

## 회전, 각, 그리고 공간 다중화 방법을 결합 사용하는 홀로그래픽 디스크 메모리에서의 면적저장밀도

장주석<sup>†</sup> · 신동학

부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부  
(608-737) 부산광역시 남구 대연3동 599-1번지

김지덕 · 이홍석

삼성종합기술원, System & Control Sector  
(449-711) 경기도 용인시 기흥읍 농서리 산14-1번지

(2000년 7월 10일 받음, 2000년 9월 18일 수정본 받음)

디스크 형태의 저장 매체에 다중 홀로그램을 기록함에 있어서, 우리는 저장밀도를 향상시키기 위해 회전, 각, 그리고 공간 다중화를 복합적으로 구현할 수 있는 간단하고 비유면에서 효율적인 방법을 연구한 바 있다. 회전다중과 각다중은 두 개의 췌기 프리즘을 이용하여 기준빔을 직접 제어함으로써 얻고, 공간다중은 기록매질을 이동시킴으로써 얻었다. 본 논문에서는 저장밀도가 신호빔과 기준빔 경로상에 있는 렌즈들의  $F/\#$ ( $f$  number)와 밀접한 관계가 있으며, 그 저장밀도가 신호빔 경로상에 있는 렌즈의  $F/\#$ 가 기준빔 경로에 있는 렌즈의  $F/\#$ 의 약 두 배가 될 때 최대로 얻어짐을 보였다.

OCIS codes : 210.2860, 090.4220, 090.7330.

### I. 서 론

홀로그래픽 메모리는 3차원의 데이터 저장과 병렬적인 데이터 처리로 주목받고 있다.<sup>[1,2]</sup> 다수의 데이터 페이지를 중첩하여 저장하기 위해, 각다중, 회전다중, 이동다중, 공간다중, 직교위상코드다중, 그리고 파장다중 등이 제안되었다.<sup>[3-8]</sup> 저장밀도를 더욱 증가시키기 위해서는, 두 개 이상의 다중화 방법을 혼합하여 사용할 수 있다. 비록 직교위상코드다중과 파장다중 방법은 기준빔 자체를 움직이지는 않지만, 기준빔의 위상패턴을 제어하기 위한 장치나 값 비싼 광원이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 이 두 방법은 고려하지 않았다.

홀로그래픽 데이터 저장 실험에서는 주로 각다중, 회전다중, 그리고 공간다중화를 사용해 왔다. 각다중 방식에서는, 기준빔의 방향을 제어하는 장치를 사용함으로써 기록매질의 Bragg 분리각 이상이 되는 기준빔들을 각각의 영상을 중첩저장하는데 사용한다. 회전다중화 방식은 기준빔과 신호빔의 방향은 고정해 두고 기록매질을 기록위치점을 중심으로 회전시키면서 여러 개의 영상을 중첩기록한다. 이는 기록매질이 얇아서 Bragg 분리각이 클 때에 유용하다.<sup>[4]</sup> 공간다중화 방식은 기록매질을 공간적으로 움직임으로써 기록 매질의 다른 지점에 데이터를 저장하는 방법이다. 이는 일반적인 메모리에서 저장용량을 증가시키기 위한 간단하고 명백한 방법이다. 공간다중화는 이동다중화의 특별한 경우라고 볼 수도 있다. 일반적으로 이동다중화는 각다중이나 회전다중과 같이 사용하지 못하는데, 이는 이동다중화로 기록된 홀로그램의 격자 벡터가 각다중이

나 회전다중으로 기록된 홀로그램의 격자 벡터와 겹치는 경우가 발생하기 때문이다. 그러므로 우리는 공간다중화만을 고려할 것이다.

한 지점에 가능한 많은 홀로그램을 기록하기 위하여 각다중 및 공간다중, 각다중 및 회전다중과 같이 두 개 이상의 다중화 방식을 혼합하여 사용한 연구가 있었다.<sup>[9,10]</sup> 그런데 각다중, 회전다중, 그리고 공간다중을 혼합하여 사용하기 위해서는 기준빔과 기록 매질을 제어하기 위한 적어도 세 개의 독립된 기계적 움직임이 있어야 한다. 이와 같은 움직임을 구현하는 시스템은, 기록매질이 놓여지는 공간이동 장치가 다시 회전다중을 위한 회전장치 위에 설치되어야 하기 때문에, 다소 복잡하게 된다.

우리는 한쌍의 췌기 프리즘을 사용하여 세 가지의 다중화 방법을 혼합할 수 있으며, 구조가 간단하고 비유면에서 효율적인 방법을 연구한 바 있다.<sup>[11-13]</sup> 회전다중과 각다중은 한 쌍의 췌기 프리즘 사이의 상대적인 회전속도와 회전각에 따라 기준빔을 임의의 방향으로 제어함으로써 얻을 수 있으며, 이 시스템에 추가로 기록매질을 2차원면에서 이동시킴으로써 공간다중을 구현하였다. 본 논문에서는 우리 시스템에서 저장밀도가 신호빔과 기준빔 경로상에 있는 렌즈들의  $F/\#$ ( $f$  number)의 함수가 되며, 기준빔 경로에 있는 렌즈의  $F/\#$ 가 주어졌을 때에는, 신호빔 경로상에 있는 렌즈의  $F/\#$ 가 기준빔 경로에 있는 렌즈의  $F/\#$ 의 약 두 배가 될 때 최대의 면적저장밀도가 얻어짐을 보였다. 그리고 우리의 시스템의 유용함을 보이기 위해, 기초적인 실험을 수행하였다. 이런 세가지의 다중화를 혼합하는 방식은 디스크형 홀로그래픽 메모리<sup>[14,16]</sup>에서 높은 저장밀도를 얻을 수 있는 유용한 방법이라 믿는다.

