

주파수 영역 결합변환 상관기의 위상특성을 고려한 광 암호화 시스템

도 양 회* · 박 세 준** · 이 상 준***

Optical Security System in Consideration of Phase Characteristic of the Frequency-domain Joint Transform Correlator

Yang-Hoi Doh* · Se-Joon Park** · Sang-Joon Lee***

ABSTRACT

In optical security system using the frequency-domain JTC, we proposed the method which can remove the effect of terms caused by the shifted center of input images. Because the joint input plane of the frequency-domain JTC system is composed in a frequency domain, it needs only one Fourier transformation. In this method, the phase component appeared in the output plane of JTC should be considered. We analyze the effect of phase terms and provide the solution. By computer simulation and optical experiment, the analysis for the phase effect and the performance of the proposed system are confirmed.

Key Words : encryption, decryption, phase modulation, JTC

1. 서 론

현재 사용되는 광 보안 시스템[1-3] 중에서 결합변환 상관기(JTC: joint transform correlator)[4]는 광축

정렬이 필요 없고 복소공액 마스크를 제작할 필요가 없으며 외부교란에도 거의 영향을 받지 않는 장점이 있다. 또한 현재 널리 사용되는 디지털 장비와 직접적인 결합을 통하여 실시간 처리에도 적합하다는 장점을 가진다. 그러나 JTC는 그 구조적인 특성 때문에 출력 평면에 큰 세기의 자기상관 성분이 나타나는데, 이는 JTC를 광 상관 시스템이나 광 보안 시스템에 이용하기 어렵게 만드는 주원인이 된다.[5]

본 논문에서는 JTC의 자기상관 성분을 이용하여 원 영상을 재생할 수 있는 주파수영역에서의 암호화 방법[6]에서 발생하는 위상성분의 영향을 분석하고 그 영향을 제거하는 방법을 제안하였다. 주파수영역

* 제주대학교 전기전자공학부, 첨단기술연구소
Faculty of Electrical & Electronic Eng., Cheju Nat'l Univ., Res. Inst. of Adv. Tech.
** 구미1대학 전자정보과
Department of Electronics Information, Kumi 1 College.
* 제주대학교 통신컴퓨터공학부, 첨단기술연구소
Faculty of Communication & Computer Eng., Cheju Nat'l Univ., Res. Inst. of Adv. Tech.

에서 JTC를 이용한 암호화 방법은 전통적인 JTC 시스템을 이용하여 암호화된 영상으로부터 원 영상의 재생이 가능하며, 원 영상을 복원할 때 결합입력평면을 주파수 영역으로 사용하므로 푸리에 역변환의 한 가지 처리과정만 거치게 된다. 그러나 JTC를 푸리에 역변환의 한 가지 처리과정만 거치는 구조로 이용할 경우 입력영상과 기준영상의 중심의 이동에 따른 위상성분의 영향이 출력평면에 발생하게 되며 재생되는 영상에 영향을 미치게 된다. 이 위상성분은 결합입력평면에서의 대칭구조에 의해 여현(cosine) 함수로 나타나게 되므로 기준영상과 입력영상의 위치를 조정함으로써 그 영향을 제어할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 주파수 영역에서 암호화한 영상을 JTC를 사용하여 재생할 때 출력평면에 발생하는 위상성분의 영향을 분석한 후 그 영향을 받는 화소를 제거하는 방법을 제안하여 원 영상을 복원하였다. 컴퓨터 모의실험과 광 실험을 통하여 JTC 구조에서 발생하는 위상성분의 영향에 대한 분석의 타당성을 검증하고 컴퓨터 모의실험을 통해 제안한 암호화 방법의 성능을 확인하였다.

II. 주파수 영역 JTC를 이용한 광 암호화 시스템

2.1. 암호화 방법

본 논문에서 사용한 암호화 시스템은 Fig. 1과 같다. 먼저 암호화 할 이진영상 $f(x,y)$ 를 위상 변조시키고, 컴퓨터에서 발생한 이진 무작위 영상 $r(x,y)$ 을 위상변조 한다. 위상변조 된 각각의 영상 $f_p(x,y)$, $r_p(x,y)$ 는

$$\begin{aligned} f_p(x,y) &= \exp[j\pi f(x,y)] \\ r_p(x,y) &= \exp[j\pi r(x,y)] \end{aligned} \quad (1)$$

와 같이 표현된다. 이때 위상 변조된 영상의 세기는 '1' 이므로 $|f_p(x,y)|^2 = |r_p(x,y)|^2 = 1$ 이다. 두 위상 변조 된 영상을 곱한 암호화 영상을 $h(x,y)$ 라 두면

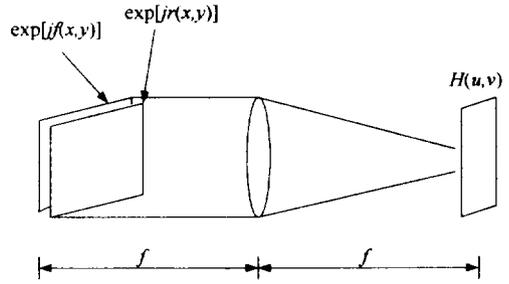


Fig. 1. Encryption system.

