

論文99-36D-10-9

노출 시간 계획 분석을 통한 다중 홀로그램 기록 및 재생

(Multiple Hologram Recording and Retrieving Through Analysis of Exposure Time Schedule)

金正淮*, 金男*, 李權淵**

(Jung-Hoi Kim, Nam Kim, and Kwon-Yeon Lee)

요 약

본 논문에서는 균일한 다중 홀로그램을 얻기 위한 몇 가지 노출 시간 계획을 분석하고 실험을 통해 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}(0.015\text{wt}\%)$ 결정에 기록된 홀로그램의 회절 효율을 측정하였다. 높은 각도 분해능을 갖는 시스템(최소각도 : 0.0028°)을 이용하여 두 입사빔의 세기비와 최소 단위의 다중화 각도가 정밀하게 조사되었다. 초기 기록시간, 전체 노출시간, 그리고 시간상수를 고려하여 100개의 회절분포($0.014\% \pm 0.005\%$)를 측정하였으며, 330개의 아날로그 영상을 동일한 장소에 기록하였다. 또한 공간 다중화를 통해 총 500개 이상의 홀로그램이 재생되었다.

Abstract

In this paper, we analyze several exposure time schedules to obtain uniform multiple hologram and measure the diffraction efficiencies of holograms stored in $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}(0.015\text{wt}\%)$ crystal through experiments. The minimum angular selectivity and the intensity ratio of two incident beams are investigated precisely by the high resolution system(minimum angle : 0.0028°). Considering initial recording time, total exposure time and time constants, the efficiency distribution($0.014\% \pm 0.005\%$) of 100 holograms is measured and the 330 analog images are recorded in the same place. Also, total 500 holograms are retrieved by spatial multiplexing.

1. 서 론

부피형 광굴절 매질에 다중화 기법(multiplexing method)을 이용하여 홀로그램을 중첩하게 되면 대용량의 정보저장 뿐만 아니라 재기록과 병렬처리를 통한 빠른 접근이 가능하다. 광굴절 홀로그램(photorefractive

hologram)이란 광굴절 결정에 기록되는 홀로그램을 말하며 일반적으로 부피형 홀로그램(volume hologram)이라고 부른다. 부피형 홀로그램의 이러한 장점으로 인해 홀로그램의 중첩은 초창기 템플릿 매칭(template matching), 광 뉴럴 네트워크(optical neural networks), 그리고 광 배선(optical interconnects)등의 응용분야에 매우 중요한 역할을 하게 되었다. 그후 차세대 메모리로서 갖추어야할 대용량의 정보저장 능력과 자연스럽게 부합됨으로써 광 메모리의 구현에 필수적인 기술로 인식되고 있다.^{1,2,3)}

그러나 이러한 매질이 가지고 있는 근본적인 문제점은 동일한 에너지로 저장된 홀로그램들이 서로 다른 밝기의 영상으로 재생된다는 것이다. 이러한 문제점은 빛의 연속적인 노출에 의해 이전에 기록된 홀로그램이

* 正會員, 忠北大學校 情報通信工學科

(Dept. of Computer & Communication Eng., Chungbuk Nat'l Univ.)

** 正會員, 順天大學校 電子工學科

(Dept. of Electronics Engineering, Suncheon Nat'l Univ.)

接受日字:1998年11月6日, 수정완료일:1999年9月27日

전하의 재분포(charge redistribution)에 따라 지수함수적으로 지워지기 때문이다. 따라서 동일한 장소에 다중 홀로그래프를 중첩하게 되면 먼저 기록된 홀로그래프는 새로운 홀로그래프가 기록되는 동안에 부분적으로 지워지게 된다.^[4]

이러한 문제점을 해결하기 위한 방법들로는 두 개의 기록매질을 이용하여 주기적인 복사(copying)를 수행함으로써 안정된 홀로그래프를 얻거나 전기적인 루프(electronic loop) 및 전광학적인 루프(all-optical loop)를 추가하여 메모리로부터 재생된 영상을 임계값(threshold) 및 증폭(amplified) 처리를 한 후 피드백을 통해 결정에 기록하는 메모리 refreshing 등이 있다^[5,6,7]. 이러한 방식들은 추가적으로 루프나 피드백을 위한 부가적인 처리과정이 필요하며 두 개의 결정을 사용하기 때문에 전체 시스템이 복잡해지는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 빛의 연속적인 노출로 인해 홀로그래프가 지워지는 것을 보상하기 위해서 특별한 추가적인 구성없이 균일한 회절 효율을 얻을 수 있는 노출시간 계획(exposure time schedule)을 사용하였다. 이러한 시도는 W. Burke와 P. Sheng이 식 (1)에 따라 18개의 홀로그래프를 광굴절 결정에 중첩 기록하였으며, 이와 비슷한 시도가 A. Strasser 등에 의해 식 (2)와 같이 수행되었지만 21개의 홀로그래프를 기록하는데 그쳤으며 기록시간이 급격하게 0에 수렴함에 따라 더 많은 수의 홀로그래프는 기록하지 못했다.^[8,9]

$$t_M = \frac{t_1}{1 + (N-1)/\beta} \quad (1)$$

$$t_M = t_1 \exp\left[\frac{-(N-1)t_r}{2\tau_e}\right] \quad (2)$$

여기서, t_1 은 첫 번째 홀로그래프의 기록시간, β 는 기록시간과 지움상수의 비 (τ_e/t_r), M 은 노출 차수이다.

따라서 본 논문에서는 이 후에 개선된 수식들을 정리하여 각각의 수식이 갖는 특성을 분석하고 실험을 통해 높은 회절효율과 저장밀도를 높이기 위해 두 입사빔의 세기비에 따른 회절 효율과 고분해능의 시스템을 이용하여 정밀하게 다중화 각도를 측정하였다. 그리고 균일한 회절효율과 왜곡이 적은 영상을 얻기 위해서 시간상수 값의 변화, 초기 및 전체 기록 시간 등을 고려하여 500개 이상의 홀로그래프에 노출시간 계획을 적용하였다.

