

이상적인 디스크형 3차원 홀로그래픽 메모리에서의 면적 저장밀도

장주석 · 신동학

부경대학교, 정보통신공학과

(1999년 12월 14일 받음, 2000년 2월 10일 수정본 받음)

홀로그램 기록 매질의 성능이 이상적이라 가정할 때, 각다중이나 회전다중 또는 그 두 가지를 모두 사용하는 경우에 있어서, 디스크형 홀로그래픽 메모리에서의 면적 저장 밀도를 산출하여 비교하였다. 이때 면적 저장 밀도는 신호빔에 사용되는 Fourier 변환 렌즈의 f 수(초점거리/직경, $F/\#_2$)와 각다중을 위한 기준빔의 입사각 범위(또는 이 각 범위에 대응하는 등가적인 f 수, $F/\#_1$)에 크게 의존된다. Fourier 면 홀로그램을 기록할 경우, 면적 저장밀도는 공간 광 변조기의 픽셀 크기에는 큰 영향을 받지 않지만, 영상면 홀로그램을 기록할 경우, 이 픽셀 크기에 직접적으로 영향을 받는다. 일반적으로 높은 면적 저장 밀도를 얻기 위해서는 영상면보다 Fourier 면(또는, 적어도 Fourier면 근처)에서 홀로그램을 기록하는 것이 유리하다. 또, 저장 매질의 두께가 대략 $500 \mu\text{m}$ 이하일 때에는 각다중보다 회전다중 방식이 더 높은 면적 저장 밀도를 주었다. 그러나, 저장매질의 두께와 관계없이 면적 저장밀도를 더욱 높이기 위해서는, 각다중과 회전다중 방식을 복합적으로 사용할 필요가 있음을 알 수 있었다.

I. 서 론

최근 정보를 3차원적으로 저장하고 병렬적으로 읽어내는 홀로그래픽 메모리에 대한 관심이 높다.^[1,2] 홀로그래픽 메모리에 대한 연구는 보통 두께 수 mm이상의 광굴절 결정을 저장 매질로 사용하는 체적형과,^[2,4] 두께 수십 내지 수백 μm 의 광 폴리머를 매질로 사용하는 디스크형태로 나눌 수 있다.^[5-8] 저장 매질의 가격과 대량 생산성에 비추어보면, 디스크형이 좀 더 상용화에 유리하다고 말할 수 있을 것이다.

홀로그래픽 디스크 메모리에서 많이 사용되는 저 비용의 다중화 방식으로 각다중과 회전다중 방식을 꼽을 수 있다.^[7-9] 일반적으로 저장매질이 매우 얇을 때에는 각다중 보다는 회전다중 방식^[10]을 사용하는 것이 면적 저장밀도를 높이는데 유리하고, 이들 두 다중화 방식을 함께 사용하는 것이 한가지 다중화 방식을 사용하는 것보다 더 유리하다고 알려져 있다. 그리고 이러한 다중화 방식을 사용함으로써 얻을 수 있는 면적 저장밀도가 예측된 바 있다.^[7] 그러나 이들 다중화 방법을 사용할 때, 영상면 홀로그램과 Fourier 면 홀로그램 모두에 대해 일관성을 가지고, 어느 정도의 면적 저장밀도를 얻을 수 있으며, 어느 정도의 다중화 횟수가 요구되는지, 자세하게 비교된 적이 없었다. 본 논문에서는 매질의 성능이 이상적이라 가정하고, 여러 가지 시스템 파라미터로 2진 홀로그램을 저장하는 경우에 있어서, 얻을 수 있는 면적 저장밀도와 다중화 횟수를 산출하고 비교하였다. 이 논문의 결과들은 새로운 디스크형 3차원 홀로그래픽 메모리를 연구하거나 매질을 개발함에 있어서 비교 지표로 사용될 수 있다.

II. 다중화 방식과 표면 저장 밀도

저장 매질의 성능은, $M/\#$ 가 충분히 크고, 흡수나 산란 등과

같은 손실이 없으며 수축현상 등은 발생하지 않는다는 등, 이상적이라고 가정한다. 크기가 $D \times D$ 인 정방형 공간 광 변조기 (Spatial Light Modulator: SLM)를 사용한다고 하고, 픽셀의 pitch는 δ 라 하자. 그러면 $(D/\delta)^2 \equiv N^2$ 개의 픽셀들, 즉 정보 bit 들이 홀로그램 한 페이지를 기록할 때마다 매질에 저장된다. 그림 1(a), (b), (c)에 나타난 것처럼, 보편적으로 많이 사용되는 각다중, 회전다중, 그리고 이 두 가지를 결합한 방식을 사용하여 다중기록 한다고 가정하였다. 이들 경우 모두, 신호빔이 입사되는 방향은 매질 면에 수직이라고 하자. SLM의 정보를 기록 매질에 집속시켜 주는 렌즈 L_2 의 f 수, 즉 f_2/D_{L2} 를 $F/\#_2$ 로 표기하기로 한다. 여기서 f_2 는 L_2 의 초점거리이고 D_{L2} 는 직경이다.

각다중 또는 회전 다중을 구현하는 시스템에서, 매질면에 입사되는 기준빔의 최대 입사각을 $\theta_{R,max}$ 라 하자. 이때, 편위상 θ 대신에 다음의 관계를 갖는 등가적인 $F/\#_1$ 을 사용할 것이다:

$$F/\#_1 = \frac{1}{2 \tan \theta_{R,max}} \quad (1)$$

예를 들어, $F/\#_1 = 0.3$ 은 $\theta_{R,max} = 59^\circ$, $F/\#_1 = 0.4$ 는 $\theta_{R,max} = 51^\circ$, $F/\#_1 = 0.5$ 는 $\theta_{R,max} = 45^\circ$, $F/\#_1 = 0.6$ 은 $\theta_{R,max} = 40^\circ$ 에 해당된다.

