

論文98-35D-12-10

# 각·공간 복합 다중화 체적 홀로그래픽 메모리 시스템

## (Angular-Spatial Multiplexed Volume Holographic Memory System)

姜勳宗\*, 李丞玄\*, 韓鐘旭\*\*, 金恩洙\*

(Hoon Jong Kang, Seung Hyun Lee, Jong Wook Han, and Eun Soo Kim)

### 요 약

체적홀로그래프의 저장용량을 향상시키기 위해서 여러 가지 다중화 기법이 제안되고 있는 가운데, 본 논문에서는 각다중화와 공간다중화를 병행한 복합 다중화 시스템을 구현하였다. 기준파의 각도 및 공간상의 위치를 변화시키는 방법으로 스텝 모터를 사용하여 다중 홀로그래프를 기록할 수 있었다. 기록 시간 스케줄에 의하여 노출 시간을 조절하므로써 기준파와 물체파 간의 간섭 패턴을 홀로그래프에 기록하였다. 3층 300개의 영상을 한 개의  $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 에 기록하였으며 실험 결과를 보였다.

### Abstract

Many multiplexing techniques are proposed for high storage densities in a volume hologram. In this paper, we present a hybrid angularly and spatially multiplexed volume holographic memory system. Multiple holograms are recorded by using reference and object waves with different incident angles and positions that are changed by step motors. A hologram is written by exposing the crystal with recording time schedule to the interference pattern of the object beam and a reference plane wave. Finally, we show experimental results of the storage of three layers of 300 multiplexed holograms in a  $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$  crystal.

### I. 서 론

21세기 고도 정보화 사회에서의 정보 통신 량은 우리의 상상을 훨씬 초월할 것으로 예측되며, 이러한 방대한 정보량을 보다 효과적으로 기록·처리하기 위해서는 새로운 개념의 데이터 저장 기술이 요구되고 있다. 체적 홀로그래피로 알려진 광 기록 기술은 각선탕

만한 크기의 광굴절매질에 극 초대용량의 데이터 저장 용량과 저장된 정보를 초고속 병렬 액세스할 수 있는 장점을 동시에 제공할 수 있어 차세대 정보 저장 기술 중의 하나로 분석되고 있다.<sup>[1-5]</sup>

일반적으로, 홀로그래픽 광 메모리 시스템은 두 개의 레이저 빔(물체파와 기준파)이 광굴절 매질 내에서 간섭하면 광굴절 효과(photorefractive effect)에 의해 매질 내에 격자(grating) 패턴이 형성되므로 저장된다. 즉, 레이저빔이 공간 광 변조기(spatial light modulator)에 디스플레이 된 데이터를 통해 조사된 물체 파가 다수의 각도(또는 파장, 위상 부호)로 정렬된 기준파와 광굴절 기록 매질에서 만나게 됨으로써 수천 페이지 이상의 홀로그래프 데이터가 고밀 도로 다중화 되어 기록되게 된다. 데이터의 재생을 위해서는 위와 같은 기록과정을 거친 후에 특정 페이지의 데이터를

\* 正會員, 光云大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Eng., Kwangwoon Univ.)

\*\* 正會員, 韓國電子通信研究院

(Electronics and Telecommunications Research Institute)

※ 본 연구는 한국과학재단 '97특정기초연구비 지원에 의해 수행됨.

接受日字:1998年7月24日, 수정완료일:1998年11月23日

기록시 사용된 기준파와 동일한 각도(또는 파장, 위상 부호)로 기준파를 다시 입사시킴으로써 홀로그램 적으로 재생할 수 있다. 광굴절 기록 매질에 형성된 회절 격자를 통과할 때 기준파는 원래의 페이지에 있는 정보의 영상을 재현하는 방향으로 회절 된다. 재현된 영상은 CCD 와 같은 영상 센서부에 입사되어 한 페이지에 저장된 정보를 한번에 모두 읽을 수 있고, 이 데이터는 다시 디지털 컴퓨터에 의해 전자적으로 저장·처리된다. 광굴절 기록 매질의 저장용량을 향상시키기 위한 방법으로 각 다중화(angular multiplexing)<sup>[2,6]</sup>, 위상 코드 다중화(phase code multiplexing)<sup>[7]</sup>, 파장 다중화(wavelength multiplexing)<sup>[8]</sup> 등 여러 가지 다중화 기법이 제안되고 있다. 이 중 각 다중화 방식은 기준파의 각도를 변화시키면서 홀로그램을 기록하는 것이며, 위상 코드 다중화 방식은 공간적으로 위상을 변조하여 페이지를 기록하게 되고, 파장 다중화 방식은 파장가변 레이저를 사용하여 파장 변화에 따라 다른 데이터를 기록하게 된다. 기록된 데이터의 재생은 기록된 방식에 의존하여 기준파의 각도, 공간 위상 분포, 파장에 따라 입사한 기준파에 대응하는 데이터의 페이지가 광학적으로 재생되게 된다.