II. 노출시간 계획 이론

광굴절 결정에 신호빔과 기준빔(두빔의 세기가 균일하다고 가정) 결합에 따라 가장 간단한 회절 격자를 기록할 때, 임의의 기록시간 t 동안에 기록되는 격자의 진폭은 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[3,10,17]

$$A = A_0[1 - \exp(-t/\tau_r)] \quad (3)$$

여기서, A 는 노출 기록시간 동안에 기록되는 격자의 진폭, A_0 는 격자의 포화진폭(saturation amplitude), 그리고 τ_r 은 광굴절 결정의 기록 시간상수(recording time constant)로 τ_r 는 기록매질의 종류와 입사빔의 세기에 의존하는 시간상수이다. 기록시간 t 동안에 다중화를 통해 두 번째 홀로그래프가 중첩되어지면 전하의 재분포(charge redistribution)에 의하여 먼저 기록된 홀로그래프의 진폭 A 는 식(4)의 지수항에 따라 홀로그래프의 일부분이 지워지게 된다. 따라서 최대 회절효율로 많은 수의 홀로그래프를 기록하는 것이 매우 어렵다는 것을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} A' &= A \exp(-t'/\tau_e) \\ &= A_0[1 - \exp(-t/\tau_r)] \exp(-t'/\tau_e) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 t' 는 두 번째 홀로그래프의 기록시간, τ_e 는 광굴절 결정의 지움시간 상수(erasing time constant)이다. 그러므로 M 개의 홀로그래프의 회절 효율은 아래 식과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} A_1 &= A_1(t_1) \exp[-(t_2 + t_3 + \dots + t_M)/\tau_e] \\ A_2 &= A_2(t_2) \exp[-(t_3 + t_4 + \dots + t_M)/\tau_e] \\ &\vdots \\ A_m &= A_m(t_m) \exp\left[-\sum_{m'=m+1}^M \frac{t_{m'}}{\tau_e}\right] \\ &= A_0[1 - \exp(-t_m/t_r)] \exp\left[-\sum_{m'=m+1}^M \frac{t_{m'}}{\tau_e}\right] \\ A_{m+1} &= [1 - \exp(-t_{m+1}/t_r)] \end{aligned} \quad (5)$$

마지막 홀로그래프는 전하 재분포에 따라 지워지지 않음을 알 수 있다. 위 식으로부터 균일한 홀로그래프를 얻기 위해서는 모든 m 에 대하여 $A_m = A_{m+1}$ 을 만족

해야 하므로,

$$[1 - \exp(-\frac{t_m}{\tau_r})] \exp\left[-\frac{t_{m+1}}{\tau_e}\right] = \left[1 - \exp\left(-\frac{t_{m+1}}{\tau_e}\right)\right] \quad (6)$$

여기서 t_m 과 t_{m+1} 은 각각 m 번째와 $m+1$ 번째 홀로그래ムの 기록시간을 나타낸다. 먼저 수식을 간단히 하기 위해 두 시간상수인 τ_e 와 τ_r 이 같다고 가정하면, m 번째 홀로그래ムの 기록시간 t_m ($t_m \geq 2$)은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.^[11]

$$t_m = \tau \ln \left[\frac{1+(m-1)\kappa}{1+(m-2)\kappa} \right], \quad (7)$$

여기서

$$\kappa = 1 - \exp(-t_1/\tau) < 1$$

초기 기록시간 t_1 이 정해짐에 따라 t_2, t_3, \dots, t_m 값들은 식 (7)으로부터 차례로 구해지며 κ 는 매질의 시간 응답 곡선에서 초기 시작점을 결정한다. 식 (7)에 따라 홀로그래ム을 기록한 후, 각각의 홀로그래ム들에 대한 진폭과 총 기록시간을 시간상수와 홀로그래ム 수 M 으로 나타내었다.

$$\frac{A_0 \kappa}{1+(M-1)\kappa} \approx \frac{A_0}{M},$$

$$T = \sum_{i=1}^M t_i = \tau \ln \left[\frac{1+(M-1)}{1-\kappa} \right] \approx \tau \ln M \quad (8)$$

두 기록시간 상수가 $\tau_r \neq \tau_e$ 라면 기록시간 t_m 은 식 (6)으로부터 다음과 같이 구해진다.^[2]

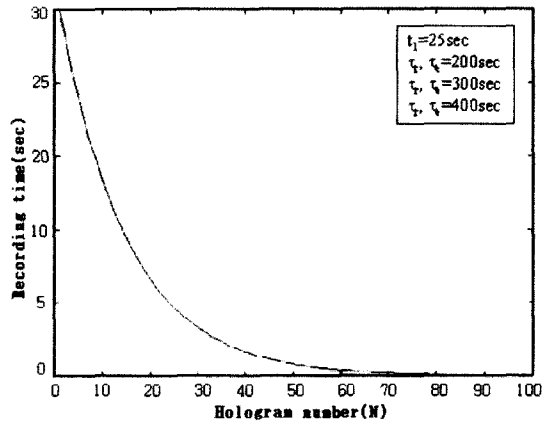
$$t_m = -\tau_r \ln \{ 1 - \exp(t_{m+1}/\tau_e) \} + \exp \left[t_{m+1} \left(\frac{1}{\tau_e} - \frac{1}{\tau_r} \right) \right] \quad (9)$$

식 (9)로부터 t_m 을 구하기 위해서는 먼저 마지막 기록시간 t_{m+1} 을 통해 t_m 을 구하고 다시 $t_{m-1}, t_{m-2}, \dots, t_2, t_1$ 의 역순으로 구한다. 마지막 홀로그래ムの 기록시간이 0값에 근접하지 않도록 결정할 수 있어 기록시간을 얻기에 편리하다. 만약, t_1, t_2, \dots, t_m 에 따라 기록시간을 구할 경우 식 (10)과 같이 구할 수 있다.^[3]

