

論文98-35D-2-13

# 각도 다중화 방법을 이용한 광 메모리 시스템의 구현

## (Implementation of Optical Memory System using Angular Multiplexing Method)

金喆洙\*,金星完\*\*\*,朴世駿\*\*\*,金鍾燦\*\*,宋在元\*\*\*,  
金秀重\*\*\*

(Cheol-Su Kim, Seong-Wan Kim, Se-Joon Park, Jong-Chan Kim,  
Jae-Won Song, and Soo-Joong Kim)

### 요 약

본 논문에서는 새로운 입력방법과 각도 다중화 방법을 이용하여 많은 영상 정보를 저장 및 재생할 수 있는 홀로그래픽 광 메모리 시스템을 구현하였다. 새로운 입력방법에서는 입력영상의 밝기 정보대신 위상 정보를 기록 매질에 입력시켰다. 이를 위해 CCD카메라로 포획한 영상 또는 컴퓨터 화면의 영상을 편광기가 제거된 LCTV에 표현하였다. 그러므로 입력영상의 전체 밝기에 상관없이 균일한 세기의 입력빔을 만들 수 있고, 계획적 기록 방법을 적용시킬 수 있다. 또한 입력빔 세기를 증가시킬 수 있으므로 영상의 기록 시간을 단축시킬 수 있다. 그리고 재생된 영상은 편광기를 사용하므로써 위상 정보를 밝기 정보로 변환하여 얻었다. 기준빔의 입사각도 또한 SA(simulated annealing) 알고리즘으로 설계한 이진 위상 홀로그램을 LCTV에 표현한 후, 푸리에 변환하므로써 얻었다. 그러므로 제안된 광 메모리 시스템은 기준빔의 입사각도가 전자적으로 쉽게 제어되므로 안정하다고 할 수 있다. 제안된 홀로그래픽 광 메모리 시스템을 이용하여 다양한 형태의 영상들을 BaTiO<sub>3</sub>에 저장하고 재생하는 광 실험을 하였다.

### Abstract

In this paper, we implemented holographic optical memory system which can store and reconstruct many images using new input and angular multiplexing method. In the new input method, phase information of input image is inputted in the recording material instead of brightness information. To do so, we represented the images, which captured with CCD camera or displayed on the computer monitor, on the liquid crystal television(LCTV) which removed polarizer/analyzer. Therefore, we can generate uniform input beam intensity regardless of the total brightness of input image, and apply the scheduled recording method. Also we can increase the intensity of input beam so reduce the recording time of input image. And reconstructed image is acquired by transforming phase information into brightness information of image with analyzer. The incident angle of reference beam is acquired by Fourier transform of the binary phase hologram(BPH) which designed with SA algorithm on the LCTV. The proposed optical memory system is stable because the incident angle of the reference beam is controlled easy and electronically. We demonstrated optical experiment which store and reconstruct various type images in BaTiO<sub>3</sub> using proposed holographic memory system.

\* 正會員, 金泉專門大學 電子通信科  
(Dept. of Electronic Communication, Kimchon Junior College)

\*\* 正會員, 慶北專門大學 電子科  
(Dept. of Elec. Eng., Kyungpook Junior College)

\*\*\* 正會員, 慶北大學校 電子電氣工學部

(School of Electronics & Electrical Eng., Kyungpook National University)

※ 이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 대학부설 연구소 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

