

논문 2004-41SP-3-20

비축 홀로그램을 이용한 디지털 워터마킹 (Digital Watermarking using Off-axis Hologram)

김 규 태*, 김 종 원**, 김 수 길***, 최 종 욱*

(Kyu Tae Kim, Jong Weon Kim, Soo Gil Kim, and Jong Uk Choi)

요 약

본 논문은 비축 홀로그램을 이용하여 기하학적인 변형에 강인하면서 멀티비트를 삽입할 수 있는 디지털 워터마킹 방법을 제안하였다. 멀티비트를 삽입하기 위해 푸리에 변환을 이용한 홀로그래픽 워터마크를 생성하여 공간영역에서 커버이미지에 삽입하였다. 홀로그래픽 워터마크는 기하학적인 변형에 대비하기 위한 별도의 정보 삽입없이 고화질에서 기하학적인 공격에 강인한 특성을 갖는다. 제안된 방법을 입증하기 위해 화질평가 방법인 PSNR(peak signal to-noise ratio)이 39dB 이상에서 최대 1,024 비트의 정보를 삽입하여 추출하였고 BER(bit-error rate)을 이용하여 rotation, scale, cropping과 같은 기하학적인 공격에 대한 강인성을 평가하였다.

Abstract

We propose a new watermarking scheme that can be used to embed multiple bits and also resilient to geometrical transforms such as scaling, rotation, and cropping, based on off-axis holographic watermark that allows multiple watermark recovery without original content(cover image). The holographic watermark is that Fourier transformed digital hologram is embedded into cover image in the spatial domain. The proposed method has not only increased robustness with a stronger embedding but also imperceptibility of the watermark in the evaluation process. To compare with the conventional scheme, the spread spectrum, we embedded and recovered maximum 1,024 bits that consist of binary number over PSNR(peak signal to-noise ratio) 39dB. And also, we computed robustness with BER(bit error rate) corresponding the above attack

Keywords : Digital Watermarking, Digital Hologram, Holographic Watermark, Geometrical Attack

I. 서 론

빠르게 성장하고 있는 인터넷을 통해서 디지털 콘텐츠의 유통이 보편화되고 있어 콘텐츠의 저작권 보호는 중요한 사회적 이슈로 떠오르고 있다. 이는 이미지, 오디오, 비디오 등의 디지털 콘텐츠가 컴퓨터에서는 손쉽게 다량의 복사가 가능하며 복사 후 원본과 비트 하나

틀리지 않은 동일한 파일로 만들어지기 때문이다. 더구나 인터넷에서는 이러한 불법 복제된 데이터가 대량으로 순식간에 세계 어디로나 송신될 수 있기 때문에 저작권 문제는 더욱 심각해진다. 워터마킹은 텍스트, 이미지, 비디오, 오디오 등의 데이터에 제공자만이 아는 마크(mark)를 사람의 육안이나 귀로는 구별할 수 없게 삽입하고 이를 네트워크에서 제공한다. 만약 사용자들이 멀티미디어 디지털 정보를 불법 복제하여 정당한 대가나 허락 없이 상업용 혹은 기타 용도로 사용되었을 때에는 자신의 마크를 추출하거나 보여줌으로서 그 콘텐츠가 자신의 소유임을 밝힐 수 있고, 이는 지적 재산권 행사에 결정적인 증거가 된다.

일반적으로 워터마킹 기술은 많은 데이터 삽입량과 다양한 공격에 대한 강인성 그리고 비인식성이 요구되

정희원, 마크애니 부설연구소
MarkAny Research Institute)
* 정희원, 상명대학교 소프트웨어학부 부교수
Division of Computer Software at Sangmyung Univ.)
** 정희원, 호서대학교 전기정보통신공학부 부교수
School of Electrical Engineering at Hoseo Univ.)
※ 본 논문은 2000N NL-01-C 286 NRL 과제의 지원을 받아 수행되었습니다.
접수일자: 2003년10월21일, 수정완료일: 2004년4월27일

며 최근에는 더욱 다양한 공격조건에 강인성을 갖는 연구가 진행되고 있다. 워터마킹 이미지에 대한 공격 방법은 크게 JPEG와 같은 손실압축과 회전(rotation), 크기(scaling) 그리고 cropping과 같은 기하학적 변형(geometrical transformation)으로 구분할 수 있다. I. J. Cox에 의해 제시된 대역확산(spread spectrum) 방법은 손실압축에 강인한 대표적인 방법으로 상관도가 매우 낮은 랜덤시퀀스(random sequence)를 이용하여 전 주파수 대역에 워터마크 정보를 분포시킴으로서 특정 영역의 성분이 제거되어도 삽입된 워터마크를 추출할 수 있다.^[1-3] 기하학적 변형에 강인한 워터마킹 방법에는 log-log map이나 log-polar mapping을 사용하여 워터마크를 구성하는 방법^[4-6] 그리고 기하학적인 변형을 찾기 위해 임의의 템플릿을 워터마크로 삽입하거나 반복적으로 삽입된 워터마크의 자기상관(auto-correlation)을 이용하는 방법이 있다.[7-8] 그러나 연산시간이 오래 걸리거나 손실압축에 약하며 정확한 워터마크 추출에 단점을 갖고 있다.

본 논문에서는 손실압축과 기하학적인 변형에 강인하면서도 많은 데이터의 삽입을 위한 새로운 접근 방법으로 디지털 홀로그래를 워터마킹 기술에 적용하였다. 빛의 회절현상을 이용하는 홀로그래가 워터마크로 적용될 경우 회전, 크기와 같은 기하학적인 변형은 삽입된 데이터의 회절경로만이 변경시키기 때문에 데이터 추출이 가능하고 홀로그래의 용장성(redundancy)으로 cropping과 같은 기하학적인 변형에도 강인한 특성을 갖는다. 또한, 홀로그래를 기록할 때, 빔 확산기(diffuser)와 같은 랜덤 위상변조기(random-phase modulator)를 이용하면 물체정보 전 영역에 고르게 분포하기 때문에 손실압축에도 예러 없이 삽입된 데이터의 추출이 가능하다. 제안된 방법을 검증하기 위해 256×256의 lena 이미지에 약 130byte(1,024bits)의 데이터를 삽입하여 예러 없이 추출하였고 회전, 크기, cropping과 같은 기하학적인 변형에 대한 실험결과를 분석하였다.

II. 디지털 홀로그래

1948년 Gabor^[9]에 의해 최초로 제안된 홀로그래는 Leith와 Upatniek^[10]에 의해 분리된 두 개의 코히어런트한 빛의 간섭을 이용한 비축 홀로그래(off-axis hologram)이 발표된 이후 3차원 영상의 디스플레이를 위한 가장 유력한 수단으로 인식되어 왔다. 특히, 디지털 컴퓨터에 의한 홀로그래 합성방법은 실제 세계에서

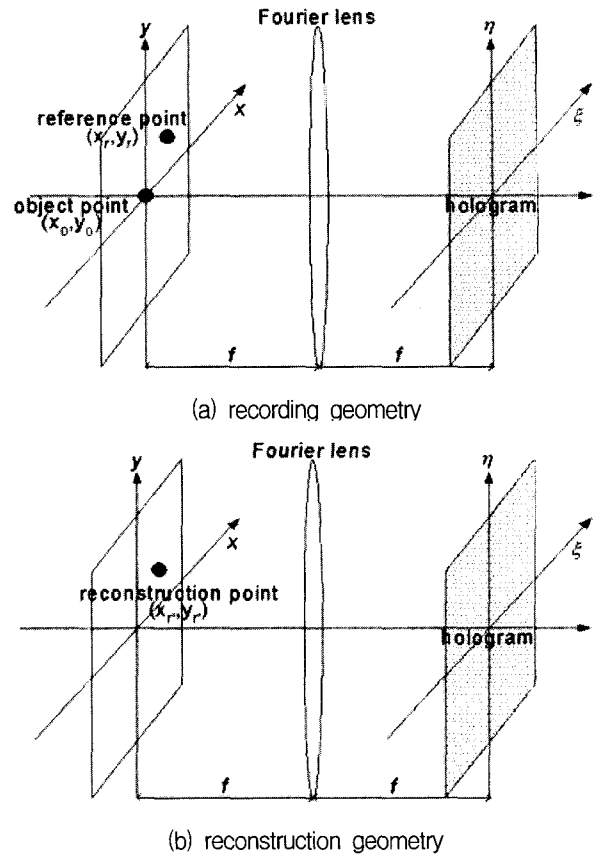


그림 1. 홀로그래 기록과 복원 방법
Fig. 1. Recording and reconstruction of the hologram

존재할 수 없는 이미지를 만들 수 있다는 장점으로 많은 연구가 수행되었다.