$$\begin{aligned} h(x,y) &= f_p(x,y) r_p(x,y) \\ &= \exp[j\pi(f(x,y) + r(x,y))] \end{aligned} \quad (2)$$

와 같고 암호화된 영상의 세기도 '1'이 된다. 이때 암호화된 위상영상 $h(x,y)$ 를 푸리에변환 한 복소함수 $H(u,v)$ 를 최종 암호화된 영상으로 사용하며, 진위를 판별하는 키 코드(key-code)는 위상변조 된 무작위 영상 $r_p(x,y)$ 를 푸리에변환 한 $R_p(u,v)$ 를 사용한다. 이는

$$\begin{aligned} H(u,v) &= \mathcal{F}\{h(x,y)\} \\ R_p(u,v) &= \mathcal{F}\{r_p(x,y)\} \end{aligned} \quad (3)$$

와 같고, 여기서 \mathcal{F} 는 푸리에변환을 나타낸다.

여기서 암호화된 영상은 원 영상을 위상변조 한 후 위상변조 된 무작위 영상과 곱해진 후 푸리에변환을 하므로 두 번의 암호화 과정을 거친 것과 동일한 결과를 가지게 되며, 암호화에 사용된 키 코드 없이는 원 영상을 복원할 수 없다. 또한 이 방법은 위상마스크를 제작한 후 단순히 푸리에 변환 과정을 통하여 구현이 가능하므로 기존의 4-f 광 상관기 시스템이 가지는 광축정렬이 필요 없으며 외부교란에 거의 영향을 받지 않으며 복소함수 값을 가지므로 세기검출기로 복사되지 않는 광 보안시스템의 장점을 그대로 가지게 된다.

2.2. JTC를 이용한 복호화

복호화에 사용되는 전통적인 JTC 시스템 구성도는

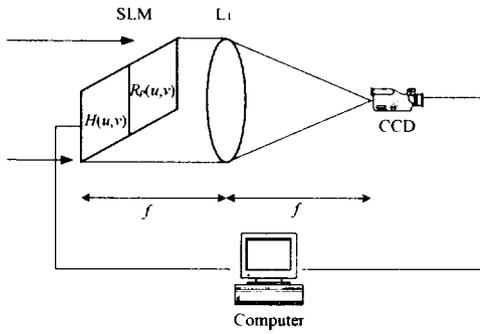


Fig. 2. Decryption system using conventional JTC.

Fig. 2과 같다. 여기에서 SLM은 입력영상이 올라가는 결합입력평면(joint input plane)을, 렌즈 L1은 푸리에 변환렌즈를, P1은 출력평면을 나타내며, f 는 렌즈의 초점거리이다. 결합입력평면의 좌반평면에는 암호화된 영상 $H(u,v)$ 를 중심이 $(x_0, 0)$ 이 되도록 배치하고, 우반평면에는 진위를 판별하는 키 코드 $R_p(u,v)$ 를 중심이 $(-x_0, 0)$ 이 되도록 배치한다. 따라서 결합입력 평면 $E(u,v)$ 는

$$E(u, v) = H(u - u_0, v) + R_p(u + u_0, v) \quad (4)$$

와 같다. 결합입력평면은 렌즈 L1에 의해서 푸리에 역변환 되어지며 이는

$$e(x, y) = h(x, y) \exp(j2\pi u_0 x) + r_p(x, y) \exp(-j2\pi u_0 x) \quad (5)$$

로 주어진다. 여기서 $\exp(\pm j2\pi u_0 x)$ 는 주파수영역에서 중심의 이동에 의해 생기는 출력평면에서의 위상성분이다.

출력평면 P1에 놓인 CCD 카메라에 의해서 검출되어지는 세기함수는

$$\begin{aligned} |e(x, y)|^2 &= |h(x, y)|^2 + |r_p(x, y)|^2 \\ &\quad + h(x, y)r_p^*(x, y) \exp(j4\pi u_0 x) \\ &\quad + h^*(x, y)r_p(x, y) \exp(-j4\pi u_0 x) \quad (6) \\ &= 1 + 1 + \exp[j\pi f(x, y)] \exp(j4\pi u_0 x) \\ &\quad + \exp[-j\pi f(x, y)] \exp(-j4\pi u_0 x) \end{aligned}$$

과 같고 이는 이진 값으로 구성되는 원 영상의 각 화소 값에 따라

$$e(x, y) = \begin{cases} 2 + 2\cos(4\pi u_0 x), & \text{if } f(x, y) = 0 \\ 2 - 2\cos(4\pi u_0 x), & \text{if } f(x, y) = 1 \end{cases} \quad (7)$$

과 같이 정리된다. 식 (7)에서 재생된 영상의 세기에 영향을 미치는 u_0 는 결합입력평면의 중심에서 입력 영상과 기준영상의 각각의 중심의 위치이며 이의 영향이 없다면, 즉 $\cos(4\pi u_0 x) = 1$ 로 두면

$$e(x, y) = \begin{cases} 4, & \text{if } f(x, y) = 0 \\ 0, & \text{if } f(x, y) = 1 \end{cases} \quad (8)$$

과 같이 나타나게 되어 원래 영상의 명암이 반전된 영상이 나타나게 된다. 식 (6)의 앞의 두 항은 결합입력평면을 구성하는 각 입력 영상의 자기상관 성분이며 뒤의 두 항은 상호상관 성분이다. 식 (6)에서 자기상관 성분이 있어야 원 영상의 재생이 가능하므로 JTC의 가장 큰 어려움인 자기상관 성분을 제거시킬 필요가 없다는 것을 알 수 있다. 따라서 제안한 암호화 방법은 JTC 구조에 보다 적합한 방법이라 할 수 있다. 만약 암호화할 때 원 영상의 명암을 반전시켜 위상변조 한 후 암호화한다면 JTC의 출력평면에 원 영상이 재생된다.