2.1. Fourier면 홀로그램을 저장할 경우

Fourier면 홀로그램을 기록할 때에는, SLM과 L_2 의 거리 및 L_2 와 기록매질까지의 거리가 모두 f_2 가 된다. 이때, SLM이 갖고 있는 픽셀 정보가 손상없이 모두 기록 매질에 올바르게 노출되기 위해서는, 픽셀의 회절을 고려하여, D_{L2} 는 적어도 $\sqrt{2D+2\lambda f_2/\delta}$ 보다 커야 한다. 그리고 이 한 페이지의 정보를 저장하기 위해 매질에서 필요한 면적은 최소 $A = (2\lambda f_2/\delta)^2$ 이어야 한다. 단, λ 는 기록 빔의 파장이다. 그러면, 홀로그래픽 디스크 메모리에서 면적 저장 밀도 S_{2D} 는 다음과 같이

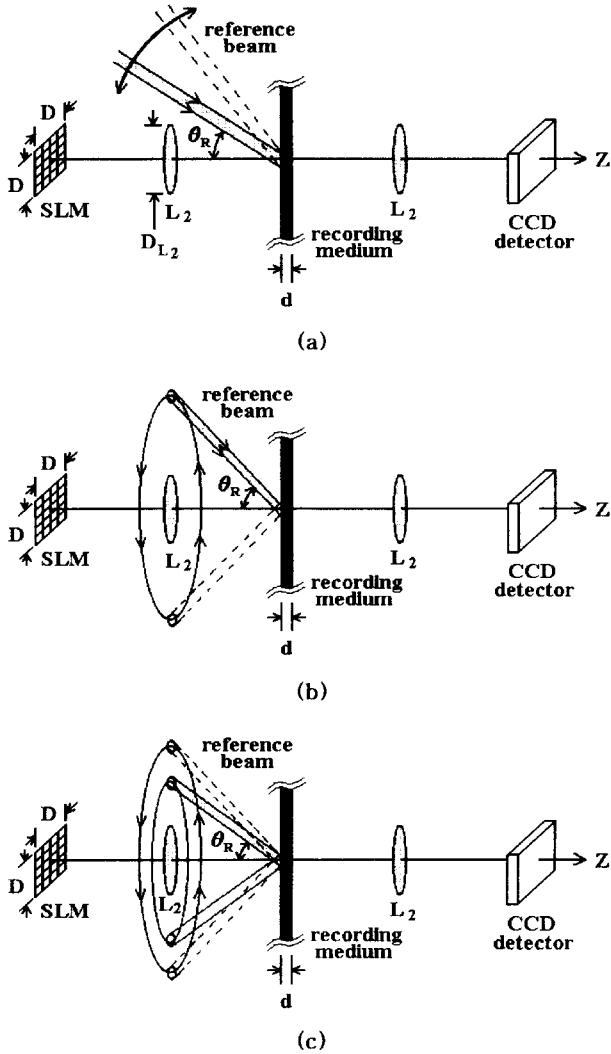


그림 1. 디스크형 홀로그래픽 메모리 시스템 구조. (a) 각다중 방식을 사용하는 경우. (b) 회전다중 방식을 사용하는 경우. (c) 각다중과 회전다중 방식을 결합하여 사용하는 경우.

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

로 쓸 수 있다. 여기서 M 은 한 지점에 다중화하는 횟수를 의미한다. SLM의 모양이 렌즈와 같이 둥글고 직경이 $\sqrt{2} D = D_{L2} - 2\lambda f_2 / \delta$ 이라면, 페이지 당 픽셀수가 한 변이 D 인 정방형 SLM에 비해 $\pi/2$ 배만큼 증가하므로, 식 (2)의 S_{2D} 도 $\pi/2$ 배만큼 증가한다. 주의할 것은 기록 매질이 이상적인 성능을 갖는다 하더라도 두께가 유한하므로 M 을 임의로 늘릴 수 없다는 점이다. 일반적으로 M 은 기록 방법과 시스템의 구조에 의존하게 된다.

2.1.1 각다중 방식을 사용할 경우

각다중에서는 누화잡음을 최소화시키기 위해, 기준빔을 Bragg 분리각 이상으로 바꾸어 주면서 다중기록을 수행한다. 이 Bragg 분리각은

$$\Delta\theta_a = \frac{8\lambda}{\pi n d \sin \theta_R} \quad (3)$$

이다.^[5] 여기서 n 은 기록 매질의 굴절율, d 는 기록매질의 두께, 그리고 θ_R 은 기준빔의 입사각, 즉 기준빔과 매질면에 수직으로 입사하는 신호빔 사이의 각이다. 그림 1(a)에서 보는 것처럼, 기준빔이 L_2 를 통과해서는 되지 않는다. 즉, θ_R 의 최소값 $\theta_{R,\min}$ 은 $\tan^{-1} [1/2(F/\#_2)]$ 가 된다. 바꾸어 줄 수 있는 θ_R 범위의 약 반, 즉, $(\theta_{R,\max} - \theta_{R,\min})/2 \equiv \Theta_a$ 을 각다중을 위해서 사용한다고 하자. 그러면, $\theta_{R,\max} - \Theta_a \leq \theta_R \leq \theta_{R,\max}$ 이다. 따라서, 한 지점에서 수행할 수 있는 각다중 횟수 M_a 는 약 $\Theta_a / \Delta\theta_a'$ 이다. 여기서 $\Delta\theta_a'$ 은 식 (3)의 최대값으로, $\theta_R = \theta_{R,\max} - \Theta_a = \theta_{R,\max}/2 + \theta_{R,\min}/2$ 일 때이다. 따라서

$$M_a = \frac{\pi n d}{16\lambda} \left(\tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_1} - \tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_2} \right) \times \sin \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_1} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_2} \right) \quad (4)$$

이 되고, 식 (2)로부터

$$S_{2D,a} = \frac{\pi n d}{128\lambda^3} \left(\frac{1}{F/\#_2} - \frac{2\lambda}{\delta} \right)^2 - \left(\tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_1} - \tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_2} \right) \times \sin \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_1} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_2} \right) \quad (5)$$

를 얻게 된다.

