

디지털 워터마킹을 위한 새로운 광 시스템

도 양 회* · 김 병 열**

A New Optical System for Digital Watermarking

Yang-Hoi Doh* · Byung-Yeol Kim**

ABSTRACT

A new optical system is proposed for digital watermarking. The proposed system uses binary phase hologram and Mach-Zehnder interferometer. The mark image to be hidden is randomly phase-modulated image, and its Fourier-transformed hologram image is superposed on the original image. The mark image, the information for authentication, is extracted by using Mach-Zehnder interferometer. The availability of the proposed watermarking system is confirmed by computer simulation and optical experiment.

Key Words : Digital watermarking, Interferometer, Hologram, Encryption, Decryption

1. 서 론

디지털 워터마킹(watermarking)은 영상에 대한 저작권 보호를 위해 원 영상(original image)에 마크영상(mark image)을 삽입함으로써 소유권을 확인할 수 있어 영상의 불법 사용을 막을 수 있는 방법이다 [1-4]. 기존의 신호처리에 의한 디지털 워터마킹 시스템 방법들은 여러 가지 공격(attack)에서는 좋은 결과를 보이나 절단(cropping)에서는 영상의 손상이 심하다는 단점을 가지므로 이를 보완하기 위해서 홀로그램 방법[5]이 제안되었다.

본 논문에서는 이진위상 홀로그램(binary phase hologram)[3,6]을 이용하여 디지털 워터마킹을 구현하였으며 마흐-젠더 간섭계(Mach-Zehnder interferometer)[3,6]를 사용하여 영상의 진위여부를 검증하고 확인하였다. 먼저, 원 영상에 숨기기 위한 정보로 사용될 마크영상은 전 영역에 걸쳐 확산형태(diffuse type)로 랜덤 위상변조를 수행하게 되고 그 결과의 푸리에 변환하여 얻은 결과와 참조파(reference beam)를 중첩시켜 홀로그램의 세기를 얻는다. 생성된 홀로그램은 사람의 눈으로는 식별할 수 없기 때문에 원 영상에 선형중첩시켜 워터마킹된 영상을 얻는다. 이렇게 얻어진 영상의 복호화 과정은 경로차가 같도록 구성된 마흐-젠더 간섭계를 이용하여 워터마킹된 영상의 위상변조 성분과 위상변조된 원 영상을 합성시켜 마크영상을 얻음으로써 영상의 진위여부를 검증하였다. 임의의 절단된 영상에서도 마크영상이 재생됨을 컴퓨터 모의실험을 통해 확인하였고 위상 변조 특성이 있는 LCD(liquid crystal display)를 사용하여

* 제주대학교 전기전자공학부, 첨단기술연구소
Department of Electrical & Electronic Eng., Cheju Nat'l Univ.,
Res. Inst. of Adv. Tech.
** 경북대학교 대학원 전자공학과
Department of Electronics, Graduate School, Kyungpook Nat'l
Univ.

제안한 복호화 시스템을 광학적으로 구현하였다.

II. 디지털 워터마킹

2.1. 워터마킹의 기본 구조

디지털 워터마킹이란 디지털 콘텐츠의 저작권보호를 목적으로 삽입할 정보를 사람의 눈으로 쉽게 감지할 수 없도록 디지털 이미지나 오디오, 그리고 비디오 신호에 마크영상을 삽입(embedding)하는 기술을 말한다. 데이터의 형태를 완전히 바꾸는 암호법(cryptography)과는 달리 원 신호의 형태를 유지한다. 워터마킹의 기본구조는 Fig. 1에 나타내었다. 숨기기 위한 마크영상 M 과 마크영상이 삽입될 원 영상 V 가 서로 선형중첩 되어 생성된 워터마크 영상 V' 는