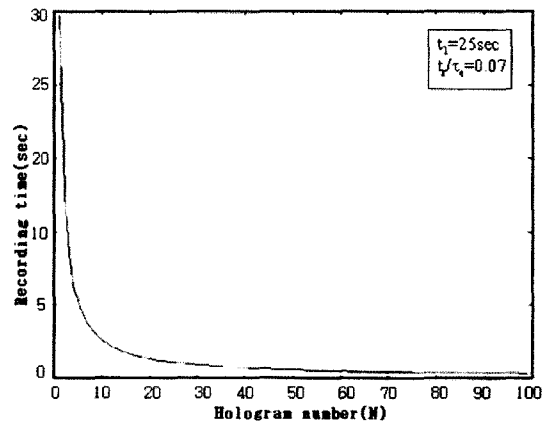
$$t_m \approx \frac{\tau_e}{m} \quad (10)$$

M 개의 홀로그래ム을 기록한 후의 크기는 식 (11)으로 나타내어진다.

$$A_m = A_0 [1 - \exp(-t_m/\tau_r)], \quad t_m = \tau_e/m \quad (11)$$



(a)

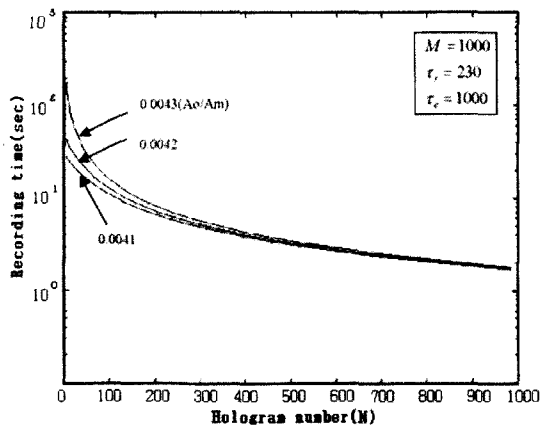


(b)

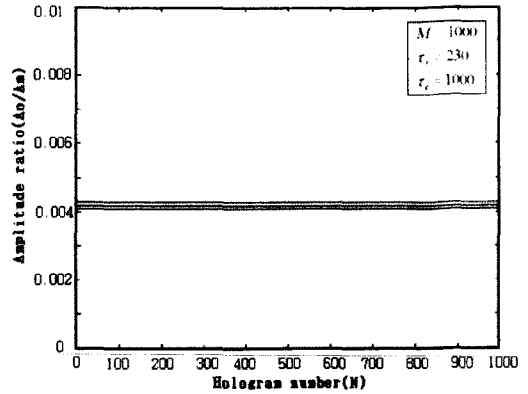
그림 1. 노출 시간 곡선: (a) W. Burke등에 의해 제안된 식; (b) A. Strasser등에 의해 제안된 식
Fig. 1. Exposure time graph: (a) an equation supposed by W. Burke et al.; (b) a equation supposed by A. Strasser et al.

이제 이들 수식을 살펴보면, 식(1)과 식(2)는 그림 1에 나타난 것처럼, 기록하고자 하는 홀로그래ム 개수가 불과 수십 개밖에 안 되는데도 급격하게 0으로 수렴하

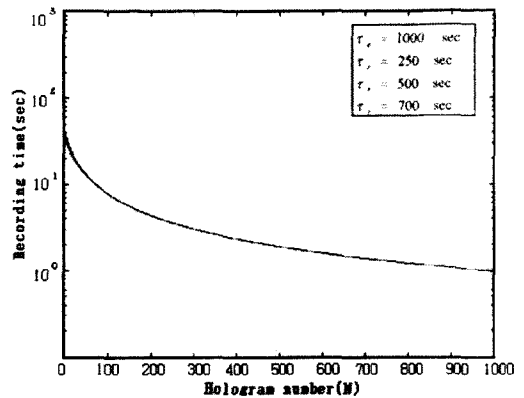
고 있다. 따라서 수백 개의 홀로그램을 기록하기에는 부적합함을 알 수 있다. 이후에 개선된 수식들은 모두 식(4)와 식(6)을 바탕으로 하고 있지만, 조금씩 차이를 가지고 있다. 먼저 식(7)의 경우는 두 시간 상수가 동일할 때만 사용이 가능하다. 하지만 LiNbO_3 결정을 사용하는 광 메모리와 같이 90° 구조를 사용하는 경우에는 두 시간 상수가 대칭으로 나타나지 않기 때문에 사용에 제한을 받는다. 반면에 식(10)은 최초의 노출 시간이 첫 번째 홀로그램에서부터 적용되며, 기록 시간상수와는 무관하게 지움 상수에 절대적으로 의존하는 것을 알 수 있다. 하지만, 이 식의 경우에도 일단 지움 상수가 결정되면 노출 시간계획은 기록하고자 하는 개수 m 에 따라 하나의 곡선이 결정되기 때문에 유연성에 상당히 제한을 받게 된다. 따라서 본 논문에서는 마지막 홀로그램의 노출 시간을 결정하여 뒤에서부터 역순으로 구하고, 전체 회절 효율을 계산하기 쉽고 초기 노출 시간과 전체 노출 시간을 조절할 수 있는 식(9)을 적용하였다. 그림 2의 (a)는 식(9)의 특성을 알아보기 위해 동일한 홀로그램 개수에 따른 노출 시간의 변화를 나타내었다. 곡선의 위 부분에서는 기록시간이 많은 차이를 보이고 있지만 아래 부분에서는 거의 차이가 나지 않음을 알 수 있다. 즉, 회절 효율을 높이기 위해 초기 노출 시간을 높여더라도 그림 2. (b)에 나타난 것처럼, 전체적인 회절 효율의 변화는 매우 미세함을 알 수 있다. 또한 그림 2. (c), (d)는 두 시간상수인 τ_r 와 τ_e 에 따른 곡선의 변화를 나타낸 것으로 노출 곡선이 기록 상수의 변화보다는 지움 상수의 값에 지배적임을 알 수 있다.



