

## 자유공간 광 연결을 위한 결합형 이진 위상 홀로그램

서호형 · 이일항

한국전자통신연구소, 기초기술연구부

(1996년 1월 10일 받음)

기존의 이진 위상 홀로그램 사용시 재생되는 불필요한 영상을 효과적으로 제거할 수 있는 결합형 이진 위상 홀로그램을 개발하였다. 두 개의 이진 위상 홀로그램을 이용하는 결합형 이진 위상 홀로그램은 제작이 용이하고 효율이 높아 광 연결이나 광 정보처리에 매우 유용하게 사용할 수 있다. 본 논문에서는 결합형 이진 위상 홀로그램의 원리와 특성 및 실험 결과들을 나타내었다.

### I. 서 론

광 논리 소자, 광 정보처리, 자유공간 광연결 시스템을 구현하기 위해서는 균일한 세기를 갖는 이차원 광파 어레이가 절실히 요구된다. 이러한 광 어레이를 생성하기 위한 방법으로는 초기에는 Dammann 회절격자가 사용되어 왔다.<sup>[1,4]</sup> Dammann 회절격자는 효율이 낮고 또한 특정한 패턴의 회절빔의 재생이 불가능하여 이러한 단점을 보완하는 줄무늬형 이차원 Dammann 격자가 개발되었다.<sup>[5,6]</sup> 홀로그램을 여러 개의 직사각형 모양의 위상 셀로 나누어 설계하는 이진 위상 홀로그램(Binary Phase Hologram: BPH)도 연구되었는데 최근에 컴퓨터의 성능이 향상되면서 회절 효율이 높은 이러한 BPH 또는 다중 위상 홀로그램에 관심이 높다.<sup>[7]</sup> 그런데 이진 위상 홀로그램은 두 가지의 위상을 이용해 설계되기 때문에 제작이 용이한 반면 회절광의 세기가  $I(m, n)$ 과  $I(-m, -n)$ 이 같게 되어 원하는 상 이외에 원점에 대하여 대칭인 역 대칭상이 동시에 나타나게 된다. 만약 이러한 역 대칭상이 불필요하다면 결과적으로 회절 효율을 반감시키는 결과가 되고 잡음으로 작용하여 전반적으로 효율이 감소하게 된다. 홀로그램을 다중 위상으로 설계 제작한다면 이러한 문제는 해결되겠지만,<sup>[8]</sup> 제작시 공정 단계가 늘어나고 이에 따른 정확한 정렬 작업이 요구된다. 최근에 이러한 문제를 해결하기 위해 BPH에다 이진 위상 블록으로 이루어진 마스크를 합친 Block-quantized BPH가 보고된 적이 있다.<sup>[9]</sup> 그러나 이 경우도 위상 마스크의 제한된 공간 주파수로 인해 불필요한 상을 제거하는데 한계가 있다. 본 연구에서는 두 개의 BPH를

따로 설계 제작하고 이들을 결합하여 다중 위상 홀로그램으로 만들어 불필요한 회절빔을 소거하는 방식의 새로운 위상 홀로그램 방식을 개발하였다. 이러한 방식의 홀로그램을 결합형 이진 위상 홀로그램(Combined binary phase hologram: CBPH)이라 부르며<sup>[10]</sup>, 이것은 실제로 4개의 위상을 갖는 다중 위상 홀로그램의 성능을 가지면서 제작이 쉽고 여러 가지 새로운 응용이 가능하다는 장점이 있다. 제 2장에서는 결합형 이진위상 홀로그램의 개발 배경 및 이론적 설명을 하였고, 제 3장에서는 이진 위상 홀로그램 설계시 최적화 방법을 제 4장에서는 실험 결과 및 토의, 마지막으로 제 5장에서는 결론을 나타내었다.

