

PAL-SLM을 이용한 다채널 부호화 방법에 따른 다위상형 CGH의 광학적 구현

정종래[†] · 백운식

경희대학교 전자정보학부

Ⓞ 449-701 경기도 용인시 기흥읍 서천리 1번지

김정희 · 김 남

충북대학교 정보통신공학과

Ⓞ 361-763 충청북도 청주시 흥덕구 개신동 산48

(2004년 12월 31일 받음, 2004년 6월 7일 수정본 받음)

공역상 없이 여러 가지 물체를 동시에 재생 가능한 다채널 다단계 위상형 컴퓨터-생성 홀로그램(CGH)을 설계할 수 있는 보다 효과적인 부호화 방법을 제안하였다. 다채널 CGH 패턴을 설계하기 위하여 pixel oriented CGH 제작방식을 이용하였다. 설계된 CGH 패턴의 성능평가를 위해 양자화 위상 단계수에 따른 여러 가지 다채널 CGH들의 회절효율(η), 평균제곱에러(MSE) 및 신호 대 잡음비(SNR) 등의 변화를 살펴보았다. 일반적으로 CGH에 기록되는 물체 수가 증가할수록 CGH의 재생품질은 떨어진다. 그러나 회절효율의 경우 1채널 CGH가 70%이고 제안한 부호화 방법으로 설계한 2채널, 4채널, 8채널 CGH들은 각각 62%, 62%, 63%로 채널수가 증가하여도 큰 차이가 없음을 컴퓨터 모의실험을 통하여 확인할 수 있었다. 또한 렌즈로 결합되어 있는 PAL-SLM과 XGA형 LCD 그리고 이에 빛을 조명하는 LD 등으로 구성되어 있는 액정 공간 광 위상 변조기를 사용하여 광학적으로 CGH를 구현하여 입력영상을 재생·고찰해 보았다.

주제어 : computer generated holography, CGH, multiplexed holograms, multi-phase holograms, spatial light phase modulator.

I. 서 론

CGH는 실존하는 물체뿐만 아니라 실제로 존재하지 않지만 수학적으로 표현되는 물체로부터 설계되어 질 수 있다는 특성과 광 홀로그램과 비교해서 설계하기가 쉽고, 재현성이 뛰어나다는 장점을 가지고 있다. 따라서 이는 광정보처리, 간섭계, 2차원 혹은 3차원 디스플레이, 광메모리, 레이저 빔 스캐닝, 광학소자의 검사 등과 같은 광신호처리시스템에 널리 사용되고 있다.^[1,2]

CGH는 임의의 물체를 표본 데이터화 한 후 부호화를 거쳐 설계된다. 1960년 중반에 들어서서 A.W. Lohmann^[3,4]은 기준파를 사용하지 않고 수학적인 표시가 가능한 물체에 대하여 진폭과 위상을 기록할 수 있는 detour phase hologram 이란 CGH를 창안하였다. 그 후 성능이 우수한 CGH를 설계하기 위하여 반복형 알고리즘 등 여러 가지 부호화 방법이 꾸준히 연구되어 왔으나, 이들 방법으로 설계된 CGH는 대부분 이진 홀로그램이었기 때문에 물체상(object image)과 공역상(conjugate image)을 동시에 재생함으로써 재생상의 회절효율을 떨어뜨리는 결과를 낳았다. 또한 부호화 방법에 따라 CGH에 저장할 수 있는 정보량이 달라질 수 있다. 최근까지 연구된 CGH는 주로 하나의 물체만을 부호화하여 왔으나, 최근에는 detour phase hologram 설계방법을 응용한 2-채널^[5,6]

과 4-채널^[7] 다중화 CGH 부호화 방법이 제안되었다. 이는 두 가지 혹은 네 가지의 물체들을 동시에 부호화 하여 그 정보를 저장한 다음, 모든 물체의 이미지를 서로 다른 회절방향으로 동시에 재생할 수 있는 방법으로써 하나의 홀로그램에 두 배 혹은 네 배의 정보를 저장할 수 있다. 하지만 부호화 과정이 복잡하고 재생시 공역상이 발생함으로써 회절효율이 떨어지고 품질도 우수하지 않았다. 이 방식의 결점을 일부 보완한 설계가 보다 용이하고 성능이 우수할 뿐만 아니라 CGH 패턴 계산 시간이 보다 짧은 위상 가산형 pixel oriented 다채널 이진 CGH의 설계방법^[8]도 제안되었으나, 이진 양자화 기술을 사용하기 때문에 여전히 공역상이 재생되어 부호화 되는 물체수가 제한되었다. 그 후 공역상 문제가 일부 해결되어 전보다 2배의 물체들을 부호화 할 수 있는 위상 가산형 pixel oriented 다채널 다단계 CGH의 설계방법^[9]도 제안되었지만, 위상단계별 스펙트럼 분포 측, 픽셀분포가 균일하지 않아 만족스러운 재생품질을 얻을 수 없었다. 따라서 이러한 문제점들을 해결할 수 있는 다채널 다단계 위상형 CGH를 설계할 수 있다면, 보다 많은 물체들을 동시에 부호화 할 수 있을 뿐만 아니라 재생 품질도 향상시킬 수 있다. 이렇게 개발된 CGH를 정합필터로 사용할 경우 여러 가지 물체를 한 개의 필터로 인식할 수 있기 때문에 이를 광상관기에 적용함으로써 보다 효율적인 광패턴인식 시스템을 구현할 수 있다.

본 고에서는 CGH의 품질이 떨어지지 않으면서 동시에 정

[†] E-mail: jrchung@iwlee.com

보 저장능력을 여러 배 증가시키기 위하여 여러 가지 물체들을 동시에 부호화 하여 저장할 수 있는 방법으로 detour phase hologram보다 설계가 용이하고 성능 또한 우수한 CGH 부호화 방법을 제안하였다. 이 방법은 기존의 위상 가산형 pixel oriented 다채널 이진 CGH보다 양자화 에러를 줄여 정확하게 물체들을 재생하고, 공액상이 발생하지 않게 하기 위하여 다위상으로 부호화하는 복소투과함수 가산형 pixel oriented 다채널 다단계 위상형 CGH 설계기술을 사용하였다. 이때 CGH 설계를 위하여 사용된 입력영상은 크기가 256×256 픽셀인 이진 윈도우 비트맵 파일에 64×64 크기의 8가지 종류의 영상을 삽입한 것이며, 설계된 CGH 패턴도 크기가 256×256 픽셀인 그레이 스케일의 윈도우 비트맵 파일을 사용하여 도시하였다. 또한 모의실험을 통하여 부호화 방법에 따른 재생상의 품질을 비교하였고, 더불어 여러 가지 부호화 방법에 대한 채널수와 양자화 위상단계수별 CGH의 회절효율, 평균제곱에러 및 신호 대 잡음비 등의 성능을 비교 분석하여 그 결과를 제시하였다. 그리고 CGH패턴들로부터 입력 영상을 광학적으로 재생하기 위하여 반사형 액정 공간 광 위상 변조기를 이용하였다. 이 변조기는 PAL-SLM(parallel aligned nematic liquid crystal spatial light modulator)^[10]과 LCD(liquid crystal display) 그리고 이들을 결합해 주는 렌즈, LCD에 빛을 비추는 LD(laser diode) 등으로 구성되어 있다. 특히 PAL-SLM은 전압을 인가할 경우 위상변조 효율이 비교적 낮았던 기존 SLM에 사용되던 twisted-nematic liquid crystal 대신 편광판 회전이 일어나지 않고 액정 분자가 광축과 평행으로 정렬됨으로써 70%까지의 높은 위상변조 효율을 얻을 수 있는 광학적으로 어드레스되는 parallel aligned nematic liquid crystal을 사용하고 있다. 이러한 반사형 액정 공간 광 위상 변조기를 이용하여 여러 가지 부호화 방식으로 설계된 CGH패턴들을 실시간으로 출력하여 재생상의 품질을 비교해 보았으며, 마지막으로 결론을 맺고 향후 과제를 제시하였다.