<sup>†</sup>E-mail: jsjang@jjlab.pknu.ac.kr

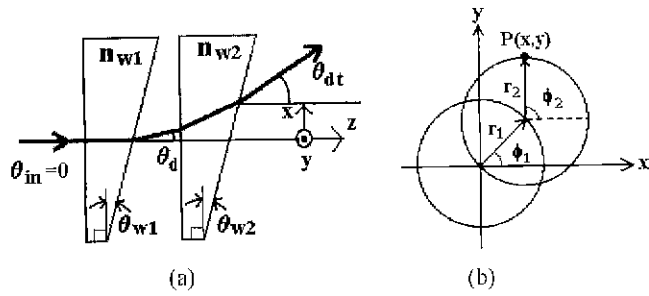


그림 1. 한쌍의 췌기 프리즘에 의한 빔 굴절. (a) 빔 경로의 옆면. (b) 두 췌기 프리즘의 z축에서의 회전각  $\phi_1$ 과  $\phi_2$ 에 대한 (x,y)면에 놓인 스크린에서의 부위치

## II. 시스템 구조

### 2.1. 한 쌍의 췌기 프리즘을 이용한 기준빔의 제어

그림 1(a)와 같이 빔이 췌기 프리즘을 통과할 때, 빔의 진행 방향은 변하게 된다. 췌기 프리즘의 한면이 z축에 수직으로 위치하고, z축과의 각도가  $\theta_m$ 인 빔이 이 췌기 프리즘에 입사한다고 가정하자. 여기서 췌기 프리즘의 굴절률을  $n_w$ , 프리즘의 다른 뒷면의 기울어진 각은  $\theta_w$ , 그리고 췌기 프리즘의 출력빔이 z축과 이루는 각을  $\theta_d$ 라고 하면, Snell의 법칙으로부터 <sup>[11,12]</sup>

$$\theta_d \approx (n_w - 1)\theta_w + \theta_m \quad (1)$$

이다. 단, 식 (1)은  $\theta_m$ 과  $\theta_w$ 가  $\pi/2$ 보다 매우 작을 때 잘 만족된다. 식 (1)로부터 출력빔의 각  $\theta_d$ 는 입사빔의 각  $\theta_m$ 과 췌기 프리즘에 의한 굴절각  $(n_w - 1)\theta_w$ 의 단순 합으로 얻어짐을 알 수 있다.

그림 1(a)의 한 쌍의 췌기 프리즘 사이의 거리를  $l_p$ 라 하자. 두 번째 췌기 프리즘의 빔 입사각이 첫 번째 췌기 프리즘의 굴절각과 일치하기 때문에 최종 굴절각  $\theta$ 는 식 (1)로부터, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\theta \approx (n_{w2} - 1)\theta_{w2} + (n_{w1} - 1)\theta_{w1} = \theta_{d1} + \theta_{d2} \quad (2)$$

여기서  $\theta_{d1}$ 은 첫 번째 췌기 프리즘에 의한 굴절각이고,  $\theta_{d2}$ 는 두 번째 췌기 프리즘에 의한 굴절각이다. 이때 두 개의 프리즘을 z축을 회전축으로 하여 각각  $\phi_1$ 과  $\phi_2$  만큼씩 회전시킨다면 두 프리즘으로부터 충분히 멀리 떨어진 거리  $l$ 에 (즉,  $l \gg l_p$ 인 곳에) 위치한 스크린상의 출력빔 P의 좌표값  $x, y$ 는

$$x + jy = r_1 \exp(j\phi_1) + r_2 \exp(j\phi_2) \quad (3)$$

로 표현할 수 있다. 이 상황을 그림 1(b)에 나타내었다. 여기서,  $j = \sqrt{-1}$ ,  $r_1 = l \tan \theta_{d1} \approx l \theta_{d1}$ ,  $r_2 = l \tan \theta_{d2} \approx l \theta_{d2}$ 이다. 두 개의 췌기 프리즘이 동일하면  $\theta_{d1} = \theta_{d2} = \theta_d$ ,  $r_1 = r_2 = r$ 이고,  $\phi_1$ 과  $\phi_2$ 를 적절히 제어함으로써 (x,y)평면에서 반경이  $2r$ 인 원 내부의 임의의 지점으로 빔을 보낼 수 있다. 일반적으로 두 췌기 프리즘을 각각 각속도  $\omega_1$ 과  $\omega_2$ 로 회전시키면 빔  $P(x,y) = P[x(t), y(t)]$ 의 좌표 궤적은

$$x(t) + jy(t) = r \exp [j (\omega_1 t + \phi_1)] + r \exp [j (\omega_2 t + \phi_2)] \quad (4)$$

로 표현된다. 예를 들어  $\phi_1 \neq \phi_2$ 이고  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ 이면 반경 2

$r \cos[(\phi_1 - \phi_2)/2]$ , 각속도  $\omega$ 로 빔을 회전시킬 수 있다. 또  $\phi_1 = \phi_2 = 0$ 이고,  $\omega_1 = -\omega_2$ 이면 식 (4)에서  $x(t) = 2r \cos(\omega t)$ ,  $y(t) = 0$ 이므로  $-2r \leq x \leq 2r$  범위에서 직선운동을 얻을 수 있다. 일반적으로,  $\phi_1, \phi_2, \omega_1, \omega_2$  값들을 적절히 조절함으로써 타원, 나선형, 동심원과 같은 임의의 움직임을 얻을 수 있다.