### II. 결합형 이진 위상 홀로그램의 원리

그림 1과 같이 0 또는  $\pi$ 의 위상이 반복되는 1차원 회절격자의 스펙트럼을 보면 +1차와 -1차로 각각 40%의 세기를 갖는 회절빔의 세기를 갖게 된다. 또한 위상이 0,  $\pi/2$ ,  $\pi$ ,  $3\pi/2$ 인 4개인 다중 위상 회절격자의 스펙트럼 분포를 보면 +1차로 약 80%의 세기를 갖는 반면 -1차의 세기는 상쇄되어 0%가 된다. 이와 같은 다중 위상 회절격자는 위상이 0,  $\pi$ 인 이진 위상 회절격자에 공간 주파수가 2배이고 위상이 0 또는  $\pi/2$ 가 되는 회절격자를 결합시켜 만들 수 있다. 위와 같은 개념을 2차원의 이진 위상 홀로그램에 확장시켜 결합형 이진 위상 홀로그램을 만들 수 있다.

그림 2와 같이 위상 투과 함수가 각각  $g_1(x, y)$ 와  $g_2(x, y)$ 인 이차원 위상 홀로그램 BPH1과 BPH2를 고

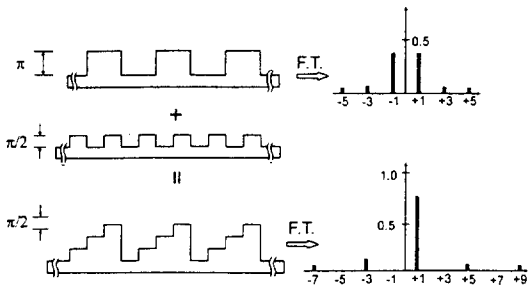


그림 1. 위상이 각각  $(\pi, 0)$ ,  $(\pi/2, 0)$ 인 두 개의 1차원 이진 위상 회절격자를 결합하여 위상이  $(0, \pi/2, \pi, \pi/3/2)$ 인 회절격자를 구성하는 원리도.

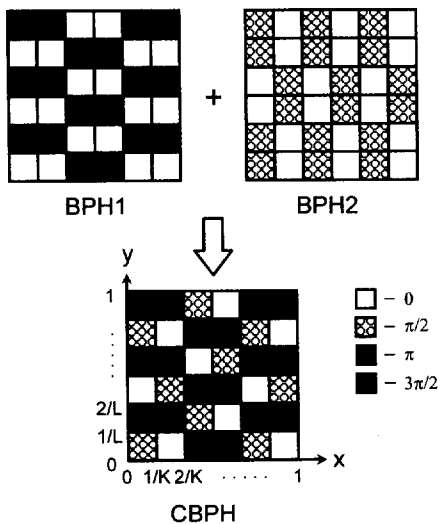


그림 2. 두 개의 이진 위상 홀로그램을 이용하여 결합형 이진 위상 홀로그램을 형성하는 원리도. BPH1 (BPH2)의 각 셀의 위상은 0 또는  $\pi(\pi/2)$ .

려하자. 각 홀로그램의 한 주기는  $K \times L$ 개의 직사각형 셀로 나누고, 셀들은 입력파에 대하여 적당한 위상 지연을 갖는다. 만약 이 두개의 위상 홀로그램을 적절하게 결합시키면 새로운 위상 함수는 다음과 같이 두 위상 함수의 곱으로 나타내어진다.

$$g(x, y) = g_1(x, y)g_2(x, y) = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} \exp(i\psi_{k,l}) \text{rect} \left\{ \frac{x-k/K}{1/K}, \frac{y-l/L}{1/L} \right\} \quad (1)$$

이 때,  $\psi_{k,l}^1$ 와  $\psi_{k,l}^2$ 를 각각 위상 함수 BPH1과 BPH2의 위상 값이라 할 때 CBPH의 위상  $\psi_{k,l}$ 은 이 둘의 합인  $\psi_{k,l}^1 + \psi_{k,l}^2$ 로 나타낸다. 만약  $\psi_{k,l}^1$ 가 입력파에 대해 위상