II. 컴퓨터 생성 홀로그램

컴퓨터를 활용하여 홀로그램의 투과함수를 계산하여 설계 제작한 것이 CGH이다. 복잡한 물체의 파면을 컴퓨터를 활용하여 계산함으로써 수학적으로 묘사할 수 있다. 이러한 특성을 활용하여 광학적인 방법으로 제작할 수 없는 광학부품들을 컴퓨터로 제작할 수 있다.

이들 컴퓨터-생성 홀로그램과 광학-생성 홀로그램은 주로 복소파면 기록방법에 그 차이를 두고 있다. 이상적인 경우 기록된 홀로그램의 진폭투과도는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$t(x, y) = |Re^{i2\pi ax} + A(x, y)e^{i\phi(x, y)}|^2 = R^2 + A^2(x, y) + 2RA(x, y) \cdot \cos[2\pi ax - \phi(x, y)] \quad (1)$$

식 (1)에서 $Re^{i2\pi ax}$ 는 기울어진 기준파를, $A(x, y)e^{i\phi(x, y)}$ 는 물체파를 표현한다. $t(x, y)$ 는 기준파와 물체파 사이의 간

섭패턴의 세기변화이다. CGH 설계 작업은 복소물체파면 생성을 위한 부호화가 대부분을 차지하며, 여기서 사용되는 부호화는 복소값 함수를 표본화하여 2개 혹은 2ⁿ개의 진폭값이나 위상값으로의 전환을 의미한다.

2.1. Pixel-oriented CGH

pixel oriented CGH를 만드는 부호화 절차는 복소물체 분포함수의 계산, 공간캐리어의 변조, 양자화 등 3가지 단계로 나눌 수 있다.

복소물체 분포함수 $u(x, y)$ 를 만들기 위해 실수값의 물체 분포 $o(x, y)$ 에 임의의 위상분포 $\phi(x, y)$ 를 곱한다.

$$u(x, y) = o(x, y) \exp[i\phi(x, y)] \quad (2)$$

여기에서 모든 $|x| \geq \Delta x/2$, 그리고 $|y| \geq \Delta y/2$ 에 대하여 $o(x, y) = 0$ 이다.

$u(x, y)$ 를 푸리에 변환하여 얻은 함수를 $U(\mu, \nu)$ 라하고 이에 이미지의 위치정보를 가지고 있는 캐리어 함수를 써서 진폭과 위상을 변조하면 다음 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$U_M(\mu, \nu) = |U(\mu, \nu)| \cos[2\pi(x_0\mu + y_0\nu) + \phi(\mu, \nu)] \quad (3)$$

여기에서 $|U(\mu, \nu)|$ 는 $U(\mu, \nu)$ 의 진폭이고 $\phi(\mu, \nu)$ 는 $U(\mu, \nu)$ 의 위상이다. 그리고 $U_M(\mu, \nu)$ 는 진폭형 CGH의 복소투과함수이다. 위상형 CGH의 경우 식 (3)은 아래의 복소투과함수 $U_P(\mu, \nu)$ 와 같이 단지 위상만의 함수로 바꾸어 쓸 수 있다.

$$U_P(\mu, \nu) = C \exp[i\{2\pi(x_0\mu + y_0\nu) + \phi(\mu, \nu)\}] \quad (4)$$

여기에서 C 는 상수이다. 즉, 위상값 만을 변조시켜 CGH가 설계되게 된다. 통상 위상형 CGH의 경우 크기를 1로 정규화 시켜 위상성분만을 변화시키므로 빛이 CGH평면을 통과할 때 빛의 손실을 없게 하며, 고주파성분 통과필터와 같은 역할을 수행하므로 매우 높은 광효율을 얻게 된다.

2.2. 다채널 다단계 위상형 CGH

CGH에 관한 연구는 크게 부호화 기술, 응용분야, 화질개선기술 등으로 나눌 수 있으며, 여기서 화질개선기술은 양자화 잡음의 문제와 관련된다. 기존의 위상 가산형 pixel oriented 다채널 다단계 위상형 CGH의 경우 잡음과 공액상의 문제가 존재하기 때문에 이를 보완한 셀 결합형과 복소투과함수 가산형 pixel oriented 다채널 다단계 위상형 CGH 부호화 방법을 제안하고자 한다. 단, 본 고에서는 채널수를 최대 8개로 제한하고 있으며, 각 채널값을 i 로 표기하며, 1~8의 값을 갖는 것으로 가정한다.

1) 위상 가산형 pixel oriented CGH

복소물체의 파면 $a'_i(x, y)$ 를 만들기 위해 실수값의 물체 분포 $o'_i(x, y)$ 에 임의의 위상분포 $\phi_i(x, y)$ 를 곱한다.

$$a'_i(x, y) = a_i(x, y) \exp[j\phi_i(x, y)] \quad (5)$$

위 복소물체의 파면을 표본화하여 푸리에 변환한 값에 다시 캐리어 함수를 곱하여 위상을 변조하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\Psi_i(\mu, \nu) = 2\pi(x_i \mu + y_i \nu) + \phi_i(\mu, \nu) \quad (6)$$

여기서 x_i 와 y_i 값은 캐리어 공간 주파수로서, 물체 파면을 재생할 경우 재생상의 위치를 결정하는 offset 값이 되며, 이러한 offset 값은 재생 시 물체 분포영역 $a'_i(x, y)$ 를 발생하는 것을 원하지 않는 항으로부터 분리시키기 위하여 충분히 커야 한다. 여기서 8채널 위상 가산형 CGH의 경우, 식 (6)에 의해 얻어진 위상함수 $\Psi_1(\mu, \nu)$, $\Psi_2(\mu, \nu)$, $\Psi_3(\mu, \nu)$, $\Psi_4(\mu, \nu)$, $\Psi_5(\mu, \nu)$, $\Psi_6(\mu, \nu)$, $\Psi_7(\mu, \nu)$, $\Psi_8(\mu, \nu)$ 들을 식 (7)과 같이 더하고 정규화 하여 새로운 위상함수 $B_{PA}(\mu, \nu)$ 를 만든 후, 식 (8)과 같이 위상형 복소투과함수 $U_{PA}(\mu, \nu)$ 를 구한다.

$$B_{PA}(\mu, \nu) = \frac{\sum_{i=1}^8 \Psi_i(\mu, \nu)}{8} \quad (7)$$

$$U_{PA}(\mu, \nu) = C_{PA} \exp[jB_{PA}(\mu, \nu)] \quad (8)$$

여기에서 C_{PA} 는 상수이다. 상기 복소투과함수 $U_{PA}(\mu, \nu)$ 로 만들어지는 위상 가산형 CGH는 입력영상 8가지를 한 개의 CGH에 동시에 부호화 함으로써 여덟 배의 정보를 저장할 수 있다.

이러한 CGH에 평면파를 조사하여 물체의 파면을 재생하게 되면 일정 방향으로 빛이 회절되어 렌즈의 푸리에 평면에

서 입력에 사용했던 영상 8개가 공간주파수로 지정했던 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , (x_4, y_4) , (x_5, y_5) , (x_6, y_6) , (x_7, y_7) , (x_8, y_8) 비축 상에 나타나게 된다. 그러나 위상 가산형 CGH의 경우에는 공역상 발생을 억제하기 위하여 다단계 위상값으로 양자화 할지라도 각각의 입력영상에 대한 홀로그램 투과함수들의 공간 주파수 다중화가 명확하게 이루어지지 않는 관계로 그림 1(b)와 같이 각 위상단계에 대한 스펙트럼 즉, 픽셀분포가 전체범위 내에서 균일하지 않기 때문에 결국 효율이 떨어지는 문제점이 발생된다.