홀로그래는 물체에서 회절된 광파를 기록하는 과정과 기록시 사용된 광원을 이용하여 복원하는 과정으로 나누어 설명할 수 있다. 물체에 입사된 광원은 회절되어 진폭과 위상에 관한 정보로 나타나며 이러한 정보를 모두 기록해야 3차원 정보를 표현할 수 있다. 그러나 모든 기록매질은 빛의 세기만을 기록할 수 있으므로 위상정보를 빛의 세기 정보로 기록하는 방법이 필요하다. 홀로그래는 진폭과 위상정보를 기록하기 위해 가간섭성을 갖는 기준파와 물체파의 간섭패턴을 이용한다. 그림 1은 기록방법 및 복원방법을 나타낸 것이다. 여기서, 기준파와 물체파의 광원을 각각 $o(x_r, y_r)$ 과 $r(x_o, y_o)$ 라고 하고 복원시 사용되는 광원을 (x_r, y_r) 로 가정한다. 물체를 점들의 집합이라고 가정하면 물체를 이루는 각 점들에 의해 발생하는 회절파는 각각 독립적으로 간섭무늬를 만든다. 따라서 일반적으로 홀로그래의 기록과 복원과정에도 포함된 물리적 공간은 선형적이고 공간 불변성을 갖는 각 점들에 대한 각각의 복소진폭의 중첩형태로 기록된다.

식 (1)은 그림 1(a)에서 나타낸 기준파와 물체파를 이용한 푸리에 홀로그램(Fourier hologram)을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned}
 U(\xi, \eta) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} o(x-x_o, y-y_o) \\
 &\quad \exp -j \frac{2\pi}{\lambda_1 f} (\xi x + \eta y) d\xi d\eta \\
 &+ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} r(x-x_r, y-y_r) \\
 &\quad \exp -j \frac{2\pi}{\lambda_1 f} (\xi x + \eta y) d\xi d\eta \\
 &= O(\xi, \eta) \exp -j \frac{2\pi}{\lambda_1 f} (\xi x_o + \eta y_o) \\
 &+ R(\xi, \eta) \exp -j \frac{2\pi}{\lambda_1 f} (\xi x_r + \eta y_r)
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, 우변의 첫 번째 항은 물체파에 대한 푸리에 변환식이고 두 번째 항은 기준파에 대한 푸리에 변환식을 나타내며, λ_1 과 f 는 각각 기록시 사용된 광원의 파장과 푸리에 변환 렌즈의 초점거리를 나타낸다. 식 (1)에서 표현된 기준파와 물체파의 중첩에 의한 간섭패턴은 기록매질에서 세기 정보로 식 (2)와 같이 표현되며 $U_H(\xi, \eta)$ 로 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 U_H(\xi, \eta) &= |O(\xi, \eta)|^2 + |R(\xi, \eta)|^2 \\
 &+ O(\xi, \eta)^* R(\xi, \eta) \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda_1 f} (\xi x_r + \eta y_r) \right. \\
 &\quad \left. + j \frac{2\pi}{\lambda_1 f} (\xi x_o + \eta y_o) \right\} \\
 &+ O(\xi, \eta) R(\xi, \eta)^* \exp \left\{ +j \frac{2\pi}{\lambda_1 f} (\xi x_r + \eta y_r) \right. \\
 &\quad \left. - j \frac{2\pi}{\lambda_1 f} (\xi x_o + \eta y_o) \right\}
 \end{aligned} \tag{2}$$

여기서, 우변의 첫 번째와 두 번째 항은 단지 기준파와 물체파의 세기만을 표현하기 때문에 디지털 홀로그램 복원시 세 번째와 네 번째 항만을 이용한다. 식 (3)은 식 (2)에서 표현된 홀로그램으로부터 물체파 정보를 복원하기 위한 복원파의 복소진폭을 나타낸다.

$$U_R(\xi, \eta) = R(\xi, \eta) \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda_2 f} (\xi x_r + \eta y_r) \right\} \tag{3}$$

(375)

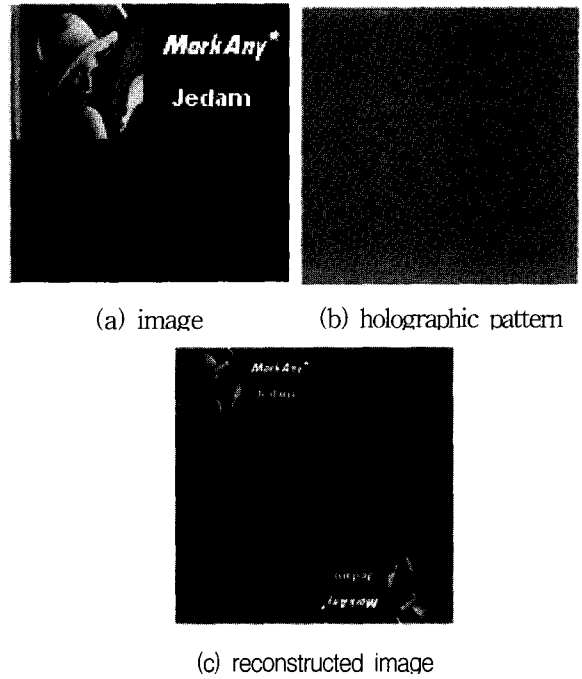


그림 2. 홀로그램과 복원영상
Fig. 2. Hologram recording and reconstruction

여기서, λ_2 와 f 는 각각 복원시 사용된 광원의 파장과 푸리에 변환 렌즈의 초점거리를 나타낸다. 식 (3)의 복소진폭을 식 (2)의 세 번째와 네 번째 복소진폭에 곱하면 홀로그램으로부터 회절되는 물체파를 얻을 수 있다. 이때, 홀로그램의 기록과 복원에 사용된 광원의 파장과 푸리에 변환 렌즈의 초점거리를 $\lambda_1 = \lambda_2$, $f = f$ 와 같이 가정한다면 식 (4)와 같이 홀로그램으로부터 회절되어 복원되는 물체파 정보를 간략화할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 U_I(\xi, \eta) &= R O^* R \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda_1 f} (\xi x_r + \eta y_r) \right. \\
 &\quad \left. + j \frac{2\pi}{\lambda_1 f} (\xi x_o + \eta y_o) - j \frac{2\pi}{\lambda_2 f} (\xi x_r + \eta y_r) \right\} \\
 &+ R O R^* \exp \left\{ +j \frac{2\pi}{\lambda_1 f} (\xi x_r + \eta y_r) \right. \\
 &\quad \left. - j \frac{2\pi}{\lambda_1 f} (\xi x_o + \eta y_o) - j \frac{2\pi}{\lambda_2 f} (\xi x_r + \eta y_r) \right\} \\
 &= R O R^* \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda_2 f} (\xi x_i + \eta y_i) \right\}
 \end{aligned} \tag{4}$$

여기서, *는 허수항을 의미하고, (x_i, y_i) 는 홀로그램 평면으로부터 복원된 광원의 좌표를 나타내며 식 (5)와 같이 각각의 좌표값을 얻을 수 있다.

$$\begin{cases} x_i = \mp x_o \pm x_r + x_r' \\ y_i = \mp y_o \pm y_r + y_r' \end{cases} \quad (5)$$

복원되는 광원은 홀로그래 평면을 중심으로 허상(virtual image)과 실상(real image)이 대칭 쌍(twin image)으로 복원된다. 그림 2는 홀로그래픽 워터마크로 사용될 홀로그래와 홀로그래에 의한 복원영상을 나타낸다. 그림 2에서 보는 바와 같이 입력 데이터는 식 (2)에 의해 기준파와의 간섭에 의한 홀로그래가 만들어지며 식 (4)와 같은 과정을 거쳐 식 (5)에서와 같은 허상과 실상이 원점 대칭된 형태로 복원된 영상을 얻을 수 있다.