지연 값  $\phi_1$  또는  $\phi_2$ 를 갖고  $\psi_{k,l}^2$ 는  $\phi_3$  또는  $\phi_4$ 의 위상 지연을 가진다면 CBPH의 위상 값  $\psi_{k,l}$ 은  $\phi_1 + \phi_3$ ,  $\phi_1 + \phi_4$ ,  $\phi_2 + \phi_3$ ,  $\phi_2 + \phi_4$ 로 4개의 위상 값을 갖는 다중 위상 홀로그램이 된다. 또한  $\phi_2 - \phi_1 = \pi$ ,  $\phi_4 - \phi_3 = \pi/2$ 이고  $\phi_1 + \phi_3 = 0$ 이라고 하면, 위의 4개의 위상 값은 0,  $\pi/2$ ,  $\pi$ ,  $3\pi/2$ 로 간단하게 나타낼 수 있다. 홀로그램이 주기 함수이기 때문에 홀로그램의 투과 함수  $g(x, y)$ 는 다음과 같이 푸리에 전개를 할 수 있다.

$$g(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} G(m, n) \exp[2\pi i(mx + ny)] \quad (2)$$

푸리에 계수  $G(m, n)$ 은 출력 면에서의 회절빔의 진폭을 나타내고 다음과 같은 식으로 구해진다.

$$G(m, n) = \int_0^1 \int_0^1 g(x, y) \exp[-2\pi i(mx + ny)] \quad (3)$$

식 (1)을 식 (3)에 대입하면 식 (4)가 얻어진다.

$$G(m, n) = G_0(m, n) \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} \exp(i\psi_{k,l}) W(m, n, k, l) \quad (4)$$

여기서

$$G_0(m, n) = \frac{1}{KL} \exp\left[i\pi\left(\frac{m}{K} + \frac{n}{L}\right)\right] \text{sinc}\left(\frac{m}{K}, \frac{n}{L}\right) \quad (5)$$

$$W(m, n, k, l) = \exp\left[-2\pi i\left(\frac{mk}{K} + \frac{nl}{L}\right)\right] \quad (6)$$

이고, 위의 (5)식에서  $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/\pi x$ ,  $\text{sinc}(x, y) \equiv \text{sinc}(x) \text{sinc}(y)$ 이며 상수  $K$ 와  $L$ 은 홀로그램의 한 주기에 서 각각  $x$ 와  $y$ 축으로의 분할된 셀의 수를 나타낸다.

### III. 최적화 방법

홀로그램 설계시 원하는 출력이 나오도록 BPH1과 BPH2의 각 셀들의 위상 값을 결정해 주면 되는데 이러한 작업은 반복적이고도 상당한 시간이 소요되는 최적화 과정을 요한다. 유전자 알고리즘이나 Simulated annealing(SA) 등의 방법은 지역 최솟점에 빠지는 확률을 극소화시켜 전역 최소를 보장해 주긴 하지만 시간이 많이 소요된다. 본 논문에서는 SA를 이용하면서 실제 시간을 상당히 줄이는 방법으로 특정한 셀들의 위상 값만을 고려하는 방법을 도입하였다. 코스트 함수로는 회절 효율과 균일도 이 두 가지면을 고려해서 다음과 같이 정의하였다.

$$C = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{m,n} (T_{m,n} - |G(m, n)|^2)^2 + A(I_{max} - I_{min})^2 \quad (7)$$

여기서  $T_{m,n}$ 은 회절빔의 세기의 목표값을 나타내고,  $w_{m,n}$ 은 목표값에 따라 1 또는 0의 값을 갖는 상수이다.  $I_{max}$ 와  $I_{min}$ 은  $w_{m,n}$ 이 1인 경우에 해당하는 출력의 세기 중 각각 최대값과 최소값을 나타낸다. 식 (7)의 오른쪽의 첫째 항의 값이 감소함에 따라 회절 효율은 목표값에 접근하며 둘째 항의 값이 감소하면 회절빔들 사이의 균일도가 증가한다. 상수 A는 최적화 할 때 회절 효율과 균일도 중에서 어느 곳에 더 비중을 주는가 하는 상수이다. A값이 증가할수록 회절 효율보다는 균일도가 강조된다. 한편 회절 효율  $\eta$ 은 다음과 같이 목표값이 0이 아닌 회절빔의 모든 세기의 합으로 정의된다.

