

특집논문 (Special Paper)

방송공학회논문지 제22권 제3호, 2017년 5월 (JBE Vol. 22, No. 3, May 2017)

<https://doi.org/10.5909/JBE.2017.22.3.295>

ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

DWT의 주파수 특성을 이용한 실험적 디지털 영상 워터마킹

강 이 슬^{a)}, 이 용 석^{a)}, 서 영 호^{b)}, 김 동 육^{a)}‡

An Empirical Digital Image Watermarking using Frequency Properties of DWT

I-Seul Kang^{a)}, Yong-Seok Lee^{a)}, Young-Ho Seo^{b)}, and Dong-Wook Kim^{a)}‡

요 약

디지털 영상 콘텐츠는 가장 정보 함축적이며 고부가가치의 콘텐츠이다. 따라서 이 콘텐츠들의 지적재산권을 보호할 필요가 있으며, 본 논문도 이것을 목적으로 한 디지털 워터마킹 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 디지털 영상에 대한 2차원 이산웨이블릿변환 (2-Dimensional Discrete Wavelet Transform, 2D-DWT)의 주파수 특성을 이용하며, 영상의 국부적 또는 특정 데이터를 사용하지 않고 전역적 데이터에 디지털 워터마크를 삽입하는 방법을 사용한다. 디지털 워터마크를 삽입하는 방법은 간단한 양자화 인덱스 변조 (Quantization Index Modulation, QIM) 방법을 사용하며, 워터마크 데이터를 다중으로 삽입하는 다중 워터마킹 방식을 사용한다. 워터마크를 추출할 때 다중 워터마크를 모두 추출하여 간단한 통계적 방법으로 최종 워터마크 데이터를 결정한다. 이 방법은 워터마크 삽입과정에서의 파라미터들을 실험적으로 결정하는 실험적 방법이다. 제안하는 방법은 다양한 공격에 대해 다양한 영상을 대상으로 실험을 수행하며, 기존의 대표적인 방법들과 그 성능을 비교하여 제안한 방법의 우수성을 보인다.

Abstract

Digital video content is the most information-intensive and high-value content. Therefore, it is necessary to protect the intellectual property rights of these contents, and this paper also proposes a watermarking method of digital image for this purpose. The proposed method uses the frequency characteristics of 2-Dimensional Discrete Wavelet Transform (2D-DWT) for digital images and digital watermark on global data without using local or specific data of the image for watermark embedding. The method to insert digital watermark data uses a simple Quantization Index Modulation (QIM) and a multiple watermarking method that inserts the same watermark data in multiple. When extracting a watermark, multiple watermarks are extracted and the final watermark data is determined by a simple statistical method. This method is an empirical method for experimentally determining the parameters in the watermark embedding process. The proposed method performs experiments on various images against various attacks and shows the superiority of the proposed method by comparing the performance with the representative existing methods.

Keyword : digital image watermarking, frequency property, 2-dimensional discrete wavelet transform (2D-DWT), global data, empirical method

I. 서 론

디지털 영상콘텐츠는 디지털 미디어 중 가장 함축적인 정보를 가지고 있으며 고부가가치의 콘텐츠이다. 따라서 이 콘텐츠의 소유권(ownership) 또는 지적재산권(intellectual property right)은 마땅히 보호되어야 하며, 이 문제는 약 30년간 연구되어 왔다^[1]. 지적재산권을 보호하는 조치는 허락되지 않은 자에게 그 콘텐츠 자체를 숨겨 콘텐츠의 내용을 인식할 수 없도록 하는 암호화^[2]와 콘텐츠에 제작자의 정보를 숨기고 필요할 때마다 그 정보를 추출하여 소유권을 주장하도록 하는 방법을 사용하고 있다. 후자의 방법으로는 디지털 워터마킹(digital watermarking, DWM)^[1]이 가장 주목을 받고 있으며, 본 논문 또한 이 방법에 대한 연구이다.

DWM은 소유권 증명(proof of owner), 콘텐츠 인증(authentication), 무결성(integrity) 증명, 복사/복제 제어(copy control), 콘텐츠 추적(tracking), 방송 모니터링(broadcasting monitoring) 등 매우 다양한 용도로 사용되나^[1], 이 중 가장 많은 연구가 소유권 증명에 대해 이루어져 왔고, 본 논문도 이것을 목적으로 한다. DWM은 워터마크(watermark, WM)를 추출할 때 필요한 콘텐츠 정보의 정도에 따라 blind 와 non-blind 워터마킹으로 구분하기도 한다^[1]. Non-blind 워터마킹은 WM를 추출할 때 원 영상정보를 사용하는 방법이며, blind 워터마킹은 아무런 원 영상 정보도 사용하지 않는 방법이다. 일반적으로 기술적 난이도 측면에서는 blind 워터마킹이 Non-blind 워터마킹에 비해 상대적으로 높은 것으로 알려져 있다^[1]. 또한 디지털 콘텐츠는 콘텐츠에 내재된 WM 정보를 손상시킬 목적으로 디지털 콘텐츠

를 변형하는 악의적 공격과 콘텐츠의 배포나 전송을 위해 필요한 데이터를 압축하는 등의 비악의적 공격을 받는 것으로 간주한다^[1]. DWM은 이러한 공격에 대해 WM가 살아남도록 하는 강인성(robustness) 워터마킹과 이러한 공격을 받으면 원 콘텐츠에 손상이 가도록 하는 fragile 워터마킹으로 구분하기도 한다^[1]. 어떤 방법이건 원 콘텐츠에 WM정보가 삽입되었다는 것이 가시적으로 드러나지 않도록(비)가시성, invisible)하는 방법과 가시적으로 WM 정보가 보이도록(가시성, visible)하는 방법으로 분류하기도 한다^[1]. 이 중 논문의 방법은 WM의 비가시성을 갖고 공격에 강인한 blind 워터마킹에 해당한다.

디지털 영상에 대한 DWM 방법은 공간영역에서의 WM에서 비롯하여 다양한 주파수영역에서의 WM까지 많은 연구가 진행되어 왔다. 최근에는 2차원 이산 웨이블릿 변환(2-dimensional discrete wavelet transform, 2D-DWT)을 이용한 방법들이 주로 연구되고 있으며, 이들의 결과도 다른 방법들에 비해 우수함을 보이고 있다. 본 논문 또한 2D-DWT를 이용한 방법을 제안하고자 한다. 먼저 2D-DWT를 사용하는 기존의 방법들을 소개하면 다음과 같다.

먼저 2D-DWT의 1-레벨(level) 변환을 이용하여 각 부대역의 공격에 대한 강인성을 실험한 결과를 발표하였는데^[3~6], 이 중 LL1(앞의 문자는 가로방향, 뒤의 문자는 세로방향 필터링을 나타내며, L은 저주파통과 필터링, H는 고주파통과 필터링을 의미함. 맨 우측 숫자는 변환레벨을 나타냄. LL1은 가로방향과 세로방향 모두 저주파통과 필터링한 레벨-1의 부대역(subband)을 나타냄)을 다른 부대역보다 10배 강하게 DWM을 삽입하고, JPEG 압축공격과 Salt&pepper 잡음 첨가 공격을 가한 결과, 공격이 강해짐에 따라 LL1은 WM의 추출률이 급격히 떨어지는 반면 다른 부대역은 비슷한 추출률을 보였다. 이와 비슷하게 [7]에서는 다른 다양한 공격을 시험하였으며, 대부분의 공격에 대해서 HH1이 가장 높은 추출률을 보였다.

2-레벨 이상의 변환을 사용한 방법들도 연구되어 왔는데, [8]은 512×512 영상의 화소들을 4×4 블록들로 나누고 그 중 우하측 화소들을 모아 256×256 영상을 만들어 2-레벨 2D-DWT한 결과 중 HH 부대역에 WM를 삽입하였다. 이 방법은 비교적 적은 양의 WM을 삽입한 방법으로, average filtering, median filtering, crop 등에서 낮은 추출률을 보였

a) 광운대학교 전자재료공학과(Department of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University)

b) 광운대학교 인체니움학부대학(School of Liberal Arts, Kwangwoon University)

‡ Corresponding Author : 김동욱(Dong-Wook Kim)
E-mail: dwkim@kw.ac.kr
Tel: +82-2-940-5167

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4668-743X>

※ 이 논문은 2017년도 광운대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

※ 이 연구는 2016년도 정부(교육부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2016R1D1A1B03930691).

· Manuscript received February 28, 2017; Revised May 22, 2017; Accepted May 22, 2017.

다. 2D-DWT와 DCT(discrete cosine transform)를 사용하는 방법을 [9]에서 제안하였는데, 이 방법은 HL1, LH1, HL2, LH2, HH2의 계수들을 8×8 DCT하여 좌표 (6,7)의 계수와 좌표 (7,6)의 계수를 조정하는 방법으로 WM를 삽입하였다. 이 방법은 median 필터링 공격에 대해 약 0.7정도의 추출률을 보였다. 2-레벨 변환 후 HH1과 HH2에 64×64 와 32×32 WM를 각각 삽입하여 WM의 양과 비가시성에는 큰 상관관계가 없음을 보이기도 하였다^[10].

영상의 컬러(color)정보를 DWM에 사용하는 방법도 [11]에서 제안되었는데, 이 방법은 인간의 시각시스템(human visual system, HVS)에 가장 민감성이 떨어지는 blue 채널에 WM를 삽입하고 다양한 필터링 공격을 실험하여 0.9 정도의 높은 추출률을 보였다. 또한 [12]에서는 RGB채널을 YCbCr 채널로 변환하여 그 중 가장 HVS에 덜 민감한 Cb 채널을 선택, 4-레벨 2D-DWT한 후 HL4에 WM를 삽입하였다. 그 결과 대체적으로 0.9이상의 높은 NCC값을 보였으나 rotation과 같은 기하학적 공격에는 낮은 추출률을 보였다.

그 밖에 WM를 삽입하는 방법에 있어서 QIM(quantization index modulation)을 사용하는 방법들이 제안되었는데^[13~15], 이 방법들 역시 특정 공격에만 높은 강인성을 보이거나

나^[13], 기하학적 공격에 낮은 강인성을 보였다^{[14][15]}. 이에 기하학적 공격에 대한 강인성을 목표로 한 방법을 제안하기도 하였다^[16]. 이 방법은 1-레벨 2D-DWT를 사용하였으며, LL1 계수를 4×4 블록으로 나누어 SVD(singular value decomposition)한 후 최대값을 갖는 계수에 WM를 삽입하였다. 그러나 이 방법은 WM 추출 시 영상의 특징점을 사용하여 하므로 모든 특징점을 보관하여야 하는 단점(non-blind)을 갖고 있다.