2) 셀 결합형 pixel oriented CGH

8채널 셀 결합형 CGH의 경우, 2.1.절에서 설명한 방법에 따라 8가지 물체영상들에 대한 캐리어 공간 주파수 x_i, y_i 별로 식 (6)에 의해 8가지 위상함수 $B_{P_i}(\mu, \nu) = \Psi_i(\mu, \nu)$ 를 구하고, 이들 위상함수들에 각각 대응되는 식 (9)의 복소투과함수들을 통해 8가지 다단계 위상형 CGH들을 설계한다.

$$U_{P_i}(\mu, \nu) = C_{P_i} \exp[jB_{P_i}(\mu, \nu)] \quad (9)$$

여기에서 C_{P_i} 는 상수이고, i 는 1~8의 채널값을 나타낸다. 이렇게 설계된 8가지 CGH 패턴 각각을 그림 2와 같은 방법으로 하나의 CGH에 동시에 결합하여 부호화 함으로써 위상 가산형 CGH와 마찬가지로 여덟 배의 정보를 저장할 수 있다.

셀 결합형 CGH에 평면파를 조사하여 물체의 파면을 재생하게 되면 일정 방향으로 빛이 회절되어 렌즈의 푸리에 평면에

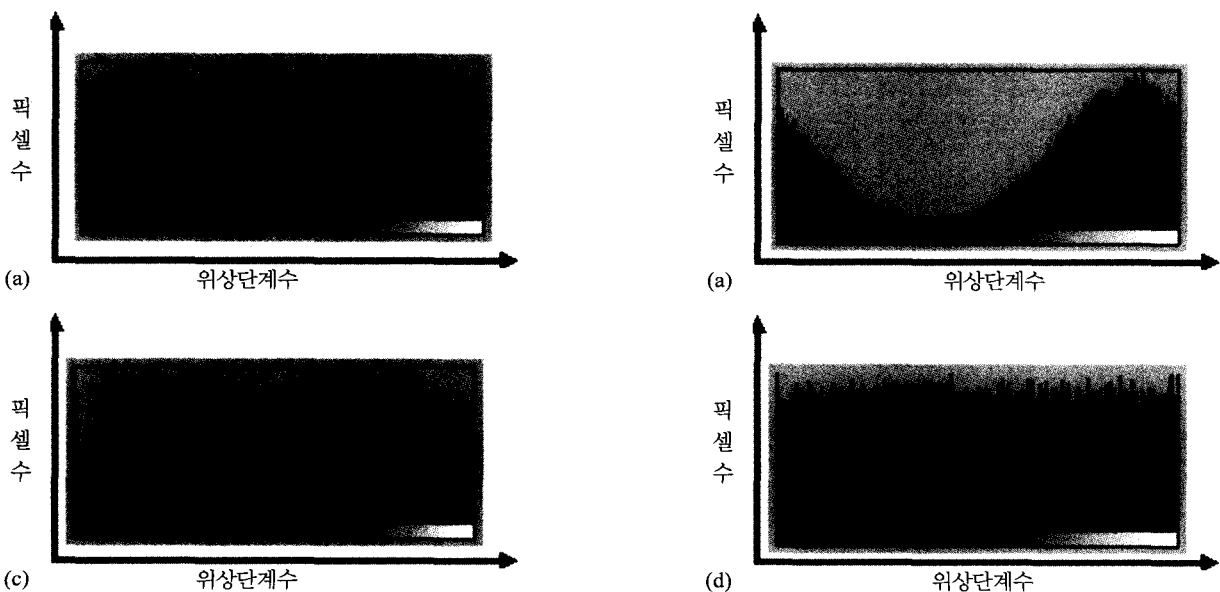


그림 1. (a)1채널 CGH, (b)8채널 위상 가산형 CGH, (c)8채널 셀 결합형 CGH, (d)8채널 복소투과함수 가산형 CGH들의 위상단계수에 따른 픽셀 스펙트럼 분포도.

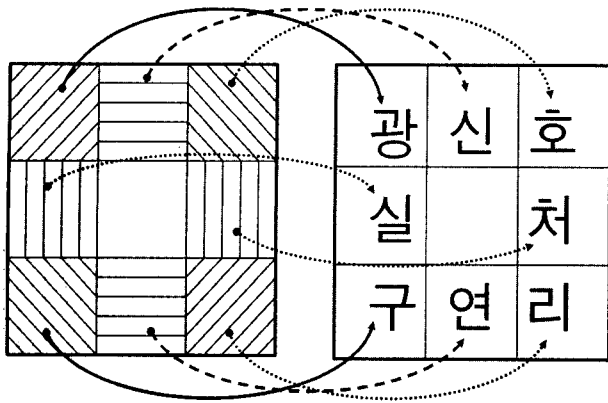


그림 2. 셀 결합형 CGH의 재생 개념도.

$(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4), (x_5, y_5), (x_6, y_6), (x_7, y_7), (x_8, y_8)$ 비축 상에 나타나게 된다.

그러나 상기 방식과 같은 셀 결합형 CGH의 경우 물체영상이 많아질수록 설계 시 여러 개의 CGH 패턴을 결합하는 과정이 추가되며, 또한 결합으로 인하여 CGH의 크기가 증가되는 단점을 가지고 있다.

3) 복소투과함수 가산형 pixel oriented CGH

각 복소물체에 해당되는 위상형 CGH의 복소투과함수들을 모두 합하여 새로운 복소투과함수를 구한 후 이에 해당되는 CGH를 설계하면 셀 결합형 CGH의 단점인 여러개의 CGH 패턴을 결합하는 과정을 없앨 수 있고, 1채널 CGH의 크기와 동일한 크기의 다채널 CGH를 만들 수 있다.

복소투과함수 가산형 다단계 위상형 CGH의 경우, 식 (9)와 같은 복소투과함수들을 합한 식 (10)과 같은 새로운 복소투과함수 $U_{P_{sum}}$ 를 이용하여 설계한다.

$$U_{P_{sum}}(\mu, \nu) = \sum_{i=1}^8 C_{P_i} \exp[jB_{P_i}(\mu, \nu)] \quad (10)$$

여기에서 C_{P_i} 는 상수이고, i 는 1~8의 채널값을 나타낸다. 이의 경우 1채널 CGH의 경우와 마찬가지로 크기가 동일할 뿐만 아니라 각 위상단계에 대한 픽셀분포가 그림 1(b)와 같이 균일하지 않은 위상 가산형 pixel oriented CGH의 경우와 달리 그림 1(d)와 같이 균일하게 나타나기 때문에 성능 또한 1채널의 경우보다 크게 떨어지지 않는 장점을 가지고 있다.

2.3. 양자화 알고리즘

CGH가 제작되기 전에 CGH의 진폭투과도를 나타내는 함수 또는 복소 파면 그 자체는 반드시 디지털화 되어야만 한다. 디지털화란 규칙적인 간격으로 함수를 샘플링 하는 것과 샘플된 값들을 유한한 수의 단계들로 각각 양자화 하는 것을 말한다. 본 연구에서는 양자화 할 때 양자화 에러가 적게 발생하며, 또한 구현하기가 쉽고 계산시간이 매우 짧은 장점을 지닌 직접 양자화 방법을 이용하였다. 즉, 이진 양자화가 아닌 다단계 위상값으로 양자화하기 때문에 모의 실험의 경우 0, π 와 같은 단순한 2단계의 값이 아닌 4, 8, 64, 128, 256 단계의 값에 대응되도록 양자화하여 다단계 위상값으로 CGH 패턴을 구하였다. 그러나 광학적으로 구현할 때는 8단계의 값으로 양자화 하여 실험하였다.