위의 결과는 위상성분의 영향을 배제하였을 경우이나, 실제 재생된 영상은 u_0 의 값에 따라 그 세기 값이 변하게 된다. 따라서 u_0 의 값에 따라 복원된 영상이 어떤 영향을 받는 지를 분석하여야 하고 그 영향을 제거하는 방법을 찾아야 제안한 암호화 방법이 JTC로 구현될 수 있다. 본 연구에서는 위상성분이 재생되는 영상에 미치는 영향을 분석하고 위상성분의 영향을 제거하는 방법을 제안하였다.

III. 위상성분의 영향

3.1. 위상성분의 영향

JTC의 입력평면을 주파수영역으로 사용하고, 수식 전개의 편의를 위해 동일한 영상 $F(u,v)$ 를 Fig. 2의 결합입력평면에 Fig. 3과 같이 나란히 두면 식은

$$E(u, v) = F(u - u_0, v) + F(u + u_0, v) \quad (9)$$

와 같고, 렌즈에 의해 푸리에 역변환 된 결과는

$$e(x, y) = f(x, y) \exp(-j2\pi x u_0) + f(x, y) \exp(j2\pi x u_0) \quad (10)$$

로 나타난다. 이 때 CCD 카메라에서 검출되는 광세기 함수는

$$\begin{aligned} |e(x, y)|^2 &= |f(x, y)|^2 + |f(x, y)|^2 \\ &\quad + |f(x, y)|^2 \exp(-j4\pi x u_0) \\ &\quad + |f(x, y)|^2 \exp(j4\pi x u_0) \\ &= |f(x, y)|^2 [2 + 2\cos(4\pi x u_0)] \end{aligned} \quad (11)$$

로 나타나며 재생되는 영상에 위상성분의 영향이 있음을 알 수 있다. 여기서 위상성분이 여현함수, 즉 $\cos(4\pi x u_0)$ 로만 나오는 것은 입력영상과 기준영상의 위치가 결합입력평면의 중심에서 좌우 대칭으로 같은 위치 $\pm u_0$ 에 있기 때문이다. 만약 중심에서 같은 위치가 아니라면 위상성분은 식 (11)과는 달리 여현함수로 나오는 것이 아니라 복소함수로 나오게 된다. 즉 결합입력평면의 중심에서부터 각각의 영상의 중심을 어떻게 정하느냐에 따라 위상성분의 영향이 다르게 나온다는 것을 확인할 수 있다.

JTC의 입력과 출력평면은 각각 표본화된 영역이므로 표본화된 영상의 주파수영역과 공간영역의 관계는

$$\begin{aligned} \Delta d &= \frac{1}{2f_s} \\ x &= k\Delta d = k \frac{L}{N_x} \\ u &= k \frac{1}{\Delta d} = k \frac{N_x}{L} \\ k &= 0, 1, \dots, N_x - 1 \end{aligned} \quad (12)$$

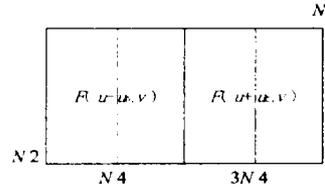


Fig. 3. Joint input plane in frequency-domain.

으로 주어지며 편의상 x 축과 u 축만 표시하였다. 여기서 Δd 는 표본화 간격, f_s 는 영상의 x 축의 최고 주파수, L 은 x 축의 영상의 길이, k 는 화소번호이며 N_x 는 표본화 개수이다.

Fig. 3에서 각 입력영상의 중심 ($\pm u_0, 0$)는 결합입력평면의 1/4, 3/4 되는 지점이다. 따라서 식 (12)을 식 (11)의 위상성분에 대입하면

$$\begin{aligned} \cos[4\pi x u_0] &= \cos\left\{4\pi \left(\frac{1}{4} \frac{N}{L}\right) \left(k_x \frac{L}{N}\right)\right\} \\ &= \cos(\pi k_x) \end{aligned} \quad (13)$$

이 된다. 여기서 k_x 는 x 축의 화소가 되며 식 (13)에서

$$\cos(\pi k_x) = \begin{cases} +1, & k_x = 2n \\ -1, & k_x = 2n + 1 \end{cases} \quad (14)$$

과 같고 이를 식 (11)에 대입하면 그 최종 출력은

$$\begin{aligned} |f(x, y)|^2 [2 + 2\cos(\pi k_x)] \\ = \begin{cases} 4|f(x, y)|^2, & k_x = 2n \\ 0, & k_x = 2n + 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