接受日字:1997年11月29日, 수정완료일:1998年2月3日

## I. 서 론

앞으로의 정보화 사회에서는 무엇보다도 엄청난 양의 정보를 저장하고, 재생하는 새로운 기술이 요구된다. 기존의 반도체 메모리 기술 또는 CD(compact disk) 메모리 기술 등에서는 처리속도 및 저장용량면에서 기술적인 한계에 부딪힌다. 최근에는 기존의 방법과는 다르게 새로운 방법으로 많은 양의 정보를 저장하고, 재생할 수 있는 홀로그래픽 광 메모리 시스템의 구현에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>[1-3]</sup> 이는 광의 병렬성과 고속성을 이용하여 페이지 단위로 정보의 기록 및 재생이 가능하므로 기존의 방법에서 직면하는 한계점을 극복할 수 있다. 홀로그래픽 광 메모리 시스템의 구현을 위해서는 영상 정보를 저장할 수 있는 메모리 소자의 개발 뿐만 아니라 하나의 소자에 많은 영상 정보를 저장할 수 있는 다중화 방법에 관한 연구가 필요하며, 또한 여러 개의 영상을 저장할 때 각 영상의 기록 시간을 결정하는 방법이 연구되어야 한다. 메모리 소자로서는 빛의 세기에 따라 매질내의 굴절률이 변하는 광굴절효과를 지니는 광굴절 매질을 많이 이용한다. 이 매질에는 가시광선의 영역에서 효과적으로 동작되는 BaTiO<sub>3</sub>, LiNbO<sub>3</sub>, Sr<sub>x</sub>Ba<sub>1-x</sub>Nb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> (SBN), Bi<sub>20</sub>SiO<sub>20</sub>(BSO), KNbO<sub>3</sub>, Bi<sub>12</sub>TiO<sub>20</sub> (BTO) 등의 단결정과 적외선 영역의 광원에서 효과적으로 동작되는 GaAS, GaP, CdTe, InP 등의 반도체 화합물이 있다. 특히 전기 광학 계수가 큰 BaTiO<sub>3</sub>와 LiNbO<sub>3</sub>가 저출력 레이저로도 영상 정보의 저장과 재생이 용이하여 메모리 시스템의 구현에 널리 이용되고 있다. 광굴절 매질에서는 기준빔과 물체빔의 간섭 세기가 매질내의 굴절률 변화를 일으키기 때문에 영상을 저장할 수 있으며, 또한 저장된 영상을 재생하기 위해서는 기준빔만을 브래그 조건을 만족하는 각도로 매질에 입사시키면 된다. 여러 개의 영상을 하나의 3차원 매질에 저장하는 다중화 방법에는 기준빔의 각도를 변화시키는 각도 다중화 방법(angular multiplexing method),<sup>[4-5]</sup> 기준빔의 파장을 변화시켜 다른 색의 광원을 이용하는 파장 다중화 방법(wavelength multiplexing method),<sup>[6]</sup> 그리고 기준빔의 위상이 서로 직교하도록 부호화하는 위상 부호 다중화 방법(phase coded multiplexing method)<sup>[7-8]</sup>이 있다. 그리고 광굴절 매질에 여러 개의 영상을 저장할 때 각 영상의 기록 시간도 홀로그래픽 광 메모리 시스템의

성능에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 여러 개의 영상을 저장할 때 먼저 저장된 영상 정보가 나중에 저장되는 영상 정보에 의해 조금씩 지워진다. 만약 기록 시간이 같으면 저장되는 영상 정보의 순서에따라 지워지는 정도가 다르므로 저장된 정보를 읽어낼 때 재생된 영상에 누화가 발생하고, 밝기가 균일하지 않다. 이를 보상할수 있는 기록 방법에는 처음에 저장되는 영상의 기록 시간은 길게 하고 나중에 저장되는 영상의 기록 시간은 점점 짧게 하는 계획적 기록 방법(scheduled recording method)<sup>[9]</sup>과 저장하고자 하는 영상들을 짧은 시간동안 반복하여 기록하는 증진적 기록 방법(incremental recording method)<sup>[10-11]</sup>이 있다. 그러나 두 방법 모두 입력 영상들의 밝기가 균일하다는 가정하에 근사화를 통해 결정한 방법이므로, 입력 영상들의 밝기가 균일하지 못하면 큰 의미를 가지지 못한다.