본 논문에서는 각다중화와 공간다중화 방식을 병행한 복합 다중화 홀로그램 데이터 저장 시스템을 구현하였다. 즉, 일정 위치에서 기준파의 각도를 변화시키며 허용 각도내의 정보들을 기록한 다음, 공간상의 위치를 이동시키고 이러한 각다중화를 반복 적용하는 방식으로 저장할 수 있는 정보의 용량을 늘리게 된다. 기준파와 물체파의 각도 변화를 위한 스텝 모터의 회전, 영상의 디스플레이, 기록 시간 스케줄(recording time schedule)에 따른 홀로그램 기록은 자동적으로 처리되도록 프로그램을 이용하여 시스템 구성을 하였으며 실험을 통해 본 논문에서 제시한 복합 다중화 방식을 평가하였다.

## II. 체적 홀로그래픽 메모리

체적홀로그램은 광굴절 효과를 이용한 것이며, 광굴절 효과는 광굴절 매질에서 빛으로 야기된 굴절률의 변화를 말한다. 즉, 광굴절 효과는 결정의 체적 내부에 두 개의 간섭하는 광파의 간섭패턴에 대응하는 굴절률의 격자를 기록하는 것을 가능케 하고, 이와 같이 구성된 격자 패턴은 다른 빛이나 홀로그램을 기록하기

위해 사용된 빛의 진행에 영향을 미치게 된다. 광굴절 효과의 기본적인 메커니즘은 빛이 광굴절 기록 매질에 입사된 후 광이온화(photoionization), 확산(diffusion), 재결합(recombination), 공간전하(space charge) 형성, 전기(electric field) 형성을 거쳐 굴절률의 변화로 정보를 기록하게 된다. 다시 말해서, 광이온화 현상에 의해 생성된 전하들은 불 균일한 밀도를 가지고 있으므로 확산이나 드리프트를 통해 불 균일한 공간전하분포를 발생시킨다. 이러한 공간전하분포는 결정 내에서 내부전계를 형성하며, 이 전계는 전기광학효과(Pockels effect)에 의해 물질의 굴절률을 국부적으로 변화시킴으로 입력된 정보를 저장할 수 있다. 여기서, 전기광학효과란 투명한 결정체에서 결정에 인가되는 전기의 세기에 비례하여 빛의 굴절률이 변화하는 현상을 말하는 것으로, 흔히 광신호 변조기를 구성하는 경우에 사용된다. 기록 매질에 회절 격자 형태로 기록된 영상과 간섭을 일으킨 광파가 매질을 통과할 때, 간섭파는 기록 영상을 재현하는 방향으로 회절 되어 영상을 재현하게 된다. 정보가 기록된 광굴절 매질은 균일한 빛이나 온도를 가함으로써 회절 격자가 없는 원래의 상태(erased)로 복원될 수 있다. 광굴절 매질로는 barium titanate( $BaTiO_3$ ), lithium niobate ( $LiNbO_3$ ), potassium niobate ( $KNbO_3$ ), gallium arsenide( $GaAs$ ), strontium barium niobate(SBN) 등이 있다. 광굴절 효과를 Fe-doped  $LiNbO_3$ 를 통하여 단계별로 그림 1에 나타내었다.<sup>[8]</sup>

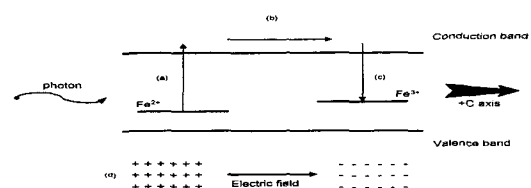


그림 1.  $LiNbO_3$ 의 에너지 준위 개략도

(a) 광이온화 (b) 확산 (c) 재결합 (d) 공간전하 형성 및 전기 형성

Fig. 1. Energy-level diagram of  $LiNbO_3$ . (a) photoionization (b) diffusion (c) recombination (d) space-charge formation and electric-field generation

홀로그램 데이터 저장 소자로써 가장 일반적이고 효과적인 광굴절매질로 알려져 있는  $LiNbO_3 : Fe$ 를 이용하였다.  $LiNbO_3 : Fe$ 에 빛이 인가되었을 때 야기되는 굴절률의 변화는 1966년 Ashkin 등이 처음 발표

하였으며, Staebler 와 Amodei는 LiNbO<sub>3</sub>의 광굴절 효과를 증대시키기 위한 방법으로 iron을 도우핑 하거나 줄이는 방식을 이용하였다. 또한, Staebler는 리튬 니오베이트의 양성자가 높은 온도에서 활성화가 되어 이온 전하 분포 형태의 광굴절 전하 분포를 상쇄하고 고정할 수 있다는 것을 발견하였다. LiNbO<sub>3</sub>:Fe에 데이터를 저장하기 위해서는 수 mW/cm<sup>2</sup> 정도에 해당하는 입사광의 세기만이 요구되므로, 부가적으로 전계를 인가하지 않아도 되며 광손상을 피할 수 있다. 매질에 균일한 광파를 조사하거나 약 200°C 정도로 가열하므로 써 형성된 정보(격자)를 지울 수 있다. LiNbO<sub>3</sub>:Fe에 형성된 격자의 저장 시간은 수개월에서 수년이 될 수 있으며, 약 150°C 정도의 온도로 매질을 가열하였을 때 발생하는 양성자 상쇄를 이용하여 격자를 고정할 수 있다. 가열된 매질은 상온에서 점차적으로 식힘으로써 이온 전하 분포가 고정되고, 광파를 조사하면 양성자 격자가 나타나게 된다. LiNbO<sub>3</sub>:Fe 는 z 축 방향으로 강한 광전압 효과를 본질적으로 지니며, 이 효과의 세기는 빛의 세기에 비례한다. 또한, 10<sup>-3</sup> 정도로 굴절률의 변화를 야기하기에 충분한 양의 내부 전계가 구성된다.