2.1.2 회전다중 방식을 사용할 경우

기록 매질의 두께가 매우 얇을 때에 한 지점에 여러 페이지의 정보를 저장할 경우, Bragg 불일치 문제가 없어 기록된 정보가 함께 읽혀진다. 이때 주어진 위치의 기준빔에 대응되는 정보는 본래의 SLM 방향에서 회절되어 나오므로, CCD에 올바르게 검출되지만, 다른 정보는 이동된 위치에서 재생된다. 누화를 피하기 위해서는 이동거리가 CCD의 구경보다 더 커서 CCD 검출 면에서 재생되는 영상이 겹치지 않으면 된다. 이를 위해 충분히 기준빔을 회전시켜야 하며, 최소 회전각은

$$\Delta\theta_{r1} = \frac{D}{f_2 \sin \theta_R} \quad (6)$$

으로 주어진다.^[10] 각다중을 사용하지 않고 회전 다중만 사용하므로 θ_R 은 $\theta_{R,\max} = \tan^{-1} [1/2(F/\#_1)]$ 을 사용하는 것이 가장 유리하다. 이때 식 (6)의 $\Delta\theta_{r1}$ 은 그 최소값이 되고, $M_{r1} = 2\pi / \Delta\theta_{r1}$ 은

$$M_{r1} = 2\sqrt{2}\pi \left(\frac{1}{F/\#_2} - \frac{2\lambda}{\delta} \right)^{-1} \sin \left(\tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_1} \right) \quad (7)$$

이 된다. 따라서

$$S_{2D,r1} = \frac{\sqrt{2}\pi}{4\lambda^2} \left(\frac{1}{F/\#_2} - \frac{2\lambda}{\delta} \right) \sin \left(\tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_1} \right) \quad (8)$$

을 얻는다.

기록 매질의 두께 d 가 $2\lambda(D/f_2)^2$ 보다 클 때에는 Bragg 정합 조건이 회전다중의 분리각을 결정짓는다. 이 분리각은

$$\Delta\theta_{r2} = \left(\frac{2\lambda}{d} \right)^{1/2} \frac{1}{\sin \theta_R} \quad (9)$$

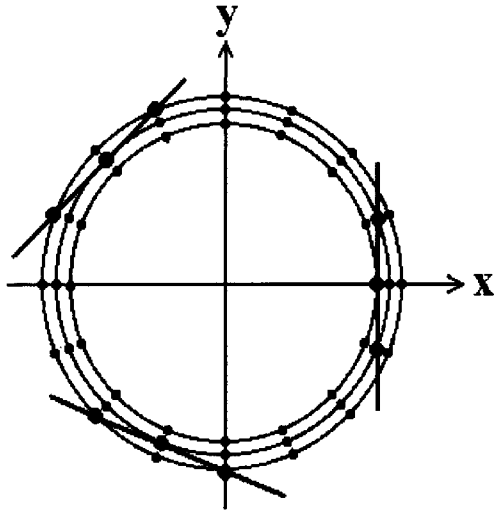


그림 2. 각다중과 회전다중 방식을 함께 사용할 때, 기록매질에서 벗어난 $z =$ 상수인 면에서, 기준빔의 궤적과 위치의 예. 각각의 원은 회전다중을 위한 기준빔의 회전 궤적을 표현한 것이고, 원의 반경이 서로 다른 것은 각다중을 의미한다. 이때, 직선으로 연결되는 기준빔의 위치에서 기록된 홀로그램들과 이들 기준빔 사이에는 Bragg 정합이 발생한다.

으로 주어진다.^[10] 식 (7)과 (8)에서처럼 회전다중 횡수와 면적 저장 밀도를 계산하면

$$M_{r,2} = \sqrt{2} \pi \left(\frac{d}{\lambda} \right)^{1/2} \sin \left(\tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_1} \right) \quad (10)$$

$$S_{2D, r,2} = \frac{\pi d^{1/2}}{4 \sqrt{2} \lambda^{5/2}} \left(\frac{1}{F/\#_2} - \frac{2\lambda}{\delta} \right)^2 \sin \left(\tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_1} \right) \quad (11)$$

이 된다.

2.1.3 각다중과 회전다중 방식을 결합하여 사용할 경우

이 경우, 식 (6)의 회전 분리각을 사용하는 것이 안전하다. 왜냐하면, 식 (9)의 회전 분리각을 사용할 경우, 그림 2에 나타난 것처럼 한 기준빔의 원형 궤적을 따라 회전 다중으로 기록된 홀로그램들 가운데 하나와 다른 원형 궤적을 따라 회전 다중으로 기록된 홀로그램들 사이에 Bragg 정합이 발생할 수 있기 때문이다. 이 경우 누화가 발생할 수 있다. 그러나 식 (6)의 분리각을 사용하면, 재생되는 홀로그램들이 CCD의 구경에서 영상들이 분리되어 검출되므로 문제가 되지 않는다. 또 각다중을 함께 사용하므로 식 (6)에서의 θ_R 은 각다중에서의 최소각 $\theta_R = \theta_{R,max} - \theta_a = \theta_{R,max}/2 + \theta_{R,min}/2$ 을 사용한다고 하자. 그러면 한 지점에서의 회전다중 횡수 M_r 은

$$M_r = \sqrt{2} \pi \left(\frac{1}{F/\#_2} - \frac{2\lambda}{\delta} \right)^{-1} \sin \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_1} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_2} \right) \quad (12)$$

이 되고 각다중 횡수는 식 (4)와 동일하다. 따라서 표면저장 밀도는

$$S_{2D, ar} = \frac{\sqrt{2} \pi^2 n d}{64 \lambda^3} \left(\frac{1}{F/\#_2} - \frac{2\lambda}{\delta} \right) \left(\tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_1} - \tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_2} \right) \times \sin \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_1} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_2} \right) \quad (13)$$

이 된다.