III. 홀로그래픽 워터마크

본 논문에서는 기하학적인 변형에 강인하고 멀티비트 정보를 삽입할 수 있는 홀로그래픽 워터마크를 제안하고자 한다. 홀로그래픽 워터마크는 회전이나 축소, 확대 그리고 cropping에 대하여 강인한 특성을 갖는 홀로그래를 워터마크로 사용하여 공간영역에서 이미지에 삽입하고 원본 이미지 없이 홀로그래의 복원 방법만으로 간단하게 삽입된 정보를 추출할 수 있다. 제안된 방법은 기하학적인 변형에 대한 강인성을 위해 별도의 워터마크나 템플릿과 같은 회전 및 스케일 변형 정보를 삽입하는 과정이 필요하지 않기 때문에 부가적인 정보 삽입에 따른 많은 계산량 및 좌표변환에 의한 삽입 정보의 손실을 극복할 수 있다. 또한, 홀로그래의 용장성(redundancy)으로 워터마크를 반복적으로 삽입하지 않고도 cropping이나 cutting과 같은 변형에 강인하기 때문에 전체적인 처리과정이 간단하다. 식 (6)은 식 (2)에 의해 생성된 홀로그래를 이미지에 중첩시킴으로써 얻어지는 워터마킹된 이미지를 나타낸다.

$$w(x, y) = c(x, y) + \alpha H(\xi, \eta) \quad (6)$$

여기서, $w(x, y)$ 와 $c(x, y)$ 는 각각 워터마킹된 이미지와 콘텐츠 이미지를 나타내고 α 는 홀로그래의 가중치를 나타낸다. 이때, 콘텐츠 이미지와 홀로그래는 각각 정규화되어 중첩되고 홀로그래 가중치에 의해 삽입 강도를 조절하였다. 식 (6)에 의해 표현된 워터마킹 이미지에 식 (3)의 복원파를 곱한 후, 역푸리에 변환시키면 삽입된 멀티비트 정보를 추출할 수 있다. 이때, 삽입된 멀티비트 정보는 그림 1과 식 (1)을 이용하여 식 (7)과 같이 여러 점들의 중첩으로 표현될 수 있으며, 이러

한 점들은 식 (8)을 통해 각각 독립적으로 추출된다.

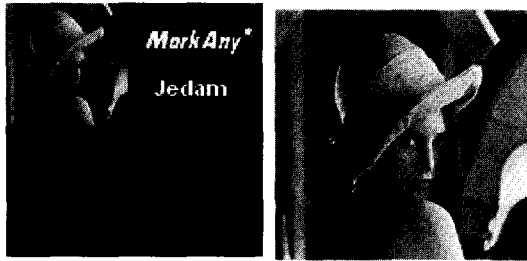
$$d(x_o, y_o) = \sum_{l=1}^N d_l(x_o, y_o) \quad (7)$$

$$d(x_i, y_i) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} w(x_i, y_i) U_R(\xi, \eta) \times \exp\{j2\pi(\xi x_i + \eta y_i)\} d\xi d\eta \quad (8)$$

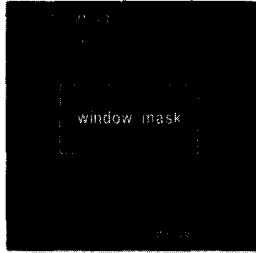
여기서, $d_l(x_o, y_o)$ 은 2차원 평면에서의 데이터 삽입과 추출시 사용된 비트정보의 순서를 의미하며, 중첩된 $d(x_o, y_o)$ 와 $d(x_i, y_i)$ 는 각각 삽입된 데이터와 추출된 데이터를 나타내고, N 은 삽입된 데이터의 개수이다. 식 (8)에서와 같이 홀로그래픽 워터마크는 원본 이미지 없이 삽입된 멀티비트 정보를 추출할 수 있지만 푸리에 변환에 의한 원본 이미지의 푸리에 스펙트럼과 홀로그래의 복원 이미지가 중첩되기 때문에 식 (8)에서 삽입된 멀티비트 정보를 추출하기 위해 원본 이미지의 푸리에 스펙트럼에서 홀로그래의 복원 이미지를 분리시켜야 된다. 일반적으로 원본 이미지의 푸리에 스펙트럼은 대부분 저주파수 대역에 집중되어 있으므로 고주파수 대역에서 홀로그래의 복원 이미지가 나타나면서 동시에 원본 이미지에 의한 푸리에 스펙트럼을 윈도우 마스크를 이용하여 차단시키면 원본 이미지 없이 멀티비트 정보를 추출할 수 있다. 그림 3은 이러한 방법에 의해 추출된 정보를 나타낸다.

그림 3에서와 같이 홀로그래에 의한 추출 정보를 원본 이미지의 푸리에 스펙트럼으로부터 분리하기 위해 식 (5)를 이용하여 추출될 데이터의 좌표를 설계한다. 본 논문에서는 기하학적인 변형에 강인하면서 많은 양의 디지털 정보 삽입이 가능함을 증명하기 위해 그림 3에서와 같은 이미지 정보를 사용하지 않고 삽입 데이터를 "1"과 "0"의 이진 정보(binary data stream)로 구성하여 삽입용량을 측정하였다. 많은 양의 이진 정보를 비인지성을 갖도록 삽입하면서 기하학적인 변형에도 오류없이 추출할 수 있으면 사용자의 생체정보나 2차원 바코드(2D barcode)와 같은 다양한 정보로 응용하는 것이 가능하다.

그림 4는 임의의 멀티비트 정보를 이용하여 디지털 홀로그래를 생성시킨 후, 이미지에 삽입하여 추출된 결과를 나타낸다. 그림 4(a)에서와 같이 삽입된 비트수는 픽셀 좌표 (20, 100)에서 시작하여 (105, 120)까지 총 80 비트이고 이때 그림 4(c)의 워터마킹 이미지에 대한



(a) watermark image (b) watermarking image



(c) watermarking image

그림 3. 푸리에 스펙트럼의 대역 분리를 이용한 정보 추출

Fig. 3. Extraction of embedding image



(a) multiple bits(80bit) (b) hologram

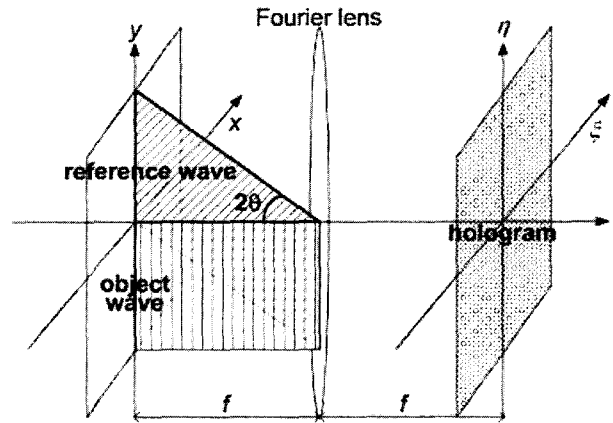


(c) watermarking image (d) extracted bits

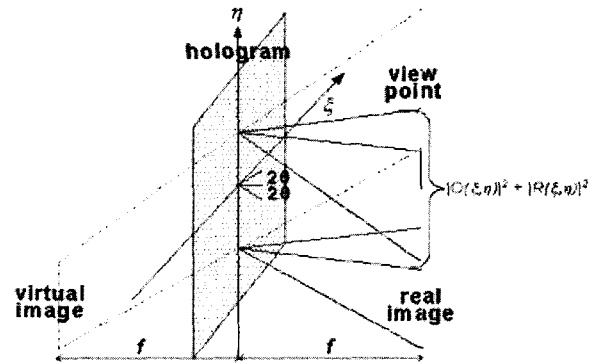
그림 4. 멀티비트를 이용한 홀로그래픽 워터마크의 삽입 및 추출

Fig. 4. Holographic watermark using multiple bits

PSNR(peak signal-to-noise ratio)는 약 45dB 이다. 그림 4에서 삽입된 데이터와 추출된 데이터의 위치가 다른 것은 식 (5)에 설명된 것과 같이 디지털 홀로그램을 생성할 때 사용된 기준파와 물체파 그리고 복원파의 상대적인 위치 때문이다. 그러나 식 (5)를 이용하여 원하



(a) recording off-axis hologram



(b) reconstruction from off-axis hologram

그림 5. 비축 홀로그램의 기록과 복원

Fig. 5. Geometry for off-axis hologram

는 픽셀에 추출된 데이터를 생성시킬 수 있으므로 추출된 이진 데이터로부터 원래의 정보로 디코딩할 때 별도의 동기값을 적용시킬 필요가 없다.

