

## 국소 홀로그래픽 기록방식에 기초한 홀로그래픽 디스크 메모리

오용석 · 김복수 · 장주석<sup>†</sup>

부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부  
Ⓣ 608-737 부산광역시 남구 대연3동 599-1

강영수

부경대학교 화학과  
Ⓣ 608-737 부산광역시 남구 대연3동 599-1

(2003년 6월 16일 받음, 2003년 11월 10일 수정본 받음)

본 논문에서는 디스크형 기록매질에 이용될 수 있는 국소 홀로그래픽 기록방식을 연구하였다. 이 방식에서는 원통렌즈를 사용하여 기준빔을 얇은 두께로 집속하고, 그 집속된 곳에 신호빔을 쬐어 홀로그래픽을 기록한다. 기록매질을 기준빔의 스팟 크기보다 더 많이 이동시킴으로써 여러 개의 국소 홀로그래픽을 다중화한다. 국소 홀로그래픽 기록방식은 균일한 회절효율을 위하여 기록시간을 조절할 필요가 없다. 우리는 주어진 신호빔의 스팟 크기에 대해서 요구되는 최저의 기록매질 두께가 존재함을 보였다. Fe가 도핑된 2 mm 두께의 LiNbO<sub>3</sub> 광결정을 사용하여 데이터의 저장 및 복원 실험을 실행하였고, 20 bit/um<sup>2</sup>의 면적 저장밀도와 2.5×10<sup>-3</sup>의 RBER(raw-bit error rate)을 얻었다.

주제어: holographic disk memory, localized hologram, recording medium thickness.

### I. 서 론

홀로그래픽 데이터 저장에서는 데이터가 기록매질에 3차원적으로 중첩 저장된다. 많은 데이터 페이지를 저장하기 위해 여러 다중화 방식들이 연구되었다.<sup>[1-7]</sup> 이들 다중화 방식은 기록매질의 한 영역에 많은 홀로그래픽들을 중첩하여 저장하는 중첩 홀로그래픽 기록방식이다. 회절효율은 매질의 한 곳에 기록된 홀로그래픽 수의 제곱에 반비례하므로, 중첩되는 홀로그래픽 수가 많아질수록 회절효율이 급격히 떨어진다.<sup>[8]</sup> 그리고, 기록된 홀로그래픽들이 동일한 회절효율을 가지도록 할 필요가 있다. 이를 위해서는 매질의 특성에 의존하는 빔 노출시간을 조절해야 한다.<sup>[8,9]</sup> 또한, 광굴절 결정에서 특정한 홀로그래픽을 지우려고 하면 같은 공간에 저장된 모든 정보가 동시에 지워지게 된다. 따라서 특정한 한 페이지를 지우기 위하여 홀로그래픽을 refreshing하는 방법이 연구된 바 있다.<sup>[10]</sup> 그런데, 이 방법은 지우고자 하는 한 페이지를 제외한 나머지 모든 페이지를 조금씩 반복하여 기록하는 방법이기 때문에 전체 기록 및 삭제 과정이 매우 복잡하다.

중첩 다중화 방식을 사용할 경우에 생기는 이러한 문제점들을 극복할 수 있는 국소 홀로그래픽 기록방식이 최근에 제안된 바가 있다.<sup>[11-16]</sup> 국소 홀로그래픽 기록방식에서는 원통 렌즈를 사용하여 기준빔이 기록매질 내부에서 얇게 집속되도록 하고, 신호빔이 이 부분을 교차하면서 홀로그래픽이 기록된다. 이렇게 해서 기록매질의 매우 작은 폭의 영역에 하나의 홀로그래픽을 기록되고, 기록매질을 옆으로 이동한 뒤에 다음 홀로그래픽을 공

간적으로 다른 영역에 기록한다. 공간적으로 독립된 영역에 홀로그래픽이 하나씩 저장되므로 홀로그래픽들 사이에 중첩이 발생하지 않는다. 그러므로, 중첩 홀로그래픽 기록방식처럼 균일한 회절효율을 얻기 위하여 빔 노출시간을 조절할 필요가 없고, 단 하나의 노출시간을 사용하면 된다. 그리고, 저장된 홀로그래픽들 중에서 특정한 홀로그래픽을 선택적으로 삭제하거나 재기록하는 것이 가능하다. 또한, 동일한 수의 홀로그래픽을 기록할 경우에 중첩 방식보다 높은 회절 효율을 얻을 수 있다.<sup>[12]</sup> 국소 홀로그래픽 기록방식의 단점은 저장밀도가 중첩 기록방식에 비해 낮다는 점이다.