2.2. 영상면 홀로그램을 저장할 경우

단위 면적 당 저장밀도를 높이기 위해서 SLM의 크기를 렌즈로 인자 r 만큼 축소시켜 기록한다고 하자. 즉 $0 < r \leq 1$ 인 범위는 축소를, $r > 1$ 이면 확대를 의미한다. SLM과 L_2 의 거리를 s , L_2 와 기록면과의 거리를 s' 이라 하면, $r = s'/s$ 이고 Gauss 렌즈 법칙에서 $s = (r+1)f_2/r$ 이다. 그러면 L_2 의 직경은 회절 효과를 고려하여, 대략

$$D_{L2} = \sqrt{2} D + \frac{2\lambda f_2}{\delta} \left(\frac{r+1}{r} \right) \quad (14)$$

이 되어야 한다. D, δ, D_{L2}, f_2 및 λ 가 주어지면 식 (14)에서 r 은

$$r = \frac{2\lambda}{\delta} \left[\frac{1}{F/\#_2} \left(1 - \frac{\sqrt{2}D}{D_{L2}} \right) - \frac{2\lambda}{\delta} \right]^{-1} \quad (15)$$

으로 주어지고 이 r 은 얻을 수 있는 최소값이 된다. 축소를 고려하여, 한 페이지가 저장될 때 얻어지는 면적 저장 밀도는 $N^2/(rD)^2 = 1/(r\delta)^2$ 이다. 따라서

$$S_{2D'} = \frac{M}{r^2 \delta^2} = \frac{M}{4\lambda^2} \left[\frac{1}{F/\#_2} \left(1 - \frac{\sqrt{2}D}{D_{L2}} \right) - \frac{2\lambda}{\delta} \right]^2 \quad (16)$$

이 된다. 식 (16)으로부터, 영상면 홀로그램을 기록할 때에는, SLM의 대각선 길이 $\sqrt{2}D$ 는 렌즈의 직경 D_{L2} 보다 작을수록, 그만큼 영상을 축소할 수 있어서, 면적 저장밀도가 높아짐을 알 수 있다.

식 (2)와 (16)에서 페이지 당 저장밀도를 비교해 보면

$$\frac{S_{2D}/\text{page}}{S_{2D}'/\text{page}} = \frac{r^2 \delta^2}{8\lambda^2} \left(\frac{1}{F/\#_2} - \frac{2\lambda}{\delta} \right)^2 = \frac{r^2}{2} \left(\frac{\delta}{2\lambda F/\#_2} - 1 \right)^2 \quad (17)$$

가 된다. 간단한 예로 $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$, $\delta = 20 \mu\text{m}$, $F/\#_2 \approx 1$ 라고 하면, 식 (17)의 비가 1이 되기 위해서는 $r \approx 1/13$ 이 되어야 한다. 이는 식 (14)에서 $D_{L2} - \sqrt{2}D \approx 0.7f_2$ 가 됨을 의미하고, 또 $F/\#_2 = f_2/D_{L2} \approx 1$ 이므로 $D \approx 0.2D_{L2}$ 임을 뜻한다. 즉 주어진 렌즈의 직경에 비해 매우 작은 SLM을 사용하여야 하므로 한 페이지에 병렬적으로 저장할 수 있는 정보량은 감소한다. 이때 기록면에서의 픽셀 크기는 약 $1.5 \mu\text{m}$ 으로 축소되므로 기록매질의 표면에 있는 미세한 먼지나 오물에 민감한 영향을 받을 수 있다. 또 L_2 와 SLM 사이의 거리는 $s' \approx 13s \approx 13f_2$ 가 되어 시스템의 크기를 줄이는데 불리해진다. 만약 $r = 1$ 인 경우를 생각한다면, 식 (17)에서 페이지당 저장 밀도는, Fourier면에서 기록하는 것이 영상면에서 기록할 때에 비해, 약 $181 (= 13^2)$ 배나 더 높다. 결국 다중화 횡수 M 이 동일하다면 Fourier 면 또는 그 가까이에서 기록하는 것이 저장 밀도에 있어서 유리함을 알 수 있다. 사실 $r = 1$ 인 경우 L_2 와 기록면까지의 거리 s 가 $2f_2$ 가 되므로, Fourier 면 홀로그램을 기록하는 경우에 비해, 각다중할 수 있는 각의 범위가 약간 더 커진다. 다음의 논의는 편의상 $r = 1$ 인 경우에 대한 것이다.

2.2.1 각다중 방식을 사용할 경우

s 가 $2f_2$ 가 되므로 식 (3)에서 θ_R 의 최소값 $\theta_{R,\min}$ 은 $\tan^{-1}[1/4(F/\#_2)]$ 가 된다. 물론 $\theta_{R,\max}$ 는 여전히 $\tan^{-1}[1/2(F/\#_1)]$ 이다. 여기서도 바꾸어 줄 수 있는 θ_R 범위의 약 반, 즉, $(\theta_{R,\max} - \theta_{R,\min})/2 \equiv \Theta_a$ 을 각다중을 위해서 사용한다고 하자. 그러면, 2.1.1에서와 같은 논의를 쫓아서,

$$M_a' = \frac{\pi nd}{16\lambda} \left(\tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_1} - \tan^{-1} \frac{1}{4F/\#_2} \right) \times \sin \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_1} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{1}{4F/\#_2} \right) \quad (18)$$

이 되고, 식 (16)으로부터

$$S_{2D,a}' = \frac{\pi nd}{16\lambda\delta^2} \left(\tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_1} - \tan^{-1} \frac{1}{4F/\#_2} \right) \times \sin \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_1} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{1}{4F/\#_2} \right) \quad (19)$$

를 얻게 된다.