물론, 기준빔을 제어하기 위해 한쌍의 췌기 프리즘 대신에 갈바노미러를 이용한 (x, y) 주사 시스템을 이용할 수도 있다. 췌기 프리즘 쌍을 이용할 때의 특징은 다음과 같다. 첫째, 빔의 회전제어가 매우 간단하다는 점이다. 둘째, 프리즘은 단순히 빔의 방향만 변화시키므로 빔의 편광을 유지할 수 있다. 갈바노미러를 이용한 시스템에서는 두 개의 거울을 적절히 기울여서 빔의 방향을 바꾸므로 편광의 방향이 변하게 된다. 셋째, 췌기 프리즘의 직경을 빔 크기 만큼 줄일 수 있기 때문에 빔제어 시스템을 소형화 할 수 있다.

### 2.2. 홀로그래프의 기록과 복원

프리즘 뒤의 거리  $l$ 인 지점에 초점거리  $f$ 인 렌즈를 스크린 대신 놓으면 z축상의 고정된 점으로 빔의 진행 방향을 집중시킬 수 있다. 렌즈로부터 이 점까지의 거리  $z_f$ 는 가우스 렌즈법칙으로부터  $z_f = l f / (l - f)$ 가 된다. 짧은  $z_f$ 를 얻기 위해서는 렌즈를 조합하여 사용할 수 있다. 빔을 제어하기 위한 한 쌍의 췌기 프리즘과 z축상의  $z = z_f$ 인 점으로 빔을 집중시키기 위한 렌즈들로 이루어진 우리 시스템을 ARMH(Angle and Rotational Multiplexing Head)라 부를 것이다. ARMH의 출력빔을 홀로그래프의 저장 및 복원을 위한 기준빔으로 사용한다.

그림 2(a)와 2(b)에서와 같이 두 가지 홀로그래프 기록 구조가 가능하다. 두 렌즈  $L_1$ 과  $L_2$ 는 기준빔을  $z = z_f$ 인 점에 모이도록 하기 위해 사용하였다. 그림 2(a)의 예각 기록구조에서는 기준빔 R과 신호빔 S 사이의 각이 예각이다. 공간광변조기(SLM)에 의해 표현된 2진 데이터를 포함하는 신호빔은 Fourier 변환 렌즈  $L_2$ 를 통해 기록매질에 입사된다. 사실  $L_1$ 과  $L_2$ 는 그림 2(a)에서와 같이 동일한 1개의 렌즈가 될 수 있다. 디스크형태의 홀로그래픽 기록매질은  $z = z_f$ 인  $L_2$ 의 초점면에 위치하며, 따라서 Fourier면 홀로그래프들이 기록된다.

회전다중을 위해서는, 두 췌기 프리즘의 상대적인 위상  $\phi_1 - \phi_2 = \Delta\phi$ 를 일정하게 유지하면서, 이들 두 췌기프리즘을 동시에 회전시켜야 한다. 그러면, 기준빔은 원추모양으로 회전된다. 반면에 각다중화를 위해서는  $\Delta\phi$ 를 변화시켜서 원추각이 바뀌도록 하여야 한다. 그 다음 다시 회전다중화를 사용하여 홀로그래프 기록을 반복한다. 마지막으로, 기록매질을 (x,y)면에서 이동시킴으로써 공간다중화를 얻는다. 홀로그래프 기록이 완성된 후, 저장된 데이터는 ARMH 시스템과 CCD에 의해 재생된다. 이 시스템의 렌즈와 SLM의 위치를 조정함으로써 영상면 홀로그래프도 마찬가지로 방법으로 기록할 수 있다.

그림 2(b)의 90° 기록 구조에서는 기준빔과 신호빔사이의 각은 약 90°이다. 여기서 예각구조와 유사하게 두 개의 췌기 프리즘을 조정하여 각다중과 회전다중을 얻을 수 있고, 기록매질을 이동시킴으로써 공간다중을 얻을 수 있다.<sup>[11,12]</sup> 이제부터의 설명은 예각 기록구조에 대해서만 생각할 것이다.