$$\eta = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{m,n} |G(m, n)|^2 \quad (8)$$

결합형 이진 위상 홀로그래프는 주 홀로그래프와 보조 홀로그래프로 구성된다. 먼저 주 홀로그래프인 BPH1을 설계하고 다음은 이것을 이용해 보조 홀로그래프인 BPH2를 설계하게 된다. BPH1을 설계하기 위해서는 먼저 BPH1의 모든 셀에 0 또는  $\pi$ 의 위상 값을 무작위로 갖게 한다. 그 다음은 임의의 셀들을 택하여 그들의 위상 값을 0에서  $\pi$ , 또는  $\pi$ 에서 0으로 바꾸어 주면서 식 (7)의 코스트 함수를 조사해 보고 코스트 함수가 작아지는 쪽으로 위상값을 결정해 준다. 이러한 작업은 홀로그래프의 셀의 수가 많으면 많을수록 시간이 더 소요된다. 본 논문에서는 최적화 시간을 단축시키기 위해 다음과 같은 방법을 도입하였다.

(1) 먼저 FFT 알고리즘을 이용해 BPH1의 초기의 위상 값으로부터 진폭과 코스트 함수  $C$ 를 구한다.

(2) 임의의 셀( $k, l$ )을 택하여 그것의 위상을 바꾼다. 단 셀을 택할 때 위상값  $\psi_{k,l}^0$ 이 주위의 상하좌우 이 네 개의 셀들의 위상( $\psi_{k-1,l}^0, \psi_{k+1,l}^0, \psi_{k,l-1}^0, \psi_{k,l+1}^0$ )들과 모두 같은 경우는 택하지 않는다.

(3) 바뀐 위상값에 대한 새로운 진폭  $G^{new}(m, n)$ 과 코스트함수  $C'$ 를 구한다.

(4) 만약 코스트 함수값이 감소된 경우, 즉  $\Delta C (=C'-C) < 0$ 일 경우  $\psi_{k,l}^0$ 의 새로운 위상값은 채택이 되고 그렇지 않은 경우는 확률  $P(\Delta C) = 1/[1 + \exp(\Delta C/T)]$ 에 의해 채택 여부가 결정된다. 여기서  $T$ 는 담금질의 온도에 해당하는 매개변수이다.

(5) 과정 (2)~(4)를 온도  $T$ 를 점차 감소시키면서 코스트 함수가 적정 수준에 이를 때까지 반복한다.

특히 과정 (3)에서 임의의 셀이 진폭  $G(m, n)$ 에 미치는

영향은 다른 셀의 위상값에 대하여는 무관하므로 어떤 한 셀( $k, l$ )의 위상을 바꾼 후 이에 해당하는 새로운  $G^{new}(m, n)$ 를 구하기 위해 식 (4)~(6)을 직접 이용하는 것보다는 다음과 같이 이전에 이미 계산된 세 셀( $k, l$ )에 의한 변화량만  $\Delta(m, n, k, l)$ 만 첨가해 주면 된다.

$$G^{new}(m, n) = G^{old}(m, n) + \Delta(m, n, k, l) \quad (9)$$

$$\Delta(m, n, k, l) = G_0(m, n) W(m, n, k, l) (\exp(i \psi_{k,l}^{new}) - \exp(i \psi_{k,l}^{old})) \quad (10)$$

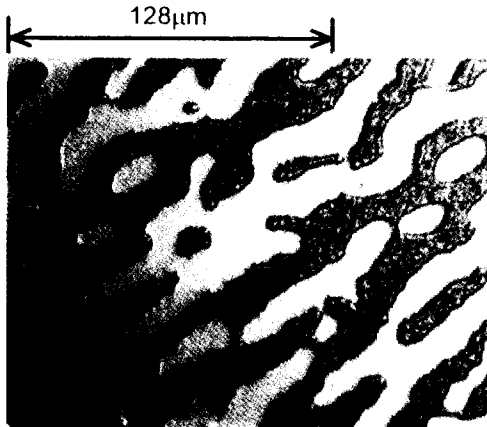
위와 같이 하면 모든 셀에 대하여 계산할 필요가 없기 때문에 최적화의 시간을 상당히 줄일 수 있다.