$$V' = V + \alpha M \quad (1)$$

와 같이 표현된다. 여기서 α 는 워터마킹의 세기이

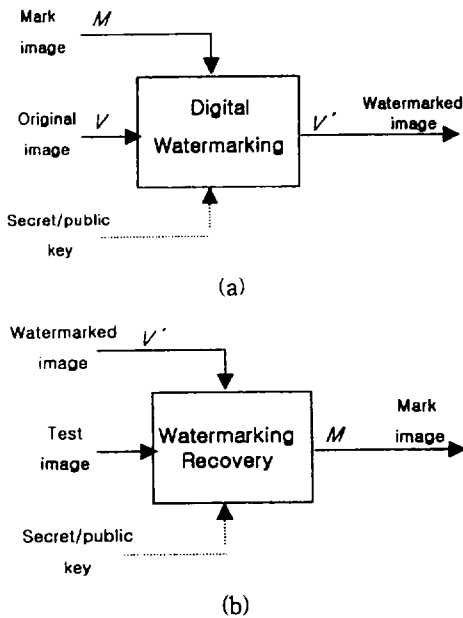


Fig. 1. The generic watermarking: (a)generic scheme of watermarking, and (b)decryption scheme of watermarking

다. 워터마크의 세기는 워터마크의 강인성(robust)과 영상의 질을 저하시키지 않는 범위 내에서 적절하게 선택되어야 하며 이는 영상의 선택에 따라 달라지게 된다. 이렇게 생성된 워터마크 영상 V' 는 인간시각 시스템에서는 원 영상과 차이를 감지할 수 없도록 구성해야한다. 또한 사용자에게 배포되면 무분별한 복제에 대처할 수 있도록 마크영상을 추출할 수 있어야 한다. 워터마크된 영상은 Fig. 1(b)와 같이 마크영상을 복호화 함으로써 영상의 진위를 판별한다.

2.2. 홀로그램의 생성과 재생

디지털 홀로그램은 원 이미지에 숨기기 위한 정보를 생성하기 위해 사용된다[3]. Fig. 2에서와 같이 마크이미지의 정보를 홀로그램 전체에 걸쳐 확산시키기 위해 마크영상 $m(x, y)$ 를 랜덤 위상변조 한다. 변조된 영상 $f(x, y)$ 는

$$f(x, y) = m(x, y) \exp [j\phi(x, y)] \quad (2)$$

와 같고, 이를 푸리에 변환한 결과 $F(u, v)$ 는 다음과 같다.

$$F(u, v) = \iint f(x, y) \exp[-j2\pi(ux + vy)] dx dy \quad (3)$$

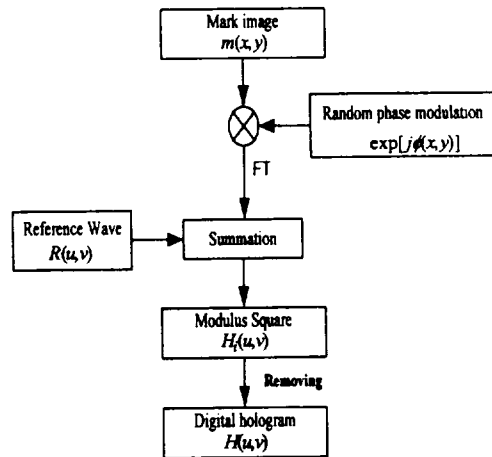


Fig. 2. The block diagram of the proposed method of hologram generation.

여기에 참조파 $R(u, v)$ 를 선형중첩시켜 홀로그래프의 세기 $H_s(u, v)$ 를 얻는다.

$$\begin{aligned} H_s(u, v) &= |F(u, v) + R(u, v)|^2 \\ &= |F(u, v)|^2 + |R(u, v)|^2 \\ &\quad + F^*(u, v)R(u, v) \\ &\quad + F(u, v)R^*(u, v) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 *는 복소공액을 나타낸다. 참조파 $R(u, v)$ 는 $\exp[2\pi j(au + bv)]$ 의 위상을 가지고, 성분 a, b 에 따라 홀로그래프의 재생 위치가 달라지게 된다 [3,4].