그림 2(c)에 나타낸 것처럼 Cassegrain 망원경<sup>[17]</sup> 시스템과

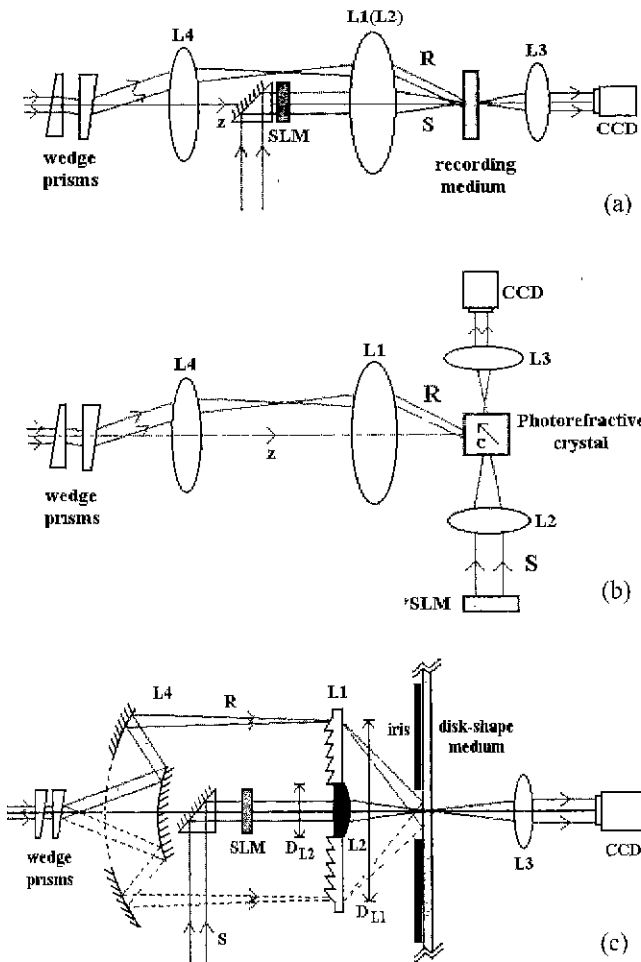


그림 2. 홀로그램 기록 시스템의 개략도. (a) 예각 기록구조. (b) 직각 기록구조. (c) Cassegrain 망원경 구조와 Fresnel 렌즈를 이용한 소형 시스템 디자인.

마찬가지로 두 개의 포물면 거울을  $L_4$  대신에 사용하면 ARMH를 소형화할 수 있다. 다음 장에서 설명하겠지만 저장 밀도를 증가시키기 위해서는  $L_1$ 의  $F/\#$ 가 작아야 한다 ( $L_1$ 의  $F/\#$ 를  $F/\#_1$ 로 표기할 것이다). 그러나  $F/\#$ 가 작으면서 왜곡도 작은 렌즈를 만들기는 어렵다. 사실  $L_1$ 의 역할은 단순히 기준빔을  $z=z_0$ 인 점으로 쥘이도록 하는 것이므로 렌즈  $L_1$ 에서의 왜곡은 렌즈  $L_2$ 에서의 왜곡보다는 중요하지는 않다. 그러므로 우리는 그림 2(c)에서와 같이 홀 밀도(groove density)가 낮은 Fresnel 렌즈를  $L_1$ 으로 사용하였다. Fresnel 렌즈는  $F/\#$ 가 작더라도 얇게 그리고 저렴하게 만들 수 있다.  $L_2$ 의  $F/\#$ , 즉  $F/\#_2$ 는  $F/\#_1$  보다는 커야 한다. CCD 검출기로 복원된 영상이 좋은 질을 가지기 위해서는  $L_2$ 와  $L_3$ 의 영상 왜곡은 매우 작아야 한다. Fresnel 렌즈를  $L_4$ 의 초점면 근처에 위치시켜, 기준빔이 프리즘 역할을 하는 원형 홈(groove)들 중의 하나로만 통과하도록 하였다.

### III. 면적 저장밀도

ARMH로 디지털 홀로그램을 저장할 때 얻을 수 있는 면적

저장밀도를 산출하였다. 기본적인 산출 방식은 참고문헌 [18]을 따랐다. 디스크형 기록매질의 성능이 이상적이라고 가정하고, 전체크기가  $D \times D$ 이고, 한 픽셀 크기가  $\delta$ 인 정사각형의 SLM을 사용한다고 가정하자. 그러면 한 페이지당 픽셀 수는  $(D/\delta)^2 = N^2$ 이며, 이들은 각각의 홀로그램을 기록할 때 저장된다. SLM 영상의 전체 크기를 기록하기 위해서, 렌즈  $L_2$ 의 직경  $D_{L2}$ 는 회절효과를 고려하면, 적어도  $\sqrt{2} D + 2\lambda f_2/\delta$ 이어야 한다. 여기서  $f_2$ 는  $L_2$ 의 초점거리이다. Fourier면 홀로그램을 기록할 때, 기록면적  $A$ 는 대략  $A = (2\lambda f_2/\delta)^2$ 으로 주어진다. 여기서  $\lambda$ 는 기록파장이다. 기록매질의 두께가  $\sqrt{A}$  보다 매우 작다는 전제하에, 기록매질의 체적 내에 빔이 퍼지는 효과는 고려하지 않는다. 그러면 홀로그래픽 디스크 시스템의 기록 저장밀도  $S_{2D}$  (bits/ $\mu\text{m}^2$ )는 다음과 같이 표현된다.

$$S_{2D} = \frac{N^2}{A} \times M_a \times M_r = \frac{M_a M_r}{8\lambda^2} \left( \frac{1}{F/\#_2} \frac{2\lambda}{\delta} \right)^2 \quad (5)$$

여기서  $F/\#_2 = f_2/D_{L2}$ 이고,  $M_a$ 와  $M_r$ 은 각각 각다중과 회전다중으로 기록하는 홀로그램의 수이다. 만약 직경이  $D_{L2} - 2\lambda f_2/\delta$ 와 같은 원형의 SLM을 사용한다면, 페이지당 픽셀의 수가  $\pi/2$ 배만큼 증가하기 때문에 저장밀도도 그만큼 증가하게 된다.

$M_a$ 와  $M_r$ 은 시스템의 구조에 의존하는 값이기 때문에 임의로 증가시킬 수 없다. 신호빔이 기록매질에 수직으로 입사할 때, 각다중의 Bragg 선택도  $\Delta\theta_a$ 는 대략