본 논문에서는 새로운 입력방법과 각도 다중화 방법<sup>[12]</sup>을 이용하여 많은 영상 정보를 저장 및 재생할 수 있는 홀로그래픽 광 메모리 시스템을 제안하였다. 영상 전체의 밝기에 상관없이 항상 균일한 세기의 입력빔을 만들기 위해 밝기 정보를 위상 정보로 변환하여 기록하는 방법을 도입하였다. 즉 입력 영상을 액정판 앞뒤의 편광기를 제거한 LCTV<sup>[13]</sup>에 표현하므로써 밝기 정보를 위상 정보로 변환하는 기록 방법을 이용하였다. 판독시 재생되는 영상은 편광기(analyzer)를 출력 평면에 사용하므로써 위상 정보를 밝기 정보로 변환하였다. 그리고 기준빔의 입사각도는 위상 홀로그램을 이용하여 제어하였다. SA 알고리즘<sup>[14-15]</sup>으로 설계한 이진 위상 홀로그램을 위상 변조기인 LCTV에 표현한 후, 푸리에 변환하므로써 원하는 위치에서 점광원을 얻었으며, 렌즈를 통과시켜서 매질에 입사되는 각도를 제어하였다. 제안된 방법은 입력영상의 밝기가 항상 균일하고, 광효율이 좋으며, 또한 기준빔의 입사 각도 제어가 용이하므로 안전한 시스템이라고 할 수 있다. 제안한 홀로그래픽 광 메모리 시스템을 이용하여 다양한 형태의 영상들을 BaTiO<sub>3</sub>에 저장하고 재생하는 실험을 하였다.

## II. 체적 홀로그램의 다중화

### 1. 체적 홀로그램의 형성 원리

체적 홀로그램의 저장은 두 입사빔(물체빔, 기준빔)

의 간섭패턴이 광굴절 매질의 굴절률을 변화시킴으로써 가능하고, 저장된 정보의 재생은 물체빔을 차단시키고, 저장시킬 때와 같은 각도로 기준빔을 입사시키면 즉 브래그 조건을 만족시키면 가능하다. 만약 이 조건이 조금이라도 만족되지 않는다면 회절량이 급격히 떨어져서 저장된 영상 정보를 재생할 수 없다. 이와 같은 회절 특성 때문에 영상의 다중화 저장이 가능해진다. 체적 홀로그램은 저장에 사용되는 두 빔의 위치에 따라 투과형(transmission type)과 반사형(reflection type)으로 나뉜다.<sup>[16]</sup> 투과형은 같은 방향에서 나아가는 두 빔의 간섭 패턴에 의한 격자가 매질내에 형성되는 홀로그램이고, 반사형은 반대방향에 있는 두 빔의 간섭 패턴에 의한 격자를 형성하는 홀로그램이다.

광굴절 매질내에서 두 레이저 빔들의 상호작용에 의해 체적 홀로그램이 형성되는 원리를 수학적으로 표현해 보자.<sup>[17]</sup> 만약 두 빔이 주파수가 같다면, 정적인 간섭 무늬가 형성되며 이때 사용된 두 빔의 전장은

$$E_i = A_i \exp[j(\omega t - \mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r})], \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

로 표현되며, 여기서  $A_i$  는 파의 크기이고  $\omega$  는 각 주파수이며,  $\mathbf{k}_i$  는 파수벡터이다. 간단하게 표현하기 위해 두 빔이 입사면에 수직으로 편광되었다고 가정하면 매질내에서 두 빔의 간섭세기는

$$I = |E|^2 = |E_1 + E_2|^2 \\ = |A_1|^2 + |A_2|^2 + A_1^* A_2 \exp(-j\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}) + A_1 A_2^* \exp(j\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}) \quad (2)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1 \quad (3)$$

으로 표현된다. 여기서  $\mathbf{K}$  는 두 입사빔에 의해 생성된 격자의 파수벡터이고,  $|\mathbf{K}| = 2\pi/\Lambda$  이며,  $\Lambda$  는 간섭 패턴의 주기를 나타낸다. 전도대 모델에 따르면 위의 간섭세기 패턴에 의해 매질내에서 광 전자가 생성 및 재분배된다. 재분배된 이 전자들에 의해 공간 전장이 형성되며, 이 전장은 Pockel의 효과에 의해 매질내의 굴절 격자를 유도한다. 일반적으로 이 굴절 격자는 간섭세기 패턴에 비해 위상이 어느 정도 이동되며, 기본 성분을 포함한 굴절 격자의 굴절률은

$$n = n_0 + \frac{n_1}{2} \exp(j\psi) \frac{A_1^* A_2}{I_0} \exp(-j\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}) + c. c. \quad (4)$$