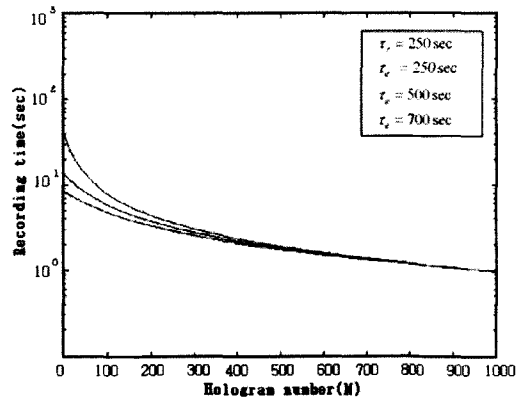
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 2. 시간 상수에 따른 노출 시간 분석: (a) 초기 기록 시간에 따른 변화; (b) 초기 기록 시간에 따른 회절 효율; (c) 기록 시간 상수에 따른 변화; (d) 지움 상수에 따른 변화

Fig. 2. Analyzing exposure time according to time constant: (a) variation due to initial recording time; (b) diffraction efficiency due to initial recording time; (c) variation due to recording time constant; (d) variation due to erasing time constant.

이와 같은 특징을 고려하여 LiNbO₃ 결정의 특성과 노출 시간에서 고려해야할 초기 기록 시간 및 전체 노출 에너지에 따른 다중홀로그래프의 영향을 고려하여 실험을 수행하였다.

Ⅲ. 각도 선택성 및 특성 실험

노출시간 계획에 따라 홀로그래프를 중첩시킬 때, 두 입사빔의 세기비에 따른 회절효율의 변화를 알아보기 위해 그림 3과 같은 실험을 구성하였다. 중심파장이 514.5nm인 LEXEL Ar 레이저를 이용하여 Fe가 0.015wt% 도핑된 Deltronic사의 LiNbO₃에 격자를 기록하였다. 총 입사의 세기는 42[mW/cm²]였고 결정면에 입사되는 기준빔과 신호빔의 각도는 최대 결합계수를 갖는 12°로 조정하였다. 결정면 앞에 설치된 감쇄기(attenuator)를 사용하여 두 빔의 세기비 $\beta = I_R / I_S$ 를 0.01~400 범위에서 변화시켜 기록하였으며, I_R 과 I_S 는 결정을 통과하기 전에 측정된 세기이다. 기록된 회절 격자의 주거나 강도는 입사각과 세기비에 따라 달라지며 두 빔 사이의 결합면적이 넓을수록 안정되게 기록된다.

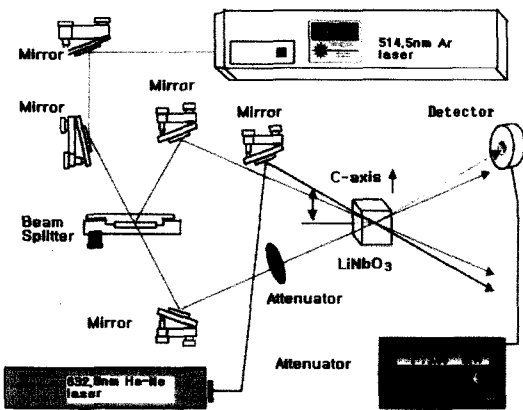


그림 3. 회절 효율을 측정하기 위한 실험 구성도
Fig. 3. Experimental setup for diffraction efficiency measurement.

세기비에 따라 기록된 격자의 회절 효율은 파장이 633nm인 He-Ne 레이저를 사용해 측정하였다. 광굴절 결정에 기록된 격자는 브래그 회절을 일으키기 때문에 입사빔의 각도(half angle)는 브래그 조건을 만족하는 7.39°로 조절하였다. 격자에서 입사빔이 충분히 회절되

도록 빔 폭을 기록빔보다 적게 하였으며 효율을 측정하는 동안 격자가 지워지지 않도록 0.9[mW/cm²]의 낮은 세기로 입사시켰다. 그림 4는 세기비를 바꾸어가면서 회절 효율 $\eta (= I\eta / IR(L))$ 를 측정한 결과이다. $\beta=5$ 일 때 최대값을 가지며 β 가 증가함에 따라 η 가 서서히 감소하고 있음을 알 수 있다. 여기서, $IR(L)$ 은 결정을 통과한 빔의 세기이며 $I\eta$ 는 격자에 의해 회절된 빔의 세기이다.

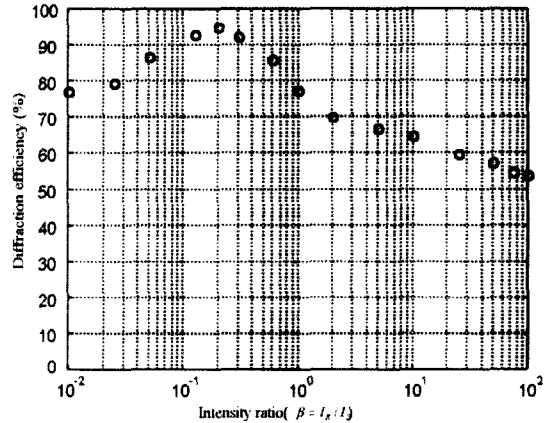


그림 4. 세기비에 따른 회절 효율
Fig. 4. Diffraction efficiency due to intensity ratio.

각도 다중화를 통해 LiNbO₃과 같은 광굴절 결정에 부피형 홀로그래프를 중첩 기록할 경우, 두 홀로그래프 간섭을 일으키지 않는 각도 선택도는 식 (12)로부터 구할 수 있다.^[12]

$$\Delta \theta_R = \frac{\lambda \cos \theta_S}{nL \sin(\theta_R + \theta_S)} \quad [radian] \quad (12)$$

여기서, λ 는 광원의 파장, n 은 기록 매질의 굴절률, L 은 광굴절 결정의 두께, θ_R 과 θ_S 는 각각 기준빔과 신호빔의 입사각을 나타낸다. 식 (12)에 그림 5는 실험 조건인 $\lambda = 514.5nm$, $n = 2.3$, $L = 10mm$, $\theta_R = 90^\circ$, $\theta_S = 0^\circ$ 을 대입하여 구한 값은 $\theta_R \approx 0.00128^\circ$ 이다.