와 같다. 식 (15)에서 출력평면의 x 축의 화소가 짝수일 때 위상성분의 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 만약 기준영상과 입력영상을 나란히 붙이지 않고 ($\pm u_0, 0$)의 위치가 결합입력평면의 1/8, 7/8 되는 지점에 있다고 한다면 식 (13)은

$$\begin{aligned} \cos[4\pi u_0 x] &= \cos\left\{4\pi\left[\frac{1}{8}\frac{N}{L}\right]\left(k_x\frac{L}{N}\right)\right\} \\ &= \cos\left(\frac{\pi}{2}k_x\right) \end{aligned} \quad (16)$$

로 되며, 입력영상들을 나란히 붙인 경우와는 달리 위상성분의 영향을 받는 화소가 증가하게 된다. 즉 기준영상과 입력영상을 결합입력평면의 중심에서 좌·우로 동일한 위치에 두는 JTC의 입력평면의 구조 특성에 의해서 출력평면의 위상성분은 여현함수만 나타나게 되고, 두 영상이 중심에서 서로 멀어질수록 위상성분의 영향을 받는 화소가 증가하게 된다는 것을 알 수 있다.

3.2. 이산신호처리와의 차이

JTC는 현재 널리 사용되는 여러 가지 디지털 장비와 결합하여 실시간 처리에 유리하다는 장점을 가진다. 따라서 연속신호를 이용하는 광 신호처리분야에 적용하였을 경우 이산신호와의 차이에서 발생하는 문제점들을 고려해야 한다. JTC의 입력과 출력에 관한 식은 이산신호처리와 거의 같다는 것을 알 수 있다. 연속신호에 대한 푸리에변환과 이산 푸리에변환의 식은 Fig. 3의 경우

$$\begin{aligned} f(x, y) &= \int_{-f_x}^{f_x} \int_{-f_y}^{f_y} \{F(u-u_0, v) + F(u+u_0, v)\} \\ &\times \exp[j2\pi(ux+vy)]dudv \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} f(n, m) &= \sum_{k=0}^{N/2-1} \sum_{l=0}^{N-1} \{F(k-u_0, l) + F(k+u_0, l)\} \\ &\times \exp\left[j2\pi\left(\frac{kn}{N} + \frac{lm}{N}\right)\right] \end{aligned} \quad (18)$$

로 주어진다. 여기서 f_{x0} 와 f_{y0} 는 각각 u 축과 v 축의 최고 주파수이다. 이산신호와 연속신호의 푸리에변환 식의 차이는 적분구간의 변화이다. 식 (17)에서와 같이 연속신호의 경우 전체평면이 늘어나도 적분구간은 변함없는데 비해 식 (18)에서와 같이 이산 푸리에변

환의 경우 원래의 영상에 비해 u 축으로 적분 구간이 두 배 늘어나게 된다. 즉 이산 푸리에변환의 경우 전체평면이 u 축으로 두 배 늘어난 것에 비해 각 입력 영상의 주파수 모양이나 크기는 변화가 없으므로 결국 각 입력영상은 u 축으로 1/2배 늘어난 것과 동일한 결과를 가지게 된다. 따라서 크기가 변화된 영상의 푸리에변환 관계는

$$f(an, m) \Leftrightarrow \frac{1}{|a|} F\left(\frac{k}{a}, l\right) \quad (19)$$

로 주어지므로 원래 크기보다 x 축으로 2배 크진 영상이 재생되며 위상성분의 영향은 식 (14)와 동일하게 나타남을 알 수 있다. 즉 연속신호의 경우 결합입력평면을 Fig. 3와 같이 구성하여 사용하였을 때 위상성분의 영향은 홀수 화소에 나타나게 되고 크기 변화는 없는 반면, 이산신호의 경우 위상성분의 영향이 홀수 화소에 나타나고 동시에 재생되는 영상이 한쪽 축으로 2배 커지게 된다. 두 신호의 차이에서 오는 문제점을 해결할 수 있는 방법은 몇 가지가 있는데 대개 광 신호처리에서는 이진위상 CGH를 이용하여 이를 위상마스크로 제작하거나 SLM을 이용해서 광학적인 구현을 한다. 따라서 이진위상 CGH를 만들고 이를 한쪽 축으로 다운 샘플링 한 후 결합입력평면을 구성하게 되면 이산신호처리와 같은 결과를 얻을 수 있고 CCD 카메라에 재생되는 영상에서 짝수화소만 추출하면 원래의 영상을 광학적으로 재생할 수 있게 된다.

IV. 실험결과 및 고찰

주파수 영역에서 JTC 구조를 사용할 때 재생되는 영상의 크기와 각각의 입력 영상들의 중심 이동에 따른 위상성분의 영향을 동시에 확인할 수 있게 여러 가지 방법으로 결합 입력평면을 구성하고 컴퓨터 모의실험과 광 실험을 비교해 보았다.