국소 홀로그래픽 기록방식은 공간 다중화 방식의 한 방법이라고 볼 수 있다. 일반적으로 공간 다중화 방식에서는 홀로그래픽들을 공간적으로 충분히 분리하여 기록하므로 저장밀도의 관점에서 불리하다. 국소 기록방식이라 함은 공간 다중화 방식에서 저장밀도의 극대화를 추구한 방법이다. 원리적으로 국소 홀로그래픽 기록방식에서는 각 홀로그래픽들이 기록매질의 서로 독립된 영역에 기록되어야 한다. 그런데, 면적 저장밀도를 높으려면 국소 홀로그래픽들이 기록되는 위치의 간격을 좁혀야 한다. 이 때, 이웃한 두 홀로그래픽의 기준빔들은 서로 공간적으로 일부 겹칠 수 있기 때문에 이러한 기준빔 겹침을 최소화하는 최적의 실험 파라미터에 대해서 고려할 필요가 있다.<sup>[15,16]</sup>

또한, 지금까지 연구되고 알려진 국소 홀로그래픽 저장방식에서 사용한 기록구조는 90° 기하구조이다.<sup>[12-14]</sup> 이 기록구조는 비교적 두꺼운 저장매체를 이용할 때 많이 사용되며, 기준빔과 신호빔이 서로 90° 각도를 이룬다. 그런데, 홀로그래픽 메모리에서는 두께가 얇은 디스크형 저장매체도 많이 사용되고 있다. 이에 홀로그래픽 디스크 메모리를 위해 국소 홀로그

<sup>†</sup>E-mail: jsjang@pknu.ac.kr

램 기록방법을 얇은 저장매체에 응용하려는 시도 및 이 방법의 기록 구조와 기록 특성 등에 관한 연구가 필요하다.<sup>[15,16]</sup>

본 논문에서는 90° 기하구조가 아닌 디스크형 기록매질에 국소 홀로그래프를 기록하고 재생하는 방법을 연구하였다. 기록매질의 두께에 따른 수용 가능한 신호빔 크기, 그리고 기준빔과 신호빔의 입사각에 따른 기록 가능한 신호빔 크기를 논의한다. 그리고, 균일한 회절효율을 위한 시간조절을 하지 않고 하나의 기록시간만으로 홀로그래프를 균일하게 기록할 수 있음을 보인다. 마지막으로 균일한 세기분포의 기준빔을 사용하여 데이터를 저장하고 재생하는 국소 홀로그래픽 메모리 실험을 수행하였고 그 결과를 분석하였다.

### II. 이론적 배경

그림 1에 기준빔과 신호빔 사이의 각이 예각인 디스크형 구조의 국소 홀로그래프 기록방식을 나타내었다. 여기서 기준빔은 원통렌즈에 의해 집속되어, 기록매질 내에서 얇은 막처럼 전파되도록 한다. 이 때, 신호빔이 이 기준빔과 간섭을 일으켜 홀로그래프를 기록한다. 하나의 홀로그래프가 완성되면 기록매질을 단순히 옆으로 일정거리만큼 이동하여 다른 홀로그래프를 기록한다.

기준빔과 신호빔 사이의 각이 거의 90°인 기존의 90° 기하구조에서는, 홀로그래프를 기록할 때마다 신호빔은 기록매질 전체를 관통한다. 따라서, 광폴리머를 기록매질로 사용하면, 나중에 기록될 홀로그래프 영역에서는 모노머의 양이 줄어들어 회절효율이 낮아진다. 그리고, 광굴절 매질을 사용할 경우에는 이전에 기록된 홀로그래프들은 나중에 기록되는 홀로그래프들의 신호빔에 의해 지속적으로 지워진다. 따라서, 균일한 회절효율을 얻기위한 기록시간의 조절이 어느정도 필요하게 된다. 이전의 국소 홀로그래프 기록실험에서는 Fe와 Mn이 이중 도핑된 LiNbO<sub>3</sub> 결정을 사용하였다. 그리고, 선택적으로 홀로그래프를 기록하고 삭제하기 위해, 기록과 삭제를 가능하도록 해주는 활성빔으로 자외선을 추가하여 사용하였다.<sup>[12-14]</sup> 이중 도핑된 광굴절 매질은 빛에 대한 민감도가 매우 낮고, 자외선이 추가로 필요하다.

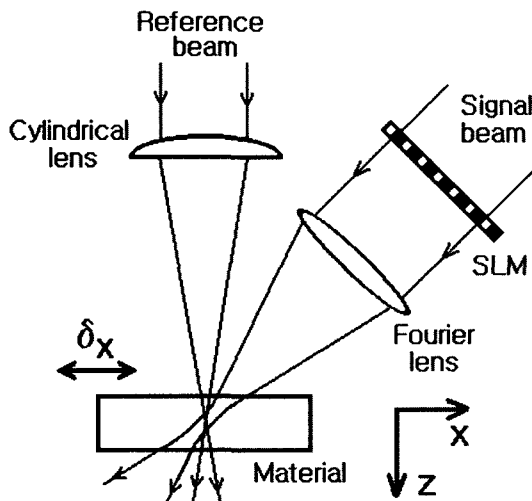


그림 1. 디스크형 국소 홀로그래프 기록방법.

한편, 본 논문에서 연구된 그림 1과 같은 기록구조의 경우에는 기준빔은 겹쳐지지 않더라도 기록매질 안에서 신호빔의 폭이 매질의 이동간격보다 커서 몇 개의 홀로그래프와 신호빔은 일부 겹칠 수 있다. 이 때문에 처음과 마지막의 몇개의 홀로그래프들은 노출조건이 달라져서 회절효율이 달라질 수 있다. 하지만, 일반적으로 기준빔의 세기에 비해 신호빔의 세기가 더 낮고, 특히 많은 수의 홀로그래프를 기록하는 경우에는 이 영향은 크지 않다. 그러므로, 디스크형 국소 홀로그래프 기록방식은 통상적으로 사용하는 광폴리머나 LiNbO<sub>3</sub>:Fe 결정을 사용할 수 있다.