보조 홀로그래프 BPH2를 구하는 알고리즘은 주 홀로그래프의 경우와 비슷하다. 하지만 BPH2를 독립적으로 설계하지는 않고, 이미 얻어진 주 홀로그래프의 위상  $\psi_{k,l}^1$ 과의 관계를 갖고 구해진다. 즉 위상이  $\psi_{k,l}^2 (= \psi_{k,l}^1 + \psi_{k,l}^2)$ 인 다중 위상 홀로그래프를 설계하기 위해서 이미 구한  $\psi_{k,l}^1$ 값은 고정시키고  $\psi_{k,l}^2$ 값만 바꾸면서 최적화를 시킨다. 다중 위상 홀로그래프의 최적화가 끝난 후  $\psi_{k,l}$ 로부터  $\psi_{k,l}^2$ 을 빼면 보조 홀로그래프의 위상  $\psi_{k,l}^2$ 이 얻어진다.

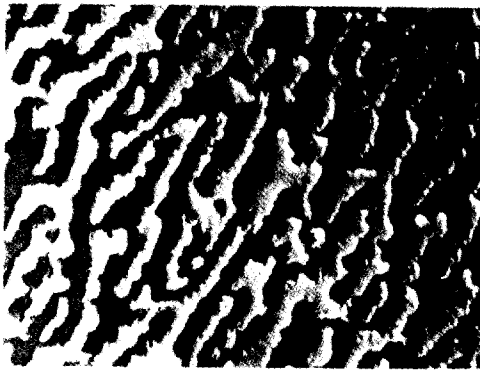
#### IV. 실험 결과 및 토의

본 논문에서는 홀로그래프의 한 주기를  $128 \times 128$ 개의 셀로 나누어 설계하였다. BPH1과 BPH2의 상대 위상이 각각  $\pi, \pi/2$ 인 경우 계산 결과 CBPH의 회절 효율은 66.38%를 얻었고 BPH1만을 이용할 경우는 35.60%의 효율을 얻어 CBPH를 이용할 경우 약 1.86배의 효율이 증가함을 보였다. 주 홀로그래프 BPH1만을 이용할 경우 기존의 이진 위상 홀로그래프를 사용하는 것과 동일하다. 그리고 보조 홀로그래프 BPH2 자체로는 별 의미가 없고 다만 주 홀로그래프와 합쳐져 다중 위상 홀로그래프가 되며 이진 위상 홀로그래프 사용시 나타나는 역 대칭상을 없앨 수 있게 된다.

한편 회절빔의 균일도는 주로 다음 두 가지에 영향을 받는다. 그 중 하나는 설계 시 홀로그래프의 한 주기 안에 있는 셀의 수이고, 다른 하나는 홀로그래프 제작시 정확한 위상차를 얻지 못함으로 인한 제작 오차이다. 이 제작 오차에 의한 영향은 회절빔의 중앙값  $I(0, 0)$ 이 증가하게 되어 상대적으로 다른 차수의 회절빔의 값은 줄어들게 되지만, 이 중앙값 만을 제외한다면 전체적인 균일도는 별 영향을 받지 않는다. 셀의 수가 많아지면 공간 주파수를 증가시키기 때문에 회절빔의 차수가 큰 경우까지도 조절이 가능해져 균일도가 증가한다. 하지만 필요이상 많은 셀의 수를 사용할 경우 설계하는 시간이 오래 걸



(a) BPH1



(b) BPH2

그림 3. 설계 제작된 이진 위상 주홀로그램(a)과 보조 홀로그램(b)의 편광 현미경 사진.