2.2.2 회전다중 방식을 사용할 경우

기록매질의 두께가 얇을 때, 여러 개의 다중화되어 기록된 영상들이 복원될 수 있다. 이때, CCD 앞에서 공간 필터링을 통해 올바른 영상만 검출한다면, 회전다중의 분리각은

$$\Delta\theta_{r1} = \frac{2\lambda}{\delta \sin \theta_R} \quad (20)$$

으로 주어진다.¹⁰⁾ 2.1.2절의 논의를 쫓아서,

$$M_{r1}' = \frac{\pi\delta}{\lambda} \sin \left(\tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_1} \right) \quad (21)$$

이 되고

$$S_{2D,r1}' = \frac{\pi^2 nd}{16\lambda^2 \delta} \left(\tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_1} - \tan^{-1} \frac{1}{4F/\#_2} \right) \times \sin \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_1} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{1}{4F/\#_2} \right) \quad (22)$$

을 얻는다. 기록 매질의 두께 d 가 $\delta/2\lambda$ 보다 클 때에는 식 (9)에서 주어진 Bragg 정합 조건이 회전다중의 분리각을 결정짓는다. 따라서 M_{r2}' 은 식 (10)과 동일하므로 면적 저장 밀도를 계산하면

$$S_{2D,r2}' = \frac{\sqrt{2}\pi(d/\lambda)^{1/2}}{\delta^2} \sin \left(\tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_1} \right) \quad (23)$$

이 된다.

2.2.3 각다중과 회전다중 방식을 결합하여 사용할 경우

각다중 횡수 M_a' 은 식 (18)과 동일하게 주어진다. 그러나 회전다중 횡수는 2.1.3의 논의를 쫓아서, 식 (24)로부터

$$M_r' = \frac{\pi\delta}{\lambda} \sin \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_1} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{1}{4F/\#_2} \right) \quad (24)$$

이 된다. 따라서 각다중과 회전다중 방식을 결합하여 영상면 홀로그래프를 저장할 때의 면적 저장밀도는

$$S_{2D,ar}' = \frac{\pi^2 nd}{16\lambda^2 \delta} \left(\tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_1} - \tan^{-1} \frac{1}{4F/\#_2} \right) \times \sin \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{1}{2F/\#_1} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{1}{4F/\#_2} \right) \quad (25)$$

이 된다.

III. 면적 저장밀도와 다중화 횡수의 비교

앞 절에서 얻은 여덟 가지 면적 저장밀도 $S_{2D,a}$, $S_{2D,r1}$, $S_{2D,r2}$, $S_{2D,ar}$, $S_{2D,a}'$, $S_{2D,r1}'$, $S_{2D,r2}'$, $S_{2D,ar}'$ 와 이들 각각에 대한 다중화 횡수 M_a , M_{r1} , M_{r2} , $M_a \times M_r$, M_a' , M_{r1}' , $M_{r2}' (=M_{r2})$, $M_a' \times M_r'$ 를 그림 3-6에 나타내었다. 면적 저장밀도의 단위는 $[\mu\text{m}^{-2}]$ 이다. 공통적으로, 기록 매질의 굴절률 $n=1.5$, 기록파장 $\lambda=0.5 \mu\text{m}$ 를 가정하였다. 실선은 $\delta=20 \mu\text{m}$ 인 경우이고 점선은 $\delta=40 \mu\text{m}$ 인 경우이다. 실선만 나타나 있는 것은 점

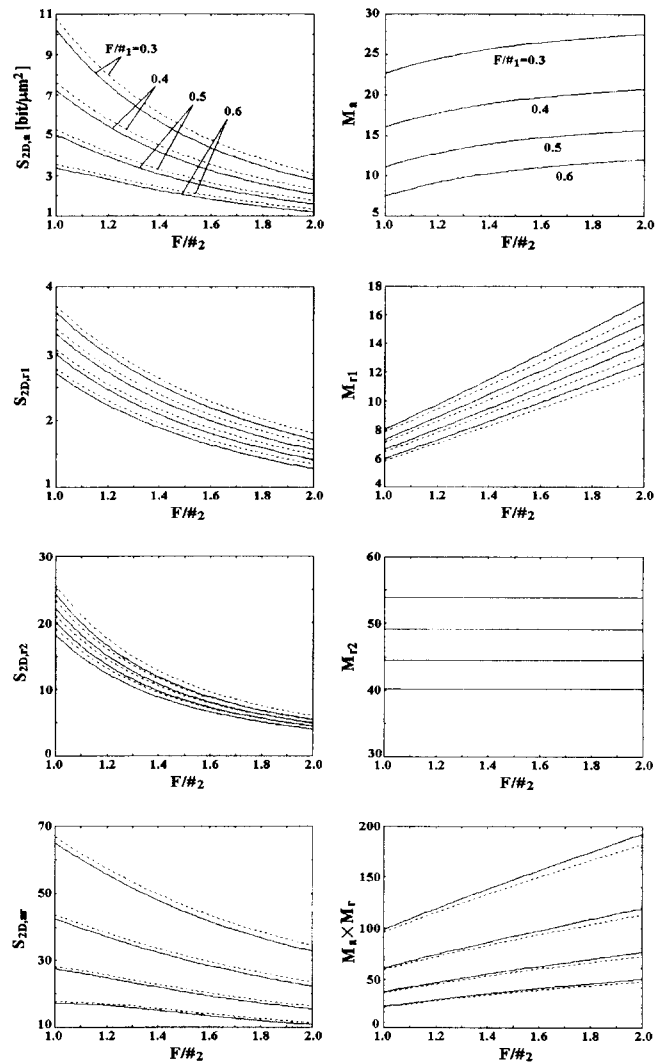


그림 3. Fourier면 홀로그래프를 기록할 때 $F/\#_1$ 과 $F/\#_2$ 에 따른 면적 저장밀도와 다중화 횡수. 기록 매질의 두께 $d=100 \mu\text{m}$ 로 하였다. 실선과 점선 모두, 맨 위쪽 곡선부터 차례로 각각 $F/\#_1=0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ 의 4가지 경우이다.