그림 4(a)에서 시작 비트의 좌표는 좌측상단을 기준으로 (20, 100)이고 마지막 비트의 좌표는 (105, 120)이며 기준파와 복원파의 좌표를 각각 (1, 129)와 (1,129)라고 하면 식 (5)에 의해 그림 4(d)에서와 같이 각각 (20, 100)-(105, 120)와 (238, 158)-(152, 138)에서 삽입된 멀티비트가 추출된다. 그림 4(b)의 홀로그램 생성시 물체파(삽입 비트)에 대한 푸리에 변환값은 대부분의 진폭 정보에 대한 푸리에 스펙트럼이 중앙에 집중되기 때문에 매우 큰 변화 범위를 갖는다. 이러한 특성은 홀로그램의 회절효율을 떨어뜨림과 동시에 워터마크 이미지의 PSNR을 나쁘게 한다. 따라서 물체파를 푸리에 변환하기 전에 임의의 랜덤 위상인자(random-phase factor)를 곱하여 물체파의 푸리에 계수값을 일정하게 만든다. 이것은 광학적으로 diffuser를 놓는 것과 유사한 효과를 갖기 때문에 물체파의 세기 정보를 모든 영역에 골고루 분산시키는 역할을 한다.

본 논문에서 사용된 멀티비트 정보는 픽셀단위로 삽입되기 때문에 1개의 픽셀이 1비트가 된다. 따라서 그림 3(c)에 나타난 원본 이미지의 푸리에 스펙트럼을 제거하기 위해 사용된 윈도우 마스크를 제외한 영역이 삽입 가능한 정보량으로 간주될 수 있다. 실험적으로 윈도우 마스크의 크기는 원본 이미지의 0.5배 이하로 구현할 경우 삽입된 정보를 오류없이 추출하는 것이 가능하다.

그림 4에 사용된 256×256 크기의 원본 이미지에서는 사용된 윈도우 마스크 크기를 제외한 최소 256×128 멀티비트를 삽입할 수 있는 공간을 갖고 있다. 그러나 그림 2와 3에서 보는 바와 같이 푸리에 홀로그램은 허상과 실상이 대칭적으로 발생되기 때문에 삽입 가능한 멀티비트 공간이 256×64로 줄어든다. 따라서 본 논문에서는 보다 많은 멀티비트 정보를 삽입할 수 있는 영역을 확보하기 위해 그림 5와 같은 비축 홀로그램(off-axis hologram)을 사용하여 실상과 허상을 분리하여 멀티비트 정보가 동시에 추출되는 것을 방지하였다. 그림 5에서와 같이 비축 홀로그램은 기록과정에서 기록매질로 입사되는 기준파와 물체파를 다른 각도로 분리시킴으로써 복원시 실상과 허상 그리고 물체파와 복원파의 회절 성분을 분리하여 하나의 이미지만을 관측할 수 있다. 식 (9)는 식 (1)에서 표현된 기준파를 이용하여 물체파로부터 2θ만큼 분리될 경우 발생하는 비축 홀로그램을 나타낸다.

$$U_{H_{off}}(\xi, \eta) = O(\xi, \eta)^* R(\xi, \eta) \exp(-j2\pi\alpha y) + O(\xi, \eta) R(\xi, \eta)^* \exp(+j2\pi\alpha y) \tag{9}$$

여기서, α는 기준파의 공간주파수(spatial frequency)로서 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{\sin 2\theta}{\lambda f} \tag{10}$$

그림 6은 식 (9)와 식 (10)을 이용하여 만들어진 비축 홀로그램과 워터마킹 이미지로부터 추출된 데이터를 나타낸다. 그림 6에서는 그림 4에서 추출된 데이터 쌍이 존재하지 않기 때문에 보다 많은 데이터 삽입이 가능하다. 그림 6(b)와 그림 6(c) 그리고 그림 6(d)는 각각 80, 205, 그리고 260 비트의 정보를 44dB 이상으로 삽입하여 추출한 결과이다. 그림 6에서 나타난 것과 같이 임의의 비트 구성이 가능하기 때문에 개인의 신상정보나

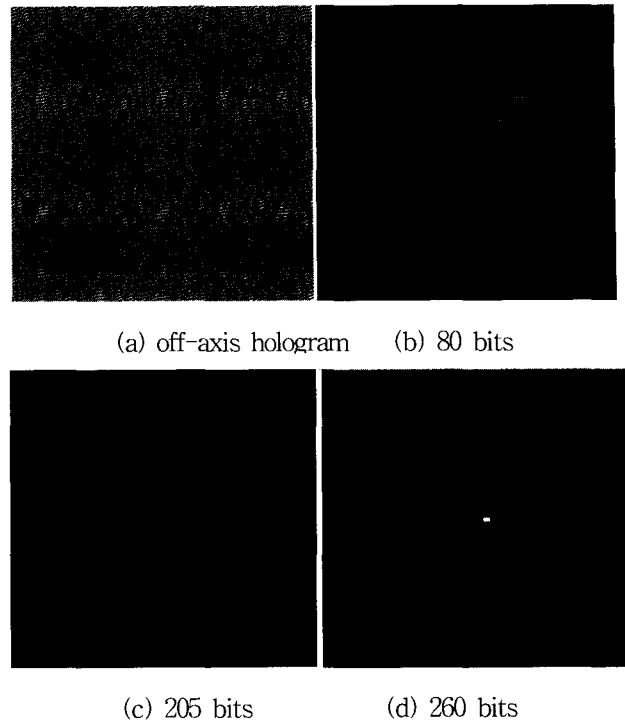


그림 6. 비축 홀로그램과 홀로그래픽 워터마크의 추출
Fig. 6. Extracted multi-bits from off-axis holographic watermark

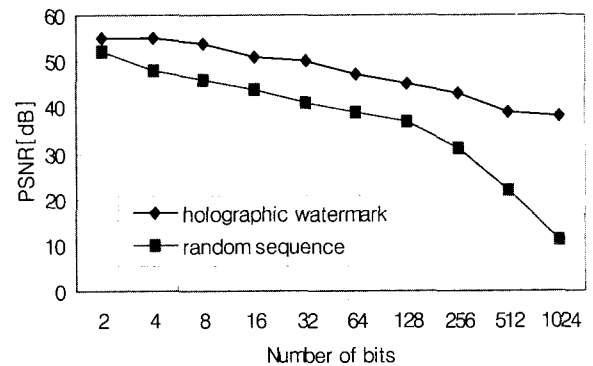


그림 7. 삽입 비트수에 따른 PSNR
Fig. 7. PSNR vs. number of bits

생체정보 등과 같은 binary stream이나 2차원 바코드 형태의 비트 구성이 가능하다.

그림 7은 본 논문에서 제시된 방법에 의해 예리없이 삽입 및 추출 가능한 비트수에 따른 워터마킹 이미지의 평균 PSNR을 나타낸다. 워터마킹 이미지의 PSNR은 워터마크의 삽입강도에 반비례하기 때문에 이미지의 질을 고려하여 워터마크를 삽입한다. 이와 같이, 강인성을 유지하려는 워터마크의 삽입강도와 이미지 질에는 항상 trade-off가 존재한다. 공간영역에서 이동된 랜덤시퀀스를 중첩함으로써 비교적 많은 양의 비트 정보를 표현할 수 있는 대역확산 워터마킹 방법은 삽입하고자 하는 비

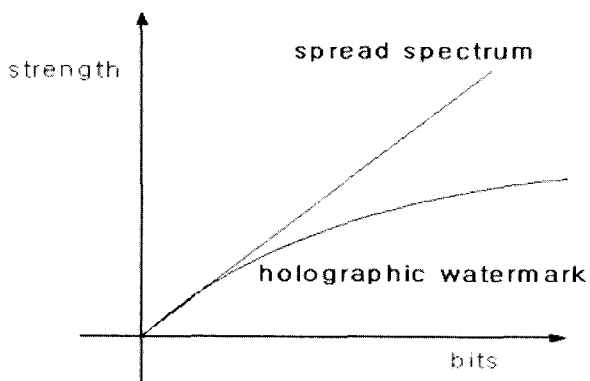


그림 8. 삽입강도에 따른 비트 정보량 비교
 Fig. 8. Strength vs. embedding bits for the spread spectrum and holographic methods

트 정보량과 랜덤시퀀스의 개수(삽입강도)는 선형적인 관계에 있기 때문에 이미지 질을 고려한 중첩할 수 있는 랜덤시퀀스의 개수는 제한되어 있다. 그러나 본 논문에서 제안된 홀로그래픽 워터마크는 홀로그램의 용장성으로 인해 이미지 질을 고려한 비트 정보량은 삽입강도에 대해 비선형적인 특성을 갖고 있다.