$$\Delta\theta_a = \frac{8\lambda}{\pi n d \sin \theta_R} \quad (6)$$

이 된다.<sup>[14]</sup> 여기서  $n$ 은 매질의 굴절률,  $d$ 는 기록매질의 두께이고,  $\theta_R$ 은 기준빔과 수직으로 입사하는 신호빔 사이의 각이다. 기준빔이  $L_2$ 는 통과하지 않고  $L_1$ 만을 통과하기 때문에,  $\theta_R$ 의 최대값  $\theta_{R,max}$ 은  $\tan^{-1} [1/2(F/\#_1)]$ 이고,  $\theta_R$ 의 최소값  $\theta_{R,min}$ 은  $\tan^{-1} [1/2(F/\#_2)]$ 이다. 각다중을 위해 사용할 수 있는 기준빔의 각범위는 기준빔이 바뀔 수 있는 전체 범위의 약 반, 즉  $\theta_a \equiv (\theta_{R,max} - \theta_{R,min})/2$ 이라 가정하자. 즉,  $\theta_{R,max} - \theta_a \leq \theta_R \leq \theta_{R,max}$ 이다. 그러면  $M_a \approx \theta_a / \Delta\theta_a'$ 가 된다. 여기서  $\Delta\theta_a'$ 은  $\theta_R = \theta_{R,max} - \theta_a (= \theta_{R,max}/2 + \theta_{R,min}/2)$ 일 때, 식 (6)에서 주어진 최악의 Bragg 선택도이다. 그러므로 각다중 개수는

$$M_a = \frac{\pi n d}{16\lambda} \left( \tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_1} - \tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_2} \right) \times \left( \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_1} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_2} \right) \quad (7)$$

이다.

회전다중화의 경우에는 기록매질의 두께  $d$ 가  $2\lambda(D/f_2)^2$  보다 클 때, Bragg 정합조건으로 회전선택도가 결정된다.<sup>[14]</sup> 그러나 이 회전선택도를 사용할 때에는, 저장된 홀로그램들 중의 하나를 읽어내기 위한 기준빔과 각다중을 위한 다른 회전 궤적들에서의 기준빔들 사이에 Bragg 정합조건이 보장되지 않을 수 있다. 이에 대한 설명을 그림 3에 나타내었다. 그러므로, 하나의 기준빔에 대해 동시에 하나 이상의 홀로그램들이 읽혀질 수 있다. 이 cross-talk를 피하기 위해, 잘못 읽혀지는 영상

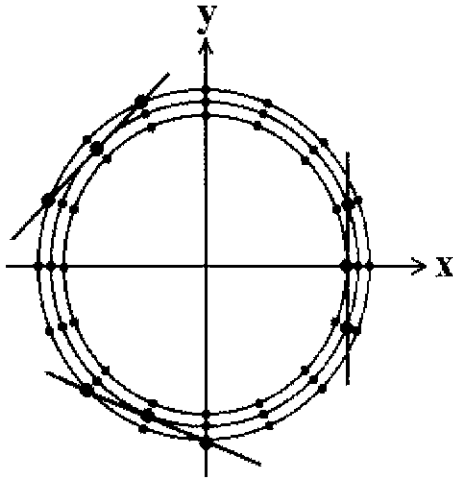


그림 3. Fresnel 렌즈에서의 기준빔 위치의 예. 직선들로 연결된 기준빔들은 그곳에서 기록된 홀로그램들 사이에 Bragg 매칭 조건이 만족된다. 각 원은 회전다중을 위한 기준빔의 궤적이다. 원의 다른 반경은 각다중을 의미한다.

이 CCD 개구에서 충분히 이동되어질 수 있는 회전선택도  $\Delta\theta_r$ 을 사용한다. 이 경우에  $\Delta\theta_r$ 은 매질의 두께  $d$ 에는 독립적이고, 대략

$$\Delta\theta_r = \frac{D}{f_2 \sin \theta_r} \quad (8)$$

가 된다.<sup>[4]</sup> 여기서 회전다중화를 위한 회전각의 범위는  $2\pi$  전체를 사용할 수 있다. 그러면,  $M_r \approx 2\pi/\Delta\theta_r$ 이 된다. 여기서  $\Delta\theta_r$ 은  $\theta_r = \theta_{r, \max} - \theta_a$ 일 때 식 (8)에서 최악의 경우에 해당하는 각이다. 그러므로

$$M_r = 2\sqrt{2}\pi \left( \frac{1}{F\#_2} - \frac{2\lambda}{\delta} \right)^{-1} \sin \left( \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{1}{2F\#_1} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{1}{2F\#_2} \right) \quad (9)$$

이다. 실제적인 시스템에서의  $F\#_1$ 과  $F\#_2$  값에 대해서  $M_r$ 은 4보다는 크다. 예를 들면,  $F\#_1 = 0.3$ 이고,  $F\#_2 = 1$ 이라면,  $M_r = 6$ 이 된다.

식 (5), (7)과 (9)로부터 저장밀도는 다음과 같이 계산된다.

$$S_{2D} = \frac{\sqrt{2}\pi^2 nd}{64\lambda^3} \left( \frac{1}{F\#_2} - \frac{2\lambda}{\delta} \right) \left( \tan^{-1} \frac{1}{F\#_1} - \tan^{-1} \frac{1}{F\#_2} \right) \times \sin^2 \left( \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{1}{2F\#_1} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{1}{2F\#_2} \right) \quad (10)$$