III. 체적 홀로그래프의 다중화 기록 기법

1. 각다중화를 이용한 체적홀로그래프

체적 홀로그래프에 대용량의 정보를 저장하기 위한 방법으로 다중화 기술을 사용할 수 있다. 다중화 방법으로는 간섭파간의 각도, 파장, 위상의 변화를 이용하는 각다중화, 파장다중화, 위상부호 다중화 기법 및 공간 다중화 기법 등이 제안되고 있다.<sup>[10,11]</sup>

각 다중화는 특정한 사잇 각을 갖는 물체파와 기준파로 기록된 체적 홀로그래프 기록시의 기준파와 복원시의 기준파 사이의 각도에 강하게 의존하여 복원된다는 사실을 기초로 하고 있다. 각 선택도는 그림 2(a)와 같이 두 개의 평면파에 의해 기록된 간단한 정현파 형태의 격자의 경우에 대해 가장 잘 설명되고 정량화 될 수 있다. 여기서, 기준파와 물체파의 입사각은 각각 홀로그래프 매질(두께 L<sub>z</sub>) 내에서 측정된 θ<sub>R</sub>과 θ<sub>O</sub>이다. 기준파와 물체파의 벡터는 식(1)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_R &= k_0(-\sin \theta_R \hat{x} + \cos \theta_R \hat{z}) \\ \mathbf{k}_s &= k_0(-\sin \theta_s \hat{x} + \cos \theta_s \hat{z}), \quad k_0 = \frac{2\pi n}{\lambda} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, n은 매질의 굴절률, λ는 진공 내에서의 빛의 파장이다.

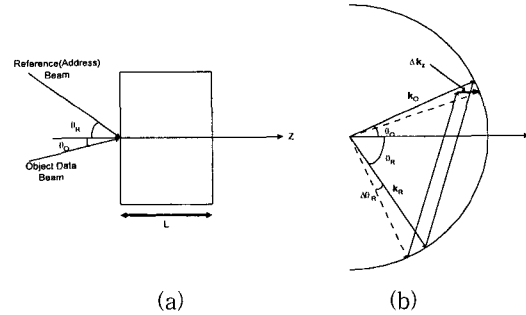


그림 2. 간단한 정현파 홀로그래프의 기하학적 구조 (a) 두 평면파에 의한 체적 홀로그래프의 정현파 격자 형성 구조 (b) 홀로그래픽 상호 작용에 대한 파벡터 공간도

Fig. 2. Simple sinusoidal hologram geometry. (a) volume interaction geometry (b) wave vector space description of holographic interaction

그림 2(b)의 파벡터 공간도형에서 격자벡터 K는 매질 내에서 진행되는 평면파에 대응하는 모든 가능한 파벡터 k의 집합을 나타낸다. 간략화를 위해 표면의 반지름이 k<sub>0</sub>인 등방성인 구의 경우만을 고려한다. 입력 기준파가 회절을 일으키기 위해 만족되어야 할 브래그 매칭 조건은 식(2)과 같다.

$$|\mathbf{k}'_0| = |\mathbf{k}_R + \mathbf{K} + \hat{z} \Delta k_z| = k_0 \quad (2)$$

여기서, k'<sub>0</sub>, k<sub>R</sub>'는 물체파 벡터와 입사된 기준파 벡터를 나타내며, 기준파 벡터는 기록시와 거의 같게 조절된다. Δk<sub>z</sub>는 매질의 두께 때문에 어느 정도 발생될 수 있는 위상 불일치이다. 약한 산란의 경우에(회절효율 η ≪ 1) 회절효율은 식(3)과 같다.<sup>[10]</sup>

$$\eta \propto \text{sinc}^2(\Delta k_z L_z) \quad (3)$$

따라서, 정보를 읽어내는 동안 기준파의 방향은 식(4)으로 정의되는 영역 내에 있어야 충분히 관측될 수 있는 회절을 얻을 수 있다.

$$|\Delta k_z| \leq \frac{\pi}{L_z} \quad (4)$$

입사되는 기준파의 각도를 기록할 때의 각도와 동조시키기 위한 각도의 방향에 대한 위상불일치는 비

등방성의 특징을 갖는다. 왜냐하면 그림 2(b)에서처럼 기준벡터는 위상불일치가 0 인 브래그 조건을 만족하는  $\mathbf{k}_R$ 과  $\mathbf{k}_O$ 에 의해 정의되는 평면에 수직인 방향으로 회전될 수 있고, 평면에서의 회전이 증가함에 따라 발생하는 위상 불일치 또한 증가하기 때문이다. 평면에서의 각 선택도는 근사적으로 식(4)에서 처음으로 0이 발생하는 지점사이의 각도의 폭으로 주어진다.<sup>[10]</sup>

$$\Delta\theta_R = \frac{\lambda \cos \theta_O}{nL_z \sin(\theta_R + \theta_O)} \quad (5)$$