III. 실험 및 결과

직접 양자화 알고리즘을 이용하여 위상 가산형과 셀 결합형 및 복소투과함수 가산형 다채널 다단계 위상형 CGH 패턴을 컴퓨터를 이용하여 계산하였다. 구해진 CGH 패턴들의 재생상을 먼저 모의실험을 통해 확인한 후 반사형 액정 공간 광 위상변조기를 이용한 실험 장치를 구성하여 실제로 원 입력영상을 광학적으로 재생시켜 보았다. 그리고 각각의 부호화 방법에 따른 CGH들의 특성을 비교 분석하였다.

3.1. 컴퓨터 모의실험 결과

컴퓨터 모의실험에 사용된 입력영상으로는 이진 윈도우즈 비트맵 파일을 이용하였고, 이 파일의 크기는 256x256 픽셀이고, 여기에 그림 3과 같은 64x64 픽셀 크기의 8가지 종류의 입력영상[$o'_i(x, y)$] ‘광’, ‘신’, ‘호’, ‘처’, ‘리’, ‘연’, ‘구’, ‘실’을 넣었다. 이 진폭형 입력영상들에 대한 프라운hofer 회절 영역에서의 위상값들 $\psi_i(\mu, \nu)$ 과 서로 다른 캐리어 공간 주파수들 x_p, y_i 를 식 (6)에 적용시킨 후 직접 양자화 방법을 이용하여 8가지 1채널 위상형 CGH를 각각 설계하였다. 이렇게 설계된 CGH들을 역 푸리에 변환을 통하여 재생상을 얻었으며, 이를 다시금 그레이스케일의 Raw 파일로 출력했다. 또한 상기 8개의 입력영상 전체 정보를 하나의 CGH에 부호화하기 위하여 위상 가산형 CGH와 셀 결합형 CGH 및 복소투과함수 가산형 CGH를 각각 설계하였다.

그림 4와 그림 5, 그림 6에는 8개의 입력영상들 각각에 대

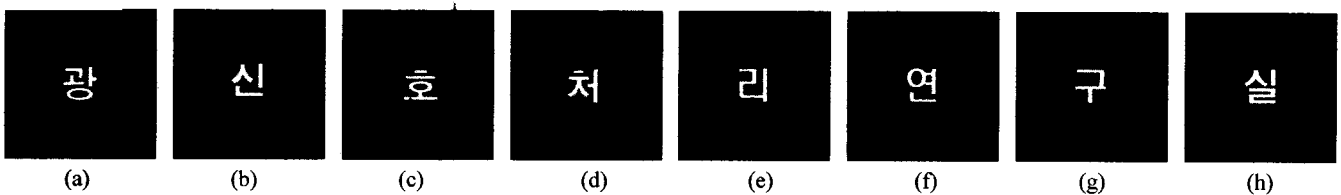


그림 3. 8가지 입력영상(64x64, 2color) (a) 광[채널1], (b) 신[채널2], (c) 호[채널3], (d) 처[채널4], (e) 리[채널5], (f) 연[채널6], (g) 구[채널7], (h)실 [채널8].

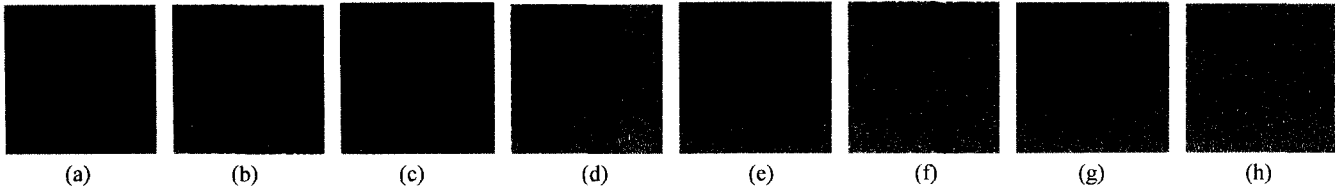


그림 4. 그림 3.의 (a) 채널1, (b) 채널2, (c) 채널3, (d) 채널4, (e) 채널5, (f) 채널6, (g) 채널7, (h) 채널8 등 8가지 입력영상들을 직접 양자화 방식으로 부호화하여 얻은 각각의 위상형 CGH 패턴.

용되는 CGH 들의 패턴과 위상 가산형, 셀 결합형 및 복소투과함수 가산형 부호화 방법에 따라 8개의 입력영상을 결합하여 설계한 8-채널 CGH들의 패턴, 그리고 모의실험을 통해 재생시킨 영상을 나타내었다. 재생영상에서 보듯이 위상 가산형의 경우 일부 공액상이 나타남을 볼 수 있으나, 셀 결합형과 복소투과함수 가산형의 경우 공액상이 나타나지 않음을 확인할 수 있다.

위상 가산형, 셀 결합형 및 복소투과함수 가산형 CGH들의 성능을 평가하기 위하여 식 (11)과 같은 구해진 상이 차지하는 영역에서의 평균제곱에러^[11]와, 식 (12)와 같은 스크린 평면에서 CGH에 의해 전 영역에 걸쳐 회절되는 빛 에너지와 구해진 상이 차지하는 영역 내에 회절되는 빛 에너지의 비로 정의되는 회절효율^[12-14], 그리고 식 (13)과 같은 구해진 상이 차지하는 영역에서의 신호 대 잡음비^[12-14]를 구하여 비교하였다.

$$MSE = \frac{1}{XY} \sum_F |h(x, y) - \lambda g(x, y)|^2 dx dy \quad (11)$$

$$\eta = \frac{\sum_F |g(x, y)|^2 dx dy}{\sum_H |g(x, y)|^2 dx dy} \quad (12)$$

$$SNR = \frac{\sum_F |h(x, y)|^2 dx dy}{\sum_F |h(x, y) - \lambda g(x, y)|^2 dx dy}$$

$$\text{단, } \lambda = \frac{\sum_F h(x, y)g^*(x, y)}{\sum_F |g(x, y)|^2} \quad (13)$$

- $h(x, y)$: 구하고자 하는 상
- $g(x, y)$: 구해진 상
- F : 구하고자 하는 상이 존재하는 영역
- H : 재생평면 전체 영역
- $X \cdot Y$: 구하고자 하는 상이 존재하는 영역의 픽셀 수

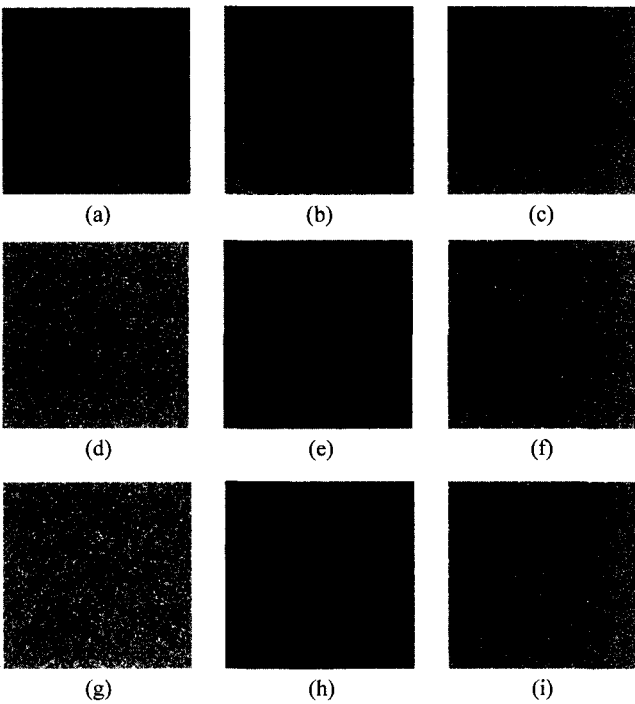


그림 5. 입력영상을 채널별로 다중화하여 부호화한 (a) 위상 가산형 [2CH] (b) 셀 결합형 [2CH] (c) 복소투과함수 가산형 [2CH] (d) 위상 가산형 [4CH] (e) 셀 결합형 [4CH] (f) 복소투과함수 가산형 [4CH] (g) 위상 가산형 [8CH] (h) 셀 결합형 [8CH] (i) 복소투과함수 가산형 [8CH] CGH 패턴.