만약 일반적인 경우에서처럼  $\delta \gg \lambda$ 인 경우에는  $S_{2D}$ 는  $\delta$ 에 크게 의존하지 않으므로,  $2\lambda/\delta$ 항은 무시할 수 있다.  $S_{2D}$ 를 증가시키기 위해서는,  $F\#_1$ 은 가능한 작아야 한다.  $F\#_1$ 이 주어지면, 그림 4(a)에서 볼 수 있는  $S_{2D}$ 를 최대화 하는  $F\#_2$ 의 최적 값이 존재한다. 식 (10), 그림 4의 결과, 그리고 일반적으로  $F\#$ 가 작아지면 영상의 왜곡이 커진다는 사실을 고려하면,  $F\#_2$ 의 실질적인 선택은

$$F\#_2 \approx 2F\#_1 \quad (11)$$

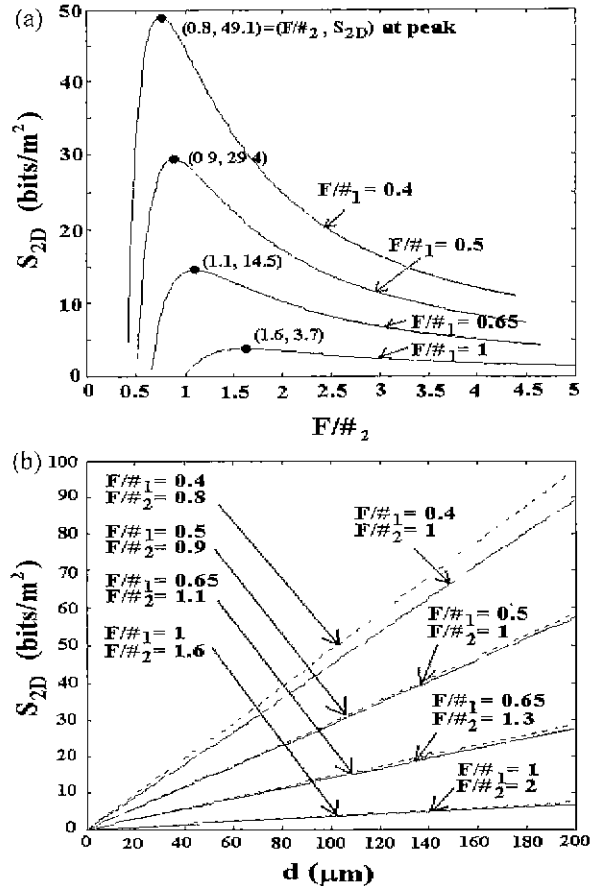


그림 4. 예상되는 기록용량. 여기서 사용한 변수는  $n=0.5$ 과  $\lambda=0.514 \mu\text{m}$ 이다. (a)  $F\#_1$ 과  $F\#_2$ 가 변할 경우. 이 예에서는 기록매질의 두께  $d$ 는  $100 \mu\text{m}$ 로 가정하였다. (b)  $d$ 가 변할 경우.

이 될 것이다. 몇몇  $F\#_1$ 과  $F\#_2$ 의 값들에 대해서, 기록매질의 두께  $d$ 에 따른  $S_{2D}$ 의 값들을 그림 4(b)에 나타내었다.

영상면 홀로그램을 기록할 경우에는  $S_{2D}$ 는 식 (10)과는 다르게 된다. 왜냐하면, 페이지당 저장밀도가  $N^2/D^2 = 1/\delta^2$ 이 되고, 회전선택도  $\Delta\theta_r$ 이  $(\delta/2\lambda) \sin \theta_r$ 이 되기 때문이다. 그외 다른 변수들은 Fourier 면 홀로그램과 동일하거나 유사하다. 그러면 이 두 경우의  $S_{2D}$ 의 비는

$$\frac{S_{2D, \text{Fourier}}}{S_{2D, \text{image}}} \approx \frac{\delta}{2\sqrt{2}\lambda F\#_2} \quad (12)$$

가 된다.  $\delta$ 가  $\lambda$ 보다 더 크다면, Fourier 면 홀로그램이 저장 밀도에 있어서는 더욱 유리하다.

#### IV. 기초 실험

그림 2(c)에 나타난 시스템 구조를 시험하기 위해, 그림 5의 구조를 구성하고 기초적인 실험을 수행하였다. 광원으로는 파장이  $514.5 \text{ nm}$ 인  $\text{Ar}^+$  레이저를 사용하였다. 사용된 두 쉐기 프리즘의 굴절각  $\theta_i$ 는  $4^\circ$  ( $\theta_o = 7^\circ 41'$ )였고, 이들은 두 개의 독립된 회전마운트에 설치되었다. SLM 대신에 2진영상들이

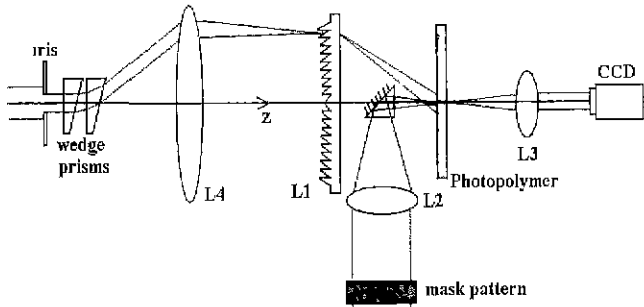


그림 5. 실험에서 사용한 광학적 구성도.

표현되어 있는 glass mask를 사용하였다. 2진영상에는 픽셀 크기가  $40 \times 40 \mu\text{m}$ 와  $100 \times 100 \mu\text{m}$ 인 데이터들이 섞여 있다. 우리가 사용한 Fresnel 렌즈는  $D_{L1} = 5 \text{ cm}$ ,  $F\#_1 = 0.65$ 이고, 홈 밀도(groove density)가  $5/\text{mm}$ 이다.  $L_2$ 와  $L_3$ 는  $F\# = 1.4$ , 초점거리  $5 \text{ cm}$ 인 Nikon 카메라 렌즈이다. 그림 5에서 나타난 것처럼, 기록매질에서 기준빔의 크기를 조절하기 위해 iris를 사용하였다. 사용한 기록매질은 두께가  $38 \mu\text{m}$ 인 DuPont의 광폴리머 필름이다. 공간다중화를 위해 이 필름을 x-y translator 위에 두었고, Fourier면 홀로그램을 기록하였다.