$$I_0 = I_1 + I_2 = |A_1|^2 + |A_2|^2 \quad (5)$$

로 표현되며, 여기서  $n_0$  는 매질내에 빛이 존재하지 않을 때의 굴절률이고,  $\psi$  는 굴절격자가 간섭세기 패턴에 비해 공간적으로 이동된 정도를 나타내며, BaTiO<sub>3</sub> 의 경우 주로 확산에 의해 동작하므로  $\pi/2$  의 크기를 가지며, 이의 부호는 광축의 방향에 따라 결정된다.  $n_1$  은 광굴절 격자 간격 및 방향, 그리고 매질의 전기 광학 계수에 의존하는 양의 실수이다. 그리고 c.c. 는 식 (4)에서 오른쪽 중간항의 복소 공액(complex conjugate)을 나타낸다. 매질 내에서의 굴절률을 나타내는 식 (4)는  $A_1$  과  $A_2$  의 곱을 포함하고 있다. 그러므로 이 격자가 물체빔  $A_1$  과 기준빔  $A_2$  에 의해 형성되는 홀로그램이 된다. 이 홀로그램의 투과 함수의 회절 성분은 다음과 같이 근사화된다.

$$t \sim \Delta n \sim A_1^* A_2 \exp(-j\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}) + A_1 A_2^* \exp(j\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}) \quad (6)$$

식 (6)은 굴절률의 변조가 약해서 고차 성분은 무시될 수 있으며, 재생을 위해서 그 홀로그램에 기준빔  $A_2 \exp(-j\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r})$  이 조사되었을 때 회절된 빔은

$$\eta_D A_1 A_2^* A_2 \exp(-j\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}) \quad (7)$$

로 표현된다. 여기서  $\eta_D$  는 회절 효율이며, 회절된 빔은 기준빔의 세기가 곱해진 재생된 물체빔임을 알 수 있다.

## 2. 다중화 방법

홀로그래픽 광 메모리 시스템은 많은 양의 정보를 저장하고 빠른 속도로 재생할 수 있으며, 특히 한 페이지에 해당하는 정보를 기록매질의 작은 영역에 병렬로 저장 및 재생할 수 있는 장점이 있다. 그러므로 기록시 어떤 메모리 시스템보다 저장용량과 처리속도면에서 탁월한 차세대 메모리 기술이라 할 수 있다. 홀로그램을 다중화하는 방법에는 매질의 폭이 간섭무늬의 주기보다 짧은 2차원 매질에 기록하는 방법과 매질의 폭이 이보다 훨씬 긴 3차원 매질에 기록하는 방법이 있다. 2차원 매질에서는 위치를 달리하여 다중영상을 기록하며, 기록 후 매질을 현상해야 하므로 실시간 처리가 어렵다. 3차원 매질에는 보통 세가지 중요한 기록 기술인 각도 다중화, 파장 다중화, 위상 부호 다중화 방법에 의해 현상과정없이 기록 및 재생된다.

각도 다중화 방법에서는 기준빔의 입사각도가 저장

된 영상 정보에 대한 주소가 되며, 따라서 기준빔의 입사각도를 달리하여 많은 영상 정보를 저장할 수 있다. 이 방법은 다중화 방법중에서 가장 널리 이용되고 있으며, 매질에 입사되는 기준빔의 입사각도를 제어하는 방법에는 스텝 모터로 구동되는 거울을 이용하거나 매질 자체를 모터로 회전시키는 기계적인 방법과 AOD(acusto optic deflector)를 이용하여 전자적으로 제어하는 방법이 있다. 기계적인 제어 방법은 시스템 구조가 간단하고 비교적 많은 영상 정보를 기록할 수 있으나, 저장된 영상을 재생할 때, 브래그 조건을 만족 시키기 어려워 재생된 영상에 누화가 발생하고, SNR이 낮아지는 단점이 있다. 한편 후에 발표된 영상 정보가 저장되는 매질의 위치를 제어하는 AOD와 매질에 입사되는 기준빔의 각도를 제어하는 AOD를 이용하여 전자적으로 제어하는 방법은 기계적인 조작을 사용하지 않기 때문에 시스템이 안정하고, 영상 정보를 매질에 신속하게 저장하고 재생할 수 있는 반면 두 AOD의 동기를 맞추기 어렵고, 광 시스템이 매우 복잡한 단점이 있다.