된다. 따라서 설계하고자 하는 패턴의 종류에 따라 적당한 수의 셀을 택하는 것이 중요하다. 진폭 형태의 광 마스크는 전자빔 리소그래피 방법으로 제작하였다. 이때 한 셀의 크기를  $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ 로 하였고, 따라서 홀로그램의 한 주기의 크기는  $128\mu\text{m} \times 128\mu\text{m}$ 이다. 이것을  $80 \times 80$ 개로 복사하여 실제의 크기는  $10.24\text{mm} \times 10.24\text{mm}$ 가 되게 하였다. 이렇게 제작된 마스크와 광리소그래피에 의해 위상 홀로그램을 만들었다. 두개의 홀로그램을 따로 제작을 하기 때문에 기존의 다중 위상 홀로그램을 제작할 때 사용하는 정교한 정렬 작업이 필요 없다. 제작 후 두개의 홀로그램을 결합할 때는 간단한  $x-y$  미세정렬기와 rotator를 이용하고 또한 레이저 빔을 홀로그램에 비추어 그 결과를 확인하면서 실시간으로 정렬을 한다. 그림 3의 (a)와 (b)는 각각 설계 제작된 주 홀로그램과 보조 홀로그램을 편광현미경으로 찍은 사진을 나타낸다.

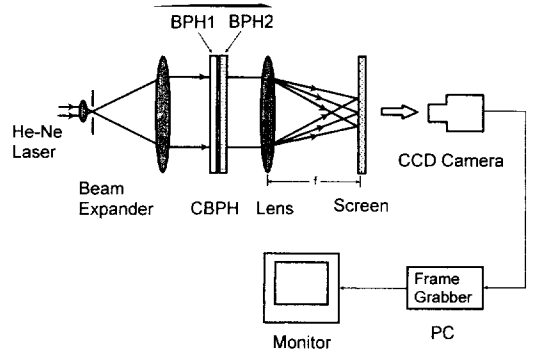


그림 4. 결합형 이진 위상 홀로그램을 이용한 실험 장치도.

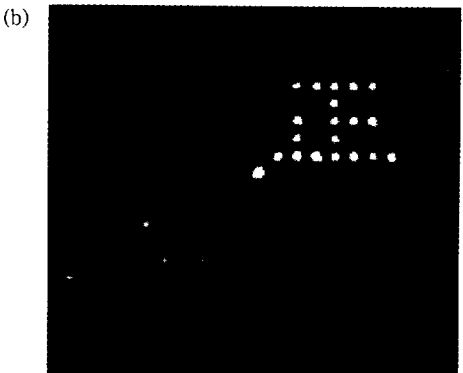
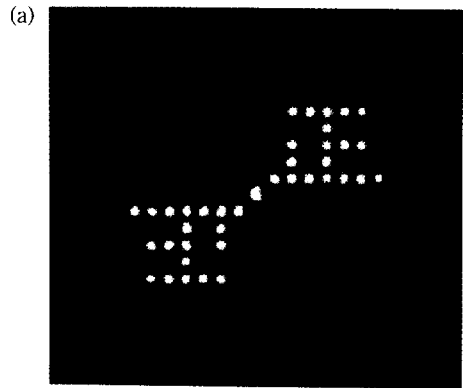


그림 5. (a) 주 홀로그램 BPH1만을 이용한 실험 결과, (b) 결합형 이진 위상 홀로그램을 이용한 실험 결과.

그림 4는 설계 제작된 CBPH를 이용해 실험하는 장치도이다. 레이저 평행광이 CBPH에 조사되면 CBPH를 통과한 회절빔은 그 뒤에 있는 렌즈를 통해 푸리에 변환된 상을 얻는다. 이 상은 PC와 연결된 CCD 카메라를 지나 최종 출력은 모니터로 확인한다. 그림 5(a)는

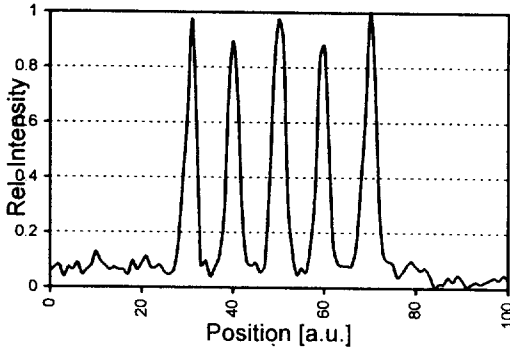


그림 6. 결합형 이진 위상 홀로그램으로 부터 얻어진 회절빔의 세기 분포도.