기존 연구에 대한 위의 설명에서 보듯이, 지금까지의 방법은 주파수 변환 후 특정 주파수 대역 또는 그 중에서도 특정한 데이터에 WM를 삽입하는 방법들이다. 이것은 삽입되는 WM의 양과 관련되며, WM의 양 뿐만 아니라 WM의 강도와 WM정보의 비가시성에 영향을 미친다. 이 중 WM의 강도는 높을수록 강인성이 높아지는 반면 비가시성은 낮아지는 상보적(trade-off) 특성을 갖는다. 그러나 본 논문에서는 2D-DWT의 특정 레벨의 모든 계수에 WM를 삽입하는 전역적인 방법을 사용하여, 많은 양의 WM정보를 삽입하지만 그 강도를 조절하여 비가시성을 손상시키지 않고 공격에 대한 강인성도 높이는 방법을 제안하고자 한다. 이 방법에서 2D-DWT의 변환레벨은 주파수 특성에 따라 결정하며, WM 추출 시 다중 WM를 모두 추출하여

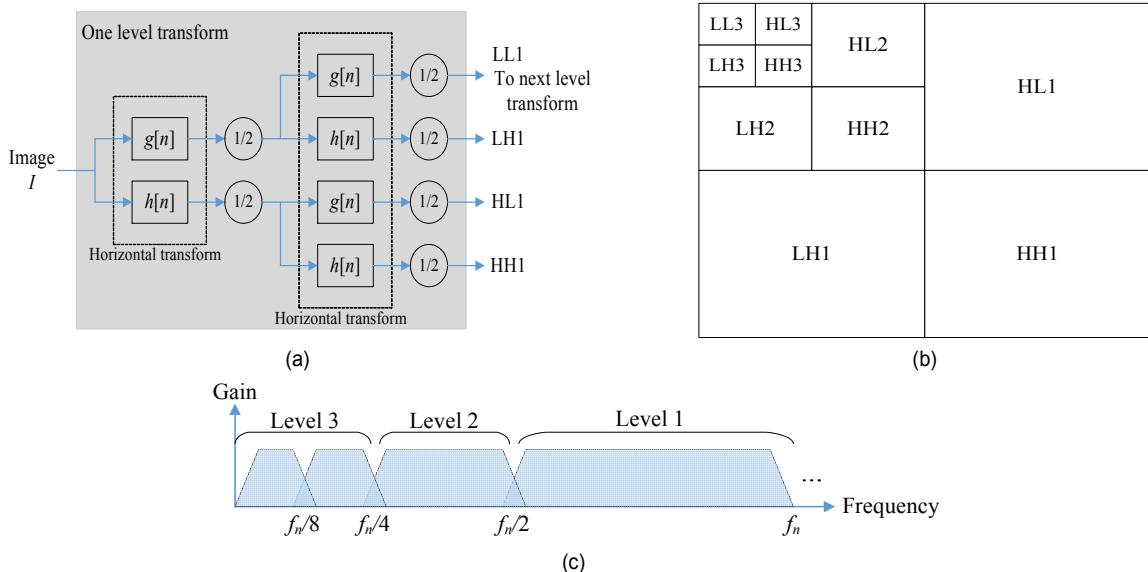


그림 1. 2D-DWT와 부대역의 주파수 대역: (a) 필터뱅크, (b) 3-레벨 2D-DWT의 부대역, (c) 3-레벨 DWT의 주파수 대역.

Fig. 1. 2D-DWT and the frequency band of subbands: (a) filter bank, (b) subbands after 3-level 2D-DWT, (c) frequency band for 3-level DWT.

간단한 통계적 방법으로 최종 WM를 결정하는 방법을 사용한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 먼저 2장에서는 2D-DWT의 주파수 특성과 이 특성에 대비한 영상데이터의 주파수 특성을 분석한다. 이를 바탕으로 3장에서는 본 논문에서 제안하는 디지털 영상의 DWM 방법을 단계별로 설명한다. 4장에서는 제안한 방법을 실험을 통해 개인성과 비가시성을 검증하며, 기존 방법들과의 비교를 통해 제안한 방법의 우수성을 입증한다. 이를 기반으로 해서 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 영상의 2D-DWT 부대역의 주파수 특성

2D-DWT는 2차원 데이터를 변환레벨과 부대역에 따라 방향적 주파수 대역 성분으로 재분배하는 변환이다^[17]. 그

림 1(a)는 2D-DWT의 필터뱅크(filter bank)를 나타내고 있는데, 2차원 데이터, 즉 영상 데이터의 가로방향과 세로방향으로 각각 저주파통과 필터링($g[n]$)과 고주파통과 필터링($h[n]$)을 수행하여 네 개의 부대역으로 재편된다. 그림에서 $1/2$ 는 $1/2$ 서브샘플링을 뜻한다. 이 변환결과를 더 높은 레벨로 변환할 때는 LL 부대역만을 사용하여 필터링 한다. 그림 2(b)에 3-레벨 변환한 결과의 부대역들을 보이고 있다.

그림 1(c)는 3-레벨 1차원 DWT 결과 부대역들이 점유하는 주파수 대역을 개략적으로 보이고 있다. 여기서 최고 주파수 f_n 은 인접화소마다 값이 변화하는 주파수 대역을 나타낸다. 1-레벨 DWT 결과 부대역들은 0에서 f_n 까지 모든 주파수 대역을 점유하지만, 그 중 LL1 부대역으로 레벨 2 변환이 이루어지므로 레벨 2 부대역들은 0에서 $f_n/2$ 까지의 주파수 성분을 갖고 레벨 1 부대역(HL1, LH1, HH1)은

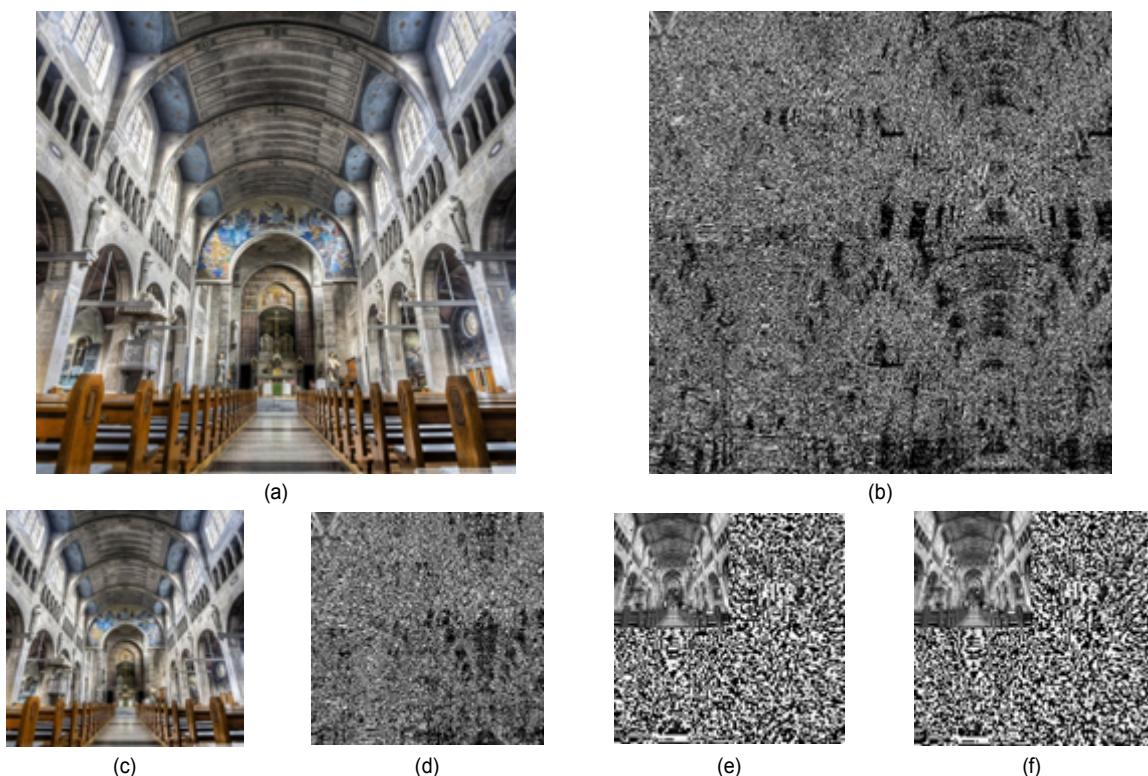


그림 2. 2D-DWT의 예: (a) 1,024×1,024 원영상, (b) (a)를 4-레벨 2D-DWT 결과, (c) (a)를 512×512로 다운샘플링한 영상, (d) (b)를 3-레벨 2D-DWT 한 결과, (e) (b)의 레벨-4 네 부대역, (f) (d)의 레벨-3 내 부대역

Fig. 2. An example of 2d-DWT: (a) 1,024×1,024 original image, (b) result from 4-level 2D-DWT for (a), (c) 512×512 down-sampled result from (a), (d) result from 3-level 2D-DWT for (c), (e) four level-4 subbands of (b), (f) four level-3 subbands of (d).

$f_n/2$ 에서 f_n 까지의 주파수 성분을 갖는다. 마찬가지로 변환레벨이 더 증가하면 저주파 대역을 분할하여 주파수 대역을 나눠 갖는다.