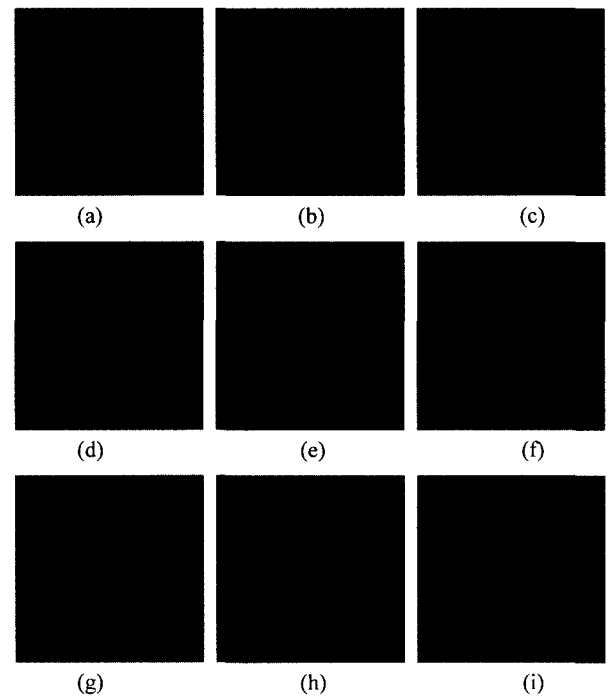


그림 6. 그림 5.의 (a) 위상 가산형 [2CH] (b) 셀 결합형 [2CH] (c) 복소투과함수 가산형 [2CH] (d) 위상 가산형 [4CH] (e) 셀 결합형 [4CH] (f) 복소투과함수 가산형 [4CH] (g) 위상 가산형 [8CH] (h) 셀 결합형 [8CH] (i) 복소투과함수 가산형 [8CH] CGH 패턴을 모의실험으로 각각 재생한 영상.

표 1은 모의실험으로 구한 위상형 CGH의 채널별 부호화 방법과 위상단계에 대한 평균제곱에러, 회절효율, 신호 대 잡음비(SNR, SNR[dB]) 등을 서로 비교해 주고 있으며, 그림 7와 그림 8은 각각 모의실험을 통하여 구한 채널수와 부호화 방법별 위상단계에 대한 성능분포를 보여주고 있다.

이 결과를 보면 회절효율의 경우 셀 결합형 CGH가 위상 가산형이나 복소투과함수 가산형 CGH 보다 성능이 좋게 나타나며, 복소투과함수 가산형 CGH의 경우 채널수가 증가하면 그 값이 크게 떨어지지 않고 오히려 조금씩 높아짐을 볼 수 있다. 평균제곱에러의 경우에는 회절효율의 경우와는 달리 복소투과함수 가산형 CGH가 위상 가산형이나 셀 결합형 CGH 보다 성능이 좋게 나타나며, 채널 수가 증가되어도 동일한 부호화 방법을 사용할 경우 그 값이 그다지 커지지 않음을 알 수 있다. 신호 대 잡음비의 경우에는 평균제곱에러의 경우와 마찬가지로 복소투과함수 가산형 CGH가 위상 가산형이나 셀 결합형 CGH 보다 성능이 좋게 나타나며, 채널

수가 증가하더라도 동일한 부호화 방법을 사용할 경우 그 값이 크게 낮아지지 않는 것을 볼 수 있다. 따라서 포괄적인 성능을 고려할 경우 복소투과함수 가산형 부호화 방법으로 설계된 CGH의 경우가 위상 가산형과 셀 결합형 부호화 방법으로 설계된 CGH 보다 성능이 우수함을 볼 수 있으며, 더불어 채널 수가 많아지더라도 회절효율과 평균제곱에러 및 신호 대 잡음비의 경우 그 성능이 크게 저하되지 않음을 볼 수 있다.

3.2. 광학 실험 결과

위상 가산형과 셀 결합형 및 복소투과함수 가산형 부호화 방식으로 설계된 다채널 다단계 위상형 CGH 패턴으로부터 다수의 입력영상을 반사형 액정 공간 광 위상변조기를 통해 실시간으로 재생하기 위한 광학장치 구성은 그림 9와 같다.

본 실험의 광원으로는 Coherent 사의 출력이 100 mW인 diode-pumped, frequency-doubled Nd:YAG($\lambda = 532 \text{ nm}$) 레이저를

표 1. 모의실험으로 측정된 (a) 1 채널, (b) 2채널, (c) 4채널, (d) 8채널 위상형 CGH의 부호화 방법과 위상단계에 따른 성능

(a)		1 CH				
채널수	위상단계수	4	8	64	128	256
회절효율(η)		0.40184	0.62914	0.69809	0.69858	0.69868
MSE		0.01081	0.00699	0.00583	0.00582	0.00582
SNR		1.61782	2.50225	2.99936	3.00360	3.00477
SNR[dB]		2.08930	3.98331	4.77029	4.77642	4.77810

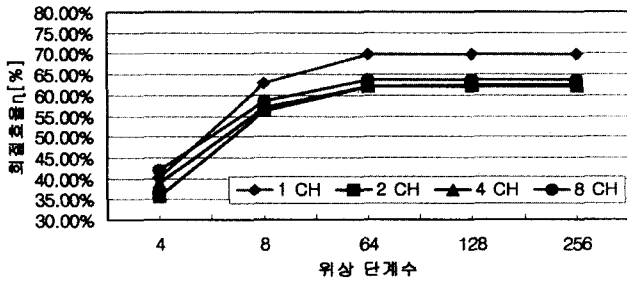
(b)		광신 [2CH]														
부호화방법	위상단계수	위상 가산형[SUM]					셀 결합형[SUB]					복소함수 가산형[AM]				
		4	8	64	128	256	4	8	64	128	256	4	8	64	128	256
회절효율(η)		0.18057	0.24589	0.26889	0.26909	0.26914	0.41327	0.63749	0.70496	0.70538	0.70548	0.35707	0.56173	0.62052	0.62099	0.62103
MSE		0.01772	0.01641	0.01595	0.01595	0.01595	0.01421	0.01032	0.00918	0.00917	0.00917	0.01402	0.00979	0.00855	0.00854	0.00854
SNR		1.20384	1.30012	1.33759	1.33796	1.33804	1.50116	2.06776	2.32521	2.32687	2.32729	1.52128	2.17989	2.49680	2.49969	2.49995
SNR[dB]		0.80568	1.13985	1.26325	1.26443	1.26468	1.76426	3.15499	3.66463	3.66772	3.66850	1.82209	3.38436	3.97384	3.97887	3.97931

(c)		광신호처 [4CH]														
부호화방법	위상단계수	위상 가산형[SUM]					셀 결합형[SUB]					복소함수 가산형[AM]				
		4	8	64	128	256	4	8	64	128	256	4	8	64	128	256
회절효율(η)		0.13450	0.19865	0.22679	0.22682	0.22686	0.42088	0.61336	0.67007	0.67040	0.67047	0.38915	0.56937	0.62215	0.62242	0.62246
MSE		0.01860	0.01737	0.01685	0.01684	0.01684	0.01393	0.01070	0.00976	0.00976	0.00975	0.01346	0.00965	0.00852	0.00851	0.00851
SNR		1.12454	1.20443	1.24172	1.24185	1.24189	1.50116	1.95452	2.14328	2.14426	2.14460	1.55389	2.16837	2.45536	2.45717	2.45741
SNR[dB]		0.50975	0.80783	0.94025	0.94070	0.94085	1.76427	2.91040	3.31079	3.31277	3.31346	1.91421	3.36133	3.90116	3.90435	3.90478