디스크형 매질에서 국소 다중 기록을 위한 이동선택도( $\delta_x$ )는 원통렌즈에 의해 기록매질 안에서 모여진 기준빔 크기에 의존한다. 원통렌즈에 의해 모여진 빔 폭은 원통렌즈에 입사되는 기준빔의 크기와 원통렌즈의 초점거리의 함수가 된다. 균일 빔세기 분포를 가지는 기준빔을 사용한다고 가정한다. 원통렌즈에 입사하는 기준빔의 크기를  $D_R$ , 그리고 원통렌즈의 초점거리를  $f_c$ 라고 한다면, 기록매질의 가운데 부분에서 집속된 빔의 폭 ( $D_R'$ )은  $2\lambda f_c/D_R$ 이다. 만약,  $\delta_x < D_R'$  이면 재생할 경우에 두 인접한 홀로그래프 사이에서 누화잡음이 커진다.<sup>[15,16]</sup> 따라서, 인접한 홀로그래프들 사이의 이동선택도( $\delta_x$ )는  $D_R' = 2\lambda f_c/D_R$ 로 정한다.

디스크형 국소 홀로그래프 기록 방식에서 얇은 막처럼 만들어진 기준빔으로 홀로그래프를 기록하기 위해서는 Fourier 변환된 신호빔을 충분히 포함하여 기록매질에 저장해야 한다. 만약에 신호빔 데이터의 하나의 화소크기가  $d$ 이고, 신호빔 축의 푸리에 렌즈의 초점거리가  $f_s$ 라고 하면, 이 데이터를 홀로그래프로 충실히 기록하고 복원하기 위해서는  $2\lambda f_s/d$  이상의 신호빔 Fourier 성분이 기록되는 것이 좋다.<sup>[17]</sup> 즉, 기록매질의 앞면부터 뒷면까지 만들어지는 기준빔의 길이는  $2\lambda f_s/d$  이상이 되어야 한다. 그런데, 공간광변조기의 액정창의 크기가 주어진 경우에  $d$ 가 작아지면 한 장의 홀로그래프에 저장되는 데이터 양은 증가하지만,  $d$ 가 작아지면 Fourier 변환된 신호빔의 크기( $D_S$ )는 커진다. 따라서, 국소 홀로그래프의 기록조건이 일정한 경우에 저장되는 신호빔의  $D_S$ 가 클수록 면적저장밀도가 높아진다.

그림 2는 기준빔이 기록매질에 수직으로 입사할 경우에 신호빔의 입사각에 따른 기록 가능한 신호빔의 크기를 보여준다.

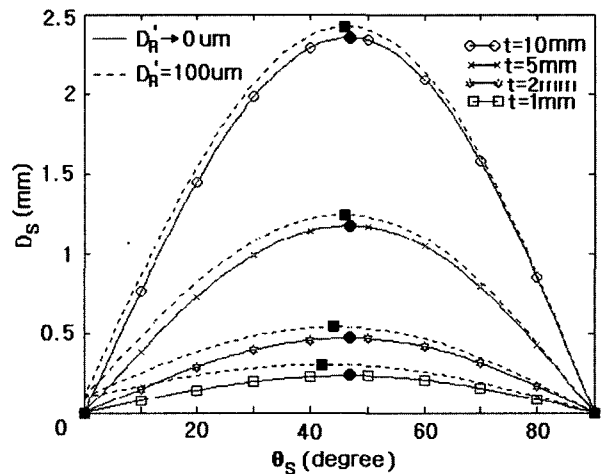


그림 2. 기록 면에서 신호빔의 입사각에 따른 기록 가능한 신호빔의 크기.

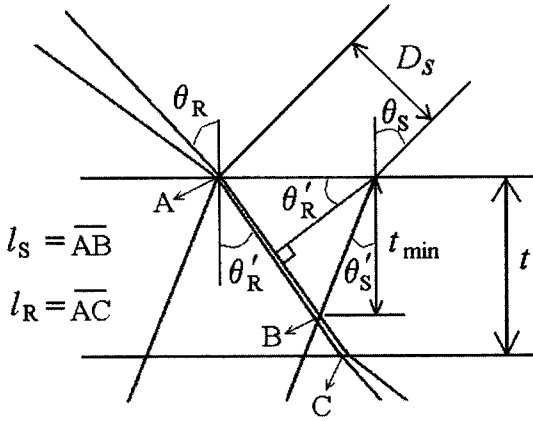


그림 3. 디스크형 국소 홀로그래프 기록 방식에서 기록매질의 두께 계산.