그림 8은 랜덤시퀀스를 이용하는 방법과 홀로그램을 이용하는 방법에 따른 삽입강도와 비트 정보량의 특성을 비교한 것이다. 홀로그래픽 워터마크는 데이터의 삽입 정보량과 비례하여 선형적으로 중첩되는 랜덤시퀀스와는 달리 홀로그래픽 워터마크의 삽입강도는 홀로그램 생성시 각각의 비트 데이터에 의한 보강, 상쇄 간섭에 의해 로그 함수형태의 비선형적인 증가를 나타낸다. 또한, 삽입정보에 따라 증가되는 홀로그램의 에너지 레벨을 비선형적으로 양자화시켜 삽입하는 것이 가능하기 때문에 낮은 삽입강도에서 비교적 많은 데이터의 삽입이 가능하다.

IV. 실험 및 고찰

비인지성을 갖추면서도 멀티비트를 삽입할 수 있는 홀로그래픽 워터마크의 기하학적인 강인성을 분석하기 위해 256×256 크기의 "lena" 영상에 홀로그래픽 워터마크를 공간영역에서 삽입하였다. 홀로그래픽 워터마크는 256×256 크기로 생성되며 "1" 과 "0"의 이진 데이터로 구성된다. 본 실험에서는 제안된 홀로그래픽 워터마크의 기하학적인 강인성을 워터마크 이미지의 화질에 따른 BER을 이용하여 분석하였다.

그림 9는 회전(rotation)에 의한 기하학적인 변형에 대한 홀로그램의 복원 특성을 나타낸 것이다. 2비트의

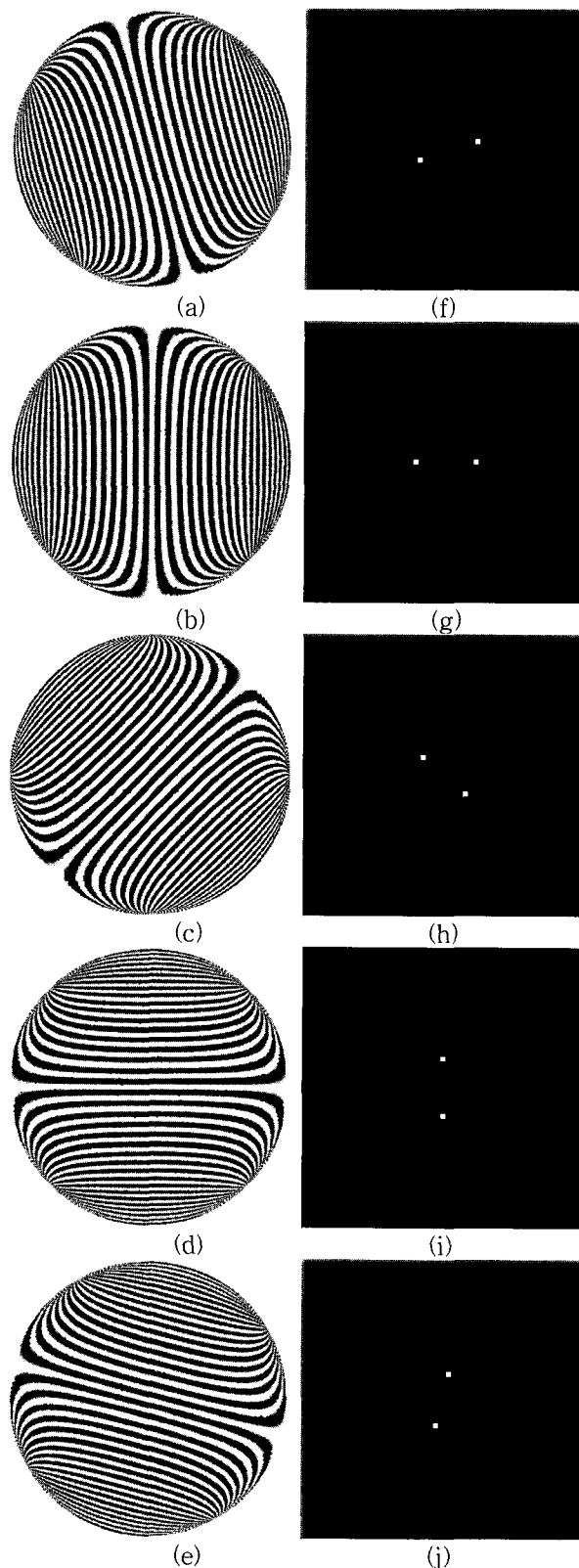


그림 9. 회전된 홀로그램에 의한 복원영상
 Fig. 9. Reconstructed images from the rotated hologram. Hologram rotation are (a) -60, (b) -45, (c) 0, (d) 45, and (e) 60 degrees. Reconstruction images are (f) -60, (g) -45, (c) 0, (d) 45, and (e) 60 degrees.

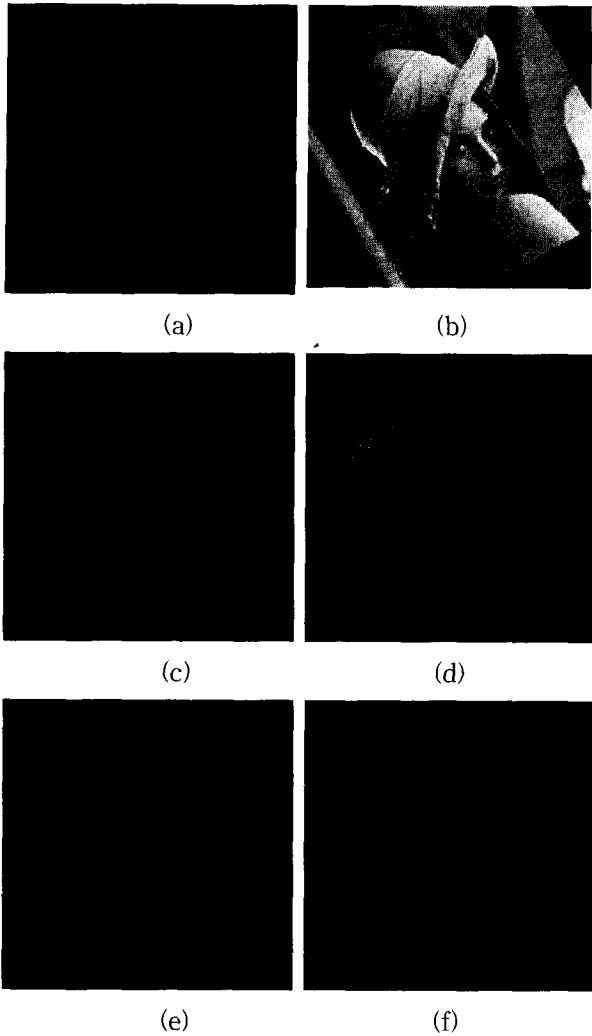


그림 10. 회전 변형의 데이터 추출 방법
 Fig. 10. Rotation attacks. Recovered bits are (c) 15, (d) 30, (e) 45, and (f) 90 degrees in a counterclockwise direction

이진 데이터를 이용하여 생성된 홀로그램은 각각 -60, -45, 45, 60로 회전함에 따라 홀로그램의 회절 특성에 따라 복원된 이진 데이터의 위치가 달라진다. 이때, 복원된 이진 데이터는 홀로그램의 회전각도와 동일하게 회전되어 복원되기 때문에 이러한 특성을 갖는 홀로그램이 워터마크로 삽입될 경우 회전변형에 의한 기하학적인 공격에 강인한 워터마킹 기술을 구현할 수 있다.