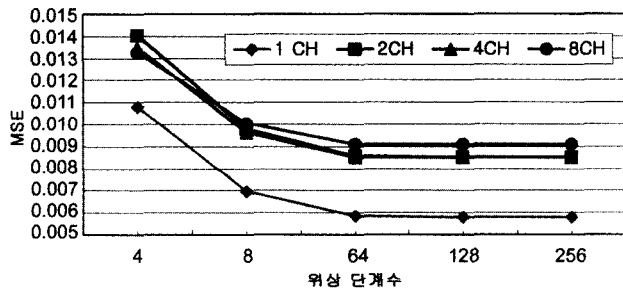
(d)		광신호처리 연구실 [8CH]														
부호화방법	위상단계수	위상 가산형[SUM]					셀 결합형[SUB]					복소함수 가산형[AM]				
		4	8	64	128	256	4	8	64	128	256	4	8	64	128	256
회절효율(η)		0.21143	0.24205	0.22957	0.22949	0.22955	0.41607	0.59573	0.65272	0.65302	0.65305	0.41911	0.58562	0.63607	0.63629	0.63635
MSE		0.01714	0.01660	0.01678	0.01678	0.01678	0.01404	0.01122	0.01033	0.01033	0.01032	0.01327	0.01007	0.00910	0.00910	0.00910
SNR		1.20189	1.24135	1.22828	1.22817	1.22822	1.46740	1.83578	1.99469	1.99554	1.99569	1.55264	2.04592	2.26456	2.26545	2.26564
SNR[dB]		0.79865	0.93895	0.89298	0.89260	0.89276	1.66549	2.63819	2.99876	3.00060	3.00093	1.91069	3.10889	3.54983	3.55154	3.55191

사용하였다. 레이저에서 나온 빔을 $\lambda/2$ 판과 공간 필터 (spatial filter)를 거쳐 광속을 확대시킨 다음, 렌즈 1에 의해 평행광으로 만들으로써 빔의 광 분포를 균일하게 하였다. 이렇게 만들어진 빔을 편광 빔 분리기(polarized beam splitter)를 통해 실시간 영상 처리가 가능한 반사형 액정 공간 광 위상

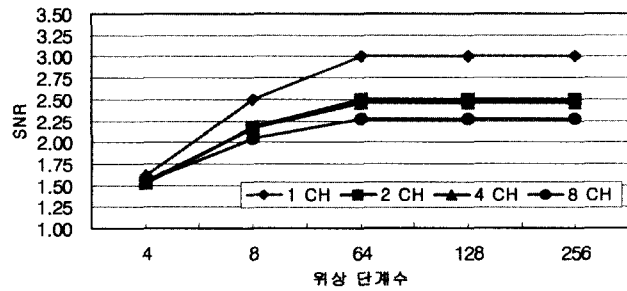
변조기에 입사시켰다. 이 때 반사형 액정 공간 광 위상변조기에는 여러 가지 부호화 방법을 이용하여 위상형으로 계산된 CGH 패턴이 있게 된다. 반사형 액정 공간 광 위상변조기는 입사하는 빔의 위상을 변조시키기 위한 장치로서 Hamamatsu의 X8267을 사용하였다. 이 장치는 반사형으로서 높은 위상변조 효율을 얻을 수 있는 PAL-SLM과 1.3" 흑백 TFT-LCD 및 이들을 결합시켜주는 광 영상 전송소자인 렌즈 그리고 컴퓨터로부터 보내진 CGH 패턴에 따라 LCD에 빛을 비추어 주는 LD 등으로 구성되어 있다. PAL-SLM은 이진 위상 변조의 경우 최대 약 40%, 다위상 변조의 경우 약 70%의 높은 위상변조 효율을 얻을 수 있게 한다. 또한 1.3" 흑백 TFT-LCD는 전기적으로 어드레스되며, 픽셀 피치가 $26 \mu\text{m}$ 크기인 $1024(H) \times 768(V)$ pixels 들로 구성되어 있다. 특히 이 변조기는 LCD의 픽셀 구성을 PAL-SLM에 전달하지 않음으로써 LCD 픽셀 구성에 의한 회절 잡음을 없애고 높은



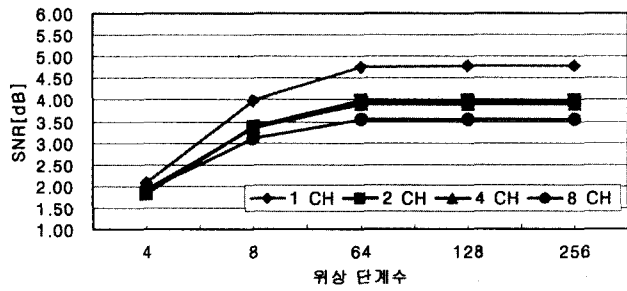
(a)



(b)

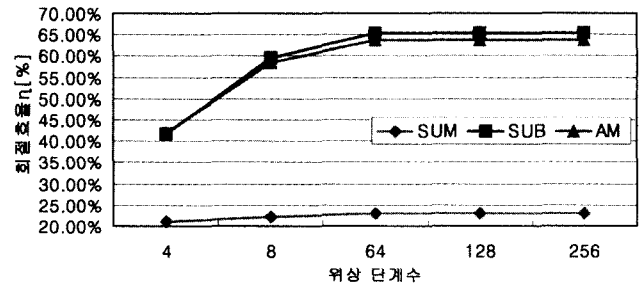


(c)

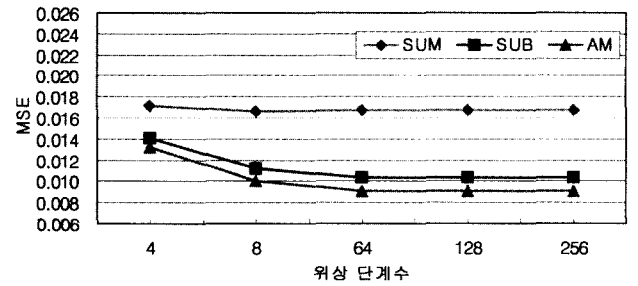


(d)

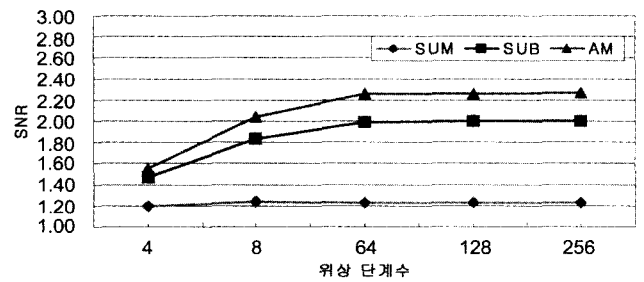
그림 7. 복소투과함수 가산형 부호화 방법을 사용하여 계산한 위상형 CGH의 채널별 위상단계에 대한 (a) 회절효율(η)[%], (b) MSE, (c) SNR, (d) SNR[dB] 등의 분포도.



(a)



(b)



(c)

그림 8. 8채널 위상형 CGH의 부호화 방법별 위상단계에 대한 (a) 회절효율(η)[%], (b) MSE, (c) SNR 등의 분포도.