Fig. 4는 컴퓨터 모의실험과 광 실험에 사용된 영상들이다. Fig. 4(a)는 원 영상 $f(x,y)$ 로 사용한 64×64 크기를 가지는 이진 영상이며, Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)

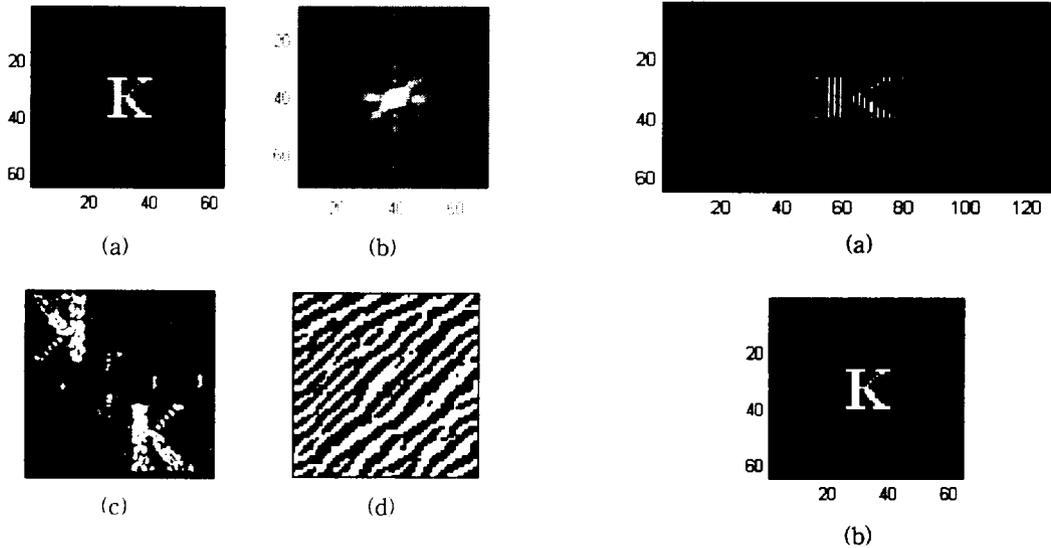


Fig. 4. Used images for computer simulation and optical experiment: (a) original image, (b) power spectrum of (a), (c) reconstructed image using CGH of (d), and (d) CGH of (a).

의 영상을 이산 푸리에 변환한 후 그 파워스펙트럼을 나타낸 것이다. Fig. 4(d)는 SA 알고리즘을 이용하여 Fig. 4(a)의 영상을 이진 위상 CGH로 제작한 영상이며, 64×64의 크기를 가진다. 광 실험은 컴퓨터 모의 실험과 동일한 과정으로 하였으며 광 실험 구성도는 Fig. 1과 동일하다. Fig. 4(c)는 Fig. 4(d)의 CGH를 SLM에 올린 후 광으로 재생한 영상이다. 이때 재생된 영상은 동일한 CGH로 결합입력평면을 구성하고 재생한 영상이 아니라 한 개의 CGH만을 SLM에 올려 재생한 영상인데 이진 위상 CGH의 특성에 의해서 두 개의 영상이 원점을 대칭으로 나타나게 된다. 실험에 사용된 SLM 장비는 EPSON사의 P13SMO15 LCD panel과 BE13S010 driver를 사용하였으며, PULNiX 사의 TM545-I CCD 카메라를 이용하여 재생된 영상을 기록하였다.

Fig. 5는 결합입력평면을 주파수 영역에서 사용했을 때 컴퓨터 모의실험과 광 실험을 통해 재생되는 영상의 차이점에 관한 분석이 타당한지를 확인한 결과이다. Fig. 3과 같이 결합입력평면을 구성한 후 Fig. 4(b)와 Fig. 4(d)를 각각 이산 푸리에 역변환과 광으로 재생한 영상이다. 크기 변화를 비교하기 위해

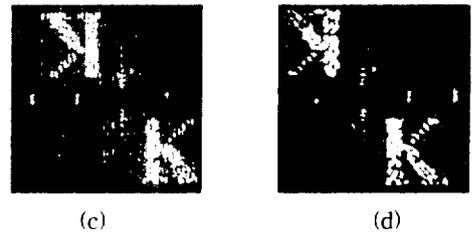


Fig. 5. Reconstructed image using JTC: (a) by DFT, (b) original image of (a), (c) by optically, and (d) original image of (c).

재생된 영상의 우측에 원래의 영상을 나타내었다. Fig. 5(a)는 이산 푸리에 역변환에 의해서 재생된 영상이며 Fig. 5(c)는 광학적으로 재생된 영상이다. 이산 푸리에 변환으로 재생된 영상은 x축으로 영상이 두 배 커지며, 광학적으로 재생된 영상은 크기 변화가 없다는 것을 확인할 수 있다. 반면에 위상 성분의 영향은 이산 푸리에 변환이나 광학적인 푸리에 변환이 동일하게 주기적으로 나오고 있음을 확인할 수 있으므로 위상성분에 대한 우리의 분석과 일치함을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 5(a)에서 짝수 화소만 추출하면 정확하게 Fig. 5(b)의 영상이 재생된다. 따라서 이산 푸리에 변환에서는 제안한 짝수화소의 추출로 위상성분의 영향을 제거시킴과 동시에 원래 영상을 재생할 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 광학적인 경우는 Fig. 5(c)에서 짝수 화소만 추출하