하나의 영상만 저장하였을 때 복원된 영상을 그림 6(a)에 나타내었다. 여기서 CCD 카메라의 검출영역이 기록한 영상의 크기보다 작기 때문에, 영상을 각 부분별로 읽어서 전체로 통합하여 나타내었다. 영상의 크기를  $2 \times 2 \text{ cm}$ 로 줄여서 (등가적으로  $F\#_2$ 가 1.8로 증가한다.) 실험적으로 최대 18개의 홀로

그램을 기록할 수 있었다. 균일한 회절효율을 얻기 위해 빔노출시간은 참고논문 19와 같이 조절되었다. 우리가 얻은 회절효율의 평균은 약  $10^{-5}$  정도였다. 동일한 패턴이 다른 기준빔으로 반복적으로 기록되었기 때문에 신호빔 하나만을 입사시킴으로써 기준빔을 동시에 읽어내는 것이 가능하다.<sup>[20-22]</sup> 18개의 복원된 기준빔을 그림 6(b)에 나타내었다. 식 (5)로부터 측정된 저장밀도는  $S_{2D} \approx 2 \text{ bits}/\mu\text{m}^2$ 이었다. 오류율 및 SNR과 같은 자세한 분석은 아직 수행되지 않았지만 앞으로 SLM을 이용한 실험에서는 이에 대한 구체적 결과를 발표할 예정이다.

$L_2$ 의 전체 영역을 모두 다 사용하였을 때에는 복원된 영상이 심하게 손상되지 않게 총 6개( $M_r = 3$ 과  $M_o = 2$ )의 홀로그램을 기록할 수 있었다. 이 경우에  $\pi/2$ 의 항이 곱해진 식 (5)로부터 마찬가지로  $S_{2D} \approx 2 \text{ bits}/\mu\text{m}^2$ 로 추산되었다. 이 경우에 복원된 영상의 질은 이전의 18개의 홀로그램을 기록한 경우보다 의견상 더욱 좋았다. 6개의 복원된 영상들의 가운데 부분을 그림 6(c)에 나타내었다. 현재 실험에 사용한 기록매질의 성능, 예를 들어 두께, 산란잡음, 수축 등이 저장밀도를 크게 제한한다고 생각한다.

## V. 결 론

일반적으로 홀로그래픽 디스크 시스템에서 높은 저장밀도를 얻기 위해서는 SLM의 크기가 커야하고, SLM에 표현되는 영상의 Fourier 변환을 위한 렌즈  $L_2$ 의 초점거리가 작아야 유리하다. 특히 회전다중, 각다중 및 공간다중을 결합하여 구현되

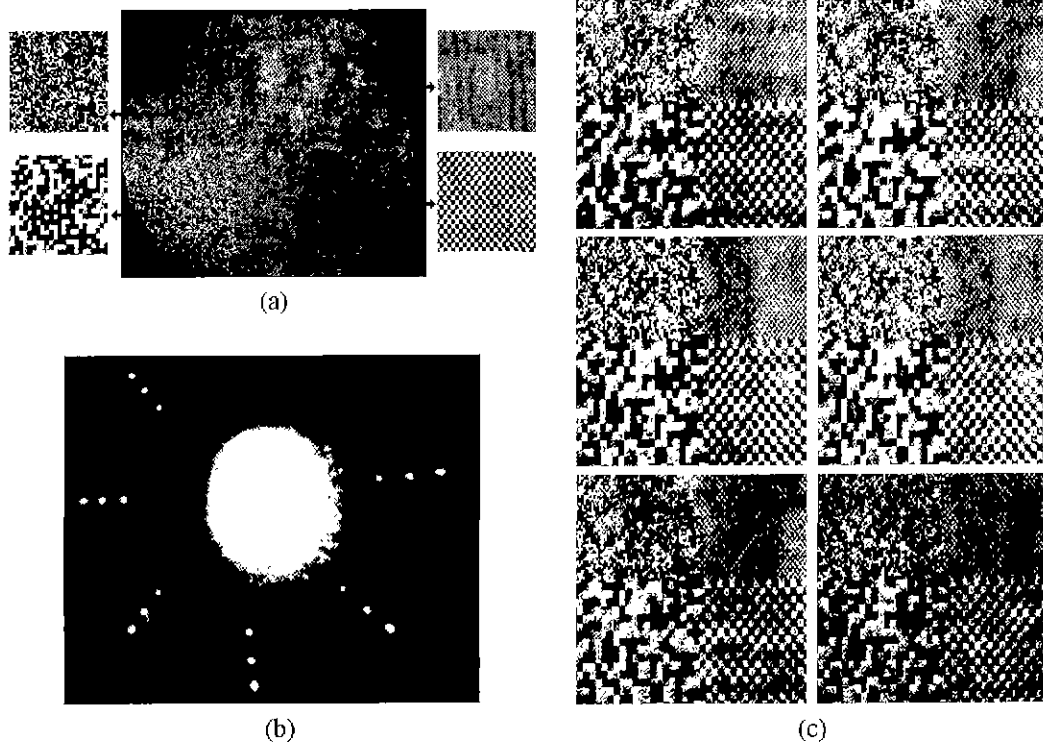


그림 6. 저장된 홀로그램으로부터 복원된 영상. (a) 하나의 이진 패턴을 광폴리머 필름의 한 위치에 저장했을 경우. (b) 각다중과 회전다중을 이용하여 매질의 한곳에 18개의 동일한 패턴을 반복하여 기록한 경우. (c) 6개의 복원된 영상의 가운데 부분.