식 (4)에서 첫 두 개의 항은 단지 각 파의 세기에 의존하지만 세 번째와 네 번째 항은 서로간의 상대적인 위상에 의존한다. 따라서 첫 두 개의 항을 제거하면 이들 사이의 간섭무늬의 기록을 홀로그래프 $H(u, v)$ 로 볼 수 있게된다.

$$\begin{aligned} H(u, v) &= F^*(u, v)R(u, v) \\ &\quad + F(u, v)R^*(u, v) \end{aligned} \quad (5)$$

재생된 영상 $h(x, y)$ 은 홀로그래프를 역 푸리에 변환함으로써 다음과 같이 얻어지며,

$$\begin{aligned} h(x, y) &= \iint H(u, v) \exp[j2\pi(ux + vy)] du dv \\ &= f^*(x-a, y-b) + f[-(x+a), -(y+b)] \end{aligned} \quad (6)$$

재생된 영상 $h(x, y)$ 의 세기는

$$\begin{aligned} |h(x, y)|^2 &= |m^*(x-a, y-b)|^2 \\ &\quad + |m[-(x+a), -(y+b)]|^2 \end{aligned} \quad (7)$$

와 같다. 결과적으로 재생된 영상은 마크영상이 원점에 대칭적으로 나타나게 된다.

2.3. 워터마킹의 적용

홀로그래프 패턴은 확산형태로 존재하기 때문에 시각적으로 식별할 수 없다. 워터마크된 영상 $W(u, v)$ 는 원 영상 $q(u, v)$ 에 마크영상의 홀로그래프 $H(u, v)$ 을 선형중첩시켜서 다음과 같이 얻는다.

$$W(u, v) = q(u, v) + \alpha H(u, v) \quad (8)$$

여기서 α 는 워터마크의 세기이고, $q(u, v)$ 는 원 영상을 나타낸다. 워터마크의 세기 α 를 증가시킬 경우 일반적인 신호처리에는 강하지만 영상의 질을 저하시키는 단점이 있고, 반대로 감소하면 영상의 질은 보장되지만 각종 신호처리에 약한 단점을 가지고 있기 때문에 삽입되는 워터마크의 세기는 워터마크의 강인성과 영상의 질을 저하시키지 않는 범위 내에서 적절하게 선택되어야 하며 이는 영상의 선택에 따라 달라지게 된다.

III. 간섭계를 이용한 워터마킹의 복호화

마흐-젠더 간섭계를 이용한 복호화 시스템은 Fig. 3과 같이 경로차가 같도록 구성된 마흐-젠더 간섭계의 두 경로상에 워터마크된 영상의 위상변조 성분과 위상변조된 원 영상을 위치시켜 광학적인 간섭의 합에 의해 마크영상을 얻음으로써 영상의 진위여부를 검증한다.

제안된 알고리즘은 Fig. 4와 같다. 먼저, 워터마크된 영상 W 와 원 영상 $q(u, v)$ 의 위상 변조된 결과는

$$\begin{aligned} W_p(u, v) &= \exp[j\pi(q(u, v) + \alpha H(u, v))] \\ O_p(u, v) &= \exp[j\pi q(u, v)] \end{aligned} \quad (9)$$

와 같다. 두 함수는 각각 마흐-젠더 간섭계의 두 입력평면에 놓이게 되고 출력평면에 나타나는 광 세기 분포함수는 다음과 같다.

$$I = |W_p + O_p|^2$$

$$= |1 + \exp[j\pi\alpha H(u, v)]|^2 \quad (10)$$

광 세기 분포함수를 다시 정리하면

$$I = 2[1 + \cos[\pi\alpha H(u, v)]] \quad (11)$$

이 된다. 여기서 DC 성분을 제거하고, 위상 성분 $H(u, v)$ 를 추출하여 역푸리에 변환하면 $h(x, y)$ 로 주어지는 마크영상을 원점에 대칭적으로 재생하게 된다.

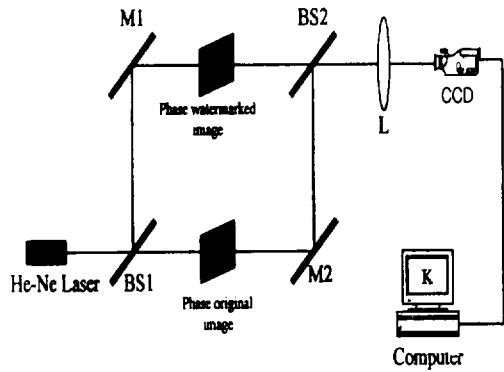


Fig. 3. Decryption system based on Mach-Zehnder interferometer.