파장 다중화 방법은 기준빔과 물체빔 사이의 각도는 일정하게 고정시키고, 광원의 파장을 변화시키면서 영상을 매질에 저장시키는 방법이다. 영상 정보를 저장하고, 재생할 때 기계적으로 움직이는 부분이 없으므로 전체 시스템이 안정하지만 광원으로서의 파장의 선택을 위해 가변 레이저를 사용해야 한다. 그리고 재생시 기준빔에 미소한 파장 변화가 생기면 재생된 영상에는 심한 누화가 발생되며, 매질의 굴절률이 광원의 파장에 따라 변하기 때문에 파장의 동적영역을 넓게할 수 없으므로 저장시킬 수 있는 영상의 수가 제한된다.

위상 부호 다중화 방법은 기준빔과 신호빔 사이의 각도를 충분히 크게하여 고정시켜 놓고 기준빔이 위상 분포를 제어하여 각 영상을 저장시키는 방법으로 입력 영상의 다중화 저장과정에서 기계적 제어 부분이 없으므로 전체 시스템이 안정하고, 빠른 속도로 영상을 재생할 수 있다. 이 방법에서는 각 기준빔은 위상 분포가 서로 다른 평면파들의 집합으로 구성되어 있으며, 저장된 정보를 읽어낼 때 재생된 영상에서 누화가 발생하지 않도록 각 기준빔들의 위상 분포 사이에는 서로 직교하는 성질을 가져야 한다. 그래서 재생되는 동안 한 물체빔은 위상 부호화된 기준빔을 홀로그램에 조사하므로써 얻을 수 있다. 이론적으로 재생된 영상들 사이에는 누화가 전혀 발생하지 않지만 실제 구현에

서는 위상을 표현하는 SLM 화소의 두께 불균일성으로 인해 누화가 발생한다. 따라서 저장되는 영상의 수도 제한된다.

### 3. 기록 시간

광굴절 매질을 이용한 다중 홀로그램의 저장 및 재생과정에서 많은 정보를 저장시키는 것도 중요하지만 저장된 정보를 읽어낼 때 재생되는 홀로그램들의 밝기도 균일해야 한다. 일반적으로 다중 홀로그램에서 나중에 기록된 홀로그램이 먼저 기록된 홀로그램보다 재생시에 훨씬 밝게 나타난다. 이는 먼저 저장된 정보의 일부분이 나중에 저장되는 정보에 의해 지워지기 때문이다. 이 현상을 보상하기 위해 계획적 기록 방법과 증진적 기록 방법이 제안 되었다. 계획적 기록 방법은 1989년 Psaltis 등<sup>[9]</sup>이 신경회로망에서 각 뉴런 사이의 연결을 광굴절 매질을 이용하여 광학적으로 구현하고자 하는 논문에서 처음 제안한 방법으로 뉴런 사이의 연결강도를 균일하게 하기 위해 첫 번째 기록하는 홀로그램의 기록 시간은 길게 하고, 차츰 기록시간을 짧게하여 다른 영상들을 기록시키는 방법이다. 각 영상들의 기록 시간은 매질의 응답 시정수(기록시간, 삭제시간)와 매질의 최대 굴절률에 의해 결정된다. 증진적 기록 방법은 1987년 Anderson 등<sup>[10]</sup>이 신경회로망의 응용에서 처음 소개한 후, 1991년 Taketomi 등<sup>[11]</sup>이 홀로그램 저장을 위한 응용에서 자세히 연구하였다. 이 방법은 매질의 응답 시정수 보다 짧은 시간으로 각 홀로그램들을 계속해서 저장시키는 방법으로 저장될 때의 굴절률의 증가량이 다른 홀로그램의 저장으로 인한 굴절률 감소량과 같아질 때까지 이 과정을 반복 수행한다. 이 두 방법에서 기록 시간은 입력빔들의 밝기가 균일하다는 가정하에 결정된 값들이므로 영상중에 어두운 부분이 많거나 밝은 부분이 많은 영상은 통과하는 빛의 양이 다르므로 기록 시간 결정에 많은 문제점을 지니고 있다.