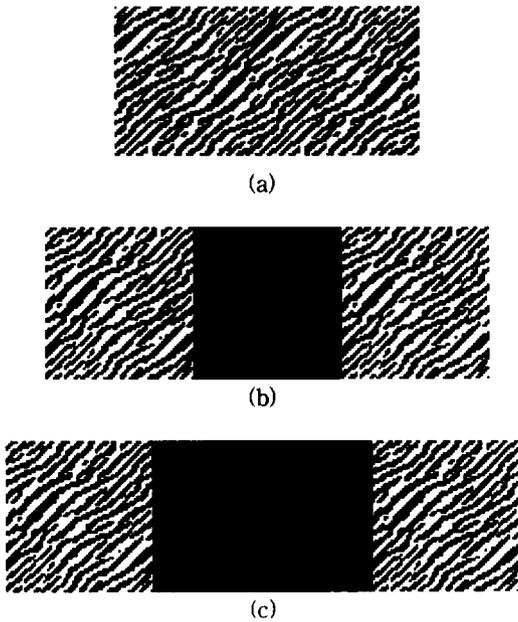


Fig. 6. Used (a) input plane 1, (b) input plane 2, and (c) input plane 3 testing the effect of phase terms in joint transform correlator.

면 원래 영상이 x축으로 반으로 줄어들게 된다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 결합입력평면의 구성에 따라 위상성분의 영향이 증가하게 되는 것을 확인한 광 실험 결과이다. 식 (16)에서 결합입력평면의 구성에 따라 각 입력영상의 중심이 변하게 되고 따라서 위상성분의 영향을 받는 화소가 일정한 간격으로 증가해서 나와야 한다. 만약 각 입력영상의 중심이 결합입력 평면의 1/6, 5/6 되는 지점이라면

$$\begin{aligned} \cos[4\pi u_0 x] &= \cos\left\{4\pi\left[\left(\frac{1}{6}\frac{N}{L}\right)\left(k_x\frac{L}{N}\right)\right]\right\} \\ &= \cos\left(\frac{2}{3}\pi k_x\right) \end{aligned} \quad (20)$$

과 같이 주어지며 위상성분의 영향을 받지 않는 화소는 3의 배수가 되는 화소라는 것을 알 수 있다. 따라서 위상성분의 영향을 받는 화소의 수가 결합입력평면을 나란히 붙인 경우보다 증가하게 된다. Fig. 6의 (a), (b), (c)는 결합입력 평면의 구성도이며, Fig. 7의 (a), (b), (c)는 Fig. 6의 (a), (b), (c)를 각각 광학

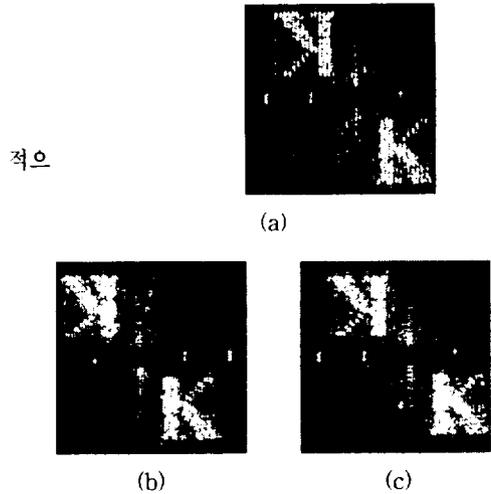


Fig. 7. Optical experiment results: Reconstructed image of (a) Fig. 6(a), (b) Fig. 6(b), and (c) Fig. 6(c).

로 재생한 영상이다. 재생된 영상에서 보듯이 결합입력 평면의 구성에 따라 위상성분의 영향을 받는 화소가 증가하며 크기 변화는 없다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 우리가 분석한 광학에서의 위상성분의 영향에 대한 식 (12)와 식 (16)이 타당함을 확인할 수 있다.

다음은 원래의 CGH를 수직이나 수평으로 다운 샘플링 한 CGH로 JTC의 결합입력평면을 구성하면 광학적으로 재생되는 영상과 컴퓨터 모의실험을 통해서 재생되는 영상이 동일하게 된다는 제안한 방법의 타당성을 확인하기 위해서 먼저 원래의 CGH를 다운 샘플링 한 후 그 각각의 CGH를 광학적으로 재생해 보았다. Fig. 8의 (a)와 (c)는 그림 4(d)의 CGH를 각각 x축과 y축으로 1/2 배 다운 샘플링 한 CGH이며 각각 64×32와 32×64의 크기를 가진다. Fig. 8(b)와 8(d)는 각각의 CGH를 재생한 영상이다. x축으로 다운 샘플링 하여 재생한 Fig. 8(b)의 영상은 수평으로 원래 영상에 비해 두 배 커져 있으며, y축으로 다운 샘플링 하여 재생한 Fig. 8(d)의 영상은 수직으로 두 배 커진 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 다운 샘플링 한 CGH로 JTC의 결합입력 평면을 구성한 후 광으로 재생하여 컴퓨터 모의실험 결과와 일치하는가를 확인한 영상이다. 결합입력평면의 구성은 Fig. 3과 동일하다. Fig. 9(a)는 Fig. 8(a)