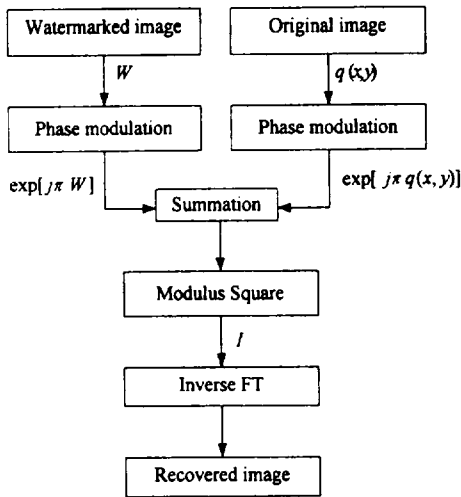


Fig. 4. The block diagram of the proposed decryption method.

IV. SA 알고리즘을 이용한 컴퓨터 형성 홀로그램

이진 마크영상의 위상 홀로그램(BPH)을 생성하기 위해서 SA(simulated annealing) 알고리즘[7]을 사용하였다. 이는 비용함수(cost function)의 일시적 증가를 조건부 수용함으로써 일반적인 반복 기법과는 달리 반복과정 중의 국소 최적해(local minimum)에서 벗어날 수 있다. SA 알고리즘은 사용되는 변수들이 많고 여러 번의 반복과정을 거쳐야 하지만 낮은 해상도에도 불구하고 회절효율이 높아 CGH 제작에 널리 이용되고 있다. 따라서 본 논문에서는 SA 알고리즘을 이용하여 이진 위상 CGH를 제작한 후 LCD를 이용하여 광실험을 하였다.

생성하려는 기준빔 함수 $h(x, y)$ 는 SA 알고리즘을 통해 설계된 위상 홀로그램 $H(u, v)$ 를 역푸리에 변환함으로써 얻을 수 있으며 각 함수는 $N \times N$ 화소로 구성되어 있다. 이들의 이산적인 표현은

$$h_{mn} = \frac{1}{N^2} \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \sum_{l=-N/2}^{N/2-1} \times H_{kl} \exp[j2\pi(\frac{km}{N} + \frac{ln}{N})] \quad (12)$$

와 같다. 여기서 H_{kl} 은 $H(u, v)$ 의 (k, l) 번째 표본화 값이며 h_{mn} 은 $h(x, y)$ 의 (m, n) 번째 표본화 값이다. SA 알고리즘에서 비용함수는 생성하려는 영상에 따라 다르며, 기준빔 생성을 위해 사용된 비용함수는

$$E = \left(\frac{\eta_t}{AB} - I_{AB} \right)^2 \quad (13)$$

으로 정의하였으며 여기서 η_t 는 목표 효율(target efficiency; TE)이고, 이상적인 값은 1이다. I_{AB} 는 (A, B) 위치에서의 빔의 세기이다. A 와 B 는 공간영역에서 기준빔의 위치를 나타내며, 기준빔의 생성 위치를 달리함으로써 입사각도를 제어할 수 있다. 그리고 이진 영상이나 명암도 영상 생성을 위한 비용함수는

제한된 영역 내에서 목표영상과 재생 영상사이의 평균 자승오차 E 로 정의한다.

$$E = \frac{1}{AB} \sum_{m=m_0}^{A-1} \sum_{n=n_0}^{B-1} ||g_{mn}|^2 - |h_{mn}|^2|^2$$

$$c \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} |g_{mn}|^2 = \eta_i$$

$$|g_{mn}|^2 = c |f_{mn}|^2 \tag{14}$$

여기서 η_i 는 목표효율을 나타내고 A와 B는 각각 목표영상의 가로 및 세로의 크기를 나타낸다. c 는 목표영상 g_{mn} 의 전체 에너지가 η_i 가 되도록 하는 계수 상수이며 전처리 과정에서 영상에 따라 달라진다.

V. 컴퓨터 모의실험

제안한 워터마킹 시스템의 성능을 알아보기 위해 Fig. 5(b)와 같이 이진 영상을 마크영상으로 하여 컴퓨터 모의실험을 하였다. 원 영상 Fig. 5(a)는 64×64 크기를 가지는 그레이 영상(gray image)이고 Fig. 5(b)는 원 영상에 삽입하기 위한 마크영상이다. Fig. 5(c)와 (d)는 마크영상을 이용하여 생성된 수치적 홀로그램과 SA알고리즘을 이용한 홀로그램을 나타낸다.