그림 10은 회전 변형에 강인한 홀로그램을 이용한 홀로그래픽 워터마크의 회전공격에 따른 이진 데이터 추출방법을 나타낸다. 홀로그램의 회전변형은 복원파에 의한 회절파의 진행방향만을 변경시키기 때문에 삽입된 데이터는 회전에 따른 위치만 변경되고 형태는 그대로 유지된다. 회전변형에 따른 홀로그래픽 워터마크에 의한 삽입 데이터의 변형을 관찰하기 위해 그림 10(a)와

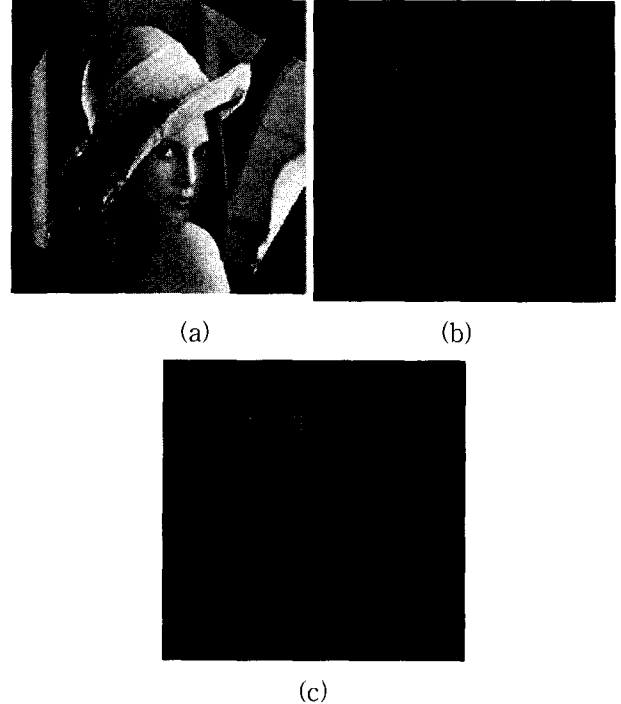


그림 11. 회전 변형의 데이터 추출
 Fig. 11. Recovered bits from the reversed watermarked image. Each image are (a) Inversed watermarked image, (b) correct recovered bits and (c) incorrect recovered bits

같이 39bits의 데이터를 한 행으로 삽입하였다. 이때, 데이터의 삽입강도는 45dB이고 비축 홀로그래픽 워터마크를 사용하였다. 그림 10(b)와 같이 임의의 각도로 회전변형된 워터마킹 이미지에서 홀로그램의 복원 방법에 의해 추출된 데이터는 그림 9(c)에서와 같이 허상과 실상이 회전되어 추출된다. 이때, 추출된 데이터의 회전각도는 워터마킹 이미지의 회전각도와 동일하며 이웃하여 추출된 데이터의 수평 거리차와 수직 거리차를 측정함으로써 회전각도를 구할 수 있다. 그림 10의 (d), (e), (f), (g)는 각각 반시계 방향으로 15~90도까지 워터마킹 이미지의 회전각도에 따른 추출된 데이터를 나타낸다. 홀로그램은 생성시 사용된 기준파의 입사각과 동일한 각도로 복원파를 입사시킬 경우 최대의 회절효율을 얻을 수 있으며 기록된 정보를 손실없이 복원될 수 있다.

따라서, 그림 10의 (d), (e), (f), (g)와 같이 회전에 의해 홀로그램의 위치가 바뀔 경우 홀로그램의 회절특성에 따른 삽입 데이터의 손실이 발생할 수 있다. 정확한 삽입 데이터를 추출하기 위해 그림 10(c)와 같은 방법에 의해 홀로그래픽 워터마크의 회전정보를 구하여 원상태로 역회전시킴으로써 정확한 삽입 데이터를 구할 수 있다.

그림 11은 그림 10(c)에서 얻어진 회전각도로 역회전

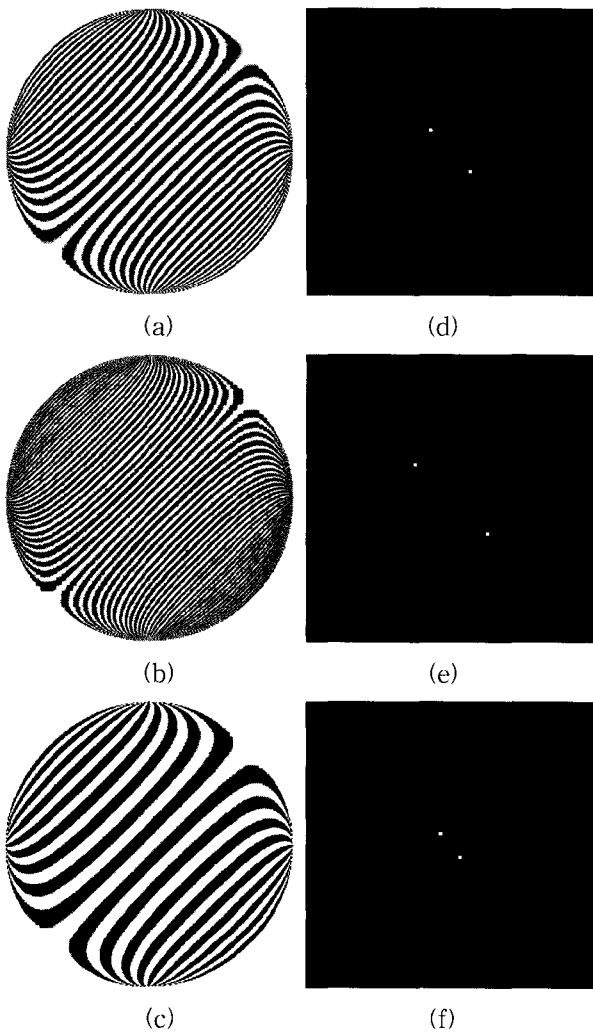


그림 12. 홀로그램 축소, 확대에 따른 복원영상
 Fig. 12. Reconstructed images for the different spatial frequency of the hologram. (a) Original hologram (b) Decreased hologram (c) Increased hologram (d) Original reconstruction (e) Magnification (f) Demagnification

시켰을 때, 얻어지는 워터마킹 이미지와 추출된 데이터를 나타낸다. 그림 11(a)의 역회전된 워터마킹 이미지가 회전공격과 일치할 경우 그림 11(b)에서와 같이 삽입된 데이터를 정확하게 추출할 수 있다. 그림 11(c)는 회전 각도가 정확하게 일치하지 않을 경우 추출된 데이터를 나타낸다. 본 논문에서는 비축 홀로그램을 이용하였기 때문에 복원파의 입사각이 정확하게 일치되지 않을 경우 추출 데이터의 회절효율이 떨어지고 허상과 실상이 대칭적으로 발생된다.

그림 12는 크기변형(scale)에 따른 홀로그램의 복원 특성을 나타낸다. 홀로그램에 의한 복원영상의 위치는 공간주파수에 의해 결정된다. 높은 공간주파수를 갖는 홀로그램은 간섭패턴 사이의 간격이 매우 조밀하기 때

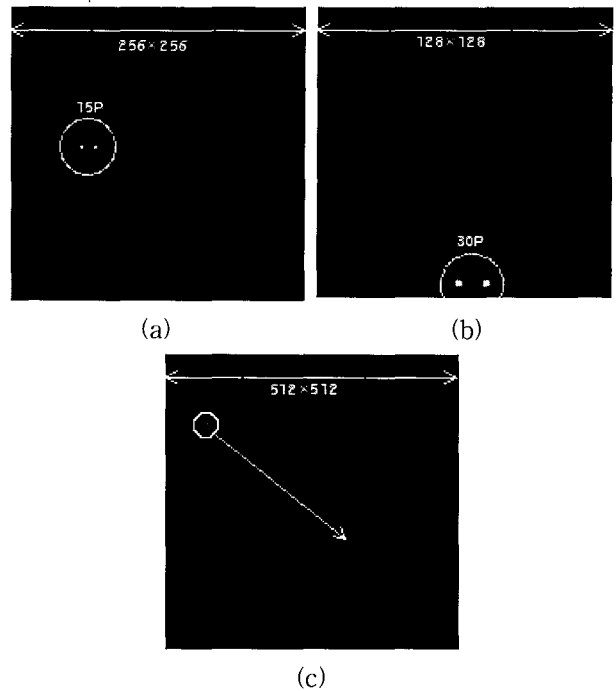


그림 13. 스케일 변형에 의한 데이터 추출 방법
 Fig. 13. Recovered bits by (a) original size, (b) demagnification, and (c) magnification of holographic watermark. Sized here to have the same printed dimensions.