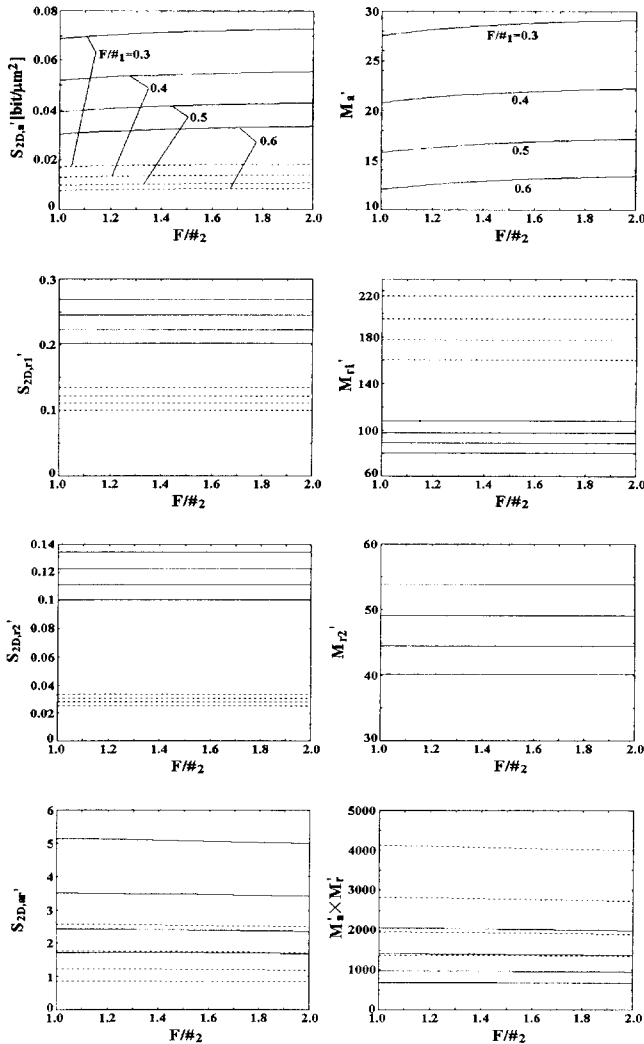


그림 4. 영상면 홀로그램을 기록할 때 $F/\#_1$ 과 $F/\#_2$ 에 따른 면적 저장 밀도와 다중화 횟수. 사용된 파라미터는 그림 3과 동일함.

선과 실선이 겹쳐졌기 때문이다.

모든 경우에 있어서 $F/\#_1$ 이 작을수록 저장밀도는 높아진다. Fourier면 홀로그램을 기록할 경우, 주어진 $F/\#_1$ 값에 대해, $F/\#_2$ 값이 작을수록 면적 저장밀도가 높아지지만, 영상면 홀로그램을 기록할 경우, 면적 저장밀도는 $F/\#_2$ 값에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 물론 영상면에서 기록하는 경우, $F/\#_2$ 값이 커지면 한 페이지 당 저장되는 정보량은 감소하므로 병렬적 정보 인출 면에서는 불리해진다. 또한, 영상면 홀로그램을 기록할 경우, 픽셀 pitch δ 가 작을수록 면적 저장밀도는 대략 그의 제곱의 역수에 비례해서 증가하지만, Fourier면 홀로그램을 기록할 경우, δ 는 면적 저장밀도에 큰 영향을 주지 않음을 (아주 약간 증가시키는 정도임) 볼 수 있다. 물론, Fourier면 기록에서 δ 가 커질수록 한 페이지 당 저장할 수 있는 정보량은 감소한다.

상용화된 SLM의 δ 값이 20 μm 정도이므로, 영상면 홀로그램을 기록하는 것보다 Fourier면 홀로그램을 기록하는 것이, 높은 면적 저장밀도를 얻는데 유리함을 알 수 있다. 일반적으로 동일한 조건의 파라미터 값을 사용할 경우, 높은 저장밀도