위 식은  $\theta_O$ 가 작을수록 정확하며, 각의 선택도는 물체파와 기준파의 각도가 90도일 때 가장 우수하고 이 각도를 중심으로 각 선택도는 대칭적으로 떨어지기 시작한다. 같은 체적 내에 다중 홀로그램을 저장하기 위하여 식(5)로 주어지는 각 증가 분만큼 간격을 둔 기준 빔들을 이용하여 동일평면에 다중화 시켜서 복원하면 cross talk가 없는 재생영상을 얻을 수 있다. 기준파의 각도  $\theta_1$ 에서  $\theta_m$ 까지의 주어진 범위 내에 다중화 될 수 있는 홀로그램의 수는 근사적으로 식(6)와 같이 주어진다.<sup>[10]</sup>

$$M \approx 1 + \frac{nL_z}{\lambda} |\cos \theta_1 - \cos \theta_m| \quad (6)$$

입사되는 기준파의 브래그 조건에 맞도록 각도를 제어하는 방법들이 개발되어 왔는데, 초창기에는 스텝모터를 이용하여 제어를 했지만, 기계적인 면이 많았기에 브래그 조건을 맞추기가 어려웠으며, 최근에는 모두 전자적인 시스템으로 만들고자 AOD를 이용하여 제어하는 방법들이 이용되고 있으며, SA 알고리즘과 LCTV를 사용한 각다중화 방법들이 제안되고 있다.<sup>[12]</sup>

## 2. 공간다중화를 이용한 체적홀로그램

일반적으로 광굴절 매질에 저장되는 총 홀로그램 개수(M)와 홀로그램 회절 효율( $\eta$ ) 사이에는 식(7)과 같은 관계식이 주어진다<sup>[10]</sup>.

$$\eta = \frac{\eta_{\max}}{M^2} \left( \frac{\tau_e^2}{\tau_w^2} \right) \quad (7)$$

위 식에서  $\eta_{\max}$ ,  $\tau_w$ ,  $\tau_e$ 는 최대 효율, 기록 및 지움 시정수에 해당한다. 식(7)의 결과는 기록된 모든 홀로그램 데이터가 똑같은 회절 효율을 갖도록 설계할 경

우 주어지는 식으로  $\eta_{\max} = 1$ ,  $\tau_e = \tau_w$ 이고 10,000개의 홀로그램을 저장했을 때 결과적인 회절 효율은 약  $10^{-8}$ 정도로 주어지며 그 이하로 내려가게 되면 잡음 등에 의해 상용 CCD로는 신호 검출이 불가능하게 된다. 따라서, 각 홀로그램이 1Mbit의 데이터를 포함하고 있다고 하면 각각의 볼륨 홀로그램 유니트에서의 저장 용량은 10Gbit로 제한될 수밖에 없다. 결과적으로 보다 많은 홀로그램 데이터를 저장하기 위한 방법으로 그러한 여러 개의 볼륨 홀로그램 유니트를 공간적으로 다중화 함으로써 증가시킬 수 있다.

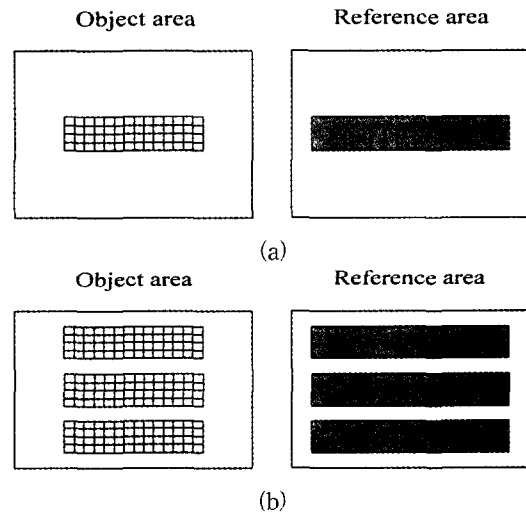


그림 3. 물체파 영역과 기준파 영역 (a) 각다중화 (b) 각·공간다중화

Fig. 3. Object space and reference space.

(a) angular multiplexing (b) angular-spatial multiplexing

그림 3은 각다중화와 각·공간 다중화에 대한 물체파 영역과 기준파 영역의 파의 입사 분포를 보인다.<sup>[6]</sup>

그림 3(a)는 일반적인 각 다중화에서 입사되는 물체파와 기준파의 범위를 나타내고 있고, 그림 3(b)는 공간다중화에서 입사되는 물체파와 기준파의 분포를 나타내고 있다. 각 다중화에서 물체파는 고정된 상태로 기준파만 1차원적인 행 방향으로 변화되며 기록되므로, 광굴절매질의 전체 체적을 활용하지 못하고 기록할 수 있는 용량을 제한 받게 된다. 공간다중화는 이러한 단점을 보완하기 위한 방법으로 광굴절매질의 체적 전체를 활용하기 위한 다중화 기법이다. 그림 3(b)에 나타난 것 과 같이 물체파를 열 방향으로 이동시키며, 기준파를 행뿐만 아니라 열의 방향으로 입사

시킴으로써 광굴절매질의 전체 체적을 활용할 수 있고, 같은 광굴절매질에 기록할 수 있는 홀로그램의 용량을 증가시킬 수 있다.