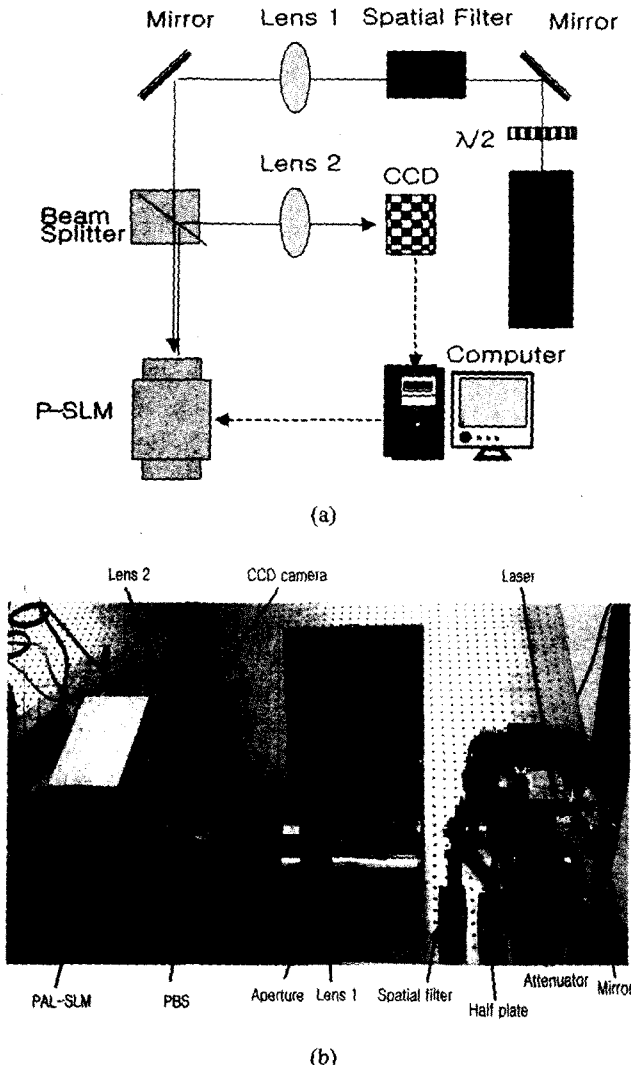


그림 9. 광학적 실험을 위한 (a) 실험구성도, (b) 실험장치구성도 사진.

변조 효율을 얻을 수 있다. 또한 이 변조기의 사용 가능 범위는 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 이기 때문에 CGH의 크기를 이에 맞게 설정하였다. PAL-SLM의 위상변조 범위는 2π 이상까지 가능하며, 설계된 CGH 패턴을 컴퓨터를 통해 출력시킴으로서 다단계 위상변조가 가능하다. 반사형 액정 공간 광 위상변조기는 $0.5 \mu\text{m}$ 의 분해능을 갖는 2단계 마이크로미터가 장착된 X, Y, Z 및 θ 스테이지에 설치되어 정밀하게 이동이 가능하도록 하였다. PAL-SLM에서 CGH 설계 패턴에 따라 위상 변조된 파면형태로 반사된 빔은 다시 편광 빔 분리기를 통해 렌즈 2(푸리에 변환 렌즈)에 의해 푸리에 평면상에 영상을 재생하게 된다. 재생 상을 PC로 저장하기 위해 Kodak megapixel CCD(charge coupled device : $1008(H) \times 1018(V)$ pixels, 픽셀 피치 $9 \mu\text{m}$) 카메라를 사용하였다.

본 실험에 사용된 시스템은 Newport사의 초점거리가 250 mm 이고 구경이 50.8 mm 인 achromatic doublet 렌즈를 푸리에 변환(Fourier transform : FT) 렌즈로 사용하여 CGH패턴 재생

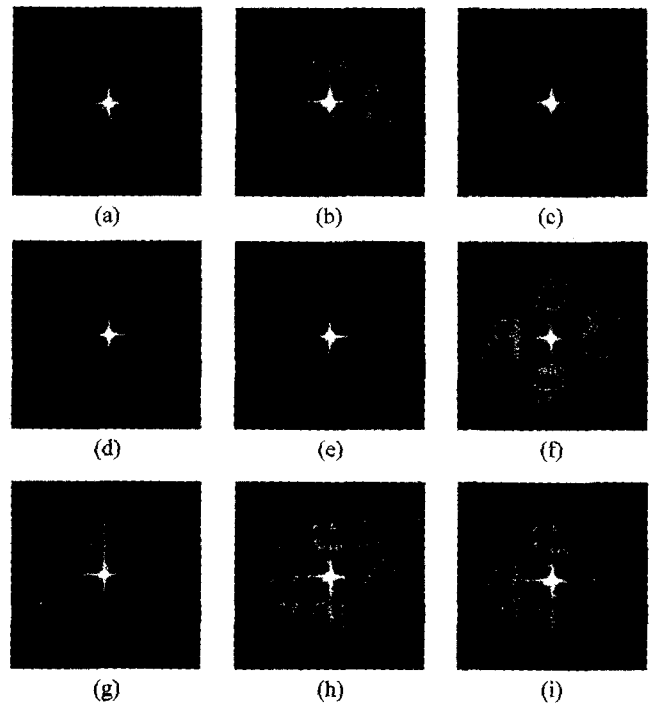


그림 10. 그림 4. 의 (a)위상 가산형[2CH] (b)셀 결합형[2CH] (c)복소투과함수 가산형[2CH] (d)위상 가산형[4CH] (e)셀 결합형[4CH] (f)복소투과함수 가산형[4CH] (g)위상 가산형[8CH] (h)셀 결합형[8CH] (i)복소투과함수 가산형[8CH] CGH 패턴을 광학실험으로 각각 재생한 영상.

이 가능하도록 하는 4-f(4-focal length) 구조를 사용하였다.

그림 10은 채널별 위상 가산형과 셀 결합형 및 복소투과함수 가산형 CGH 들에 대하여 그림 9와 같은 광학적 실험장치에 의해 재생된 영상을 나타낸다. 이들을 모의실험으로 재생한 영상과 비교하여 볼 때 거의 같은 영상임을 확인할 수 있다. 이미 모의실험에서 확인된 바와 같이 같은 부호화 방식으로 설계된 CGH로부터 얻은 재생상의 품질이 채널 수가 증가하더라도 떨어지지 않음을 시각적으로 확인할 수 있다. 광학적 재생에만 나타나 있는 zeroth order 영역의 “+” 모양의 상은 렌즈 2의 초점에 CCD를 들으로써 발생되는 회절 영상으로 생각된다. 또한 실험결과에서 보듯이 위상가산형의 경우 일부 재생상이 명확하게 나타나지 않을 뿐만 아니라 공액상이 나타남을 볼 수 있으나, 셀 결합형과 복소투과함수 가산형의 경우 입력영상형태의 이미지가 명확하게 나타나며 또한 공액상이 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 복소투과함수 가산형 CGH로부터 재생된 상이 위상 가산형과 셀 결합형 CGH로부터 재생된 상보다 명료하게 나타남으로써 재생품질이 보다 우수함을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 8개의 물체에 대한 CGH 패턴을 동시에 홀로그램에 저장할 수 있는 새로운 부호화 방법을 제시하였다.

또한 앞에서 제시한 부호화 방법들을 활용하여 설계한 위상 가산형과 셀 결합형 및 복소투과함수 가산형 CGH의 재생상을 모의실험과 PAL-SLM을 활용한 광학적 실험을 통해 확인하였다. 재생상의 경우 물체상과 공액상 모두가 동시에 나타나는 경우가 물체상만 나타나는 경우보다 회절효율을 1/2로 떨어뜨리기 때문에 공액상을 없앨 수 있는 다단계 위상형 CGH 설계 알고리즘을 개발하여 실험하였다.