한편, 영상미디어의 발전은 특수목적용인 VR(virtual reality)나 AR(augmented reality) 등을 제외하고는 고해상도로 발전하고 있다. 그러나 특정 씬(scene)을 카메라에 담을 때 해상도가 네 배라고 해서 씬의 크기가 네 배가 되는 것은 아니다. 즉, 특정 씬을 촬영할 때 카메라의 해상도와는 무관하게 촬영목적에 맞게 영상이 형성된다는 것이다. 물론 영상 콘텐츠에 따라서 다르겠지만, 비슷한 종류의 서로 다른 두 해상도의 영상을 2D-DWT하면 어떻게 될까? 극단적인 예를 그림 2에 나타내었다. $1,024 \times 1,024$ St. George Church(a) 영상을 가로와 세로를 각각 1/2로 다운샘플링(c)하고, 원영상은 4-레벨(b), 다운샘플링한 영상은 3-레벨 2D-DWT(d)를 각각 수행하여 두 결과의 같은 주파수 부대역들을 비교하였다. 그림 1(c)에서 설명한 것과 같이 (c)영상의 최대주파수를 f_n 이라고 하면 (a)영상의 최대주파수는 $2f_n$ 이 될 것이다. 따라서 두 영상의 2D-DWT에서 (b)의 레벨 l 부대역들의 주파수는 (d)의 레벨 $l-1$ 부대역들과 동일한 주파수 대역을 갖는다. 그림 2의 예에서는 (b)의 레벨-4 네 부대역(e)과 (d)의 레벨-3 네 부대역(f)을 비교하고 있다. 그림에서 보듯이 (e)와 (f)의 네 부대역이 서로 거의 같다는 것을 알 수 있다.

이상의 설명과 실험에 따르면 영상의 주파수성분은 영상의 해상도보다는 영상의 종류에 따라 결정된다고 볼 수 있다. 물론 그림 2(b)에서 보는 바와 같이, 고해상도의 레벨-1 부대역들도 상당한 에너지를 갖고 있는 것을 볼 수 있으나, 결론적으로는 비슷한 종류의 영상은 동일한 주파수 대역의 부대역이 비슷한 에너지 분포를 갖는다는 것을 알 수 있다.

III. DWT의 주파수 특성을 이용한 디지털 워터마킹 방법

본 장에서는 본 논문에서 제안하는 디지털 영상의 DWM 방법을 설명한다. 먼저 제안하는 방법에서 사용될 방법과

사용되는 파라미터들을 실험을 통해 도출하고, 이들을 요소로 하는 DWM 방법을 구성한다.

1. 공격에 강인한 주파수 밴드와 WM 삽입 방법 도출

본 논문에서 제안하는 방법은 다음의 방법을 기본적으로 적용한다.

- ① 영상의 YCbCr 컬러형식 중 Y성분을 DWM 대상 데이터로 사용한다.
- ② 2D-DWT를 사용하며, 특정 레벨의 네 부대역 모두에 WM 정보를 삽입한다.
- ③ 네 부대역의 각 계수에 WM 한 비트(bit)씩 삽입하며, 따라서 WM 데이터를 여러번 반복(다중 WM) 삽입한다.
- ④ 각 계수에 WM 비트를 삽입하는 방법은 간단한 QIM 방식을 사용한다.

위 기본 방법 중 ④의 QIM 방식은 [18]의 방식과 비슷하며, 계수 c_i 를 양자화하고(c'_i) WM 비트에 따라 값을 결정하는 방법을 그림 3에 나타내었다. 그림에서 양자화 결과 값에 표시된 '0' 또는 '1'은 WM 비트를 나타낸다. 양자화 스텝 Δ_L 은 DWM 후의 화질에 영향을 주므로 목표화질에 따라 결정된다. 계수 c_i 는 기본적으로 Δ_L 로 양자화 되나, WM 비트에 따라 c_i 값에 가장 가까운 해당 비트의 양자화된 값을 갖도록 WM 비트를 삽입한다.

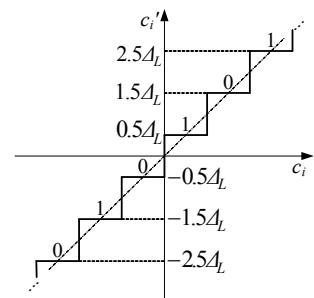


그림 3. 양자화기
 Fig. 3. Quantizer



그림 4. 1,024×1,024 테스트 영상들: (a) St. George Church, (b) Two Horses, (c) Neuschwanstein Castle, (d) Four Kittens.
Fig. 4. The 1,024×1,024 test images: (a) St. George Church, (b) Two Horses, (c) Neuschwanstein Castle, (d) Four Kittens.

또한 본 논문은 실험적 방법으로 알고리즘이 완성되는 데, 이 실험에 사용할 영상들과 실험방법을 표 1에 요약하였다. 총 다섯 가지의 해상도를 포함하였으며, 각 해상도마다 네 개의 영상을 테스트 영상으로 하였고, 그 네 영상은 주된 주파수 성분이 서로 다르도록 구성하였다. 그 중 1,024×1,024 테스트 영상들을 그림 4에 보였다. 각 영상의 2D-DWT 레벨은 최저 2-레벨에서 최고 표 1의 레벨까지 변환하였으며, 2-레벨부터 최저주파수 대역의 네 부대역에 DWM을 수행하였다. 예를 들어 512×512 영상의 경우 2-레벨 변환하여 레벨 2의 네 부대역에 WM를 삽입한 경우, 3-레벨 변환하여 레벨 3의 네 부대역에 삽입한 경우 그리고 4-레벨 변환하여 레벨 4의 네 부대역에 삽입한 경우를 실험 대상에 포함하였다. 공격의 종류는 대표적인 다섯 종류의 공격을 포함하였으며, 각 공격은 세 가지 강도의 공격을 하였다. 모든 DWM 실험에서 WM의 비가시성으로 WM 삽입 후 화질이 PSNR(peak signal-to-noise ratio)^[19] 45[dB]를 유지하도록 하였다.

본 장에서는 세 가지의 연속적인 실험을 진행하여 제안하는 알고리즘의 세부 방법을 결정한다. 이 네 실험에서 위에서 설명한 기본적인 방법을 변형한 내용을 표 2에 요약하였으며, 각 실험에서 변경되는 내용은 해당 실험에서 설명하기로 한다.

표 1. 테스트실험의 요약

Table 1. Summary of test experiments

Resolution	Highest 2D-DWT level	Attacks	
		Type	Intensity
512×512	4	JPEG compression	40, 60, 80
640×480	4	Median filtering	3×3, 5×5, 7×7
1,024×1,024	5	Gaussian noise addition	1%, 2%, 3%
1,920×1,080	5	Sharpening	2, 3, 4
2,048×2,048	6	Rotation	15°, 30°, 45°

표 2. 세 실험내용의 요약

Table 2. Summary of the three experiments

Experiment	Final WM data	Quantization step size
1	All the embedded WM sets	Same for all subbands
2	One WM set by statistical method	Same for all subbands
3	One WM set by statistical method	Adjustment according to subband energy

1.1 실험 1: 기본실험

위 설명에서 ①~④의 기본 방법을 그대로 적용하고, 모든 부대역의 양자화 스텝 Δ_L 은 동일한 크기로 DWM 후 45[dB]가 되도록 조정하였다. WM 추출은 다중으로 삽입

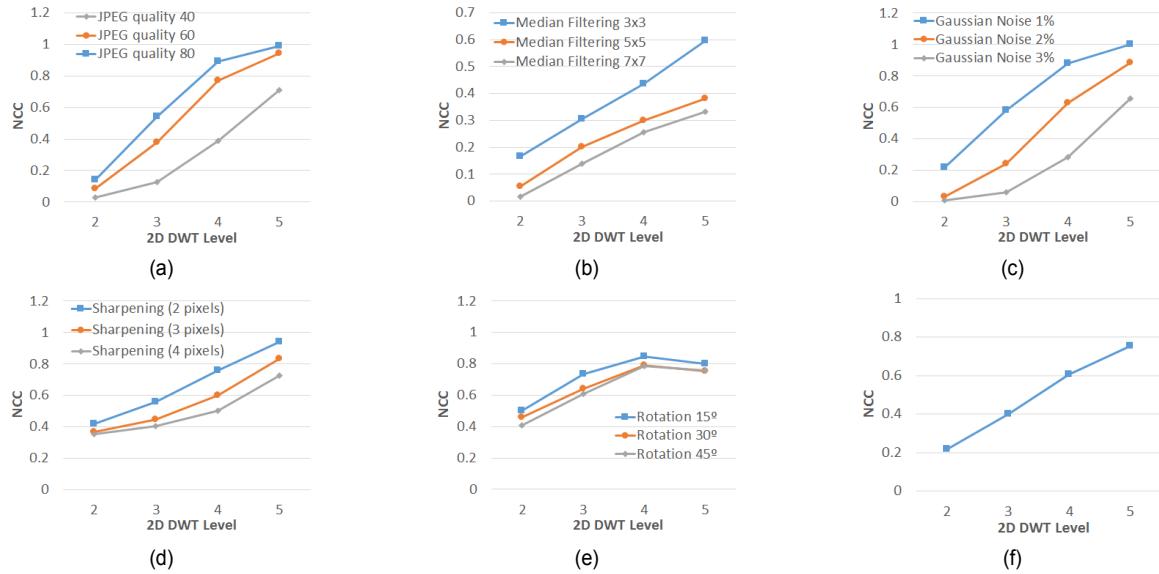


그림 5. 1,024×1,024영상의 실험 1 결과: (a) JPEG 압축 공격, (b) 미디언 필터링 공격, (c) 가우선 잡음첨가 공격, (d) 샤프닝 공격, (e) 회전 공격, (f) 모든 공격에 대한 평균.

Fig. 5. Experiment 1 results of 1,024×1,024 images for: (a) JPEG compression attacks, (b) median filtering attacks, (c) Gaussian noise addition attacks, (d) sharpening attacks, (e) rotation attacks, (f) average for all the attacks.