그림 5는 각도에 따른 단일 홀로그래프의 효율 변화를 측정함으로써 두 홀로그래프간의 간섭을 일으키지 않는 각도를 측정하기 위한 실험도이다. 두 빔의 입사각은 90°, 총 입사빔의 세기를 55[mW/cm²], 기준빔과 신호빔의 세기비는 5:1인 각각 20.03[mW/cm²], 4[mW/cm²]로 조정함으로써 가장 높은 회절 효율에서 격자를 기

록시켰다. 기준빔의 폭은 8mm×2.5mm로 하였으며, 위의 세기 조건에서 기록상수와 지움상수는 각각 $\tau_r=220$ 초, $\tau_e=800$ 초로 측정되었다. 기록된 격자는 130°에서 fixing되었고 온도 상승 시간과 유지 시간은 각각 1시간으로 조정하였다. 이렇게 fixing된 결정을 PC로 제어되며 감속비를 위해 기어가 부착되지 않은 정밀한 스텝모터(최대 분해능 0.0028°)가 장착된 회전스테이지 위에 놓고 developing을 수행하였다. 격자가 안정되었을 때 회절효율에 대한 변화량이 모터의 회전 각도에 따라 측정되었다. 스텝모터는 용이한 각도제어와 속도 제어, 빠른 시간응답과 같은 장점을 가지고 있지만 회전 방향을 바꾸게 되면 backlash로 인해 정지 오차가 발생하게 된다. 따라서 효율을 측정할 때는 최대 분해능으로 반 시계방향으로 유지하면서 변화량을 측정하였고 동일한 절차를 4회 반복하였다.

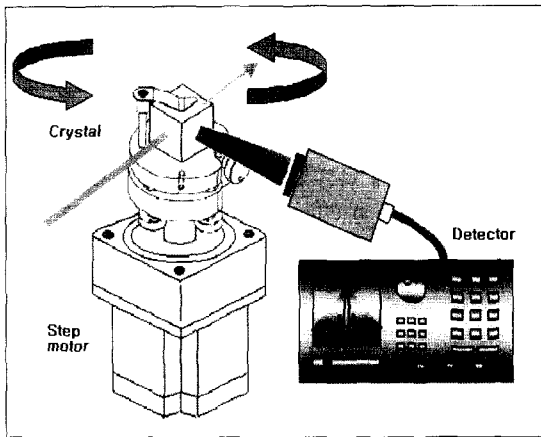


그림 5. 각도 선택도를 측정하기 위한 실험도
Fig. 5. Experimental setup for angular selectivity measurement.

평균값을 정규화한 그래프를 그림 6에 나타내었다. 모터의 스텝보다 이론상의 각도 선택도가 작기 때문에 오차한계는 0.0014° 안에서 추정된다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 포락선 형태가 싱크함수 형태를 띠고 있으며 첫 번째 최소값이 두 번째 스텝 (0.0056°)과 세 번째 스텝 (0.0084°) 사이에 있음을 알 수 있다. 또한 0점으로부터 첫 번째 스텝 (0.0028°)에서 최대값의 1/2이하임을 알 수 있으며 주엽(main lobe)과 두 번째 부엽(side lobe)의 비는 약 14:1로 부엽에 의한 간섭은 무시할 수 있다. 최소값을 $0.007 \pm 0.0014^\circ$, 최대값의 1/2인

각도를 0.0028°로 추정할 때 이론값인 0.00128°에 상당히 근접해 있음을 알 수 있었으며 실제 영상 재생에서 0.0056°에서 가능함을 보여준다.

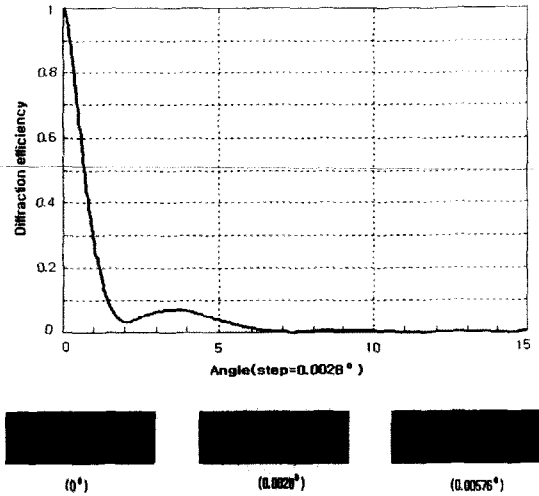


그림 6. 각도에 따른 회절 효율
Fig. 6. Diffraction efficiency due to angle.

IV. 노출시간 계획 실험 및 분석

그림 7은 기록 시간에 따라 홀로그램을 중첩시키기 위한 실험 구성도이다. 기록매질은 0.015wt%의 철이온이 도핑된 1cm×1cm×1cm 볼륨의 LiNbO₃ 결정을 사용하였다. Ar Laser에서 나온 빔은 빔분리기에서 동일한 세기로 나누어진 다음 결정면에서 대하여 $\theta = 90^\circ$ 로 입사된다. 신호의 인가 없이 SLM을 통과한 신호빔과 기준빔의 세기비는 1:5로 하였다. 총 입사 세기는 $55[\text{mW}/\text{cm}^2]$ 이었고, 기준빔과 신호빔의 세기는 각각 $20.03[\text{mW}/\text{cm}^2]$ 와 $4[\text{mW}/\text{cm}^2]$ 로 조정하였다. 8mm×8mm 사각형 개구를 통과한 기준빔은 스텝모터에 설치된 미러에 의해 3스텝 (0.0084°)씩 정밀하게 각도 다중화되었다. 회전 오차는 모터에 설치된 미러에서 발생하므로 미러를 회전축의 중심에 위치시킴으로서 각도 어긋남에 따른 회전 오차를 보정하였고 회전속도와 각도는 프로그램에 따라 PC의 병렬포트를 통해 제어되었다. 기준빔의 넓이는 8mm×2.5mm로 하여 격자가 강하게 기록되도록 하였으며, fixing은 수행하지 않았다. 그림 8에 실제로 구성된 실험 사진을 나타내었다.