이 홀로그램은 각각을 구성하는 모든 셀이 원 정보를 포함하고 있으므로 일부가 훼손되더라도 이로 인해 발생하는 오차를 최소화 줄일 수 있다. Fig. 5(e)는 홀로그램 영상을 원 영상에 선형 중첩시켜 생성된 워터마킹된 영상을 나타낸다. 그리고 워터마킹된 영상과 마크영상의 홀로그램을 이용하여 재생된 영상은 Fig. 5(f)와 같다. 재생된 영상은 참조파의 위상성분에 따라서 원점에 대칭적으로 재생됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 제안된 시스템이 임의의 절단에도 강인함을 보이기 위해서 워터마킹된 영상을 적당한 비율로 절단했을 때 재생된 결과이다. Fig. 6(a), (c), (e)는 워터마킹된 영상 Fig. 5(e)를 25%, 50%, 75% 절단했을 때 영상이고, Fig. 6(g)는 영상의 중심부분 25%만

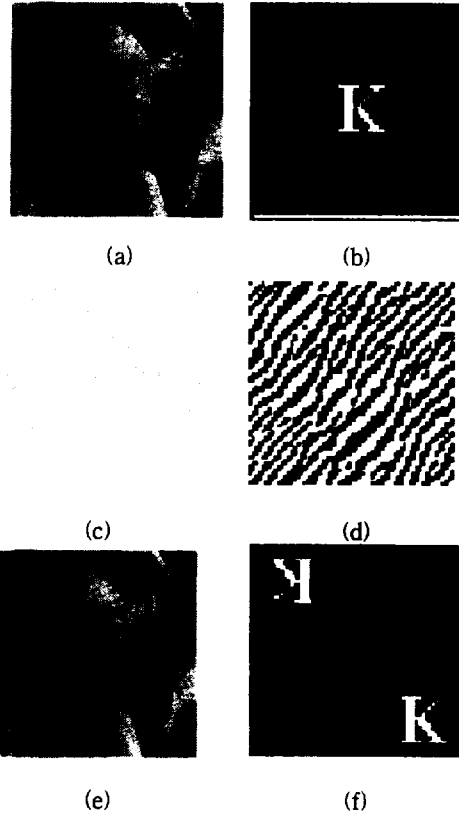


Fig. 5. (a) Original image, (b) mark image, (c) numerical hologram of (b), (d) CGH of (b), (e) watermarked image, and (f) reconstructed image.

선택했을 때의 영상이다. 이들 절단된 영상에 대한 재생 결과는 Fig. 6(b), (d), (f), (h)와 같이 재생된다. 이들은 원래의 재생된 영상 Fig. 5(f)에 비해 잡음이 더해졌으나 마크영상의 식별이 가능함을 알 수 있다.

재생된 영상의 식별 가능정도를 알아보기 위해서 신호 대 잡음비를 조사해 보았다. 여기서 신호 대 잡음비는 침투치에 대해 원 영상과 절단한 영상의 차성분의 root-mean-square(rms)의 비 PSNR (peak signal to noise ratio)로 정의한다. $M \times N$ 의 크기를 가지는 원영상을 $I(x, y)$, 절단된 영상을 $I'(x, y)$ 라 할 때의 PSNR은

$$PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{255}{y_{rms}} \right) \text{ [dB]} \tag{15}$$