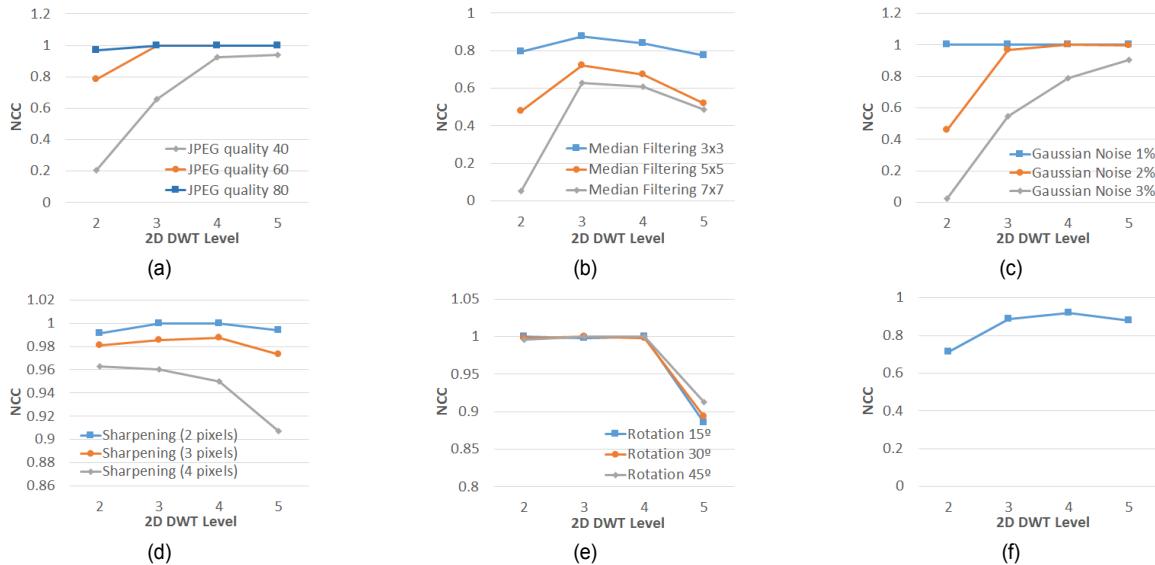


그림 6. 1,024×1,024영상의 실험 2 결과: (a) JPEG 압축 공격, (b) 미디언 필터링 공격, (c) 가우선 잡음첨가 공격, (d) 샤프닝 공격, (e) 회전 공격, (f) 모든 공격에 대한 평균.

Fig. 6. Experiment 2 results of 1,024×1,024 images for: (a) JPEG compression attacks, (b) median filtering attacks, (c) Gaussian noise addition attacks, (d) sharpening attacks, (e) rotation attacks, (f) average for all the attacks.

한 모든 WM 비트들을 추출하여 그 추출률을 원 WM와의 NCC(normalized cross correlation)^[20]값으로 계산하였다. 이 실험 결과 중 대표적으로 $1,024 \times 1,024$ 테스트 영상의 결과를 그림 5에 보이고 있는데, 이 외의 해상도 영상들로 이와 유사한 결과를 보였다. 그림 5는 공격의 종류별로 보이고 있고, 각 결과는 2D-DWT의 레벨에 따라 나타내었으며, (f)는 모든 공격에 대한 평균 추출률을 나타내고 있다.

먼저 예상한 대로 모든 공격에서 공격이 강해짐에 따라 추출률이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 2D-DWT 레벨에 따라서는 회전공격을 제외한 모든 공격에서 변환레벨이 증가할수록 추출률이 증가하는 것으로 나타났다.

1.2 실험 2: 통계적 방법에 의한 최종 추출 WM 결정

두 번째 실험은 실험 1과 달리 추출된 다중 WM 중 한 세트의 WM를 간단한 통계적인 방법을 사용하여 선택하는 것이다. 그 방법은 추출된 다중 WM를 세트별로 분류하고, 각 세트에서 동일한 위치의 비트들 중 가장 빈도수가 높은 값을 그 비트의 최종 값을 결정하는 것이다.

실험 1과의 비교를 위하여 실험 2의 결과 중 $1,024 \times 1,024$ 테스트 영상들의 데이터를 그림 6에 보였으며, 다른 해상도에 대한 결과도 유사하였다. 모든 공격에 대해 실험 1보다 추출률이 상당히 향상된 것을 볼 수 있으며, 공격의 강도에 따른 추출률의 변화는 실험 1과 같았지만, 각 공격에 대해 변환레벨에 따른 추출률은 공격의 종류에 따라 달랐다. JPEG 압축공격과 가우션 잡음첨가 공격은 대체로 레벨 증가에 따라 추출률이 증가하지만, 미디언 필터일 공격과 샤프닝 공격은 어느 정도 이상의 레벨에서는 오히려 추출률이 감소하였다. 회전공격은 거의 1의 NCC 값을 보이다가 5 레벨 변환에서는 큰 폭으로 감소하였다. 모든 공격에 대한 평균 추출률인 (f)에 의하면 레벨 4까지 증가하다가 레벨 5에서 감소하는 결과를 보였다.

1.3 실험 3: 부대역에 따라 양자화 스텝 크기 조정

실험 1과 2는 특정 레벨의 네 부대역에 WM를 삽입할 때 양자화 스텝의 크기를 동일하게 적용하였다. 그러나 특정 레벨의 네 부대역이 전체 영상에 미치는 영향이 각각 다르기 때문에 동일한 양의 데이터 변형이 서로 다른 영향을 미칠 수 있어 적절한 방법은 아닌 것으로 판단된다. 즉,

공격의 영향이 클수록 그 부대역은 더 강하게 WM를 삽입해야 하며, 그러기 위해서는 그 부대역의 양자화 스텝 크기를 크게 하여야 한다.

이에 본 논문에서는 이를 위한 예비실험을 진행하였다. 이 실험은 각 공격이 WM를 삽입하는 부대역에 미치는 영향과 그 부대역에 WM를 삽입하고 추출했을 때의 추출률을 비교하는 것이다. 그림 7에 공격의 영향을 측정하기 위한 실험방법을 보이고 있는데, 그 방법은 영상에 공격을 가한 결과에서 원 영상을 빼 공격만의 성분을 구하고, 이 성분을 원하는 2D-DWT하여 각 부대역의 에너지를 구하는 것이다. 일반적으로 2D-DWT를 수행한 결과의 부대역 중 LL 부대역과 나머지 부대역의 데이터 성격이 다르다. LL 부대역 데이터는 0에서 2^{b-1} (b 는 데이터를 표현하는 비트수)의 값을 가지지만, 나머지 부대역 데이터들은 0을 중심으로 하는 가우션 분포를 갖는다. 따라서 본 논문에서는 식 (1)과 같이 LL 부대역은 에너지의 표준편차를, 나머지 부대역은 RMS(root-mean-square) 값을 에너지로 설정하였다.

$$e_{S_i} = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^{mn} \left(c_i - \frac{1}{mn} \sum_{j=1}^{mn} c_j \right)^2} & \text{for } S \in \{LL\} \\ \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^{mn} (c_i)^2} & \text{for } S \in \{HL, LH, HH\} \end{cases} \quad (1)$$

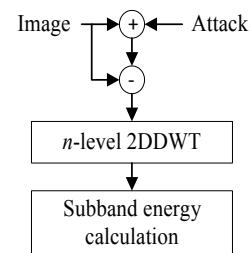


그림 7. 공격의 영향을 측정하기 위한 실험

Fig. 7. Experiment to estimate the effect of an attack

공격의 영향과 WM 추출률의 상관도를 확인하기 위해 그림 7의 실험결과와 실험 2의 데이터 중 $1,024 \times 1,024$ 영상을 4-레벨 2D-DWT한 예를 표 3에 같이 나타내었다. 이것은 그림 6(f)에서 $1,024 \times 1,024$ 영상이 4-레벨 2D-DWT한 경우 가장 높은 추출률을 보였기 때문이다. 표 3의 (a)는 그림 7의 실험결과이며, (b)는 실험 2의 데이터이다. 데이터

표 3. 공격의 영향에 대한 실험결과 중 1,024×1,024영상의 4-레벨 2D-DWT에 대한 결과의 예
Table 3. Example result from experiment on the effect of attack for 4-level 2D-DWT of 1,024×1,024 images.

Attack		(a) Effect of attack by energy				(b) WM extraction rate by NCC			
		LL	HL	LH	HH	LL	HL	LH	HH
No attack (original image)		149.349 (71.624)	16.211	15.598	20.128	-	-	-	-
Sharpening	1 pxl	0.318	0.759	0.766	1.456	0.961	0.810	0.804	0.479
	2 pxl	0.539	1.278	1.288	2.300	0.865	0.618	0.569	0.368
	3 pxl	0.765	1.760	1.771	2.903	0.728	0.492	0.459	0.337
Gaussian noise addition	1%	0.256	0.456	0.470	0.913	0.994	0.971	0.983	0.581
	2%	0.508	0.859	0.885	1.674	0.855	0.767	0.735	0.177
	3%	0.843	1.292	1.264	2.556	0.524	0.338	0.288	0.009
Median filtering	3×3	1.045	1.841	1.751	3.336	0.541	0.469	0.447	0.283
	5×5	2.198	3.872	3.936	7.172	0.390	0.330	0.309	0.167
	7×7	3.185	5.739	5.804	10.527	0.343	0.277	0.269	0.139
JPEG compression quality	80/100	0.237	0.409	0.439	2.373	0.712	0.413	0.376	0.056
	60/100	0.354	0.614	0.616	1.248	0.963	0.881	0.892	0.361
	40/100	0.686	1.180	1.216	0.901	0.996	0.989	0.980	0.605
Rotation	15°	54.176	12.292	12.839	6.721	0.834	0.855	0.840	0.857
	30°	67.896	11.921	12.995	15.248	0.776	0.796	0.780	0.802
	45°	72.336	10.162	11.317	26.927	0.787	0.797	0.775	0.788

중 첫 번째 열은 참고를 위하여 원 영상 자체의 에너지를 보이고 있는데, 괄호 내의 값은 표준편차 값이다.

먼저 (a)를 살펴보면, 예측한 대로 공격이 강해질수록 공격의 영향이 커진다는 것을 확인할 수 있다. 공격의 종류에 있어서는 회전공격이 가장 큰 영향을 미치고 있고, 그 다음이 미디언 필터링 공격으로 나타났다. 회전공격은 공격으로 인해 네 모서리의 데이터가 소멸되기 때문이며, 미디언 필터링은 4-레벨 변환을 수행하여 고주파성분을 많이 소멸시키기 때문인 것으로 판단된다. 상대적으로 샤프닝, 가우션 잡음첨가, JPEG압축 공격은 레벨-4 부대역에 상대적으로 적은 영향을 미치는 것으로 나타났다.

이제 (b)의 우측의 추출률 데이터와 좌측의 에너지의 효과에 대한 데이터를 비교해보자. 전체적으로 추출률은 공격의 영향에 반대의 경향을 보인다는 것을 알 수 있는데, 이것은 공격의 영향을 고려하지 않은 당연한 결과로 판단된다. 특정 공격에 대한 각 부대역의 데이터를 살펴보면, 공격이 부대역들에 고루 영향을 미치는 경우도 있지만, 대부분 서로 다른 양의 영향을 미치는 것을 볼 수 있고, 따라서 동일한 강도로 WM를 삽입한 결과의 추출률은 매우 다르게 나타는 것을 볼 수 있다.

