대한 가중치별 SNR을 비교한 표 6을 보면 Cox방식에서 가중치가 0.5일 때 SNR보다 제안된 방식에서 가중치가 0.7일 때 SNR이 훨씬 좋게 나왔다. 또한 음성 데이터의 경우 Cox의 방법은 α 값에 상관없이 워터마크의 삽입으로 인한 노이즈를 청각인지 가능하였으나 제안된 방법에서는 α 가 0.5이하인 경우에 노이즈가 거의 들리지 않았다. 워터마크의 원래 목적이 최대한 원본 데이터의 변화없이 저작권 정보를 숨기는데 있으므로, 제안된 방식이 높은 SNR을 보이므로 Cox 방식보다 우수하며, 심리음향 모델링을 이용하지 않으므로 계산이 간단하여 실시간으로도 충분히 검출이 가능하다.

V. 결론

본 논문에서는 I. Cox가 제안한 스프레드 스펙트럼 방식을 이용한 워터마크 삽입방법에서 워터마크가 삽입이 되는 주파수 대역을 바꿈으로서 여러 가지 공격에 강인하면서도 기존의 방식보다 좋은 음질의 워터마크된 디지털 오디오 데이터를 얻고자 하였다.

본 논문에서 제안한 방식을 이용하여 4종류-국악, 클래식, 가요, 음성-의 디지털 오디오 신호에 워터마크를 삽입하고, 공격을 가한 후 워터마크를 추출해 본 결과가 가중치 α 값이 0.7 이상인 경우는 모든 공격에서 워터마크를 추출할 수 있었다. I. Cox가 사용한 방법과 제안한 방법과의 SNR을 비교해 본 결과 제안한 방식이 훨씬 우수한 성능을 보임을 알 수 있었다. 특히 음성의 경우 Cox의 방법은 워터마크 삽입으로 인한 노이즈를 모든 α 값에서 인지할 수 있었고 제안된 방법에서는 α 가 0.7인 경우에만 노이즈가 들렸으며, 두 방법의 음질 차이를 귀로 쉽게 알 수 있었다.

삽입된 워터마크가 사람의 귀에 인지되지 않게 하기 위해 심리음향 모델링을 사용용 하여 가중치 α 값을 찾는 연구가 있었다. 그러나 심리음향 모델링과 같은 복잡한 수식을 사용하지 않고, 삽입이 되는 주파수 대역만 바꿔 줌으로서 공격에 강인한 고음질의 워터마크 된 디지털 오디오 데이터를 얻을 수 있었다.

향후 연구 과제로서 좀더 다양한 장르의 음악에 대한 실험을 통하여 제안한 방식이 모든 음악에도 적용이 가능함을 보여야겠다. 또한 스프레드 스펙트럼 방식의 경우 PN 시퀀스를 사용하기 때문에 시간 축 공격이 가해질 경우 PN 시퀀스의 동기가 맞지 않아 검출이 불가능해진다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 짧은 시간의 에코를 삽입하여 에코의 지연 정도를 파악함으로써 시간축 공격을 알아낼 수 있다[4].

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 울산대학교 네트워크 기반 자동화연구센터의 지원에 의한 것입니다

참고 문헌

1. 송관호, "향후 인터넷의 발전전망," 정보처리, 7 (3), 3-8, 2000.
2. 최문경, "디지털 콘텐츠 산업 육성방안," 생산성논집, 16 (1), 85-105, 2002.
3. I. J. Cox, J. Kilian, T. Leighton and T. Shamon, "Secure spread spectrum watermarking for multimedia," *IEEE Transaction on Image Processing*, 6 (12), 1673-1687, 1997.
4. 정사라, 홍진우, "시간축 변형을 고려한 디지털 오디오의 계층적 워터마크," 한국음향학회지 21 (8), 719~726, 2002.
5. M. Swanson, B. Zhu, A. Tewlik and L. Boney, "Robust audio watermarking using perceptual masking," *Signal Processing*, 66 (3), 337-355, May 1998.
6. 우동훈, 정의필, "주파수 대역에 따른 워터마크의 감인성," 한국 신호처리·시스템 학회 학술대회 논문집, 3 (1), 37- 40, 2002.
7. 석종원, 홍진우, "디지털 오디오 워터마킹 기술의 최신동향 및 개발," 한국음향학회 학술발표대회 논문집, 19 1(s), 71-74, 2000.
8. W. Bender, D. Gruhl and N. Morimoto, "Techniques for data hiding," *Proc. SPIE*, 2420, 40, San Jose, CA, Feb. 1995.
9. I. J. Cox, M. L. Miller, and J. A. Bloom, "Digital Watermarking," Morgan Kaufman Publishers, San Francisco, CA, 2001.
10. 석종원, 홍진우, "디지털 오디오의 저작권 보호를 위한 워터마크 삽입방법," 한국음향학회 학술발표대회 논문집, 19 1(s), 2000.
11. S. Katzenbeisser and F. Petitcolas, "Information hiding techniques for steganography and digital watermarking," Artech House, MA, 2000.

저자 약력

• 우 동 훈 (Dong-Hoon Woo)



1994년~2001년: 울산대학교 컴퓨터·정보통신공학부 (공학사)

2001년~2003년: 울산대학교 대학원 컴퓨터·정보통신학과 (공학석사)

* 주관심분야: 디지털 신호처리, 멀티미디어 데이터 압축

• 정 의 필 (Ui-Pil Chong)



1978년: 울산대학교 전기공학과 (공학사)

1980년: 고려대학교 전기공학과 (공학석사)

1985년: 미국 Oregon State University (공학석사)

1997년: 미국 Polytechnic University (공학박사)

1997년~현재: 울산대학교 컴퓨터·정보통신공학부 부교수

* 주관심분야: 신호처리, 데이터압축, 컴퓨터음악