여기서,  $\theta_S$ 는 기록매질 표면의 법선과 신호빔이 이루는 각이고,  $D_S$ 는 기록 가능한 신호빔의 Fourier 스펙트럼 폭,  $D_R'$ 는 집속된 기준빔의 크기,  $t$ 는 저장매체의 두께이다. 그리고, 기록매질의 굴절률은 2.24이며, 기준빔은  $D_R'$ 을 유지하면서 기록매질을 통과한다고 가정한다. 실선은  $D_R' \rightarrow 0$ 인 가상의 경우이고, 점선은  $D_R' = 100 \mu\text{m}$ 인 경우이다. 굵은 점은 각 곡선에서 최대 크기의 신호빔을 기록할 수 있는 입사각을 나타낸다. 한 쌍의 두 인접한 실선과 점선은 같은 두께의 기록매질에 대한 그래프이다.  $D_R' \rightarrow 0$ 인 경우에 기록매질의 두께에 관계없이 약  $17^\circ$  정도로 신호빔이 입사하면 최대 크기의 신호빔이 저장될 수 있다.  $t$ 가 작을수록  $D_R' \rightarrow 0$  곡선과  $D_R' = 100 \mu\text{m}$  곡선의 최대  $D_S$ 에 해당하는 위치의 차이가 크다. 실선과 점선의 최대  $D_S$ 의 차이는 약  $70 \mu\text{m}$ 이고, 매질의 두께가 달라질 때 이 차이의 변화는 아주 작다. 또한, 기준빔이 기록매질에 수직으로 입사하지 않는 경우에도 비슷한 결과가 나온다. 그러므로, 앞으로의 이론적인 전개에서  $D_R'$ 의 폭을 무시하였다.

그림 3은 기준빔과 신호빔의 입사각, 신호빔 폭 그리고 매질두께의 관계를 보여준다. 여기서,  $\theta_R$ 는 기준빔의 입사각이고  $\theta_S$ 는 신호빔의 입사각,  $t$ 는 저장매체의 두께,  $l_R$ 은  $\overline{AC}$ 의 길이,  $l_S$ 는  $\overline{AB}$ 의 길이를 나타낸다. 그리고,  $D_S = 2\lambda f_s/d$ ,  $\lambda$ 는 광원의 파장,  $f_s$ 는 신호빔 측 Fourier 변환렌즈의 초점거리이다. 두께가  $t$ 인 기록매질의 굴절률을  $n$ 이라 하면 두 빔의 투과각은 각각  $\theta_R'$ 과  $\theta_S'$ 이 된다. 그러면 기준빔이 기록매질 내에서 만들어 내는 궤적( $\overline{AC}$ )의 길이는 다음과 같다.

$$l_R = \frac{t}{\cos \theta_R'} \quad (1)$$

여기서  $\theta_R' = \sin^{-1}(\sin \theta_R/n)$ 이다. 신호빔과 기준빔이 만나는 단면길이( $\overline{AB}$ )는

$$l_S = \frac{2\lambda f_s}{d \cos \theta_S'} \left( \sin \theta_R' + \frac{\cos \theta_R'}{\tan(\theta_S' + \theta_R')} \right) \quad (2)$$

가 되며, 여기서  $\theta_S' = \sin^{-1}(\sin \theta_S/n)$ 이다. 재생시에 오류가 적은 홀로그래프를 기록하기 위해서는

$$l_R \geq l_S \quad (3)$$

을 만족해야 한다. 식 (3)을 만족하는 최소의 기록매질의 두께 ( $t_{\min}$ )는 다음과 같다. 즉  $l_R = l_S$ 일 때,

$$t_{\min} = \frac{2\lambda f_s}{d} \cdot \frac{\cos \theta_R'}{\cos \theta_S'} \left( \sin \theta_R' + \frac{\cos \theta_R'}{\tan(\theta_S' + \theta_R')} \right) \quad (4)$$

이다. 예를 들면,  $\lambda = 0.514 \mu\text{m}$ ,  $n = 2.24$ ,  $d = 100 \mu\text{m}$ ,  $f_s = 50 \text{ mm}$ ,  $\theta_R = \theta_S = 45^\circ$ 일 때에,  $t_{\min} \approx 1.1 \text{ mm}$ 가 된다. 식 (4)를 이용하면 기록매질 두께와 신호빔의 크기가 주어진 경우에 신호빔과 기준빔이 충분히 간섭할 수 있는 기준빔의 입사각을 구할 수 있다.

한편, 국소 홀로그래프를 기록하는 방법은 기록매질을 분할하여 사용하기 때문에 기록된 홀로그래프가 균일한 회절효율을 가지도록 시간조절을 할 필요가 없다. 따라서 하나의 노출시간만을 이용하여 동일하게 반복적으로 홀로그래프를 다중화하면 된다.<sup>[12-14]</sup>

국소 홀로그래프 방식에 대한 면적 저장밀도는 다음과 같이 계산된다. 한 홀로그래프의 총 정보수를  $N^2$ , 기준빔의 이동선택도를  $\delta_x$ ,  $y$ 축 방향의 공간다중화 간격을  $\delta_y (= 2\lambda f_s/d)$ ,  $l_R \geq l_S$  조건을 만족하게 하는 두께를 가지는 기록매질을 사용한다면,

$$D_{2d} = \frac{N^2}{\delta_x \delta_y} = \frac{N^2 D_R d}{4\lambda^2 f_s} \quad (5)$$

이다. 예를 들면,  $N^2 = 1 \times 10^5$ ,  $50 \text{ mm}$ ,  $d = 100 \mu\text{m}$ ,  $d_x = 10 \mu\text{m}$ 인 경우에  $D_{2d} \approx 20 \text{ bits}/\mu\text{m}^2$ 이다.