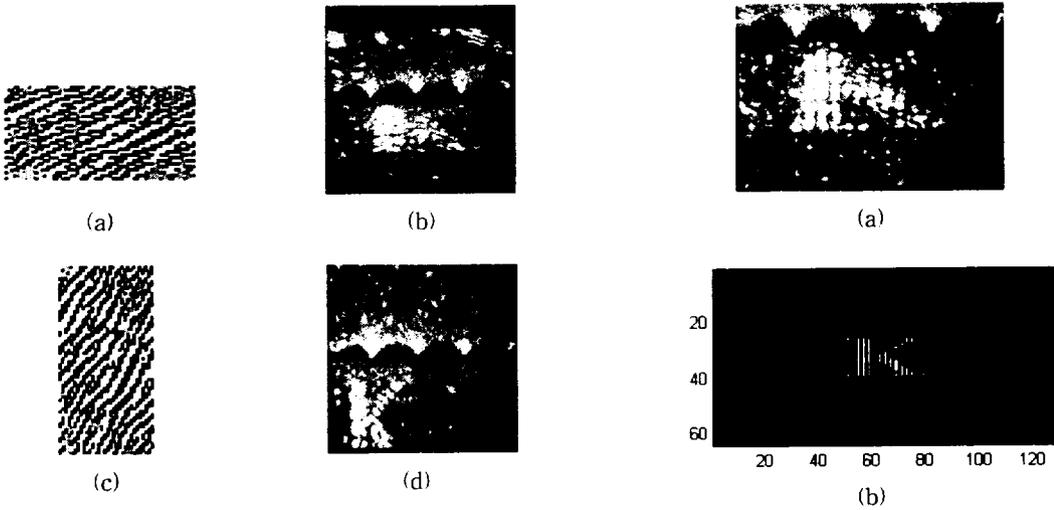


Fig. 8. Down sampled CGH of Fig. 4(d): (a) in x axis, (b) reconstructed image of (a), (c) in y axis, and (d) reconstructed image of (c).

의 CGH를 수평축을 중심으로 나란히 붙여서 결합입력평면을 구성한 후 광으로 재생한 영상이며, 비교를 위해서 Fig. 9(b)에 이산 푸리에 역변환으로 재생한 영상을 보였다. Fig. 9(c)는 Fig. 8(c)의 CGH를 수직축을 중심으로 나란히 붙여서 결합입력평면을 구성한 후 재생한 영상이며 Fig. 9(d)는 이산 푸리에 역변환으로 재생한 영상이다. Fig. 9에서 컴퓨터 모의실험 결과와 광 실험 결과가 일치한다는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 9(b)와 Fig. 9(d)의 영상에서 각각 x축과 y축으로 축소화소만 추출하면 원래 영상이 그대로 재생된다. 따라서 본 논문에서 제안한 광 신호 처리에서 발생하는 위상성분의 영향과 이산신호 처리에서 발생하는 위상성분의 영향을 일치시킬 수 있는 방법이 타당함을 확인할 수 있다.

위상성분의 영향과 크기 변화에 관한 제안된 이론을 포괄적으로 컴퓨터 모의실험하기 위해 Fig. 10과 같이 결합 입력평면을 구성하였다. 이 경우 중심의 이동은 x축, y축 양쪽으로 이동하게 되므로 결합입력 평면은

$$\begin{aligned}
 \mathcal{J}(u, v) = & F(u - u_0, v - v_0) + F(u + u_0, v + v_0) \\
 & + F(u - u_0, v + v_0) + F(u + u_0, v - v_0)
 \end{aligned} \quad (21)$$

로 주어지며 출력 평면은

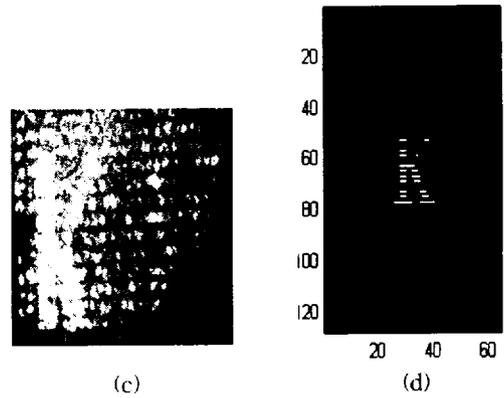


Fig. 9. Reconstructed image of JTC using (a) Fig. 8(a) optically, (b) computer simulation results of (a), (c) Fig. 8(c) optically, and (d) computer simulation results of (c).

$$|e(x, y)|^2 = 16 |\mathcal{J}(x, y)|^2 [\cos(2\pi u_0 x) \cos(2\pi v_0 y)]^2 \quad (22)$$

로 주어진다. 이 때 u_0 와 v_0 는 각각 전체 입력평면의 1/4 되는 지점이 된다. 따라서 식 (22)는

$$|e(x, y)|^2 = 16 |\mathcal{J}(x, y)|^2 \left[\cos\left(\frac{\pi}{2} k_x\right) \cos\left(\frac{\pi}{2} k_y\right) \right]^2 \quad (23)$$

로 주어지므로, 컴퓨터 모의실험 시 x축과 y축으로 영상은 동시에 두 배 커지게 되며 위상성분의 영향을

받지 않는 화소는 x 축과 y 축이 동시에 짝수 화소일 때뿐이다. 따라서 두 축의 화소가 동시에 짝수인 화소를 추출하면 원 영상이 재생된다. 또한 광 실험을 할 경우 원래의 CGH를 두 축으로 동시에 다운 샘플링을 하고 Fig. 9와 같이 결합입력 평면을 구성한 후 영상을 재생하면 컴퓨터 모의실험 결과와 동일한 영상이 재생되어야 한다.