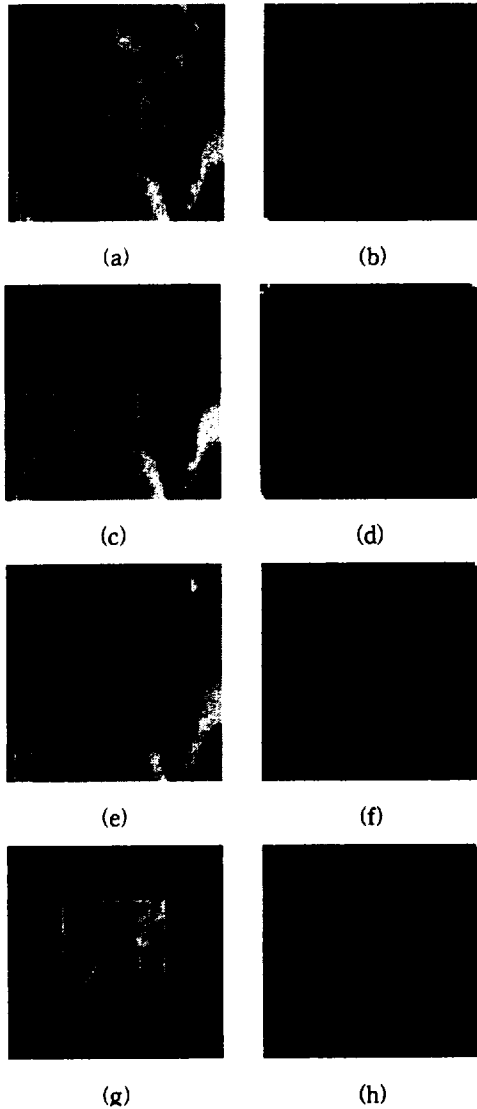


Fig. 6. Reconstructed image for cropping of water-marked image: (a) cropped image of 25%, (b) reconstructed image of (a), (c) horizontally cropped image of 50%, (d) reconstructed image of (c), (e) cropped image of 75%, (f) reconstructed image of (e), (g) 25% image of center, and (h) reconstructed image of (g).

와 같다. 여기서 y_{rms} 는

$$y_{rms} = \left\{ \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [I(x,y) - \hat{I}(x,y)]^2 \right\}^{1/2} \quad (16)$$

로 정의된다. 그림 7(a)는 워터마킹된 영상 그림 5(e)를 왼쪽부터 한 픽셀씩 절단했을 때의 PSNR을 나타낸다. 픽셀의 절단율이 25%, 50%, 75%일 때의 PSNR은 13.31, 10.39, 7.69의 값을 가지며 서서히 감소함을 알 수 있다. 그리고 그림 7(b)는 워터마킹된 영상 그림 5(e)를 한 픽셀씩 절단했을 때 재생된 영상과의 PSNR이다. 절단율이 25%, 50%, 75%일 때의 PSNR은 15.62, 14.41, 14.28로 조금씩 감소하지만 절단에 강인함을 보여준다.

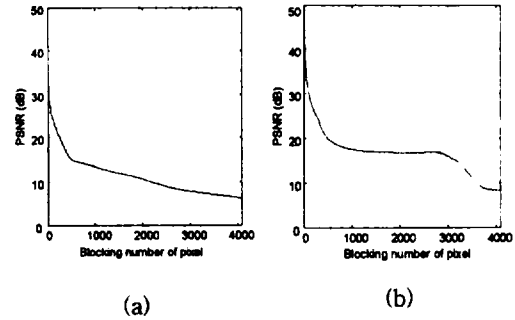


Fig. 7. Signal-to-noise ratios for pixel blocking: (a) PSNR of the watermarked image, and (b) PSNR of the reconstructed watermarked image.

VI. 광실험 및 고찰

마흐-젠더 간섭계를 구성한 후, 광 실험을 위해 'T'자 모양의 이진 영상을 원 영상으로 하여 광 실험을 하였다. 먼저, 마크영상을 원 영상에 중첩시킨 워터마킹된 영상을 이진위상 CGH로 제작하여 입력평면에 위치시키고 다른 입력평면에는 원 영상의 위상 변조된 성분을 각각 LCD에 올려서 실험하였다. 먼저, 그림 3과 같이 마흐-젠더 간섭계를 구성하여 위상변조 특성을 실험하였다. 두 경로상에 입력이 없으면 단순히 두 파의 합성이 출력평면에 나타내는데 두 경로의 광파를 서로 동일한 선형파로서 합성할 경우 두 광파의 간섭무늬가 나타난다. 일반적인 마흐-젠더 간섭계에서 동일한 파를 합성한 출력결과는 그림 8과 같이 간섭무늬로 나타난다.

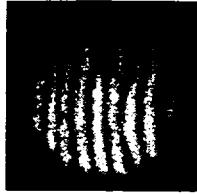


Fig. 8. Interferograms acquired through Mach-Zehnder interferometry experiment.