기록매질의 두께를 고려한 단위체적 당 저장밀도는 식 (5)에 기록매질의 두께를 고려함으로써 얻어질 수 있다. 높은 단위체적 당 저장밀도를 얻기 위해서는 가능한 한 얇은 기록매질을 사용하여야 한다. 그러면 단위체적 당 저장밀도( $D_{3d}$ )는

$$D_{3d} = D_{2d} \div t_{\min} = \frac{N^2 D_R d^2}{8\lambda^3 f_s^2} \cdot \frac{\cos \theta_S}{\cos \theta_R'} \cdot \left[ \sin \theta_R' + \frac{\cos \theta_R'}{\tan(\theta_S' + \theta_R')} \right]^{-1} \quad (6)$$

이 된다. 예를 들면, 앞에서 얘기한 면적저장밀도가  $20 \text{ bits}/\mu\text{m}^2$ 인 조건에서  $t_{\min} \approx 1.1 \text{ mm}$ 를 사용할 경우에 단위체적 당 면적 저장밀도는 약  $0.018 \text{ bits}/\mu\text{m}^3$ 가 된다. 이것은 이론적인 단위체적 당 면적 저장밀도  $1/\lambda^3$ 의 0.24%에 해당한다.

### III. 실험 및 결과

먼저 국소 홀로그래프의 이동선택도를 조사하기 위하여 그림 4와 같은 실험 구성을 했다. 실험에서 두께가 2 mm이고 c축이 결정면과 나란하며 Fe가 0.015% 도핑된  $\text{LiNbO}_3$  결정을 사용하였다. 광원은 514.5 nm의 아르곤 이온 레이저이다. 기준빔과 신호빔의 세기는 각각  $200 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 와  $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 이다. 신호빔 측은 공간광변조기(SLM)와 CCD 사이에 4f 시스템이 구성되었고, 기준빔 측에는 초점거리 10 cm의 원통렌즈(CL)를 사용하였다. 가리개를 사용하여 균일한 세기분포를 가지는 기준빔의 직경( $D_R$ )을 바꾸었다. 두 개의 서로 다른  $D_R$ 에 대하여 각각의 이동선택도를 측정된 결과를 그림 5에 나타내었다.

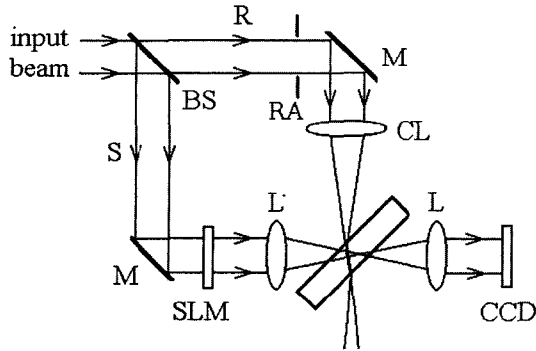


그림 4. 광학적 실험 구성도. R: reference beam, S: signal beam, L: lens, CL: cylinder lens, M: mirror, BS: beam splitter, RA: rectangular aperture, SLM: spatial light modulator.

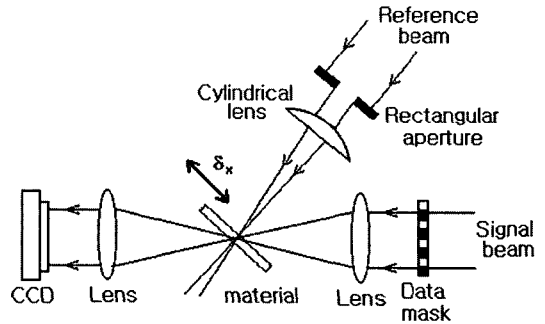


그림 6. 국소 다중화 실험을 위한 구성도.

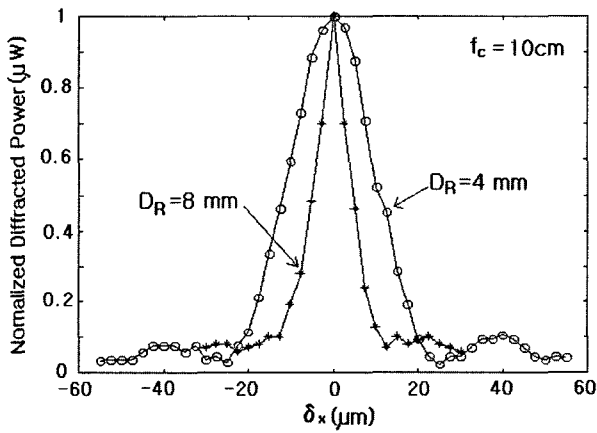


그림 5. 이동선택도의 측정결과.

기록매질의 이동거리( $\delta_x$ )에 따라 회절되는 빔의 값이 거의 0로 떨어지는 정도가  $2\lambda f_c/D_R$ 와 잘 일치하고 있다.