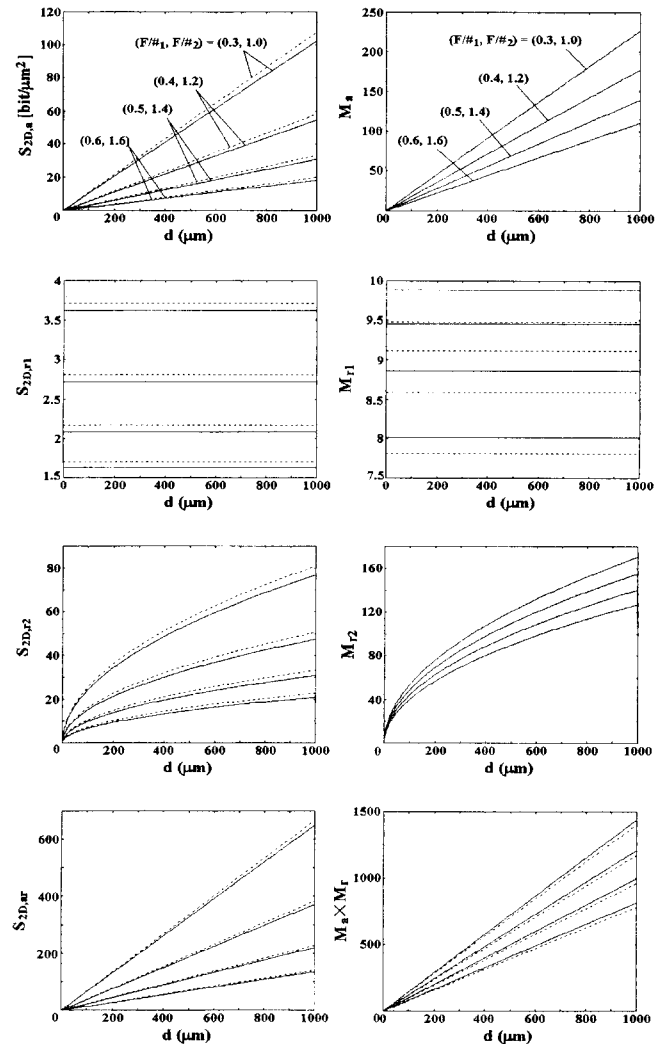


그림 5. Fourier면 홀로그램을 기록할 때 기록매질의 두께 d 에 따른 면적 저장밀도와 다중화 횟수. 실선과 점선 모두, 맨 위쪽 곡선부터 차례로 각각 $(F/\#_1, F/\#_2) = (0.3, 1.0)$, $(0.4, 1.2)$, $(0.5, 1.4)$, $(0.6, 1.6)$ 의 4가지 경우이다.

를 얻기 위해서는 다중화 횟수를 높여야 함을 알 수 있다. 그러나 영상면 홀로그램을 기록할 때에는 Fourier면 홀로그램을 기록할 때에 비해 저장 밀도는 낮지만 다중화 횟수는 오히려 더 크다. 사실 홀로그램의 회절 효율은 다중화 횟수의 제곱에 반비례하게 된다.^[11] 따라서 영상면 홀로그램은 면적밀도 뿐 아니라 회절 효율에서도 불리함을 알 수 있다.

식 (5)의 $S_{2D,a}$ 는 d 에 따라 선형으로 증가하고 식 (11)의 $S_{2D,r2}$ 는 \sqrt{d} 에 비례해서 증가한다. 그런데 그림 5에서 볼 수 있는 것처럼 이 두 면적저장밀도는 d 가 약 500 μm 에서 비슷해진다. 따라서 한가지 다중화 방식을 사용할 경우, Fourier면 홀로그램을 기록한다면, 매질의 두께가 대략 500 μm 이하 일 때에는 회절다중 방식이 각다중 방식에 비해 유리하며, 그보다 더 두꺼운 경우에는 각다중 방식이 가장 유리함을 알 수 있다. 그러나 충분히 높은 면적 저장밀도를 얻기 위해서는 각다중과 회절다중 방식을 결합하여 사용하는 것이 가장 낫다는 것을 볼 수 있다.

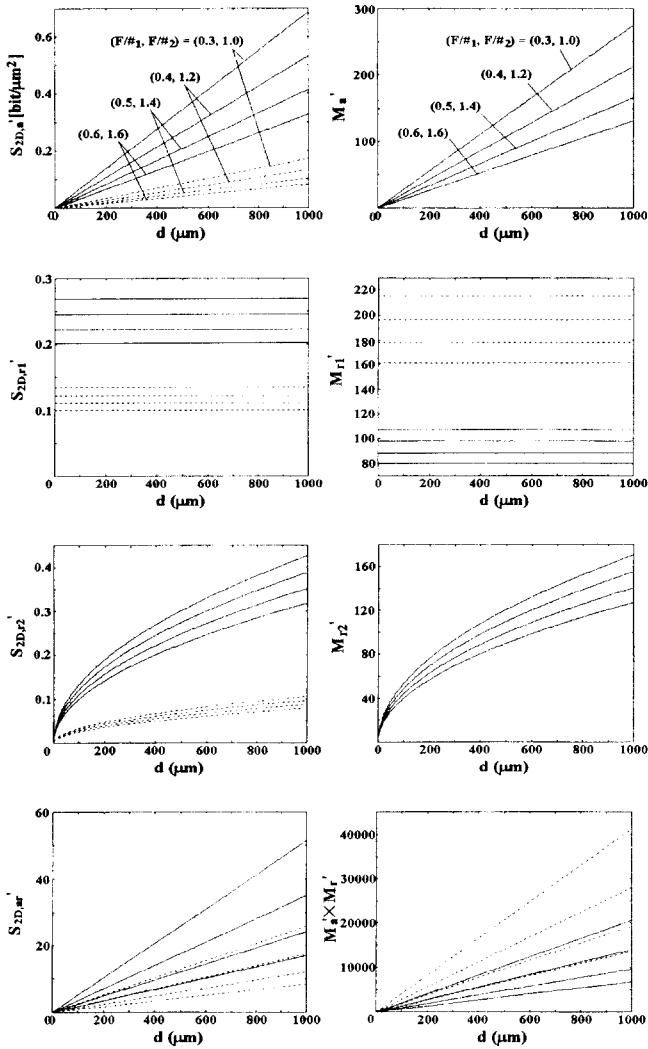


그림 6. 영상면 홀로그래프를 기록할 때 기록매질의 두께 d 에 따른 면적 저장밀도와 다중화 횟수. 사용된 파라미터는 그림 5와 동일함.

극단적으로 Fourier면과 영상 면에서의 기록에 대해 조사해 보았는데 만약 Fourier면과 영상 면 사이에서 기록한다면 저장밀도 역시 지금까지 구한 두 극단적 경우의 사이 값이 될 것이다. 또한 여러 파라미터 값에 대한 면적 저장밀도의 변화도 두 극단적인 경우의 성격을 모두 조금씩 띠게 될 것이다.