문에 복원영상은 높은 회절각을 갖는 위치에 나타난다. 반대로 낮은 공간주파수를 갖는 홀로그램은 상대적으로 낮은 회절각을 갖는 위치에 복원영상이 나타난다. 홀로그램의 크기변형은 상대적으로 단위면적당 간섭패턴의 밀도를 변화시키기 때문에 축소될 경우 그림 12(b)와 같은 높은 공간주파수를 갖으며 확대될 경우 그림 12(c)와 같은 낮은 공간주파수에 의한 복원영상을 얻는다. 홀로그램의 축소, 확대에 따른 복원영상의 위치는 식 (11)과 같은 비례식으로 나타낼 수 있기 때문에 워터마킹 이미지의 크기변형 정도를 계산할 수 있다. 그림 12(e)는 홀로그램 축소에 비례하여 입력된 두 비트 사이의 거리가 확대된 복원영상을 나타내고 그림 12(f)는 공간주파수가 낮아짐에 따른 반대로 축소된 복원영상을 나타낸다.

그림 13은 15 픽셀만큼 떨어져 있는 두 개의 비트 데이터를 이용한 스케일 변형에 따른 홀로그래픽 워터마크의 특성을 나타낸다. 그림 13(a)는 256x256 크기를 갖는 워터마킹 이미지의 스케일 변화가 없을 경우 추출된 데이터를 나타내며, 그림 13(b)와 (c)는 각각 0.5배와 2배의 스케일 변형이 발생될 경우 추출된 데이터를 나타낸다. 홀로그래픽 워터마크의 간섭패턴은 축소될 경우 복원파에 의한 회절각을 증가시키고 확대될 경우 복원

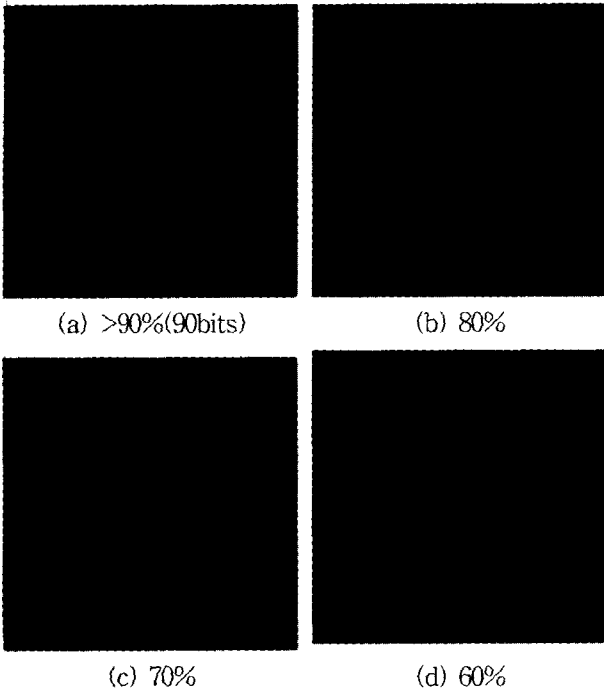


그림 14. 스케일 변형에 의한 데이터 추출
 Fig. 14. Recovered bits with (a) >90% (b) 80% (c) 70% (d) 60% scales in watermarked image size

파에 의한 회절각을 감소시키기 때문에 그림 13에서와 같이 홀로그래픽 워터마크의 스케일 변형에 반비례한 추출 데이터를 얻는다. 그림 13(b)는 홀로그래픽 워터마크의 스케일이 축소됨에 따라 추출된 데이터의 픽셀간격이 15P(pixel)에서 30P로 2배 증가하였고 그림 13(c)는 반대로 1/2배 감소하였다.

식 (11)은 홀로그래픽 워터마크의 스케일 변형에 따른 추출 데이터의 스케일 변화를 나타낸다.

$$M = \left| \frac{\partial x_i}{\partial x_o} \right| = \left| \frac{\partial y_i}{\partial y_o} \right| = \left| \frac{\partial f}{\partial f'} \right| \tag{11}$$

$$= m \left| 1 - \frac{f'}{f} \mp m^2 \frac{\lambda_1 f'}{\lambda_2 f} \right|^{-1}$$

여기서, m 과 M 는 각각 홀로그래픽 워터마크의 스케일 변형과 이로 추출 데이터의 스케일 변화를 나타낸다. 만약, $m > 1$ 이면 추출 데이터의 스케일은 커지고 $m < 1$ 이면 반대로 감소된다. 식 (11)에서와 같이 홀로그래픽 워터마크의 축소는 간섭패턴 간격을 축소하여 입사된 복원파의 회절을 증가시켜 확대된 추출 데이터를 얻고 홀로그래픽 워터마크의 확대는 반대로 축소된 추출 데이터를 얻는다.

그림 14는 40dB 이상의 삽입강도로 90bits가 삽입된 홀로그래픽 워터마크를 최소 60%에서 최대 200%까지

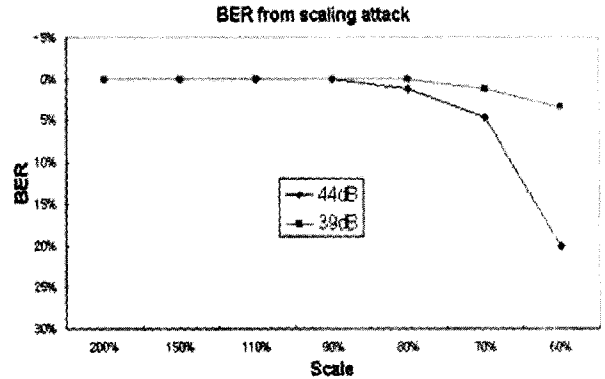


그림 15. 스케일 변형에 따른 BER
 Fig. 15. BER vs. scaling attack for the holographic watermark

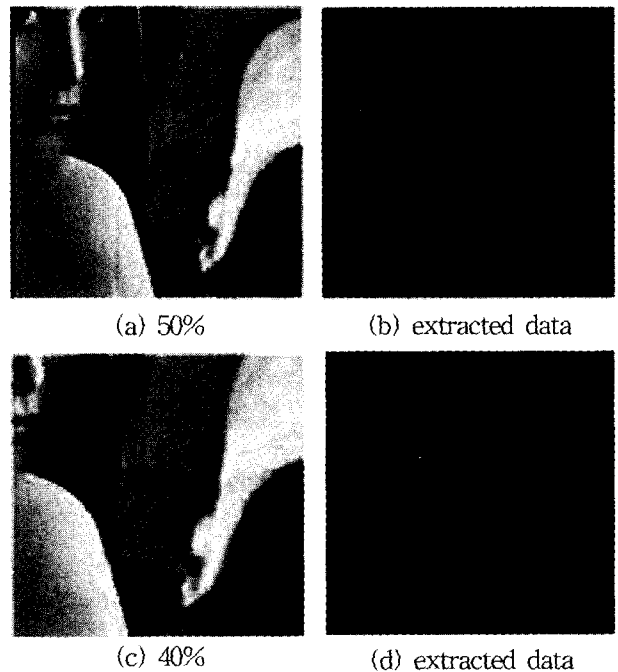


그림 16. cropping 변형에 의한 데이터 추출
 Fig. 16. Cropping images and recovered bits for payload 90 bits and PSNR 39dB. Image sizes are (a) 128×128(50%) and (b) 100×100(40%) pixels and recovered bits are (c) 128×128 and (d) 100×100.

스케일 변형을 가한 후, 추출된 데이터를 나타낸다. 그림 14에서와 같이 90% 이상의 스케일 변형에는 어리없이 삽입된 데이터의 추출이 가능하지만 그 이하로 스케일 변형이 발생될 경우 정확한 데이터 추출이 어렵다. 이와 같은 경우 어리정정코드를 삽입하거나 데이터의 삽입강도를 높여야 정확하게 추출될 수 있다.