IV. 실험 및 결과고찰

본 논문에서는 각다중화 방식과 공간다중화 방식을 사용하여 300장의 영상 정보를 홀로그램에 기록하는 저장 시스템을 설계하고, 데이터의 저장과 재생 실험을 통하여 시스템의 성능을 평가하였다. 사용된 컴퓨터 시스템은 Pentium 120MHz이고, 데이터 영상을 디스플레이 하기 위해 사용된 LCD는 640×480 화소를 갖는 EPSON사의 LC-SLM(모델 : P13VM215)으로써 3개의 LCD(Red, Green, Blue 패널)로 구성되어 있으며, 컴퓨터와 인터페이스를 취함으로써 디지털 입력 영상을 디스플레이 할 수 있다. 복원된 이미지를 비디오 카메라로 아날로그 영상을 입력받기 위한 이미지 그래픽은 Data Translation사의 DT2851을 사용하였다. 입력 데이터로는 100개의 파일로 구성된 영상을 이용하였으며, 100개의 영상을 기록함에 있어서 순서에 따른 각각의 영상은 기록시간 스케줄에 따라 홀로그램 기록시간이 조절되었다.

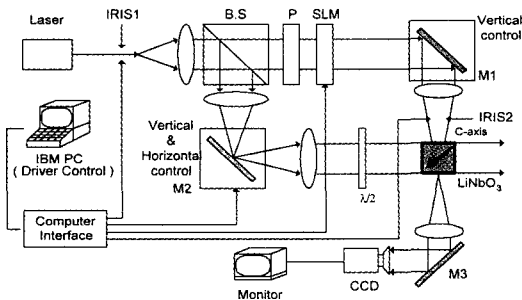


그림 4. 각·공간 다중화 방식을 이용한 홀로그램 저장 시스템

Fig. 4. Hologram storage system using angular-spatial multiplexing method.

각·공간 복합 다중화를 이용하여 정보를 기록하기 위해 그림 4 와 같은 홀로그램 저장 시스템을 구성하였다. 본 실험에서는 광굴절매질에 입사되는 기준파와 물체파의 입사각을 제어하는 방법으로 기록을 하였으며, 입사되는 파의 각도를 제어하기 위하여 스텝모터를 이용하였다. 스텝모터를 구동시키기 위해 스텝모터 제어회로를 만들었고, 스텝모터의 구동을 컴퓨터로 제

어하기 위해서 Interface card를 만들었다. 그림 5는 각·공간 복합 다중화 시스템의 사진을 보인다.

그림 6의 Interface card는 주변장치와 양방향 통신을 구현하는데 사용되는 범용 병렬 입출력 인터페이스 PPI(Programmable Peripheral Interface) 8255를 사용하였으며, 스텝모터 제어 회로는 Stepper Motor Controller IC L297과, Dual Full-Bridge Driver L298을 사용하였다. 그리고 모터는 1.8°의 Step angle을 갖는 스텝모터를 사용하였다. 이와 같이 범용 병렬 입출력 인터페이스를 사용하므로써 스텝모터의 회전 하나 하나를 정확하게 제어할 수 있었다. 바이폴라 방식의 정전류 구동용 IC set의 경우 코일의 이용도가 높고 저속에서 더 큰 토크를 얻을 수 있는 장점이 있으며 고속에서는 유니폴라가 좀 더 유리한 특성을 가지고 있다.

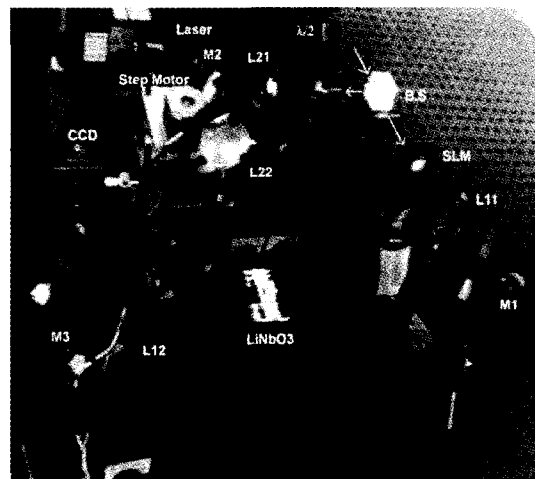


그림 5. 각·공간 복합 다중화 홀로그램 저장 시스템의 사진

Fig. 5. Angular-spatial multiplexed hologram storage system photo.

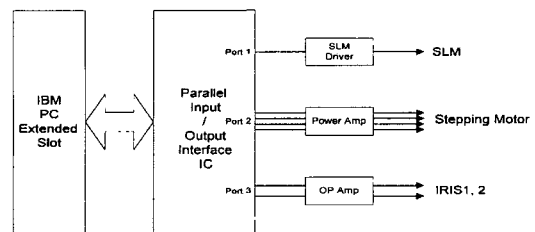


그림 6. 체적 홀로그램 메모리 시스템의 제어부

Fig. 6. Volume holographic memory system controller.