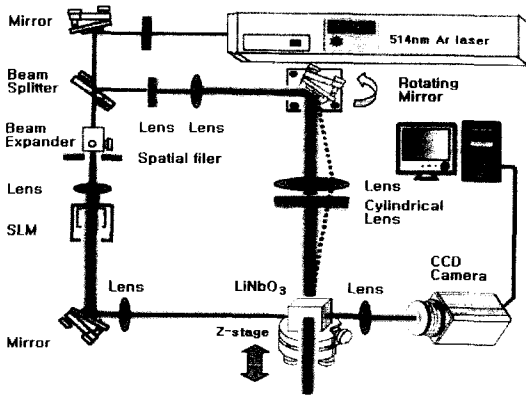


그림 7. 다중 홀로그래를 기록하기 위한 실험도
 Fig. 7. Experimental setup for multiple hologram recording.

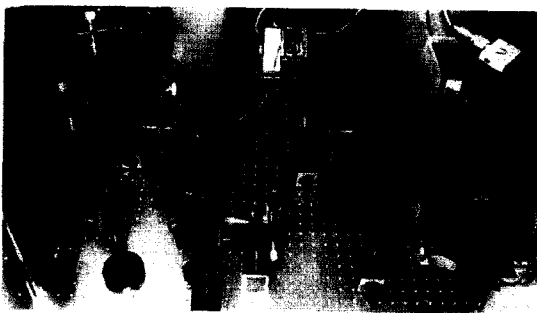


그림 8. 다중 홀로그래를 위한 실험사진
 Fig. 8. Photograph of optical system for recording holograms.

먼저 동일한 개수의 홀로그래를 기록한 다음 초기 기록시간과 총 노출시간에 따른 영상 왜곡을 알아보기 위해서 100개의 아날로그 영상을 800×600 SVGA 해상도를 갖는 EPSON사의 TFT LCD에 입력하였다. 동일한 홀로그래를 계속하여 증가된 노출 시간을 적용하게 되면, 또는 동일하게 기록 시간을 고정하고 홀로그래 개수를 증가시키면 그림 9와 같이 수직에서 고려하지 않았던 광굴절 패닝(fanning)이 발생하는 것을 확인하였다. 이러한 현상은 기록 개수와 영상 왜곡에 큰 영향을 받는 광메모리의 성능에 중요한 요소로 작용할 수 있다. 따라서 패닝의 영향을 줄이기 위해 패닝을 일으키는 총 노출 에너지를 측정하여 노출 시간을 적용하였다. 즉, 그림 2. (c),(d)와 같이 초기 기록시간 변화 폭에 비해 평균 회절 효율의 변화가 작다는 점을 착안하여 전체 노출 에너지(E_{total})가 패닝을 일으키는 에너지($E_{fanning}$)를 넘지 않도록 초기 기록시간을 조절함으

로서 영상왜곡을 방지할 수 있었다. 이러한 패닝 현상은 높은 에너지에 노출되었을 때 더 빨리 일어난다^[13]. 패닝 현상을 방지하기 위한 또 다른 방법으로는 강한 세기와 매우 짧은 주기의 펄스를 갖는 광원의 사용이 보고된바 있다.^[14,15]

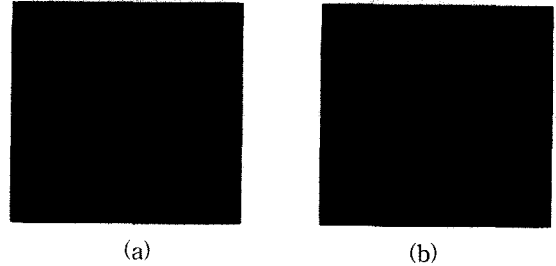


그림 9. 노출 에너지에 따른 영상 왜곡: (a) $E_{total} > E_{fanning}$; (b) $E_{total} < E_{fanning}$
 Fig. 9. Image distortion due to the exposure energy: (a) $E_{total} > E_{fanning}$; (b) $E_{total} < E_{fanning}$.

상수값의 변화에 따른 회절효율의 변화는 그림 10에 보여주고 있다. 노출 수식들에서 알 수 있듯이 기록 시간은 기록 개수 M 과 기록 영역이 결정되었을 경우 기록 상수의 변화값에 절대적으로 의존하는 것을 알 수 있다. 실험결과에서 지움상수가 클 경우($\tau_e=1000\text{sec}$) 나중에 기록된 영상이 더 밝게 재생되었고, 반면에 지움상수가 적을 경우($\tau_e=600\text{sec}$) 초기에 기록된 홀로그래가 계속 강하게 남아 있어 나중에 기록된 홀로그래가 더 밝게 재생됨을 알 수 있다.

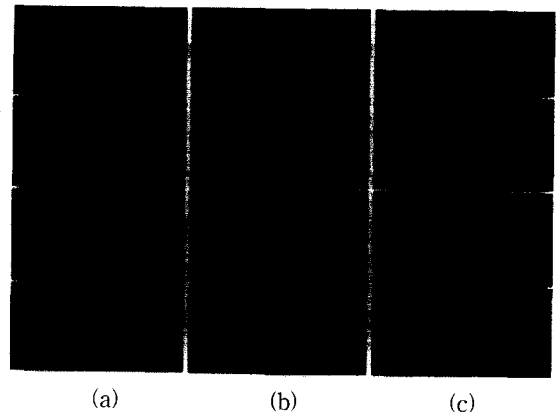


그림 10. 지움상수값에 따른 효율 변화:
 (a) $\tau_e = 1000 \text{ sec}$; (b) $\tau_e = 800 \text{ sec}$;
 (c) $\tau_e = 600 \text{ sec}$
 Fig. 10. Diffraction efficiency due to an erasure time constant: (a) $\tau_e = 1000 \text{ sec}$;
 (b) $\tau_e = 800 \text{ sec}$; (c) $\tau_e = 600 \text{ sec}$.