컴퓨터 모의실험 결과 위상 가산형 부호화 방법과 셀 결합형 및 복소투과함수 가산형 부호화 방법으로 위상값을 256 단계로 양자화하여 설계한 8채널 CGH들의 회절효율은 각각 22%, 65%, 64%이고, 평균제곱에러는 각각 0.0168, 0.0103, 0.0091이며, 신호대 잡음비는 각각 0.89 dB, 3 dB, 3.55 dB이 됨을 확인하였다. 또한 복소투과함수 가산형 부호화 방법으로 256 위상단계로 양자화하여 설계한 CGH들의 채널 수에 따른 회절효율과 평균제곱에러, 신호대 잡음비를 검토한 결과 1채널 CGH는 각각 70%, 0.0058, 4.8 dB이고, 2채널 CGH는 각각 62%, 0.0085, 3.97 dB이며, 4채널의 경우 각각 62%, 0.0085, 3.9 dB, 8채널의 경우 63.6%, 0.0061, 3.55 dB가 됨을 확인하였다. 이들 결과를 보면 제안한 복소투과함수 가산형 부호화 방법으로 설계한 CGH의 경우가 위상 가산형 부호화 방법으로 설계한 CGH보다 평균제곱에러 값은 작게 나타나고, 회절효율과 신호 대 잡음비 값은 크게 나타나기 때문에 그 성능이 보다 우수한 것으로 판명되었다. 마찬가지로 셀 결합형 부호화 방법으로 설계한 CGH 보다 회절효율 값과 평균제곱에러 값은 작게 나타나고, 신호 대 잡음비 값은 크게 나타나기 때문에 비록 회절효율 성능은 조금 떨어지나 평균제곱에러와 신호 대 잡음비 성능은 나은 것으로 확인되어 전체적인 성능이 보다 우수한 것으로 판명되었다. 그리고 비록 채널수가 증가하더라도 동일한 부호화 방법을 사용한 CGH의 경우에 회절효율 값과 평균제곱에러 값 및 신호 대 잡음비 값이 크게 변하지 않음을 볼 수 있었다. 따라서 일반적으로 CGH에 기록되는 물체 수가 증가할수록 CGH의 재생 품질은 떨어지지만 본 고에서 제시한 부호화 방법을 사용한 다채널 CGH의 경우 1채널 CGH에 비해 성능저하가 크게 나타나지 않음을 볼 수 있었고, CGH 설계과정도 보다 간편함을 확인할 수 있었다.

또한 2π 이상으로 위상변조할 경우 70%를 초과하는 광 회절효율을 얻을 수 있는 반사형 액정 공간 광 위상변조기인 PAL-SLM에 다위상으로 설계된 CGH 패턴을 컴퓨터를 통해 출력시킴으로써 얻은 광학 재생영상의 경우 모의실험으로 구한 재생영상과 시각적으로 품질의 차이가 거의 없음을 확인할 수 있었다.

향후에는 8채널 CGH 보다 많은 정보를 가질 수 있고, 성능이 더욱 우수한 다채널 다단계 위상형 CGH를 구현할 수 있는 연구가 진행되어야 할 것이다. 이렇게 개발된 CGH를 광상판기에 적용시켜 공간필터로 활용한다면 기존의 단일채널 공간필터보다 여러 배의 효과를 얻을 수 있을 것이다. 따라서 이러한 장점을 활용할 수 있는 광패턴인식 시스템 등

여러 가지 응용분야의 연구도 함께 이루어져야 한다.

참고문헌

- [1] W. H. Lee, *Computer generated holograms : techniques and applications* (Progress in Optics XVI. E.Wolf, editor, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1978), pp. 119-223.
- [2] G. Tricoles, "Computer generated holograms : An historical review," *Appl. Opt.*, vol. 26, no. 20, pp. 4351-4360, 1987.
- [3] B. R. Brown and A. W. Lohmann, "Complex spatial filtering with binary masks," *Appl. Opt.*, vol. 5, no. 6, pp. 967-969, 1966.
- [4] A. W. Lohmann and D. P. Paris, "Binary Fraunhofer holograms generated by computer," *Appl. Opt.*, vol. 6, no. 10, pp. 1739-1748, 1967.
- [5] D. Mendlovic and I. Kiryuschev, "Two channels computer generated hologram and its application for optical correlation," *Opt. Comm.*, vol. 116, no. 4-6, pp. 322-325, 1995.
- [6] D. Mendlovic, "Double multiplexed computer-generated holograms," *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 20, pp. 3887-3890, 1996.
- [7] R. C. Hong, Z. Jin and G. W. Qi, "Four-channel self-focus computer-generated hologram," *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 34, pp. 8844-8847, 1997.
- [8] 정종래, 백운식, "공간 광 변조기를 이용한 2채널 이진 CGH의 광학적 구현", *한국통신학회논문지*, 제27권 4T호, pp. 94-99, 2002.
- [9] 정종래, 백운식, 김정희, 최재광, 이형수, 김남, "액정 공간 광 위상변조기를 이용한 멀티채널 멀티위상 CGH의 광학적 구현", *한국통신학회논문지*, 제28권 12T호, pp. 742-748, 2003.
- [10] T. Hara, "Liquid crystal spatial light phase modulator and its applications," *IMID, '02 Digest*, pp. 939-942, 2002.
- [11] H. Farhoosh, M. R. Feldman, S. H. Lee, C. C. Guest, Y. Fainman and R. Eschbach, "Comparison of binary encoding schemes for electron-beam fabrication of computer generated holograms", *Appl. Opt.*, vol. 26, no. 20, pp. 4361-4372, 1987.
- [12] M. Bernhardt, F. Wyrowski and O. Bryngdahl, "Iterative techniques to integrate different optical functions in a diffractive phase element", *Appl. Opt.*, vol. 30, no. 32, pp. 4629-4635, 1991.
- [13] F. Fetthauer, C. Stroot and O. Bryngdahl, "On the quantization of holograms with the iterative Fourier transform algorithm", *Opt. Comm.*, vol. 136, no. 1-2, pp. 7-10, 1997.
- [14] 최경식, 윤진선, 김 남, "컴퓨터 생성 홀로그래픽 디퓨저의 설계", *대한전자공학회논문지*, 제38권 5호, pp. 45-54, 2001.

Realization of the multi-phase level CGH according to the multi-channel encoding method using a PAL-SLM

Jong-Rae Jeong[†] and Woon-Sik Baek

School of Electronics and Informations, Kyunghee University, Yongin 449-701, KOREA

[†] E-mail: jrchung@iwlee.com

Jung-Hoi Kim and Nam Kim

School of Electronic and Computer Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, KOREA

(Received December 31, 2004, Revised manuscript June 7, 2004)

We proposed more efficient encoding methods that can design a multi-channel multi-level phase only computer-generated hologram(CGH) that can reconstruct many objects simultaneously without a conjugate image. We used a fabrication technique for the pixel oriented CGH for designing the pattern of the proposed multi-channel CGH. We investigated the difference of the optical efficiency(η), mean square error(MSE) and signal-to-noise ratio(SNR) of multi-channel CGHs that were designed by three kinds of encoding methods according to the number of quantization phase levels, and we estimated the performance of the pattern of the proposed multi-channel CGH. Generally, as the number of input objects' reference patterns stored in the CGH is increased, the reconstruction quality of the CGH is degraded. But we observed through computer simulation that the diffraction efficiency of the 1-ch CGH is 70%, and those of the 2-ch, 4-ch, 8-ch CGHs are 62%, 62% and 63%. Therefore we found that the diffraction efficiencies of the multi-channel CGHs using the newly proposed encoding method are similar to that of 1-ch CGH. We implemented the CGH optically using a liquid crystal spatial light phase modulator that consisted of a PAL-SLM efficiently coupled with a XGA type LCD by an optical lens and an LD for illuminating the LCD. We discussed the output images that are reconstructed from the PAL-SLM.

OCIS Codes : 070.0070, 090.1760, 090.4220, 100.0100.