1.3.1 각 부대역의 양자화 스텝 크기

따라서 각 부대역에 미치는 영향을 고려하여 각 부대역의 양자화 스텝 크기를 조절하여 예 WM 강도를 조절하는 것이 DWM 효율을 높이는 방법일 것이다. 그러나 DWM을 수행할 단계에서는 어떤 공격을 받을지 알 수 없기 때문에 표 3의 좌측 데이터를 미리 알 수는 없다. 따라서 원영상의 에너지 즉, 표 3의 맨 위열의 데이터만을 사용할 수밖에 없다. 또한 각 공격에 따라 다른 양자화 스텝을 사용할 수 없으므로 모든 공격에 적용할 한 세트의 양자화 스텝을 선택하여야 한다.

표 3의 (a) 혹은 (b)의 데이터를 보면, HL과 LH 부대역이 비슷한 공격영향 또는 추출률을 보이고, 나머지 부대역은 각각 다른 경향을 보이고 있다. 이를 기반으로 다양한 실험을 해 본 결과 식 (2)의 가중치(weighting factor, γ_{Sn})를 식 (1)의 에너지(e_{Sn})에 곱하여 양자화 스텝의 크기를 결정하며, 가중치는 LL, HL=LH, HH의 세 종류의 부대역에 대해 식 (3)의 비율로 부여하는 것이 가장 높은 추출률을 보였다.

$$\alpha_{Sn} = \gamma_{Sn} e_{Sn} \quad (2)$$

$$\gamma_{LLn} : (\gamma_{HLn} = \gamma_{LHn}) : \gamma_{HHn} = 1 : 2 : 3 \quad (3)$$

각 파라미터에서 첨자 $S \in \{LL, HL, LH, HH\}$ 는 부대역의 종류를 나타내며, n 은 변환레벨을 나타낸다. 식 (3)을 비율로 나타낸 것은 WM 비가시성을 조절하는 등의 목적이 있을 때 식 (3)의 비율을 유지하면서 실제 γ_{Sn} 의 값으로 조절하기 위함이다.

1.3.2 각 부대역 데이터의 양자화 범위

식 (2)로 양자화 스텝의 크기를 결정할 경우 해당 부대역 계수의 값의 범위가 너무 크거나 너무 작으면 과다하게 크거나 작은 양자화 스텝으로 결정된다. 따라서 본 논문에서는 부대역 에너지 값에 대해 상하 각각에 문턱치(threshold value)를 정하고 식 (4)와 같이 두 문턱치 사이의 값은 식 (1)의 에너지 값을 그대로 사용하고, 이 범위를 넘는 에너지는 두 문턱치로 포화시켜 사용한다. 이것을 그림으로 나타낸 것이 그림 8이다.

$$E_{Sn} = \begin{cases} T_{Sn,l} & \text{if } e_{Sn} < T_{Sn,l} \\ e_{Sn} & \text{if } T_{Sn,l} \leq e_{Sn} \leq T_{Sn,h} \\ T_{Sn,h} & \text{if } T_{Sn,h} < e_{Sn} \end{cases} \quad (4)$$

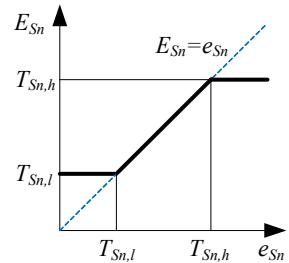


그림 8. 양자화 범위
Fig. 8. Quantization range

이상의 두 요소를 실험 2에 반영하여 추가 실험을 수행하였으며, 그 결과 중 실험 1 또는 실험 2와 같이 $1,024 \times 1,024$ 테스트 영상들의 결과 데이터를 그림 9에 보이고 있다. 실험 2와 비교하면, 대체로 비슷한 경향성을 보이나 JPEG 압축공격을 제외한 대부분의 공격에 대해 실험 2의 결과보다 높은 추출률을 보이고 있다. JPEG 압축공격은 실험 2에 비해 크게 향상되지 않았다. 반면, 샤프닝 공격에서는 상당한 추출률 향상을 보였다. 샤프닝 공격은 영상의 고주파 성분을 증가시키는 효과를 갖고 있어 큰 화소값을 더 크게, 작은

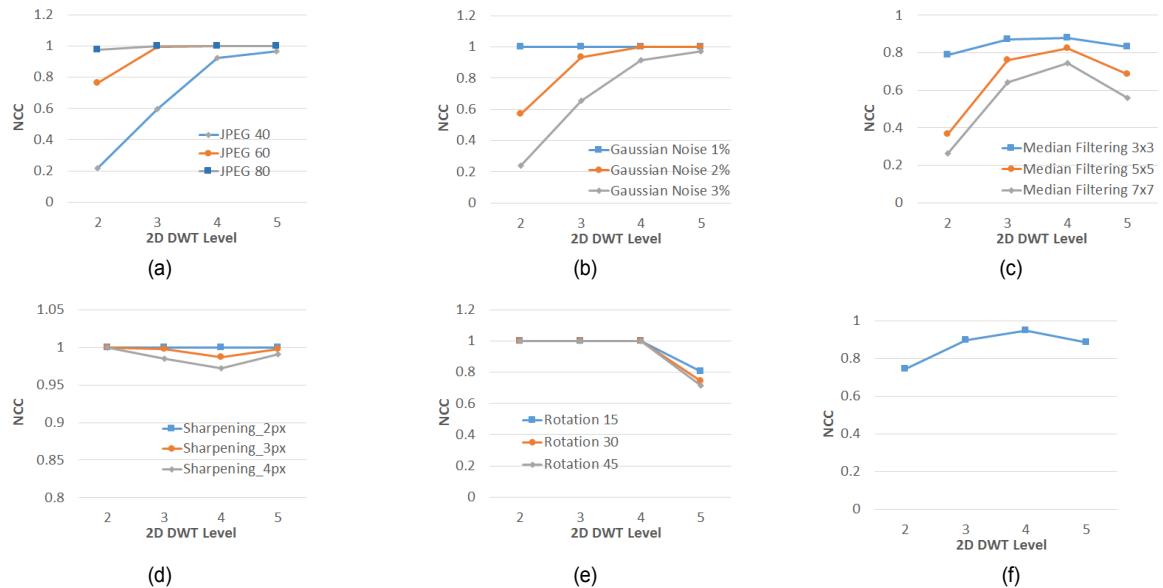


그림 9. $1,024 \times 1,024$ 영상의 실험 3 결과: (a) JPEG 압축 공격, (b) 미디언 필터링 공격, (c) 가우선 잡음첨가 공격, (d) 샤프닝 공격, (e) 회전 공격, (f) 모든 공격에 대한 평균.

Fig. 9. Experiment 3 results of $1,024 \times 1,024$ images for: (a) JPEG compression attacks, (b) median filtering attacks, (c) Gaussian noise addition attacks, (d) sharpening attacks, (e) rotation attacks, (f) average for all the attacks.

화는 더 작게 만드는 결과를 초래한다. 따라서 양자화 범위를 제한하는 기법으로 샤프닝 공격의 효과를 감소시켜 샤프닝 공격에 대한 추출률이 향상된 것으로 판단된다.

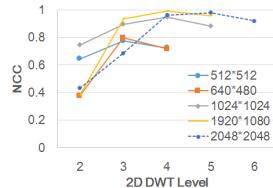


그림 10. 모든 해상도에 대한 실험 3의 결과
 Fig. 10. Results from Experiment 3 for all resolutions

실험 3의 결과를 각 해상도에 대해 모든 공격에 대한 추출률을 평균하여 그림 10에 보였다. 각 해상도의 최고 추출률을 보면 해상도가 높을수록 최고 추출률은 증가하는 것을 알 수 있다. 한 가지 특이점은 비슷한 해상도는 동일한 변환레벨에서 최고의 추출률을 보인다는 것이다. 이를 수식으로 표현하면, 식 (5)와 같다.

여기서 $M \times N$ 은 원영상의 해상도이며, n 은 2D-DWT

변환 레벨을 나타낸다. 즉, 2D-DWT 결과 최저주파수 대역의 한 부대역의 개수가 4,096과 16,384사이일 때 가장 높은 추출률을 얻을 수 있다.

$$(64 \times 64 = 4,096) \leq \frac{M}{2^n} \times \frac{N}{2^n} < (128 \times 128 = 16,384) \quad (5)$$

2. 제안하는 디지털 워터마킹 방법

앞 절에서 실험을 통해 구한 세부 방법들과 파라미터들을 사용하여 DWM 방법을 구성하면 그림 11(a)와 같고, 그림 11(a)로 삽입된 WM를 추출하는 과정은 그림 11(b)와 같다.

2.1 워터마크 삽입과정

본 논문에서는 Y성분을 사용하므로 먼저 컬러형식을 RGB에서 YCbCr로 변환한다. 이 중 Y성분 데이터를 식 (5)에 따라 해당 레벨로 2D-DWT를 수행한다. 이 중 최저주파수의 네 부대역 각각에 대해 식 (1)로 에너지를 구하고, 식

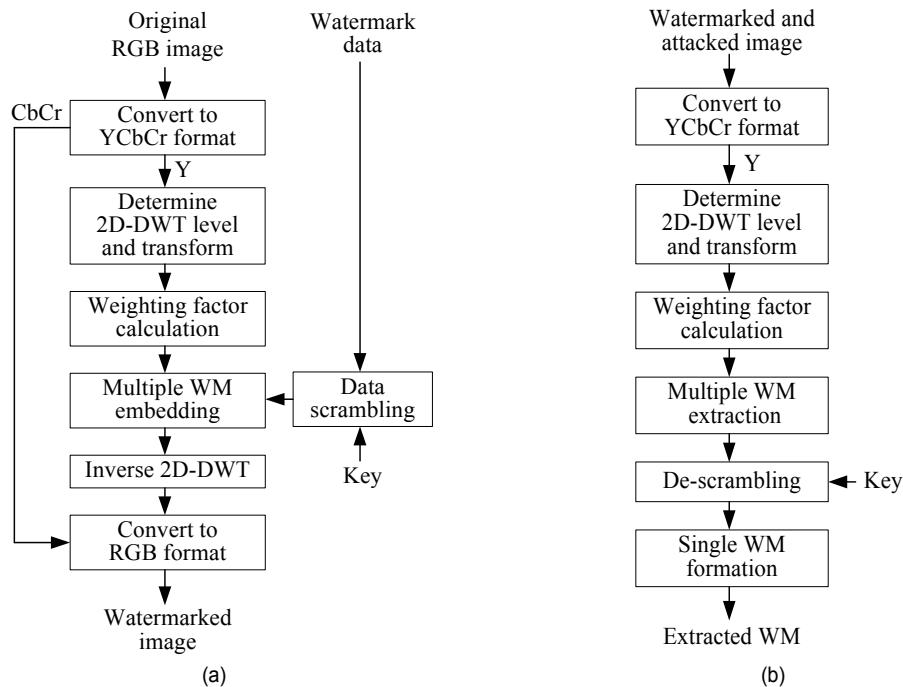


그림 11. 제안하는 DWM 방법: (a) WM 삽입과정, (b) WM 추출과정.
 Fig. 11. The proposed DWM scheme: (a) WM embedding procedure, (b) WM extracting procedure.