따라서 단순한 격자가 아닌 영상을 기록할 경우 큰 수의 M에 대한 균일한 홀로그램과 높은 회절 효율을 얻기 위해서는 상수값의 변동이 적어야하며, 고품질의 영상을 얻기 위해서는 짧은 노출 시간을 가져야 되므로 두 변수값 사이의 trade off가 필요하다. 실제로 정량적인 결과를 측정하기 위해 각도 다중화만을 이용하여 $0.84^\circ (100 \times 0.0084^\circ)$ 의 각도로 노출 곡선에 따라 100개의 홀로그램을 기록하였다. 실험의 일관성을 유지하기 위해 그림 3의 동일한 조건에서 CCD 카메라를 제거하고 주위에서 산란되는 빛이 들어오지 않도록 아이리스를 부착한 Newport사의 1835-C 검출기를 설치하였다. 0.0084° 의 각도를 유지하면서 순차적으로 기록한 다음 0.0028° 의 가장 낮은 각도로 회전시키면서 회절 효율을 측정하였다. 식 (9)에 두 시간 상수 $\tau_r=220$ 초, $\tau_e=800$ 초를 대입하여 구한 노출 시간과 100개의 홀로그램에 대한 회절 효율의 변화값을 그림 11에 나타내었다. 실험 결과에서는 평균회절 효율에 대한 최대,

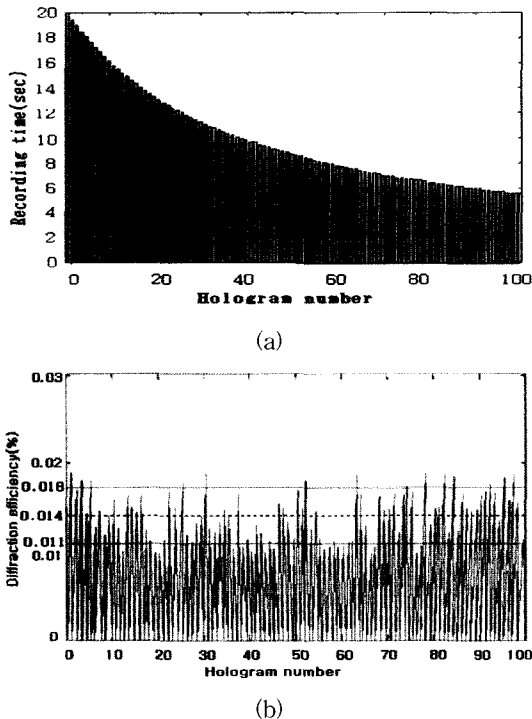


그림 11. 노출 시간과 100 홀로그램의 회절 효율 변화: (a) 100개에 대한 노출 시간; (b) 100개에 대한 회절 효율

Fig. 11. Measuring diffraction efficiency of hologram: (a) exposure time about 100 holograms; (b) diffraction efficiency about holograms.

최소값의 변화는 $0.014\% + 0.005\%$ 의 값을 나타냈으며, 이중에 70개는 0.035% (전체 회절 효율에 24%)의 변화 폭 안에 있었다. 균일도가 다소 떨어지는 것은 기록된 100개의 홀로그램 효율을 측정할 때, 차트 기록기(chart recorder)를 사용하지 않고 광 검출기를 사용하여 100 번째부터 하나씩 효율을 측정하는 동안의 연속적인 노출과 0.0084° 의 높은 각도 선택도에 의한 저장, 그리고 이로 인한 모터의 위치오차로 생각되며 이를 개선한다면 더 높은 균일도를 얻을 것으로 기대된다.

실험 결과를 토대로 동일한 실험 구성에서 두 홀로그램간의 각도 간격을 0.0084° 로 제어하고 영상을 SLM에 입력하기 위해 두 대의 컴퓨터를 통해 동기를 맞추었다. 렌즈의 수차에 의한 영상 왜곡을 방지하기 위해 수차 보정이 가능한 렌즈를 이용하여 CCD 카메라를 통해 홀로그램을 재생하였다. 각도 다중화만을 통해 330개의 영상 데이터(초기 기록 시간:25초)를 2.77° 안에 기록하였으며 기록 위치를 2.5mm이동함으로써 총 500개 이상의 문자 데이터와 영상 데이터를 노출시간 계획에 따라 기록할 수 있었다^[6]. 그림 12에는 330개에 대한 기록시간과 공간 다중화에 따라 기록된 500개 이상의 홀로그램들 중에 영상 및 문자 데이터의 일부분을 나타내었다. 그림과 같이 긴 노출시간에 따른 광굴절 패닝에 의한 영상 왜곡이 적고 그림 11에서 얻은 수치적인 변화에 비해 시각적으로 균일하고 깨끗한 영상을 얻었다.

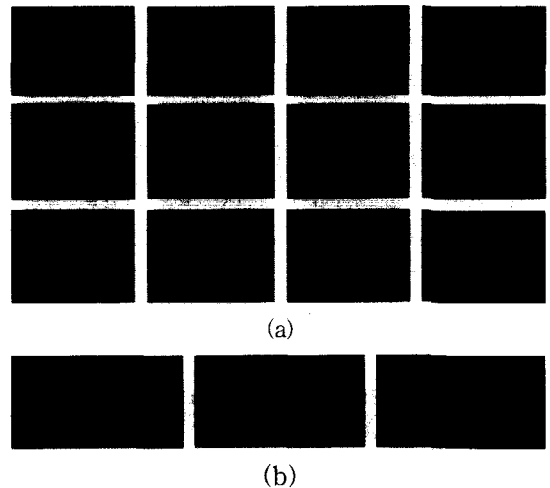


그림 12. 330개의 홀로그램과 노출시간 재생 영상들: (a) 동영상 데이터 재생; (b) 문자 데이터 재생
Fig. 12. Reconstruction of analog hologram: (a) retrieving of moving picture; (b) retrieving of letter data.