그림 15는 삽입강도가 다른 두 개의 홀로그래픽 워터마크에 대해 스케일 변형율에 따른 BER(bit-error ratio)을 나타낸 것이다. 삽입강도가 44dB인 홀로그래픽

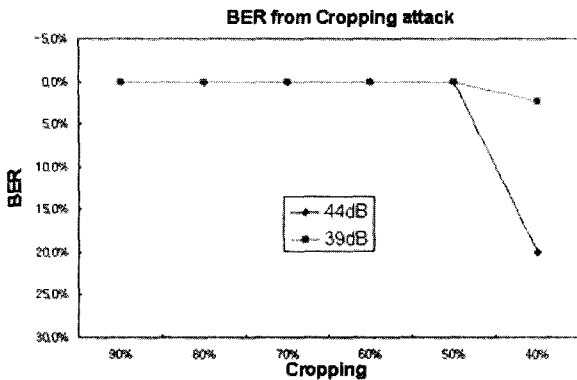


그림 17. cropping 변형에 따른 BER
 Fig. 17. BER vs. cropping attack for the holographic watermark

워터마크는 스케일 변형율이 60%에서 약 22%의 BER을 갖지만 삽입강도를 높여 39dB에서는 BER이 3.3%로 감소된다.

그림 16은 cropping 변형에 의한 홀로그래픽 워터마크의 데이터 추출을 나타낸 것이다. 홀로그래픽 워터마크는 전 영역에 삽입될 데이터에 대한 정보가 존재하기 때문에 일부분만으로도 원 정보를 복원할 수 있는 뛰어난 용장성을 갖고 있다. 따라서, cropping 변형에 대해 매우 강인하다. 그림 16에서는 44dB의 삽입강도를 유지하면서 90bits의 데이터가 삽입된 홀로그래픽 워터마크의 40%만으로 추출된 데이터를 나타낸다. 그림 17은 삽입강도가 다른 두 개의 홀로그래픽 워터마크에 대해 cropping 변형율에 따른 BER을 나타낸 것으로 홀로그래픽 워터마크의 40%만으로 삽입된 데이터를 추출할 경우 삽입강도가 44dB에서는 약 20%의 BER이 발생되고 39dB에서는 약 2.2%로 BER이 향상되었다.

V. 결 론

논문에서는 기하학적인 변형에 강인하면서 멀티비트 정보를 삽입할 수 있는 홀로그래픽 워터마크에 대하여 제안하고 이에 대한 이론적인 분석과 강인성 평가를 위한 기하학적 변형 및 영상압축 실험을 수행하였다. 홀로그래픽 워터마크는 데이터의 삽입 효율과 기하학적인 변형의 발생 유무를 체크할 수 있는 비축 퓨리에 홀로그래프를 이용하여 공간영역에서 이미지에 비인지성을 갖도록 삽입하였다. 삽입된 데이터는 워터마크 이미지에 홀로그래프 생성시 사용된 기준과 정보를 곱한 후, 퓨리에 변환함으로써 얻어진다. 이때, 홀로그래픽 워터마크에 의한 삽입 데이터는 이미지에 의한 퓨리에 스펙트럼과 분리되도

록 설계하여 윈도우 마스크를 통해 제거함으로써 원본 이미지 없이 추출될 수 있다. 실험에 사용된 데이터는 256×256 크기의 이미지에 “1”과 “0”의 이진 데이터로 만들어 사용하였고 1bit/pixel 단위로 2비트에서 1,024비트 데이터를 39~55dB의 삽입강도로 삽입 및 에러없이 추출하였다. rotation, scale, cropping와 같은 기하학적인 공격에 따른 홀로그래픽 워터마크의 강인성 실험결과 회전, 스케일, cropping 변형에 대해 삽입강도가 44dB 이상에서는 20% 이내의 모든 변형에 에러없이 삽입 데이터의 추출이 가능하였고 삽입강도가 39dB 이상에서는 평균 50% 정도의 기하학적인 공격에 강인한 특성을 보였다.

본 논문에서 제안된 방법은 온라인 상에서 위변조 방지를 위해 기하학적인 공격에 한정하여 실험하였으나 향후 연구과제에서는 보다 다양한 공격에 대한 실험과 오프라인에서 입출력된 문서 및 신분증에 대한 위변조를 방지하기 위해 D/A 및 A/D 변환에 대한 실험을 수행할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] I. J. Cox, J. Kilian, T. Leighton, and T. Shamoon, "Secure spread spectrum watermarking for multi media," *NEC Res. Inst., Princeton, NJ, Tech Rep.*, pp.95-100, 1995.
- [2] I. Pitas and T. Kaskalis, "Applying Signatures on Digital Image," *Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing*, pp.460-463, June 1995.
- [3] K. T. Kim, J. H. Kim, and E. S. Kim, "Multiple Information Hiding Technique using Random Sequence and Hadamard Matrix," *Opt. Eng.*, vol.40, no.11, pp. 2489-2494, 2001.
- [4] J. J. K. O'Ruanidh and Thierry Pun, "Rotation, Scale and Translation Invariant Digital Image Watermarking", *Signal processing journal*, 1998.
- [5] C. Y. Lin, "Public Watermarking Surviving General Scaling and Cropping: An Application for Print-and-Scan Process", *ACM Multimedia 99*, Orlando, FL, USA, Oct 1999.
- [6] C. Y. Lin and Shih-Fu Chang, "Distortion Modeling and Invariant Extraction for Digital Image Print-and-Scan Process", *ISMIP 99*, Taipei, Taiwan, Dec. 1999.

[7] R. Caldelli, M. Barni, F. Bartolini, and A. Piva, "Geo-metric-Invariant Robust Watermarking through Constellation Matching in the Frequency domain," *Proceedings of 7th IEEE ICIP 2000*, vol. II, pp.65-68, Vancouver, Canada, Sep., 2000.

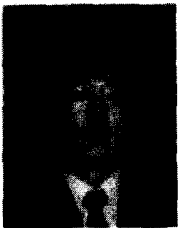
[8] C. R. Choi and J. Jeong, "Robust Image Watermarking Scheme Resilient to De-synchronization Attacks," *SPIE 2002 Security and Watermarking of Multimedia Contents IV*, San Jose, USA, Jan., 2002.

[9] D. Gaber, "A New Microscope Principle," *Nature*, Vol.161, pp.777, 1948.

[10] E. N. Leith and J. Upatnieks, "Reconstructed Wavefronts and Communication Theory," *J. Opt. Soc. Am* vol.52, pp.1377, 1962.

[11] F. Hartung, J. K. Su, and B. Girod, "Spread Spectrum Watermarking: Malicious Attacks and Counterattacks," *Proceedings of SPIE 3657, Security and Watermarking of Multimedia Contents*, pp. 147-158, 1999.

저 자 소 개



김 규 태(정회원)
 1996년 광운대학교 전자공학과 (학사)
 1998년 광운대학교 전자공학과 (석사)
 2002년 광운대학교 전자공학과 (박사)

2003년~현재 마크애니 책임연구원
 <주관심분야: 디지털 워터마킹, 디지털 홀로그래, 영상처리, 광시큐리티>



김 중 원(정회원)
 1989년 서울시립대학교 전자공학과 (학사)
 1991년 서울시립대학교 전자공학과 (석사)
 1995년 서울시립대학교 전자공학과 (박사)

1995년~1996년 kisti 선임연구원,
 1996년~2000년 주성대학 정보통신학과 조교수
 2000년~2004년 마크애니 연구소장
 2004년~현재 상명대학교 소프트웨어대학 소프트웨어학부 초빙교수
 <주관심분야: 통신, 컴퓨터, 신호처리, 반도체>



김 수 길(정회원)
 1988년 서울대학교 전기공학과 (학사)
 1991년 서울대학교 전기공학과 (석사)
 1997년 서울대학교 전기공학과 (박사)

2000년~현재 호서대학교 전기전자공학부 부교수
 <주관심분야: 디지털 홀로그래, 광시큐리티, 영상처리>



최 중 욱(정회원)
 1982년 아주대학교 산업공학과 (학사)
 1998년 University of South Carolina 경영정보시스템(박사)
 1988년~1991년 한국과학기술연구원 시스템공학센터 인공지능연구부 지식처리 연구실장

1991년~현재 상명대학교 소프트웨어학부 교수
 1999년~현재 마크애니 대표이사
 <주관심분야: 인공지능, 컴퓨터, 신호처리>