본 실험에서는 빔을 정확하게 제어하기 위해서 바이

플라 방식의 L298을 사용하였다. L297은 정전류 구동을 위한 상발생, 초퍼구동 회로를 포함한 컨트롤러이며, L298은 바이폴라 구동을 위한 두 개의 브리지 드라이버가 내장되어 있다. 본 실험에서는 이들 L297 2개와 L298 2개를 사용하여 두 개의 스텝 모터를 정확한 각도로 제어할 수 있었다. 또한 스텝 모터는  $1.8^\circ$ 의 해상도를 갖고 있으며, 1-2상 여자구동방식으로 구동시키면  $0.9^\circ$ 의 해상도를 갖을 수 있으며, 20:1의 비율을 갖는 기어박스를 사용함으로써  $0.045^\circ$ 의 해상도를 얻을 수 있었고, 렌즈의 조합에 의해  $0.001^\circ$ 의 해상도를 얻을 수 있었다. 시스템에서 홀로그램을 기록하는 순서는 먼저, 레이저로부터 방출된 파가 공간 필터와 렌즈로 인해 평행 파로 변환된 뒤 빔 분할기로 물체파와 기준파로 분할된다. 물체파는 편광기를 통과한 뒤 SLM소자인 LCD를 지나 변조되어 2개의 렌즈를 통해 적절한 크기로 조절된다. 매질을 통과한 물체파는 CCD카메라에 검출되며, 검출된 이미지를 모니터를 통해 관찰한다. 그리고, 기준파는 렌즈 2개와 하나의 미러를 지나 매질에 입사된 뒤 내부에서 물체파와의 간섭패턴이 형성되어 기록되게 된다. 이 시스템에서는 스텝 모터를 사용하여 기준파와 물체파를 제어하도록 되어있다. 먼저 M2를 각  $\Delta\theta_1$ 간격으로 수평으로 회전시키며 홀로그램을 매질에 기록하게 된다. 즉, 기준파는 첫 번째 렌즈를 통과하여 파의 초점을 M2에 고정시킨 뒤, M2를 수평으로 제어하므로써 각다중화를 이용하여 홀로그램을 저장한다. 그리고, 공간다중화를 위해 스텝 모터를 초기화하고, M2와 M1을 같은 양만큼 수직 이동시킨 다음 각다중화 방식으로 정보를 저장한다. 이 과정을 반복함으로써 본 실험에서는 각·공간 다중화를 구현하였다. 복원 시는 기록과 동일한 방법으로 물체파를 차단한 뒤 M2의  $\Delta\theta_1$ 을 수평·수직으로 제어하면서 기준파를 이용하여 복원한다. 즉, 광굴절매질에 입사되는 기준파의 각도 및 공간상의 이동을 통하여 각·공간 다중화를 실현하였고, 고용량의 데이터를 기록할 수 있음을 보였다. 본 실험에서는  $1.8^\circ$  스텝 모터를 사용했으며 스텝 모터와 LCD를 컴퓨터로 제어하므로써 정확한 기록을 할 수 있었다. 영상 입력은  $640 \times 480$ 의 화소를 갖는 LCD를 사용하였다. 그리고 영상 출력은 CCD카메라를 사용하여 검출하였다. 광굴절매질에 여러 개의 데이터를 기록하기 위해서는 데이터를 기록하는 동안 그전에 기록한 데이터가 지워지는 것을 감안하여 기록순서에 따른 기

록 시간을 달리 해 줘야 한다. 즉, 기록할 데이터의 개수와 기록 시간, 그리고 삭제시간을 이용하여 기록 시간을 산출해야 한다. 이상과 같이 데이터를 광굴절매질에 기록할 때 기록순서에 따른 기록 시간 산출, 각각의 데이터에 따른 스텝모터의 제어, 그리고 기록할 데이터를 LCD에 전송하는 것으로 분류할 수 있다. 본 실험에서는 이 3가지를 온라인화 하여 하나의 자동화 시스템으로 구현하였다. 먼저 프로그램에 기록할 데이터의 개수와 기록 시간, 삭제시간을 입력하여 컴퓨터의 메모리에 기록할 데이터를 저장해 둔 다음 실행을 시키면, 데이터들의 기록순서에 따른 기록 시간이 자동적으로 산출되어 초기 데이터를 LCD에 전송한 뒤 기록 시간 동안 LCD를 투과하여 변조된 물체파와 기준파와의 간섭패턴이 광굴절매질에 기록된다. 초기 기록이 완료되면 스텝모터를 한 스텝 회전시켜 기준파의 입사각이  $\Delta\theta_1$ 만큼 이동할 수 있도록 M2를 수평 방향으로 회전시킨다. 그런 다음 데이터를 LCD에 전송 후 다음의 기록시간에 따라 기록을 한 뒤 이를 반복하여 데이터를 수평방향으로 저장한다. M2를 수평으로 제어하여 각다중화를 이용하고, M2와 M1을 수직으로 제어하여 공간 다중화에 이용한다. 정보의 기록은 각각 기록순서에 따라 노출 시간을 산출하는 프로그램을 이용하며, LCD에 데이터를 전송하는 프로그램, 마지막으로 이들 각각의 모듈을 통합하여 하나의 자동화 시스템을 구현하므로써 방대한 데이터를 균일한 회절효율을 가질 수 있도록 자동으로 기록할 수가 있다. 이때 100장의 노출 순서에 따른 기록시간을 그림 7에 나타내었으며, 실험결과 균일한 회절효율을 가질수 있었다.