BPH1만을 이용한 결과를 나타낸다. 예상하는 바와 같이 출력면의 제 1사분면에 원하는 상이 재생되었고 동시에 제 3사분면에 역대칭된 상이 재생되었다. 하지만 CBPH를 이용해 이 역 대칭된 상이 소거된 결과가 그림 5(b)에 나타나 있다.

그림 6은 재생된 상(그림 5(b))의 균일도를 보기 위해 첫 줄 5개의 회절빔의 세기를 나타낸다. 실험적으로 평균값에 대해 약  $\pm 5\%$ 의 분포를 가짐을 확인하였다. CBPH는 기존의 위상이 4개인 다중 위상 홀로그램의 특성을 갖는 것 외에 CBPH를 이루는 보조 홀로그램의 위상을 변화시킴으로써 여러 가지 다른 출력을 얻을 수 있다는 특징이 있다. 예를 들어 보조 홀로그램의 모든 셀들의 위상을 0은  $\pi/2$ 로 그리고  $\pi/2$ 는 0으로 바꾸어 주홀로그램과 결합시키면 그림 5(a)의 제 1사분면 상이 소거되고 제 3사분면 상은 재생이 된다. 이러한 성질을 이용하며 보조 홀로그램을 공간 광 변조기로 대체시켜 주 홀로그램과 연결하여 위상을 실시간으로 바꾸어 주면 광 스위칭이나 실시간 처리를 요하는 광통신 및 광정보처리에 응용할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 두개의 이진 위상 홀로그램을 결합시켜 불필요한 회절빔을 효과적으로 제거시킬 수 있는 결합형 이진 위상 홀로그램 방식을 제안하고 이를 실험적으로 검증하였다. 결합형 이진 위상 홀로그램은 다중 위상 홀로그램 특성을 가짐으로 높은 회절 효율과 임의의 모양의 회절빔을 재생시킬 수 있으며, 두개의 이진 위상 홀로그램을 따로 제작하기 때문에 기존의 다중 위상 홀로그램보다 제작이 용이하다. 또한 보조 홀로그램의 위상을 가변 시킴으로써 다양한 결과를 얻을 수 있으며 이러한 특성을 응용하기 위한 연구가 요구된다.

## 참 고 문 헌

- [1] H. Dammann and K. Gortler, *Opt. Commun.* **3**, 312 (1971).
- [2] J. N. Mait, *Opt. Lett.* **14**, 196 (1989).
- [3] R. L. Morrison, *J. Opt. Soc. Am. A*, **9**, 464 (1992).
- [4] 서호형, 광종훈, 정종술, 이일항, *한국광학회지*, **5**, 45 (1994).
- [5] J. Turunen, A. Vasara, and J. Westerholm, *Opt. Commun.* **74**, 245 (1989).
- [6] 이득주, 윤병호, 김 남, 서호형, *한국광학회지*, **6**, 108 (1995).
- [7] M. R. Feldman and C. C. Guest, *Opt. Lett.* **14**, 479 (1989).
- [8] S. H. Song and El-Hang Lee, *ETRI Journal*, **17**, 1(1995).
- [9] M. S. Kim and C. C. Guest, *Appl. Opt.* **32**, 678 (1993).
- [10] H. H. Suh, C. H. Kwak, and E.-H. Lee, *Opt. Lett.* **20**, 2131 (1995).

## Combined Binary Phase Holograms for Free-Space Optical Interconnection

Ho Hyung Suh and El-Hang Lee

*Electronics and Telecommunications Research Institute 161 Gajong-Dong, Yusong-Gu, Taejon, 305-350, Korea*

(Received: January 10, 1996)

We have developed a combined binary-phase hologram (CBPH) consisting of two binary phase holograms. The CBPH can be effectively used for optical interconnection and image processing by suppressing unwanted images of a conventional binary-phase hologram. The theory and properties of the CBPH and experimental results are presented.