이 결과를 바탕으로 국소 홀로그래프를 기록하고 재생하는 실험을 하였다. 실험 구성은 그림 6과 같다. 홀로그래프에 저장될 데이터는 한 화소의 크기가 각각 100, 40  $\mu\text{m}$ 인 랜덤패턴과 균일한 체크무늬패턴의 네 패턴영역으로 구성된, 4 cm $\times$ 4 cm 크기의 크롬마스크의 패턴이다. 기준빔과 신호빔의 사이각은 약 50°이다. 원통렌즈의 초점거리( $f_c$ )는 10 cm이고, 신호빔 측 Fourier 변환렌즈에는  $f_s = 5 \text{ cm}$ 이고  $f/\# = 1.4$ 인 카메라 렌즈를 사용하였다. 신호빔의 지나친 비균일성을 피하기 위해 기록매질은 신호빔 측의 푸리에변환 렌즈의 초점면에서 약간 벗어난 비초점면에 위치하였다. 하나의 국소홀로그래프가 기록된 뒤에 기준빔과 신호빔을 차단하고, 기록매질을  $\delta_x$  만큼 이동시킨 다음에 다음 홀로그래프를 저장한다. 가우시안 세기분포를 가지는 기준빔을 사용할 경우, 기준빔 폭을 조절하기 위해서 여러 개의 원통렌즈 조합과 부수적인 광학부품들의 삽입이 필요하다. 그런데, 기준빔의 세기분포는 기준빔이 겹치는 정도에 큰 영향을 주지 않는다.<sup>[15,16]</sup> 그래서, 편의상 본 실험에서는 균일한 세기분포를 가지는 기준빔을 사용했고, 가리개를 이용해서 기준빔 폭을 조절했다. 가리개 슬릿의 y축 방향 길이(높이)는 2 mm 정도이다. 30, 20, 10  $\mu\text{m}$ 의 세 가지 홀로그래프 간격( $\delta_x$ )에 대하여 기록 및 재생실험을 수행하였다. 각각의 실험에서 노

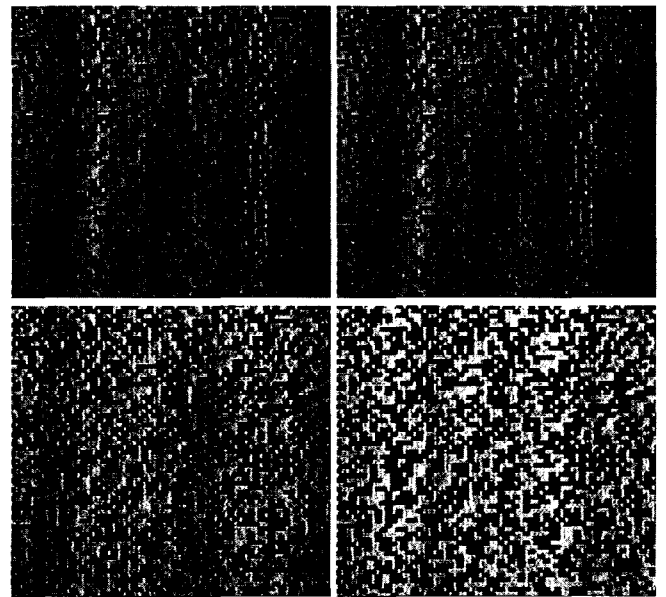


그림 7. 재생된 영상들 중 일부의 사진들( $\delta_x = 10 \mu\text{m}$ 인 경우).

출시간은 5, 5, 6초이다. 균일 세기분포 기준빔을 사용하였기 때문에  $D_R' = 2\lambda f_c/D_R$ 이다. 앞 절에서 얘기한 것처럼,  $\delta_x < D_R$ 이면 인접한 홀로그래프 사이에 누화잡음이 발생한다. 누화잡음을 피하기 위하여 기준빔 폭( $D_R$ )을 각각 5, 7, 20 mm로 하였다. 각 기준빔의 세기는 약 39, 40, 14  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 이고, 각 신호빔의 세기는 약 1, 1.7, 0.8  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 이다.

그림 7은  $\delta_x = 10 \mu\text{m}$ 인 경우에 재생된 홀로그래프들 중의 일부의 영상이다. 재생된 일부의 영상들에서 전반적으로 세로축(y축)에 대칭인 밝기의 불균일성이 나타나고 있다. 페이지간 누화 때문에 이러한 현상이 생기는 것으로 생각된다.

그림 8은 재생한 데이터 영상들의 회절효율을 나타낸다. 재생된 홀로그래프들 중에 마지막 부분들이 회절효율이 비교적 높다. 이는 이후에 기록되는 홀로그래프 수가 적어서 기준빔이나 신호빔에 의해 지워지는 정도가 상대적으로 작아지기 때문이다. 따라서, 아주 많은 수의 홀로그래프를 저장하는 시스템에서는 마지막 홀로그래프 뒤에 dummy 홀로그래프들을 추가로 기록한다면 별문제 없이 균일성을 높일 수 있다.