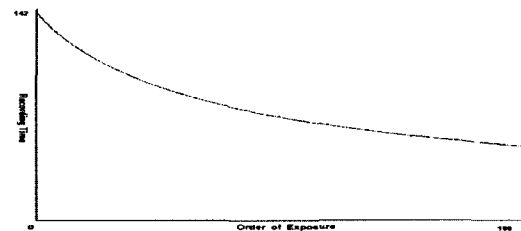


그림 7. 홀로그램 저장 순서에 따른 기록 시간 스케줄  
Fig. 7. Recording time schedule according to order of exposure.

위 그림과 같이 첫 번째 기록되는 영상의 기록 시간은 142초가 소요되었다. 여기에서 가로축은 저장되

는 홀로그램 개수이며, 세로축은 기록되는데 소요되는 시간이다.

본 실험에서는 그림 7의 기록 시간 스케줄에 따라 각각 노출 시간을 조절하여 300개의 영상 정보를 저장하였다. 기록은 계획적 기록 방법을 사용하였으며, 기록 시간 스케줄을 산출하여 계획적으로 기록 순서에 따라 기록을 했다. 식(8)에서  $i$ 번째 기록된 영상의 크기를  $A_i$ 라 할 때,  $M$ 개의 영상을 기록한 후의  $A_i$ 의 크기는 <sup>[2]</sup>

$$A_i = A_0[1 - \exp(-\frac{t_i}{\tau_r})]\exp(-\frac{t'_i}{\tau_e}) \quad (8)$$

이다. 여기서  $A_0$ 는 광굴절매질에 저장된 영상의 포화 크기이며,  $t_i$ 는  $i$ 번째 영상을 기록할 때 기록 시간이며,  $\tau_r, \tau_e$ 는 기록 시상수, 삭제 시상수이고  $t'_i$ 은  $i+1$ 번째부터  $M$ 번째까지의 전체 기록 시간의 합이다. 이 때  $\tau_r, \tau_e, A_0$ 값을 산출하여 각각의 영상에 해당하는 기록 시간  $t_i$ 값을 얻을 수 있다. 본 실험에서는  $\frac{A_i}{A_0}$  값으로 0.35를 사용하였으며,  $\tau_r$ 는 100,  $\tau_e$ 는 9000을 사용하여  $t_i$  값을 산출한 뒤 기록을 하였다. 100장을 기록한 뒤 이미지를 복원해 본 결과 기록한 이미지의 크기가 모두 균일함을 알 수 있었다.

스텝모터를 회전하는 방법으로 기준과의 각도를 변화해 가며 한 행에 100개의 영상을 기록하였고, 스텝모터를 초기화시키고 기준과 및 물체파를 동일하게 수직으로 공간 이동한 다음 행으로 다시 100장을 기록한다. 이와 같은 방법으로 3개의 행에 300장의 영상 정보를 기록하였다.

광굴절 매질에 기록된 격자가 복원시 지워지게 되는데 이를 방지하기 위해서 격자를 고정(fixing)시킨다 <sup>[13,14]</sup>. 고정방법으로는 열을 가하여 격자를 고정시키는 열적 고정과 전기장을 가하여 고정시키는 전기적 고정이 있다. 본 실험에서 사용한  $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 는 열적 고정방법으로 격자를 고정시킨다. 광굴절 매질을 고정시키기 위해, 먼저 150°C에 5분 정도 가열한 뒤 상온으로 온도를 내린 뒤 기준파를 입사시키며 Developing 과정을 거치면 공간 전하 패턴이 형성되어 고정된 격자로부터 영상이 복원된다. 그림 8은 그림 4의 시스템을 이용하여 기록된 300개의 영상을 고정시킨 후, 기준파를 이용하여 재생된 12개의 대표 영상이다.

### V. 결 론

본 논문에서는 동일한 광굴절매질의 저장용량을 향상시키기 위해서 여러 가지 다중화 기법이 제안되고 있는 가운데, 각다중화 방식과 공간다중화 방식을 사용한 복합 다중화 시스템을 설계하여 영상정보를 기록하고 재생하였다.

각다중화와 공간다중화의 구현은 스텝 모터를 이용하였으며, 기준과의 각도를 변화시키는 가운데 물체파를 통과하는 데이터의 영상을 update 시키며 LCD에 디스플레이 하므로써 광굴절매질에 데이터를 저장할 수 있었다.

고해상도의 아날로그 영상 기록 시스템 및 여러 없는 디지털 데이터 기록 시스템을 구성하므로써 대용량 홀로그램 저장 시스템의 상용화가 가능하리라 예상된다.