Fig. 10과 동일하게 결합입력평면을 구성하고 광 실험과 컴퓨터 모의 실험하여 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11(a)는 Fig. 10과 동일하게 결합 입력평면을 구성한 후 이산 푸리에 역변환을 통하여 재생한 영상이다. 원 영상 보다 2배 커진 영상이 재생되며 위상성분의 영향이 식 (22)와 동일하게 나온 것을 확인할 수 있다. Fig. 11(b)는 원래의 CGH를 x 축, y 축으로 동시에 다운 샘플링하고 Fig. 10과 동일하게 결합입력평면을 구성한 후 광학적으로 재생한 영상이다. 컴퓨터 모의 실험 결과와 일치함을 확인할 수 있다. 여기서 식 (22)와 동일하게 두 축의 화소가 동시에 짝수인 화소를 추출하면 원 영상을 재생할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

컴퓨터 모의실험과 광 실험에서 발생하는 오차는 원래의 다중위상을 이진위상 CGH로 양자화하는 과정에 따른 영상의 정보손실과 LCD와 CCD 카메라의 화소의 부정합(miss match)에 따른 결과로 판단된다. 다중위상을 정확히 구현할 수 있는 SLM과 LCD와 CCD 카메라의 화소간격이 동일한 장비를 사용하면 보다 나은 결과를 얻을 수 있을 것이라 생각된다.

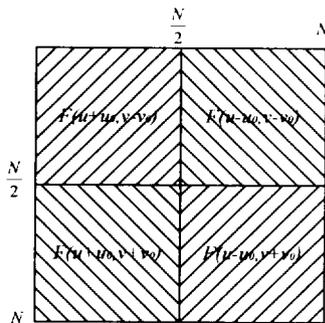
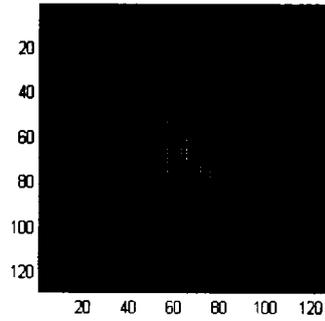
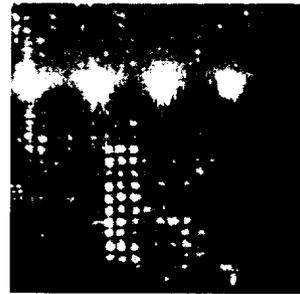


Fig. 10. Joint input plane testing the effect of phase terms and size change.



(a)



(b)

Fig. 11. Reconstructed image after constructing the joint input plane with the same as Fig. 10: (a) by DFT and (b) by optically with down sampled CGH of Fig. 4(d).

V. 결 론

본 논문에서는 주파수 영역 JTC를 이용한 광 암호화 시스템에서 발생하는 위상성분의 영향을 분석하고 그 영향을 제거할 수 있는 방법을 제안하였다. 주파수 영역 JTC를 이용한 광 암호화 시스템은 전통적인 JTC와는 달리 결합입력평면을 주파수 영역에서 사용하므로 각 입력영상의 중심이동에 따른 위상성분이 재생영상에 영향을 미치게 된다. 본 논문에서는 위상성분의 영향을 분석하고 그 해결 방법을 제시하여 암호화 방법을 구현하였다. 제안한 시스템에서 암호화된 영상은 두 번의 암호화 과정을 거치게 되며 복소함수 값을 가지므로 광 보안 시스템의 장점들을 그대로 가진다. 또한 JTC의 문제요소인 자기상관성분을 이용하여 영상이 재생되므로 JTC 구조에 보다 적합

하며 실시간 처리에도 적합하다. 또한 위상성분의 영향은 JTC 구조에서는 동일하게 적용이 가능하므로 입력평면의 구조 변화에 따른 위상성분의 영향을 제어하는데 적용이 가능하리라 생각한다. 컴퓨터 모의 실험과 광 실험을 통하여 위상성분의 영향을 확인하고 그 제거 방법의 타당성을 검증하였다.

참고문헌

- [1] P. Refregier and B. Javidi, "Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding," *Opt. Letters*, Vol. 20, No. 7, pp. 767-769, 1995.
- [2] B. Javidi and E. Ahouzi, "Optical security system with Fourier plane encoding," *Appl. Opt.*, Vol. 37, No. 26, pp. 6247-6255, 1998.
- [3] J.Y. Kim, S.J. Park, C.S. Kim, J.K. Bae, and S.J. Kim, "Optical image encryption using interferometry-based phase masks," *Electron. Lett.*, Vol. 36, no. 10, pp. 874-875, 2000.
- [4] C.S. Weaver and J.W. Goodman, "Technique for optically convolving two functions," *Appl. Opt.*, Vol. 5, pp. 1248-1249, 1966.
- [5] S.J. Park, J.Y. Kim, C.S. Kim, J.G. Bae, and S.J. Kim, "Binary image encryption technique and decryption system using joint transform correlator," *Proceedings of SPIE*, Vol. 4386, pp. 164-171, 2001.
- [6] 도양희, 박세준, "주파수 영역 결합변환 상관기를 이용한 광 암호화 시스템", 제주대학교 첨단기술 연구소 논문집, 제14권 1호, 40-47쪽, 2003년 6월