재생된 홀로그래프들의 회절효율 평탄성( $\Delta\eta/\eta_{av}$ )을 표 1에 나타내었다. 여기서,  $\eta_{av}$ 는 회절효율의 전체 평균값이고,  $\Delta\eta$ 는

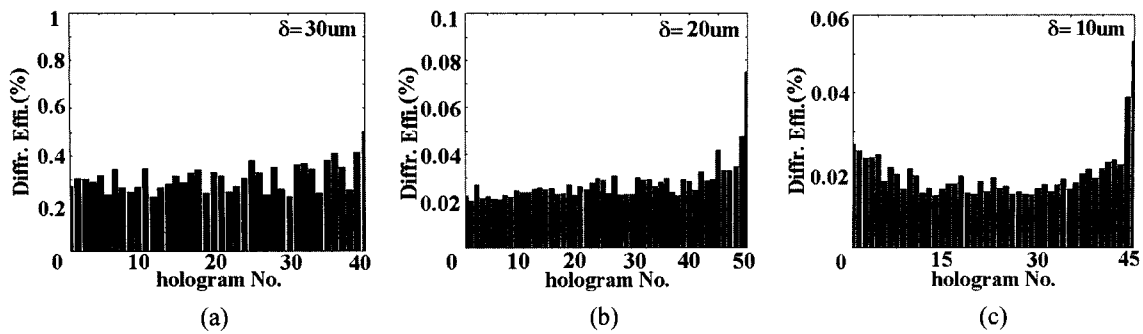


그림 8. 기록된 홀로그램들의 회절효율. (a)  $\delta_x = 30 \mu\text{m}$ , (b)  $\delta_x = 20 \mu\text{m}$ , (c)  $\delta_x = 10 \mu\text{m}$ .

각 회절효율과  $\eta_{av}$ 의 차이 중에서 가장 큰 값이다. 전체 홀로그램의 회절효율을 계산한 경우와 앞과 뒤에서 5개씩의 홀로그램들을 제외하고 계산한 경우, 앞뒤 10개씩의 홀로그램들을 제외한 경우를 나타내었다. 앞뒤로 여러 개의 홀로그램을 제외한 경우에  $\delta_x = 20, 10 \mu\text{m}$ 의 평탄성이  $\delta_x = 30 \mu\text{m}$ 의 평탄성보다 좋게 나왔다. 이 결과는 각 실험의 환경과 조건이 완전히 동일하지 않아서 생긴 것이다. 전체 홀로그램을 계산한 경우를 보거나 이론적으로 생각한다면 홀로그램 간격이 클수록 기록되는 홀로그램들의 질은 높아진다.

표 2는 각 실험에서 재생된 영상에 대한 오류율(raw-bit error rate, RBER)을 보여준다. 기록된 각 홀로그램에는 약 100 Kbits의 이진 데이터가 저장되었으며, 한 페이지 당 4.1 Kbits 정도의 샘플 데이터에 대해서 오류율을 조사하였다. 재생된 영상에 대하여 영역별로 분할한 다음, 영역별 빔세기 평균값을 문턱값으로 사용해서 데이터를 복원하였다. 재생된 영상이 세로방향으로 대칭적인 밝기분포를 가지므로, 영역을 분할할 때에 세로방향으로는 전체 비트들을 하나의 영역으로 사용하였다. 그리고, 가로방향으로 각각 전체 비트, 4 비트, 2 비트의 세 가지 경우로 영역을 분할한 다음, 이진 결정을 위한 문턱값으로 각 영역의 평균 밝기값을 사용하였다. 표 2를 보면, 기록간격이 촘촘할수록 오류율이 증가함을 알 수 있다.

이상의 실험에서  $N^2 = 1 \times 10^5$ ,  $f_s = 50 \text{ mm}$ ,  $d = 100 \mu\text{m}$ ,  $\delta_x = 10 \mu\text{m}$ 의 실험조건을 사용했으므로, 식 (5)로부터 얻어진 면적

저장밀도는 약  $20 \text{ bits/m}^2$ 이다.

#### IV. 토의 및 결론

디스크형 기록매질에서 국소 홀로그램을 저장하는 방법을 이론 및 실험을 통하여 살펴 보았다. 이 방법은 일반적으로 많이 사용되는 디스크형 기록매체(광폴리머 혹은 결정)에 사용할 수 있는 장점이 있다. 국소 다중화 방식에서 면적 저장밀도와 체적 저장밀도를 조사해 보았다. 기준빔과 신호빔의 입사각과 기록매질 두께와의 관계를 이론적으로 살펴보았으며, 주어진 기록매질 두께에서 기준빔의 입사각에 따른 기록가능한 신호빔의 크기를 구할 수 있음을 알았다. 국소 기록의 장점인 단일 노출시간을 사용한 홀로그램 기록 실험에서 비교적 균일한 회절효율을 얻었고, 데이터 저장 실험을 통하여 국소 홀로그램 기록방식이 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 1999년 한국학술진흥재단 협동연구과제(KRF99-042-D00062-D3001)의 지원에 의해 수행되었으며, 지원에 감사 드린다.

#### 참고논문

- [1] D. Psaltis and F. Mok, "Holographic memories," *Sci. Am.*, Vol. 275, pp. 52-58, 1995.
- [2] J. F. Heanue, M. C. Bashaw, and L. Hesselink, "Volume holographic storage and retrieval of digital data," *Science*, Vol. 265, pp. 749-752, 1994.
- [3] K. Curtis, A. Pu, and D. Psaltis, "Method for holographic storage using peristrophic multiplexing," *Opt. Lett.*, Vol. 19, pp. 993-994, 1994.
- [4] D. Psaltis, M. Levene, A. Pu, G. Barbastathis, and K. Curtis, "Holographic storage using shift multiplexing," *Opt. Lett.*, Vol. 20, pp. 782-784, 1995.
- [5] J. H. Hong, L. McMichael, T. Y. Chang, W. Christian, and E. G. Paek, "Volume holographic memory system: techniques and architectures," *Opt. Eng.*, Vol. 34, pp. 2193-2203, 1995.
- [6] C. Denz, G. Pauliat, G. Roosen, and T. Tschudi, "Volume hologram multiplexing using a deterministic phase encod-