V. 결 론

본 논문에서는 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}(0.015\text{wt}\%)$ 광굴절 결정에 다중홀로그래프를 기록하기 위해 몇 가지 이론적인 수식의 특성을 분석하였고 실험을 통해 많은 수의 홀로그래프를 기록하는데 있어 고려해야할 초기 기록시간, 전체 노출 에너지, 패닝 현상, 기록 및 지움 시간 상수등을 고려함으로써 각도 및 공간 다중화를 통해 500개 이상의 홀로그래프를 기록하였다. 몇 가지 수식을 분석결과 단순히 홀로그래프의 개수만을 증가시킴으로서 적합하지 않은 수식들을 찾을 수 있었고, 노출 곡선의 기울기 변화는 기록 상수보다 지움상수의 변화 값에 지배적이었으며, 기록 개수가 증가할수록 초기 노출시간의 변화에 비해 전체 회절 효율의 변화는 미미했다. 또한 실험을 통해서도 동일한 현상을 볼 수 있었으며 단순한 홀로그래프 격자가 아닌 영상을 기록할 때는 수식에서 언급되진 않았지만, 적은 수의 홀로그래프보다 기록하고자 하는 홀로그래프 개수가 증가할 때 패닝 현상이 심각하게 나타났으며, 이로 인해 영상의 질이 매우 떨어졌다. 본 논문에서는 패닝 현상을 방지하기 위해 기록에 사용한 광원의 세기, 초기 기록시간 및 전체 노출 에너지를 고려하여 패닝을 일으키지 않도록 과다 노출을 방지함으로써 개선된 영상을 얻을 수 있었다. 향후 홀로그래프 고정(fixing), 측정 방법, 기록 및 재생 방법 등을 보완함으로써 보다 균일하고 깨끗한 다중홀로그래프를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 다중홀로그래프 정보저장 기술은 대용량의 정보저장을 구현하기 위한 광메모리에 필수적인 기술일 뿐만 아니라 광 네트워크, 광 배선, 광 패턴 인식 등과 같은 다양한 응용 분야에도 적용될 수 있다.

참 고 문 헌

[1] A. B. Vander Lugt, IEEE Trans. Inf. Theory IT-10, pp. 139, 1964.
 [2] S. Wu, Q. Song, A. W. Mayers, D. A. Gregory, and F. T. S. Yu, "Reconfigurable interconnections using photorefractive holograms," Appl. Opt., vol. 29, pp. 1118-1125, 1990.
 [3] D. Psaltis, D. Brady, and K. Wagner, "Adaptive

optical networks using photorefractive crystals," Appl. Opt., vol. 27, pp. 1752-1759, 1988.

- [4] D. L. Staebler, J. W. Burke, W. Phillips, and J. J. Amodei, "Multiple storage and erasure of fixed holograms in Fe-doped LiNbO_3 ," Appl. Phys. Lett., vol. 26, pp. 182, 1975.
 [5] D. Brady, K. Hsu, and D. Psaltis, "Periodically refreshed multiply exposed photorefractive holograms," Opt. Lett., vol. 15, no. 14, pp. 817-819, 1990.
 [6] H. Sasaki, Y. Fainman, J. E. Ford, Y. Taketomi, and S. H. Lee, "Dynamic photorefractive optical memory," Opt. Lett., vol. 16, pp. 1874, 1991.
 [7] S. Boj, G. Pauliat, and G. Roosen, "Dynamic holographic memory showing readout, refreshing, and updating capabilities," Opt. Lett., vol. 17, no. 6, pp. 438-440, 1992.
 [8] W. J. Burke and P. Sheng, "Crosstalk noise from multiple thick-phase holograms," J. Appl. Phys., vol. 48, pp. 681-685, 1977.
 [9] A. C. Strasser, E. S. Maniloff, K. M. Johnson, and S. D. D. Goggin, "Procedure for recording multiple exposure hologram with equal diffraction efficiency in photorefractive media," Opt. Lett., vol. 14, no. 1, pp. 6-8, 1989.
 [10] Y. Taketomi, J. E. Ford, H. Sasaki, J. Ma, Y. Fainman, and S. H. Lee, "Incremental recording for photorefractive hologram multiplexing," Opt. Lett., vol. 16, no. 22, pp. 1774-1776, 1991.
 [11] H.-Y. S. Li, and J. Hong, "Nonuniformity in hologram diffraction efficiency from time-constant error in the recording schedule," J. Opt. Soc. Am., B 13, pp. 894-899, 1996.
 [12] J. Hong, I. McMichael, T. Y. Chang, W. Christian, and E. G. Paek, "Volume holographic memory system: techniques and architectures," Opt. Eng., vol. 34, no. 8, pp. 2193-2203, 1995.
 [13] 안준원, 최연숙, 김남, 이권연, 강석열, "Fe- LiNbO_3 결정에서 광굴절격자의 비균일성에 의한 광학적 잡음의 영향 분석," 전자공학회지 제35권 D편 제3호, pp.91-97, 1998

[14] D. Anderson and D. Lininger, "Dynamic optical interconnects," *Appl. Opt.*, vol. 26, pp. 5031-5038, 1987.

[15] F. H. Mok, M. C. Tackitt, and H. M. Stoll, "Storage of 500 high-resolution holograms in a LiNbO3 crystal," *Opt. Lett.*, vol. 16, no. 8, pp. 605-607, 1991.

[16] 신동학, 장주석, "회전, 각, 그리고 공간다중화 방법을 결합사용한 홀로그램 기록 시스템," *한국광학회지* 제9권 제3호, pp. 199-204, 1998

[17] 설문용, 윤태훈, 김재창, "노출계획에 의한 다중 홀로그램의 기록 및 재생," *Photonics Conference '97*, pp. 193, 1997

저 자 소 개



金 正 淮(正會員)
 1969년 4월 18일생. 1997년 2월 순천대학교 전자공학과(공학사). 1999년 2월 충북대 정보통신공학과(공학석사). 1999년 3월~현재 충북대학교 정보통신공학과 박사과정. 주관심 분야는 Optical Memory, Optical

Signal Processing, Optical Device, Holography

金 男(正會員) 第 33卷 A編 第 3號 參照

李 權 淵(正會員) 第 33卷 D編 第 5號 參照