실험에 사용된 He-Ne 레이저 빔은 파장이 632.8nm인 선형빔을 이용하였고, 위상변조 특성이 있는 SLM은 EPSON사의 P13SMO15 LCD panel과 BE13S010 driver를 사용하였으며, PULNiX사의 TM-1320-15CL CCD를 사용하여 재생 영상을 기록하였다. 이 SLM은 한쪽 면에만 편광기가 부착되어 있어서 투사기(projector)용으로 제작된 모듈이다. LCD를 위상 변조기로 사용하는 경우에는 미리 위상 변조 특성을 정밀하게 조사한 후 그 결과에 따라서 입력 전압을 인가해야 한다. 제안한 복호화 시스템에서 원 영상 그림 9(a)와 마크영상 그림 9(b)를 사용하여 재생된 영상은 그림 9(c)와 같다. 재생된 영상은 앞절에서의 모의실험과 같이 마크영상이 원점에 대칭적으로 재생됨을 확인할 수 있다.

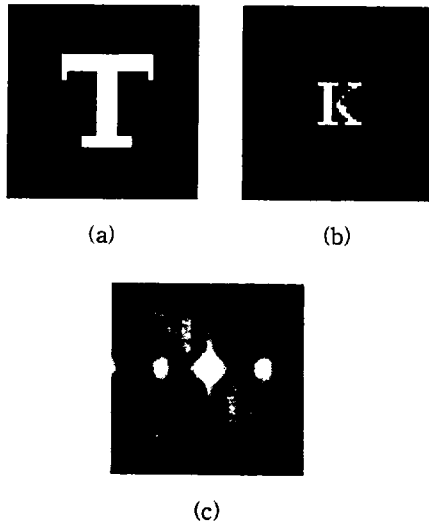


Fig. 9. Image for the experiment: (a) original image, (b) mark image, and (c) reconstructed image.

제안한 시스템의 광 실험을 통해 재생된 영상은 광학장비의 성능개선과 서로 다른 LCD의 위상 변조 특성의 오차로 인해 영상의 왜곡이 발생한 것으로 생각되며, 이러한 문제점을 보완한다면 더 좋은 실험 결과가 얻어질 것으로 예상된다.

VII. 결 론

본 논문에서는 이진위상 홀로그램과 마흐-젠더 간섭계를 이용하여 워터마킹 시스템을 구현하였다. 마크영상의 홀로그램 영상을 원 영상에 삽입함으로써 사람의 눈으로는 원 영상과의 차이를 구분할 수 없게 하였다. 또한 삽입된 홀로그램을 구성하는 모든 셀이 마크영상의 정보를 포함하고 있으므로 임의적인 절단에서도 강인함을 보였다. 제안한 광학적 워터마킹 복호화 시스템은 원 영상을 가지고 있는 사람만이 영상의 진위여부를 판별할 수 있으므로 무분별한 복제로부터 저작권을 보호할 수 있으며 광의 고속성과 실시간 처리가 가능하다는 장점이 있다. 즉, 제안한 시스템은 인증 시스템과 정보보안 시스템에 응용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- 1) J. J. K O Ruanidh, W. J. Dowling, and F. M. Boland, 1996, Watermarking Digital Images for Copyright Protection, *IEEE Proc. Vis. Image Signal Processing*, Vol. 143, No 4, pp. 250-256.
- 2) E. Koch, J. Rindfrey, and J. Zhao, 1996, Copyright protection for multimedia data, *Digital Media and Electronic Publishing*. New York Academic, pp. 203-213.
- 3) 김병열, 도양회, "홀로그램 암호화와 간섭 복호화를 이용한 디지털 워터마킹," 제주대 첨단기술연구소 논문집, 13권 2호, pp. 161-165, 2002
- 4) N. Takai and Y. Mifune, 2002, Digital watermarking by a holography technique, *Appl. Opt.*, Vol 41, pp. 865-373.

- 5) I. Yamaguchi and T. Zhang, "Phase-shifting digital holography," *Opt. Lett.*, vol. 22, pp. 1268-1270, 1997.
- 6) 김종윤, 2000, Interferometric Image Encryption and Decryption System Using Binary Phase Hologram, *경북대학교 박사학위 논문*.
- 7) M. S. Kim, M. R. Feldman, and C. C. Guest, "Optimum encoding of binary phase-only filters with a simulated annealing algorithm," *Opt. Lett.*, vol. 14, no. 6, pp. 545-547, 1989.