(2)의 e_{S_n} 을 식 (4)의 E_{S_n} 으로 교체하여 식 (3)의 비율에 따라 각 부대역의 양자화 스텝 크기를 결정한다. 이 양자화 스텝의 크기로 그림 3에 따라 각 부대역의 각 계수에 한 WM 비트를 삽입한다.

이 때 삽입되는 WM 비트는 암호화하여 삽입하는데, 그 방식은 [18]과 동일하게 선형귀환수프트레지스터(linear feedback shift register, LFSR)^{[18][20]}를 사용하고 최종단의 직렬출력 비트와 WM 비트 간 Exclusive-OR하여 암호화한다. 여기서 암호화 키(key)는 LFSR의 귀환 단의 연결조합과 각 단의 초기값을 사용한다.

암호화된 WM 데이터는 네 부대역에 반복적으로 삽입되며, 삽입된 결과는 2D-DWT 역변환을 수행하여 원영상 크기의 Y성분을 만들고, CbCr성분과 함께 RGB 형식으로 변환하여 워터마킹된 영상을 만든다.

2.2 워터마크 추출과정

DWM되고 공격받은 영상을 대상으로 필요 시 WM를 추출하는 과정은 그림 11(b)와 같다. 컬러형식 변환, 2D-DWT, 가중치 계산은 WM 삽입과정과 동일하다. 각 최저주파수 대역 부대역의 가중치를 계산한 후 WM 삽입과정과 같이 양자화 스텝 크기를 정하고, 이 스텝으로 양자화하여 그림 3의 WM 비트들을 모두 추출한다. 네 부대역에서 추출한 모든 WM 비트들을 WM 데이터 세트로 만들고, 각 비트에 해당하는 값들 중 가장 빈도수가 높은 값을 그 비트의 값으로 최종 결정한다. 마지막으로 WM 삽입 시 사용한 키를 사용하여 WM 삽입 시 사용한 것과 동일한 LFSR를 구성하고, 최종단의 직렬출력 비트와 최종 결정된 단일 WM 비트 간 Exclusive-OR하여 복호화된 최종 WM를 형성한다.

IV. 실험 및 결과

3장에서 제안한 방법에 대해 WM 삽입에 대한 비가시성과 다양한 공격에 대한 강인성을 검증하기 위한 실험을 수행하였다.

1. 실험환경

제안한 방법은 인텔코어 i7-2700K CPU와 16GB RAM을 장착한 PC에서 64-비트 Windows 7 Ultimate 환경에서 C/C++로 구현하였다. 실험에 사용한 디지털 WM는 그림 12의 2진 로고 데이터를 사용하였으며, 해상도는 32×32이다. 실험에 사용한 영상들은 표 4에 영상의 가로세로비(M:N)와 해상도에 따라 나열하였다. 이 영상들은 DWM의 테스트 영상들로 널리 사용되는 영상들로, [21~23]에서 구하였다. 또한 각 해상도 영상에 대한 2D-DWT 변환레벨을 같이 나타내었다. 사용하는 WM의 해상도가 32×32이므로 2D-DWT 최저주파수 대역 각 부대역에 4개 이상 16개 미만의 WM 데이터가 삽입된다. 영상의 해상도에 따라 표 4의 레벨로 변환할 때 가로 또는 세로의 해상도가 맞지 않을 경우 대칭확장(symmetric extension)^[24]하여 사용하였다. 예를 들어 1,920×1,080 영상은 세로방향으로 8 화소 확장하여 1,920×1,088로 만들어 확장하였다. 그러나 확장된 부분에는 WM를 삽입하지 않았다.



그림 12. 사용한 WM
Fig. 12. Used WM

표 4. 실험에 사용한 영상들
Table 4. Used images in experiments

M:N	Resolution	DWT level	# of images
1:1	512×512	3	10
	1,024×1,024	4	10
4:3	640×480	3	10
	1,280×960	4	10
16:9	1,920×1,080	4	10
	3,840×2,160	5	10

표 5에는 본 논문에서 대상으로 하는 공격들을 나열하였다. 표 5의 공격들은, 뒤에 다시 다루겠지만, 기준 연구들에서 사용한 공격들을 위주로 구성하였으며, 가능한 한 다양한 공격을 포함하였다. 표 5에서 화소값 변경공격(pixel-value change attack)은 공격의 목적이 화소값을 변경하는 공격들을 의미하며, 기하학적 공격(geometric attack)은 영

상의 형태나 해상도를 변경하는 공격을 의미한다.

표 5. 실험한 공격들

Table 5. Experimented attacks

Category	Type	Intensity
Pixel-value change attack	JPEG compression	80, 60, 40, 20/100
	Gaussian blurring	3x3, 5x5
	Average blurring	3x3
	Median filtering	3x3
	Sharpening	-
	Gaussian noise addition	3%
	Salt&pepper noise addition	3%
	Histogram equalization	-
	Contrast	-20
Geometrical attack	Shrink	0.8, 0.5, 0.25
	Magnify	2
	Rotation	$\pi/6, \pi/4, \pi/3, \pi/2$
	Cropping	25%

2. 파라미터 결정

3장에서 설명한 양자화 범위($T_{Sn,l}, T_{Sn,h}$)와 양자화 스

텝크기를 결정하는 에너지의 가중치(γ_{Sn})은 표 1의 영상들로 실험적으로 구하여 사용하였다. 표 6은 결정된 파라미터 값을 보이고 있는데, 양자화될 에너지의 범위는 LL 부대역이 상대적으로 낮고, 나머지 부대역들은 동일한 범위를 갖는다. 양자화를 위한 가중치는 앞의 설명과 같은 비율로 정하였다.

표 6. 실험적으로 결정한 파라미터 값

Table 6. Determined parameter values by experiment

Parameter	LL	LH	HL	HH
TSn,l	1.5	2.0	2.0	2.0
TSn,h	2.5	8.0	8.0	8.0
γ_{Sn}	0.1	0.2	0.2	0.3

3. 실험결과

표 1의 영상들에 대해 표 3의 공격에 대한 실험결과를 표 7과 그림 13에 보이고 있다. 먼저 표 7은 WM를 삽입하였으나 공격을 가하지 않은 영상과 원영상간의 PSNR 평균

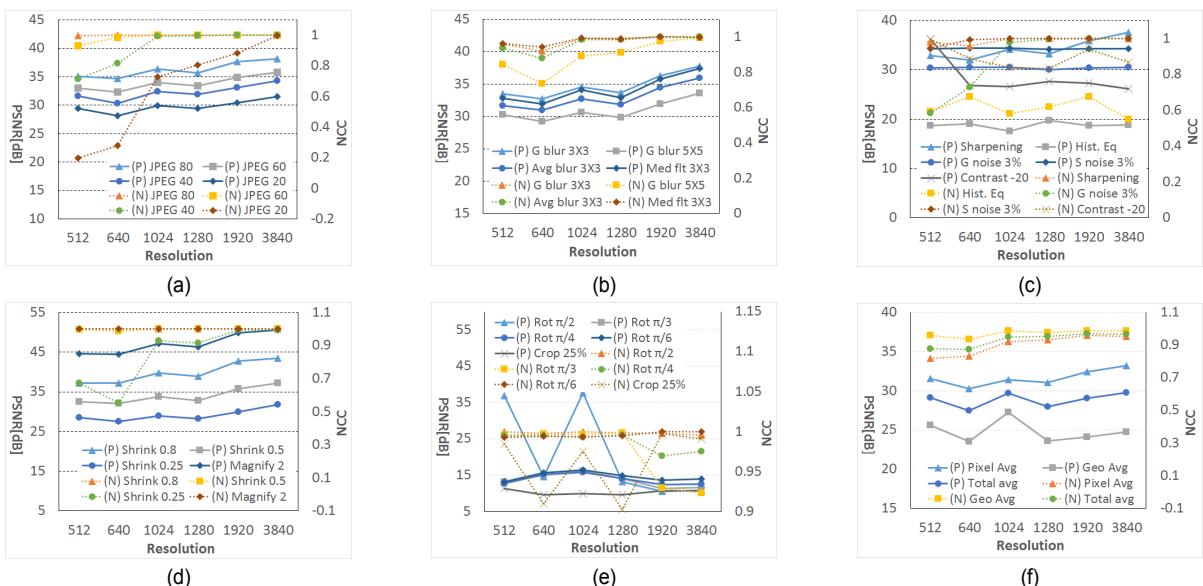


그림 13. 공격에 대한 실험결과: (a) JPEG 압축, (b) 가우션 블러링, 평균 블러링, 미디언 필터링, (c) 샤프닝, 히스토그램 평활화, 가우션 잡음첨가, Salt&pepper 잡음첨가, 콘트라스트 조정, (d) 스케일링(축소, 확대), (e) 회전, cropping, (f) 평균들.

Fig. 13. Experimental results for attacks: (a) JPEG compression, (b) Gaussian blurring, average blurring, median filtering, (c) sharpening, histogram equalization, Gaussian noise addition, Salt&pepper noise addition, contrast adjustment, (d) scaling (shrink, magnify), (e) rotation, cropping, (f) averages.

값들을 해상도에 따라 보이고 있다. 이 값은 삽입한 WM의 비가시성을 측정하는 값으로, 대부분 40[dB] 전후의 값을 보였으며, 전체 평균은 약 39.67[dB]를 보여 우수한 비가시성을 나타내었다.