는 메모리 시스템에서는, 기준빔이 움직일 수 있는 범위가 주어졌을 때 최대의 저장밀도를 얻을 수 있는  $L_2$ 의 최적  $F\#$ 가 존재함을 알 수 있었다. 그리고 픽셀크기  $\delta$ 는 저장밀도에 관련하여서는 중요한 파라미터가 아니지만, 저장된 데이터의 병렬적 인출에 있어서는 중요하게 된다. 홀로그램의 회절효율은 기록매질의 한지점에서의 다중화 횟수의 제곱에 반비례하기 때문에, 저장밀도가 동일하다면 기록매질의 한지점에 다중화시켜 기록되는 홀로그램의 개수는 가급적 줄이는 것이 유리하다.<sup>[23]</sup>

제안한 시스템의 유용함을 조사하기 위해, 기초적인 실험을 수행하는데, 38  $\mu\text{m}$  두께의 광폴리머 필름을 사용하여 약 2 bits/ $\mu\text{m}^2$ 의 저장밀도를 얻을 수 있었다. 광폴리머를 glass disk에 입혀서 사용하거나 폴리머 두께를 증가시킴으로써 저장밀도는 향상될 수 있을 것이라 여겨진다 제안한 시스템은 다른 광정보처리에 사용될 수 있다.<sup>[20-22]</sup>

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 차세대 대용량 정보저장장치개발 사업의 일환인 홀로그래픽 디지털 데이터 저장분야의 연구지원(삼성종합기술원의 위탁과제지원)으로 수행되었으며, 이 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

[1] D. Psaltis and F. Mok, *Sci. Am.* **275**, 52 (1995)  
 [2] J. F. Heanue, M. C. Bashaw, and L. Hesselink, *Science* **265**, 749 (1994).

[3] P. J. van Heerden, *Appl. Opt.* **2**, 393 (1963).  
 [4] K. Curtis, A. Pu, and D. Psaltis, *Opt. Lett.* **19**, 993 (1994).  
 [5] D. Psaltis, M. Levene, A. Pu, G. Barbastathis, and K. Curtis, *Opt. Lett.* **20**, 782 (1995).  
 [6] J. H. Hong, L. McMichael, T. Y. Chang, W. Christian, and E. G. Paek, *Opt. Eng.* **34**, 2193 (1995).  
 [7] C. Denz, G. Pauliat, G. Roosen, and T. Tschudi, *Opt. Commun.* **85**, 171 (1991).  
 [8] G. Rakuljic, V. Leyva, and A. Yariv, *Opt. Lett.* **17**, 1473 (1992).  
 [9] D. Psaltis and A. Pu, *Int. J. of Optoelectronics Devices and Technologies* **10**, 333 (1995).  
 [10] E. Chuang and D. Psaltis, *Appl. Opt.* **36**, 8445 (1997).  
 [11] J.-S. Jang and D.-H. Shin, *Proc. of SPIE* **3468**, 30 (1998).  
 [12] 신동학, 장주석, *한국광학회지* **9**, 199 (1998).  
 [13] J.-S. Jang, D.-H. Shin, and Y.-S. Park, scheduled for publication in Nov. 2000 issue of *Opt. Eng.*  
 [14] H. S. Li and D. Psaltis, *Appl. Opt.* **33**, 3764 (1994).  
 [15] A. Pu and D. Psaltis, *Appl. Opt.* **35**, 2389 (1996).  
 [16] G. Zhou, D. Psaltis, and F. Mok, "Holographic read-only memory," to appear in *Optics and Quantum Electronics*.  
 [17] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics* (Pergamon Press, Oxford, UK, 1980), p. 246.  
 [18] 장주석, 신동학, *한국광학회지* **11**, 58 (2000).  
 [19] A. Pu, K. Curtis, and D. Psaltis, *Opt. Eng.* **35**, 2824 (1996).  
 [20] J.-S. Jang and D.-H. Shin, *Opt. Lett.* **21**, 1612 (1996).  
 [21] D.-H. Shin and J.-S. Jang, *Appl. Opt.* **37**, 329 (1998).  
 [22] D.-H. Shin and J.-S. Jang, *Opt. Eng.* **39**, 2431 (2000).  
 [23] F. Mok, G. Burr, and D. Psaltis, *Opt. Lett.* **21**, 896 (1996).

## Area storage density in holographic disk memories using rotational, angular, and spatial multiplexing methods in combination

Ju-Seog Jang<sup>†</sup> and Dong-Hak Shin

*Division of Electronics, Computers and Telecommunications, Pukyong National University, Pusan 608-737, KOREA*

<sup>†</sup>*E-mail: jsjang@jllab.pknu.ac.kr*

Jideog Kim and Hong-Seok Lee

*System & Control Sector, Samsung Advanced Institute of Technology, Kyungki-do 449-711, KOREA*

(Received July 10, 2000 Revised manuscript received September 18, 2000)

For multi-hologram recording especially in a disk-shaped storage medium, we had studied a simple cost-effective method to implement the rotational, angular, and spatial multiplexing techniques together in order to enhance the area storage density. Holographic storage with both rotational and angular multiplexing was realized by controlling the reference beam directly with a pair of wedge prisms, while the storage with spatial multiplexing by shifting the storage medium. In this paper we show that the area storage density of our system is strongly dependent on  $f$  numbers of the lenses in the signal and reference arms, and also show that the area storage density becomes maximal when the  $f$  number of the lens in the signal arm is approximately twice as long for a given  $f$  number of the lens in the reference arm.

*OCIS codes* : 210.2860, 090.4220, 090.7330.