표 1.  $\Delta\eta/\eta_{av}$

$\delta_x (\mu\text{m})$	전체	처음과 마지막 홀로그램을 5개씩 제외	처음과 마지막 홀로그램을 10개씩 제외
30	0.62	0.29	0.28
20	1.71	0.59	0.17
10	1.78	0.28	0.19

표 2. 오류율(raw-bit error rate, RBER)

$\delta_x (\mu\text{m})$	데이터 복원을 위한 국소 문턱값을 결정할 때에 사용한 부분 페이지의 가로×세로 크기		
	the whole page (all bits×all bits)	1/16 페이지 (4 bits×all bits)	1/32 페이지 (2 bits×all bits)
30	$4.1 \times 10^{-4}$	$1.6 \times 10^{-4}$	$1.6 \times 10^{-4}$
20	$1.1 \times 10^{-3}$	$7.6 \times 10^{-4}$	$6.8 \times 10^{-4}$
10	$3.7 \times 10^{-3}$	$2.6 \times 10^{-3}$	$2.5 \times 10^{-3}$

- ing method," *Opt. Commun.*, Vol. 85, pp. 171-176, 1991.
- [7] J.-S. Jang, D.-H. Shin, and Y.-S. Park, "Holographic data storage by combined use of rotational, angular, and spatial multiplexing," *Opt. Eng.*, Vol. 39, No. 11, pp. 2975-2981, 2000.
- [8] F. Mok, G. Burr, and D. Psaltis, "System metric for holographic memory systems," *Opt. Lett.*, Vol. 21, No. 12, pp. 896-898, 1996.
- [9] D. Psaltis, D. Brady, and K. Wagner, "Adaptive optical networks using photorefractive crystal," *Appl. Opt.*, Vol. 27, No. 9, pp. 1752-1759, 1988.
- [10] J. P. Drolet, E. Chuang, G. Barbastathis, and D. Psaltis, "Compact, intergrated dynamic holographic memory with refreshed holograms," *Opt. Lett.*, Vol. 22, No. 8, pp. 552-554, 1997.
- [11] 신동학, 박연섭, 장주석 "3차원 정보저장을 위한 slice 홀로그램 쌓기에 의한 공간다중화," 광자기술학회 99, 설악 한화 리조트, 논문집 pp. 210-211, 1999.
- [12] C. Moser, B. Schupp, and D. Psaltis, "Localized holographic recording in doubly doped lithium niobate," *Opt. Lett.*, Vol. 25, No. 3, pp. 162-164, 2000.
- [13] C. Moser, I. Maravic, B. Schupp, A. Adibi, and D. Psaltis, "Diffraction efficiency of localized holograms in doubly doped LiNbO<sub>3</sub> crystals," *Opt. Lett.*, Vol. 25, No. 17, pp. 1243-1245, 2000.
- [14] C. Moser and D. Psaltis, "Holographic memory with localized recording," *Appl. Opt.*, Vol. 40, No. 23, pp. 3909-3914, 2001.
- [15] 오용석, 김복수, 장주석, "국소 홀로그램 기록에 기초한 홀로그래픽 디스크 메모리," Photonics Conference 2002, 용평리조트, pp. 47-48, 2002.
- [16] 오용석, 김복수, 장주석, 김지덕, 이홍석, "이웃한 국소 홀로그램 기록을 위한 기준빔의 겹침 특성," 한국광학회지, 제 14권 1호, pp. 65-71, 2003.
- [17] 장주석, 신동학 "이상적인 디스크형 3차원 홀로그래픽 메모리에서의 면적 저장밀도," 한국광학회지, 제 11권 1호, pp. 58-64, 2000.

### Holographic disk memories based on localized hologram recording

Yongseok Oh, Fushou Jin, Ju-Seog Jang<sup>†</sup>

*Division of Electronics, Computers and Telecommunication Engineering  
Pukyong National University, Busan, 608-737, KOREA*

<sup>†</sup>E-mail: jsjang@pknu.ac.kr

Young Soo Kang

*Department of Chemistry, Pukyong National University, Busan, 608-737, KOREA*

(Received June 16, 2003, Revised manuscript November 10, 2003)

We studied a localized hologram recording method that can be used in a disk-shaped medium. In this method, the reference beam is focused by use of a cylindrical lens to get a thin spot in the medium, and then a hologram is recorded in that spot by illuminating the signal beam. Many localized holograms are multiplexed by shifting the medium by a distance more than the thin spot size of the reference beam. This method does not need recording-time scheduling for uniform diffraction efficiencies. We show that a minimal required thickness of the recording medium exists for a given spot size of the signal beam. We performed experiments for data storage and retrieval, and obtained a storage density of 20 bits/um<sup>2</sup> and a raw-bit error rate (RBER) of 2.5×10<sup>-3</sup>, when a 2 mm-thick Fe-doped LiNbO<sub>3</sub> crystal was used.

OCIS Codes : 210.2860, 070.2590.