표 7. 삽입한 WM의 비가시성
Table 7. Invisibility of the embedded WM

Resolution	PSNR[dB]
512×512	40.21
1,024×1,024	39.33
640×480	40.14
1,280×960	39.37
1,920×1,080	39.48
3,840×2,160	39.43
Average	39.67

그림 13의 각 그림의 값은 해당 공격에 대한 해당 해상도 영상들의 평균값들을 나타내고 있으며, 해상도가 증가함에 따른 경향성을 나타내기 위하여 횡축(공간적 제약으로 가로방향 해상도만 표시)을 낮은 해상도에서 높은 해상도로 정렬하였다. 각 그림은 공격의 강도를 나타내는 공격 후 원 영상과의 PSNR값(그림에서 범례의 팔호 속 약자 P)과 해당 공격에 대한 강인성 데이터로 공격 후 추출한 WM의 추출률을 NCC(그림에서 범례의 팔호 속 약자 N)을 동시에 나타내었다. 좌측 종축은 PSNR, 우측 종축은 NCC값을 나타내며, 데이터는 PSNR값을 실선, NCC값을 점선으로 표시하였고, 동일한 공격에 대한 PSNR과 NCC는 같은 연결점을 사용하였다.

각 그림은 비슷한 공격들을 비교하기 위하여 가능하면 비슷한 공격들을 한 그래프에 나타낸 것으로, (a), (b), (c)는 화소값 변경 공격, (d)와 (e)는 기하학적 공격, 그리고 (f)는 평균값들로 구성하였다. 즉, (a)는 JPEG압축 공격, (b)는 영상의 고주파성분을 약화시키는 가우션 블러링(G blur), 평균 블러링(Avg blur), 그리고 미디언 필터링(Med flt)을 포함하고 있으며, (c)는 그 외의 공격들, 즉 샤프닝(sharpening), 히스토그램 평활화(Hist. Eq), 가우션 잡음첨가(G noise), Salt&pepper 잡음첨가(S noise), 콘트라스트 조정(Constrast) 공격을 같이 보이고 있다. (d)는 스케일링 공격인 축소(Shrink)와 확대(magnify)의 기하학적 공격, (e)

는 회전(Rot)과 cropping(crop) 공격을 같이 보이고 있다. (f) 화소값 변경 공격의 평균(Pixel Avg), 기하학적 공격의 평균(Geo Avg), 그리고 모든 공격에 대한 평균(Total Avg)를 포함하고 있다.

각 그림을 살펴보면, (a)의 JPEG 압축에 대한 PSNR은 예측한 대로 강도가 강해짐에 따라 PSNR이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 공격에 대한 강인성에 있어서는 전체적으로 해상도가 높아질수록 강인성이 높아졌으나, JPEG quality 40/100 이상의 공격에서는 1,024×1,024 이하의 해상도에서는 NCC값이 많이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 참고로 quality 40/100 이상의 공격은 원영상의 화질을 크게 훼손하여 영상자체의 효용성이 크게 떨어진다. (b)의 블러링 공격들도 PSNR과 NCC가 해상도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 가장 강한 공격인 가우션 블러링 5×5의 경우 1,024×1,024 이하의 해상도에서 0.9이하의 NCC값을 보였으나, 그 외의 경우는 높은 공격 강인성을 보였다. (c)는 이질적인 공격들을 같이 보이고 있어 공격들 간 PSNR과 NCC값들의 편차가 크게 나타났다. 가우션 잡음첨가 공격에서 가장 높은 화질과 공격 강인성을 보였으며, 히스토그램 평활화 공격의 경우 유판으로 확인하는 것보다 실제 PSNR 값은 매우 낮게 나타났고, 공격에 대한 강인성 또한 0.6 정도의 NCC값으로 가장 낮은 강인성을 보였다. 이 그림에 포함된 공격들은 화질이나 공격 강인성에서 해상도에 따른 경향성이 크게 나타나지 않았다.

기하학적 공격은 영상의 형태나 해상도를 변화시키기 때문에 확대나 4/5 축소 정도를 제외하고는 화소값 변경 공격 보다 공격강도가 훨씬 높다. 따라서 (d)와 (e)에서 보듯이 공격 후의 화질이 화소값 변경 공격에 비해 많이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 그러나 (d) 그림에서 1/4로 축소한 공격을 제외하고는 거의 1에 가까운 NCC값을 보여 높은 강인성을 나타내었다. 1/4 축소의 경우 1,024×1,024보다 낮은 해상도에서 0.9 이하의 NCC값을 보였다. (e)에서 보면 가로와 세로의 해상도가 같은 영상들과 서로 다른 영상들의 경우 $\pi/2$ 회전공격 후 화질의 차이가 크게 나타났다. 그 외의 공격들에서는 화질이 15[dB]이하의 낮은 값을 보여 공격의 강도가 매우 크다는 것을 알 수 있다. 그러나 공격 강인성에 있어서는 모든 공격에 대해 0.9 이상의 높은 NCC값을 보였다. 특히 $\pi/3$ 과 $\pi/4$ 회전공격의 경우 해상도가 1,920×1,080

이상에서 오히려 강인성이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. (f)의 평균값 그래프를 보면 화소값 변경 공격보다 기하학적 공격이 매우 강하다는 것을 다시 한 번 확인할 수 있다. 그러나 공격간인성에 있어서는 기하학적 공격이 오히려 높은 것을 알 수 있으며, 전체평균을 보면 모든 해상도에서 0.9 이상의 NCC값을 보여 제안한 방법이 공격에 대한 높은 강인성을 보인다는 것을 알 수 있다.

4. 기존연구와의 비교

제안한 방법이 우수한 성능을 보인다는 것을 확인하기 위해 기존 방법들 중 가장 높은 성능을 보이는 방법들의 실험결과와 제안한 방법의 실험결과를 비교한다. 비교대상 방법은 [8], [14], [15], [16]이며, 이 방법들의 개략적인 내용은 서론에서 설명하였으므로 여기서는 생략한다.

먼저 삽입한 WM의 비가시성을 비교한다. 표 8에 대상 방법들과 제안한 방법에서 삽입하는 WM 데이터의 양과 공격전 DWM된 영상의 PSNR을 보였다. 표에서 보는 바와

같이 제안한 방법이 32×32 WM를 부대역당 4~16번씩 네 부대역에 삽입하므로 다른 방법들에 비해 수십 배의 데이터를 삽입한다. 비록 제안한 방법이 가장 낮은 PSNR값을 보이기는 하지만, 삽입한 데이터 양에 비해서는 높은 값이며, 39.67[dB] 자체가 낮은 수치가 아니므로 제안한 방법도 충분한 비가시성을 갖고 있다고 판단된다.

표 8. 기존 방법들과의 비가시성 비교

Table 8. Comparison of Invisibility with existing schemes

Scheme	Amount of WM	PSNR[dB]
Ours	$(32 \times 32 \times 4 \times 4) \sim (32 \times 32 \times 16 \times 4)$	39.67
[8]	32×32	42.42
[14]	64×64	40.48
[15]	64×64	39.88
[16]	32×32	44.08

공격의 강인성에 대한 비교는 그림 14에 보였다. 표 8의 비교대상 방법들의 강인성 실험결과를 [8]과 [14]는 추출된

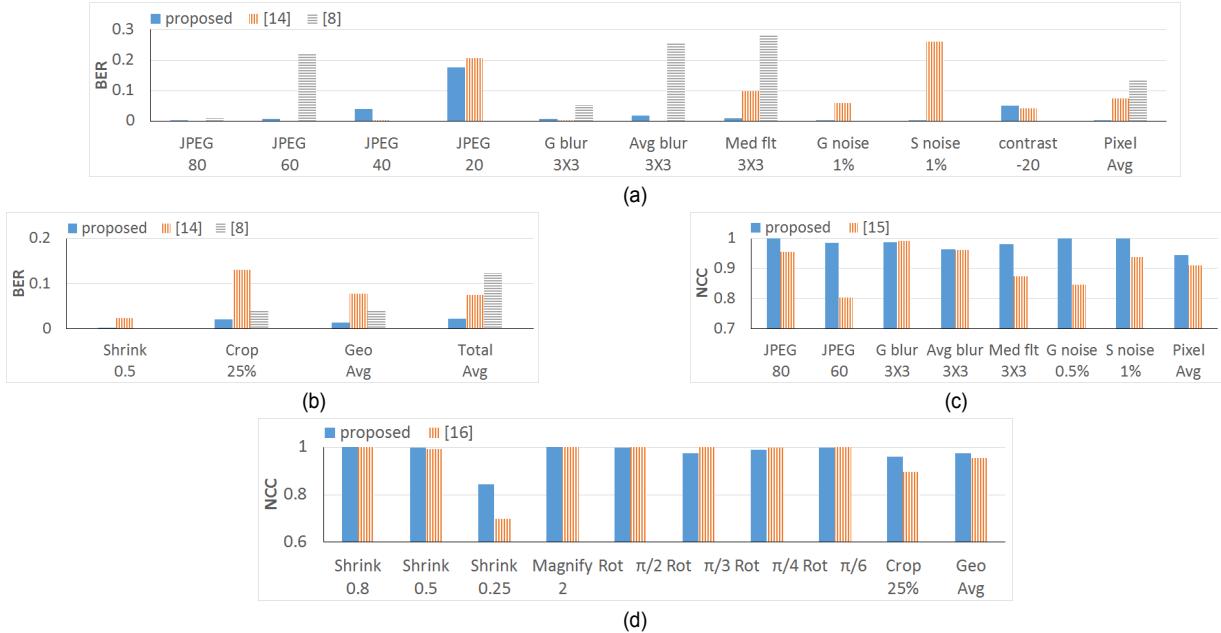


그림 14. 기존연구와의 강인성 비교: (a) [8][14]와의 화소값 변경 공격 비교, (b) [8][14]와의 기하학적 공격 비교, (c) [15]와의 화소값 변경 공격 비교, (d) [16]과의 기하학적 공격 비교.

Fig. 14. Robustness comparison with existing schemes: (a) pixel-value change attacks with [8] and [14], (b) pixel-value change attacks with [8] and [14], (c) pixel-value change attacks with [15], (d) geometric attacks with [16].