IV. 토의 및 결론

본 논문에서 한가지 고려하지 않은 것은 기록 면에서의 빛 세기 분포이다. 랜덤하게 ON-OFF된 픽셀을 갖는 공간 광 변조기 영상을 광학적으로 Fourier 변환하면, Fourier면에서의 빛 세기 분포는 항상 큰 DC 성분과 작은 고조파 성분들로 인해 매우 불균일 하다.¹¹⁾ 이에 비해 영상 면의 빛 세기 분포는 매우 평탄하다. 그리고 주어진 기록매질에서, 얻을 수 있는 굴절률 변화의 폭은 항상 제한되어 있다. 따라서 Fourier면 홀로그래프를 기록할 경우, 영상 면 홀로그래프를 기록하는 경우에 비해, 현실적으로 한 곳에 다중화 하여 저장할 수 있는 홀로

그램의 수는 더욱 제한된다. 따라서 매질의 성능을 고려하지 않고 면적저장 밀도를 비교하는 것은 엄밀히 올바른 방법이 아니다. 그러나 본 논문에서의 논의는 매질의 성능이 아무리 좋다고 하더라도, 기록 방법과 시스템적인 측면에 의해 제한 받는, 면적 저장밀도의 상한값이라고 생각할 수 있다. 주어진 매질을 가지고 실험적으로 구할 수 있는 저장밀도는 본 논문에서의 결과값 보다 낮을 것이며, Fourier면 홀로그래프가 영상면 홀로그래프에 비해 그 정도가 더 심할 것으로 예상된다.

이러한 관점에서 볼 때, 만약 영상면 홀로그래프를 기록할 때 영상의 크기를 찌그러짐 없이 축소하여 기록할 수 있다면, 영상면 홀로그래프를 기록하는 것이 Fourier면 홀로그래프를 기록하는 것 보다 더 유리할 수 있다. 각다중과 회전다중을 복합적으로 사용할 경우를 보면, Fourier면 홀로그래프를 기록하는 경우가 영상면 홀로그래프를 기록하는 경우에 비해 면적 저장밀도가 약 10배정도 더 높는데, 만약 영상의 크기를 3~4배로 축소한다면 ($r=1/3\sim 1/4$), 두 경우의 면적 저장밀도는 비슷해짐을 예측할 수 있다. 물론 상의 크기를 축소하기 위해서는 줌 렌즈를 사용한다면, 비용이나 시스템의 집약성에 있어서 불리하게 될 것이다.

결론적으로, 저장 매질의 성능이 이상적이라 하고, 영상면과 Fourier면에서 홀로그래프를 각다중, 또는 회전다중, 또는 이들 두 가지의 결합을 사용할 때, 최대 면적 저장밀도와 다중화 횟수를 추정하고 비교해 보았다. 홀로그래프는 영상면보다는 적어도 Fourier면 근처에서 기록되어야 비교적 높은 면적 저장 밀도를 얻을 수 있다. Fourier면 홀로그래프를 기록할 경우, 기록 매질의 두께가 대략 500 μm 보다 작을 때에는 각다중 보다 회전다중 방식이 유리하다. 또 이들 한가지 다중화 방식을 사용하는 것 보다, 두 방식을 결합하여 사용하는 것이 저장 밀도를 세배 정도 높일 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 한국학술진흥재단 협동연구과제(KRF-99-042-D00062-D3001)의 지원에 의해 수행되었으며, 지원에 감사 드린다.

참고문헌

- [1] D. Psaltis and F. Mok, Sci. Am. **275**(11), 52 (1995).
- [2] J. F. Heanue, M. C. Bashaw, and L. Hesselink, Science **265**(5), 749 (1994).
- [3] J. H. Hong, L. McMichael, T. Y. Chang, W. Christian, and E. G. Paek, Opt. Eng. **34**(8), 2193 (1995).
- [4] R. M. Shelby, J. A. Hoffnagle, G. W. Burr, C. M. Jefferson, M.-P. Bernal, H. Coufal, R. K. Grygier, H. Guenther, R. M. Macfarlane, and G. T. Sincerbox, Opt. Lett. **22**, 1509 (1997).
- [5] H. S. Li and D. Psaltis, Appl. Opt. **33**(17), 3764 (1994).
- [6] D. Psaltis and A. Pu, Int. J. of Optoelectronics-Devices and Technologies **10**(3), 333 (1995).
- [7] A. Pu and D. Psaltis, Appl. Opt. **35**(14), 2389 (1996).
- [8] G. Zhou, D. Psaltis, and F. Mok, "Holographic read-only memory," to appear in Optics and Quantum Electronics.

- [9] J.-S. Jang and D.-H. Shin, Proc. of SPIE **3468**, 30 (1998).
[10] K. Curtis, A. Pu, and D. Psaltis, Opt. Lett. **19**(13), 993 (1994).
[11] F. Mok, G. Burr, and D. Psaltis, Opt. Lett. **21**(12), 896 (1996).
[12] M.-P. Bernal, G. W. Burr, H. Coufal, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson, R. M. Macfarlane, R. M. Shelby, and M. Quintanilla, Appl. Opt. **37**(11), 2094 (1998).

Area storage density of ideal 3-D holographic disk memories

Ju-Seog Jang and Dong-Hak Shin

Department of Telematics Engineering Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

(Received December 14, 1999, Revised manuscript received February 10, 2000)

Assuming that the performance of holographic storage media is ideal, we estimate the area storage density of disk-type holographic memories, when the method of either angle multiplexing, or rotational multiplexing, or both are used. The area storage density is strongly dependent on the f numbers (ratio of focal length to diameter) of both the Fourier transform lens in the signal arm, denoted by $F/\#_2$, and the angle range over which the reference beam is incident (or, the equivalent f number corresponding to the angle range denoted by $F/\#_1$). The area storage density is largely independent of the pixel pitch of the spatial light modulator when the Fourier plane holograms are recorded, while it is sensitive to the pixel pitch when the image plane holograms are recorded. In general, to obtain high area storage density, the Fourier or at least near Fourier plane holograms rather than the image plane holograms should be recorded. In addition, when the thickness of the recording materials are less than approximately 500 μm , rotational multiplexing gives higher area storage densities than angle multiplexing does. To increase the storage density further, however, it is desirable to use both of the two multiplexing methods in combination.