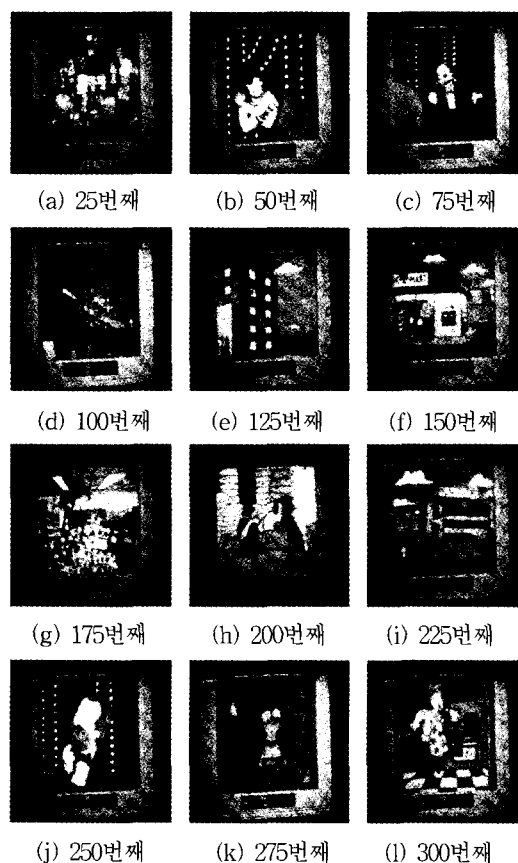


그림 8. 300개의 홀로그램으로부터 재생된 12개의 샘플 영상

Fig. 8. 12 Sample images reconstructed from 300 holograms.

## 참 고 문 헌

- [1] J. P. VanHeerden, "Theory of optical information storage in solids," *Appl. Opt.* vol. 2, pp. 393-400, 1963.
- [2] F. H. Mok, M. C. Tackitt, and H. M. Stroll, "Storage of 500 high resolution holograms in a LiNbO<sub>3</sub> crystal," *Opt. Lett.*, vol. 16, pp. 605-607, 1992.
- [3] D. Psaltis, D. G. Stinson, G. S. Kino, and T. D. Milster, "Optical data storage : Three perspective," *Optics and Photonics News*, vol. 8, no. 11, pp. 34-39, 1997.
- [4] 김은수, "차세대 홀로그래픽 3차원 광메모리 시스템," *전자공학회지*, vol. 24, no. 6, pp. 75-87, 1997
- [5] 안준원, 김 남, 이권연, "Fe-LiNbO<sub>3</sub> 결정에서 부피형 홀로그램의 회절특성을 이용한 광정보 저장," *전자공학회지*, vol. 35-D, no. 6, pp. 63-71, 1998
- [6] F. Mok, "Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate," *Opt. Lett.*, vol. 18, pp. 915- 917, 1993.
- [7] C. Denz, G. Pauliat, G. Roosen, and T. Tschudi, "Volume hologram multiplexing using a deterministic phase encoding method," *Opt. Commun.*, vol. 85, pp. 171-176, 1991.
- [8] G.A.Rakuljic and V.Leyva, "Optical data storage by using orthogonal wavelength-multiplexed volume holograms," vol. 17, no. 20, pp. 1471-1473, 1992.
- [9] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, John Wiley & Sons, , USA, 1991.
- [10] J. H. Hong, I. McMichael, T. Y. Chang, W. Christian, and E. G. Paek, "Volume holographic memory systems : techniques and architectures", *Opt. Eng.*, vol. 34, no. 8, pp. 2193-2203. 1995.
- [11] H. Y. Li and D. Psaltis, "Three-dimensional holographic disks," *Appl. Opt.* vol. 33, pp. 3764-3774, 1994.
- [12] 김철수, "BiTiO<sub>3</sub>에 영상저장을 위한 새로운 각도 다중화 방법," *전자공학회지*, vol. 33-B, no. 11, pp. 89-95. 1996
- [13] Bo Liu, Liren Liu, and Liangying Xu, "Characteristics of thermal fixing in lithium niobate," *App. Opt.*, vol. 37, no. 11, pp. 2170-2176, 1998.
- [14] J. F. Heanue, M. C. Bashaw, A. J. Daiber, R. Snyder, and L. Hesselink, "Digital holographic storage system incorporating thermal fixing in lithium niobate," *Opt. Lett.* vol. 21, no. 19, pp. 1615-1617, 1996.

## 저 자 소 개



姜勳宗(正會員)

1972년 6월 11일생. 1998년 2월 광운대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1998년 2월 ~ 현재 광운대학교 전자공학과 대학원 석사과정. 주관심 분야는 홀로그래픽 메모리, 광정보처리, 3차원 디스플레이 등

金恩洙(正會員) 第 35卷 D編 8號 參照

현재 광운대학교 전자공학과 교수

李丞玄(正會員) 第 33卷 A編 10號 參照

현재 광운대학교 전자공학과 조교수

韓鐘旭(正會員) 第 34卷 D編 11號 參照

현재 한국전자통신연구원 선임연구원