WM비트 중 잘못된 비트수를 WM 총 비트수에 대해 나타낸 BER(bit error rate)을 사용하였고, [15]와 [16]은 NCC를 사용하였다. 따라서 [8]과 [14]와의 비교를 (a)(b)에, [15][16]과의 비교를 (c)(d)에 각각 나타내었으며, 화소값 변경공격은(a)와 (c)에, 기하학적 공격은 (b)와 (d)로 분류하여 나타내었다. 모든 비교대상 방법들이 표 1의 모든 공격에 대한 실험결과 데이터를 수록하지 않아서 그림 14에는 수록된 데이터만을 나타내었으며, 그림에서 해당 공격에 대한 데이터가 없는 것은 이 경우에 해당한다. 또한 [15]는 화소값 변경공격만을, [16]은 기하학적 공격만을 다루었기 때문에 그림 14(c)는 [15]와만, 그림 14(d)는 [16]과만 비교되었다.

먼저 그림 14(a)를 살펴보면, 콘트라스트 변경공격을 제외한 모든 공격에서 [8]과 [14]보다 낮은 BER을 보여 우수한 성능을 보였다. 이 공격에서도 [14]가 0.043, 제안한 방법이 0.050로, 비록 [14]보다는 조금 높은 BER을 보이기는 했으나 매우 낮은 값이었다. 맨 우측의 평균 BER을 보면, [8]이 0.137, [14]가 0.074인 반면, 제안한 방법이 0.0026으로 매우 낮은 BER을 보였다. (b)에서 [8][14]와의 기하학적 공격을 비교하면, 모든 공격에서 제안한 방법이 매우 낮은 BER을 보였다. 화소값 변경 공격과 기하학적 공격 전체 평균값(Total Avg)이 [8]은 0.039, [14]는 0.075, 제안한 방법은 0.0133이었다.

방법 [15]와의 화소값 변경공격에 대한 강인성을 비교하면, (c)와 같이 모든 공격에서 제안한 방법이 높은 NCC값으로 더 좋은 성능을 보였다. 특히 JPEG 압축 공격 60/100과 미디언 필터링 공격, 그리고 가우션 잡음첨가 공격에서는 NCC값의 큰 차이를 보였다. (d)에서 보인 [16]과의 기하학적 공격에 대한 강인성 비교에서는 회전공격 중 $\pi/3$, $\pi/4$, $\pi/6$ 에서 [16]이 약간 높은 값을 보였으나, 이 공격들에서도 제안한 방법은 0.99가 넘는 NCC값을 보였다. 그러나 기하학적 공격에 대한 평균을 보면 [16]이 0.954, 제안한 방법이 0.973으로 제안한 방법이 전체적으로는 더 우수하다는 것을 알 수 있다.

그림 13의 실험결과와 그림 14의 비교결과, 제안한 방법이 기존의 방법에 비하여 일부 공격에서 특정 방법에 비해 다소 낮은 성능을 보이기는 하지만, 공격의 전체를 고려해 볼 때 제안한 방법이 더 우수한 성능을 보인다고 결론지을 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 디지털 영상에 대한 2D-DWT의 주파수 특성을 실험적으로 이용하여 최적의 2D-DWT 변환레벨을 정하고, 이를 이용한 디지털 영상의 디지털 워터마킹 방법을 제안하였다. 이 방법은 양상의 크기에 따라 정해진 변환레벨로 변환한 후 최저주파수 대역의 네 부대역 각각의 계수에 WM 한 비트를 삽입하는 다중 WM 삽입방법이다. WM를 삽입하는 방법은 간단한 QIM 방식이며, 양자화 스텝은 각 부대역의 에너지 값에 따라 결정한다. WM가 삽입되고 공격이 가해진 영상에서 WM를 추출할 때에는 삽입할 때와 동일한 방법으로 모든 WM 비트를 추출하고, WM 데이터의 비트위치에 해당하는 값들 중 빈도수가 높은 값으로 최종 WM 비트를 결정한다.

제안한 방법을 다양한 영상에 대해 다양한 공격을 대상으로 실험한 결과 화소값 변경 공격과 기하학적 공격 모두에서 우수한 성능을 보였으며, 기준 방법들과의 비교에 있어서도 일부 공격에 대해 특정 방법이 제안한 방법보다 좋은 성능을 보였으나 공격 전체를 고려할 때 제안한 방법이 더 우수한 성능을 보였다. 특히 화소값 변경공격에서는 해상도가 증가할수록 높은 공격 강인성을 보였으며, 모든 기하학적 공격에 대해서도 매우 높은 강인성을 보였다.

따라서 제안한 방법은 해상도가 점차 증가하는 영상분야의 발전방향을 볼 때 향후 디지털 영상의 지적재산권 보호를 위해 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 논문의 방법을 구상하는데 있어서 도출된 영상에 대한 DWT의 주파수 특성, 각 부대역의 WM 삽입강도에 대한 실험 결과 등을 향후 다른 연구에서도 좋은 참고자료가 될 것으로 기대한다.

참 고 문 헌 (References)

- [1] I. J. Cox, et al., *Digital watermarking and steganography*, Morgan Kaufmann Publisher, 2008.
- [2] William Stalling, *Cryptography and network security*, Prentice-Hall, 2011.
- [3] N. M. Makbol and B. E. Khoo, "Robust blind image watermarking scheme based on redundant discrete wavelet transform and singular value decomposition," *J. of Electronics and Communications*, Vol. 67,

- No. 2, pp. 102-112, Feb. 2013.
- [4] C. C. Lai and C. C. Tsai, "Digital image watermarking using discrete wavelet transform and singular value decomposition," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 59, No. 11, pp. 3060-3063, Nov. 2010.
- [5] E. Ganic and A. M. Exkicioglu, "Robust embedding of visual watermarks using discrete wavelet transform and singular value decomposition," *J. of Electronic Imaging*, Vol. 14, No. 4, (043004), Dec. 2005.
- [6] S. Lagzian, M. Soryani, and M. Fathy, "Robust watermarking scheme based on RDWT-SVD: embedding data in all subbands," *Artificial Intelligence and Signal Processing Symposium*, pp. 48-52, June 2011.
- [7] P. P. Thulasidharan and M. S. Nair, "QR code based blind digital image watermarking with attack detection code," *J. of Electronics and Communications*, Vol. 69, No. 7, pp. 1074-1084, Jul. 2015.
- [8] R. Mehta, V. P. Vishwakarma and N. Rajpal, "Lagrangian support vector regression based image watermarking in wavelet domain," *Signal Processing and Integrated Networks*, pp. 854-859, Feb. 2015.
- [9] J. Maedeh, S. Shadrokh and K. Nader, "Robust image watermarking by multi resolution embedding in wavelet transform coefficients," *ICEEE 2015*, pp. 478-482, May 2015.
- [10] T. H. Nguyen, D. M. Duong and D. A. Duong, "Robust and high capacity watermarking for image based on DWT-SVD," *IEEE Int'l Conf. on RIVF*, pp. 83-88, Jan. 2015.
- [11] J. George, S. Varma and M. Chatterjee, "Color image watermarking using DWT-SVD and Arnold transform," *India Conference (INDICON)*, pp. 1-6, Dec. 2014.
- [12] A. Roy, A. K. Maiti and K. Ghosh, "A perception based color image adaptive watermarking scheme in YcbCr space," *SPIN*, pp. 537-543, Feb. 2015.
- [13] B. Liao and J. Lv, "A Novel watermark embedding scheme using compressive sensing in wavelet domain," *The Open Cybernetics & Systemics Journal*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-6, Jun. 2015.
- [14] H. T. Hu, Y. J. Chang and S. H. Chen, "A progressive QIM to cope with SVD-based blind image watermarking in DWT domain," *IEEE China SIP*, pp. 421-425, Jul. 2014.
- [15] J. Ouyang, G. Coatrieux, B. Chen and H. Shu, "Color image watermarking based on quaternion Fourier transform and improved uniform log-polar mapping," *Computers & Electrical Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compeleceng.2015.03.004>.
- [16] Y. Xueyi, et al. "A SIFT-based DWT-SVD blind watermark method against geometrical attacks," *IEEE, Intl. Cong. CISP*, pp. 323-329, Oct. 2014.
- [17] R. M. Rao and A. S. Bopardikar, *Wavelet transforms*, Addison-Wesley, 1998.
- [18] Y. S. Lee, Y. H. Seo, and D. W. Kim, "Robust and Blind Watermarking for DIBR Using a Depth Variation Map", *JBE* Vol. 21, No. 6, pp. 845-860, 2016 November.
- [19] R. C. Gonzales and R. E. Woods, *Digital image processing*, Pearson Prentice-hall, Upper Saddle River, NJ, 2008.
- [20] https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_feedback_shift_register
- [21] <http://vision.middlebury.edu/stereo/>
- [22] <http://www.dofpro.com/cgigallery.htm>
- [23] <http://www.wallpapervortex.com/animals-bear-wallpapers.html#.VbgqFvntlBc>
- [24] http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_ics/catalogue_detail_ics.htm?csnumber=27687

저자 소개

강이슬



- 2016년 2월 : 광운대학교 전자재료공학과 졸업(공학사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자재료공학과(공학석사)
- ORCID : <http://orcid.org/0000-0002-7981-989X>
- 주관심분야 : Virtual Reality, 영상 신호처리, 워터마킹

이용석



- 2015년 2월 : 광운대학교 전자재료공학과 졸업(공학사)
- 2017년 2월 : 광운대학교 전자재료공학과 졸업(공학석사)
- ORCID : <http://orcid.org/0000-0002-1608-809X>
- 주관심분야 : 3D 영상 신호처리, 워터마킹, SoC 설계

저자소개



서영호

- 1999년 2월 : 광운대학교 전자재료공학과 졸업(공학사)
- 2001년 2월 : 광운대학교 일반대학원 졸업(공학석사)
- 2004년 8월 : 광운대학교 일반대학원 졸업(공학박사)
- 2005년 9월 ~ 2008년 2월 : 한성대학교 조교수
- 2008년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 인제니어링학부대학 부교수
- ORCID : <http://orcid.org/0000-0003-1046-395X>
- 주관심분야: 실감미디어, 2D/3D 영상 신호처리, 디지털 홀로그램, SoC 설계

김동욱



- 1983년 2월 : 한양대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 1985년 2월 : 한양대학교 공학석사
- 1991년 9월 : Georgia 공과대학 전기공학과(공학박사)
- 1992년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자재료공학과 정교수
- 2009년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 실감미디어 연구소 연구소장
- ORCID : <http://orcid.org/0000-0002-4668-743X>
- 주관심분야 : 3D 영상처리, 디지털 홀로그램, 디지털 VLSI Testability, VLSI CAD, DSP설계, Wireless Communication