## III. 제안된 홀로그래픽 광 메모리 시스템

### 1. 새로운 입력 방법

광신호처리 분야에서 실시간 처리를 위해 널리 이용되는 공간 광 변조기의 한 종류인 LCTV는 편광기와 액정 배열의 조합에 의해 영상이 표현되므로 입력장치로 많이 사용된다. 그래서 CCD카메라로 획득한 영상

또는 컴퓨터 모니터의 영상을 LCTV에 표현하여 입력시킨다. 이 때 입력 영상의 형태에 따라 투과하는 입력빔의 양이 다르다. 다양한 형태의 많은 영상을 광굴절 매질에 저장할 때 재생되는 영상의 회절효율을 같게 하기 위해 기록 시간을 결정하는 방법에는 계획적 기록 방법과 증진적 기록 방법이 있다. 이 때 두 방법에서 기록 시간은 입력 빔들의 밝기가 균일하다는 가정하에 수학적으로 근사화를 통해 결정된 값이므로 입력 영상의 밝기가 균일하지 않으면 큰 의미를 갖지 못한다. 즉 어두운 부분이 많은 영상은 통과하는 빛의 양이 아주 적으므로 기록 시간의 결정에서 많은 문제점을 지니게 된다.

본 논문에서는 입력 영상을 액정판 앞뒤의 편광기를 제거한 LCTV에 표현하므로써 밝기정보를 위상 정보로 변환하여 사용하였다. 그러므로 입력 영상의 형태에 상관없이 항상 일정한 입력 빔을 만들 수 있으며 기록 방법의 가정을 정당화 할 수 있다. 이 때 사용된 LCTV는 Seiko-Epson사의 ET-20 모델이다. 먼저 LCTV의 위상 정보 특성을 알아보기 위해 Mach-Zehnder 간섭 실험을 하였고 이를 그림 1에 나타내었다. 그림 1(a), (c)는 Mach-Zehnder 간섭계의 한 쪽 경로에 인가되는 입력 패턴을 나타내며, 입력 패턴의 밝기에 따라 LCTV에 인가되는 전압이 각각 다르게 된다. 그림에서 어두운 부분이 높은 전압이 인가되고, 낮은 부분은 낮은 전압이 인가된다. 그림 1(c)에서 수평막대 모양의 밝기는 256레벨중 192, 128, 0을 나타낸다. 그림 1(b), (d)는 간섭 패턴을 나타내는데, 간섭 패턴의 어긋나는 정도가 인가되는 전압의 정도에 따라 차이가 남을 알 수 있다. 그림 1(b)에서 0레벨이 인가 되었을 때 'π' 만큼 위상차가 남을 알 수 있다. 그러므로 LCTV를 위상 변조기로 사용할 수 있으며, 입력의 밝기 정보를 위상 정보로 변환할 수 있다. 그림 2는 입력 영상으로 사용된 패턴이다. 그림 2(a)는 기존의 방법으로서 LCTV를 크기 변조기로 사용했을 경우의 입력 영상이고, 그림 2(b)는 LCTV를 위상 변조기로 사용했을 경우의 입력 영상을 나타낸다. 그림 2(b)로부터 제안된 입력 방법은 영상의 명암이나 형태에 상관없이 항상 균일한 밝기의 입력빔 세기를 생성할 수 있음을 알 수 있다.

2. BPH를 이용한 기준빔의 각도제어  
 각도 다중화 방법으로 영상을 기록 및 판독할 수

있는 기준빔 생성을 위해 SA(simulated annealing) 알고리즘을 이용하여 BPH(binary phase hologram)를 설계하였다. 그리고 실시간 각도 제어를 위해 BPH를 컴퓨터를 이용하여 LCTV에 표현하였다. SA 알고리즘은 복잡한 최적해를 풀기 위한 반복적인 알고리즘으로써 국소 최적해에서 벗어날 수 있는 반면 많은 반복과정을 수행해야 하므로 시간이 많이 소요된다.

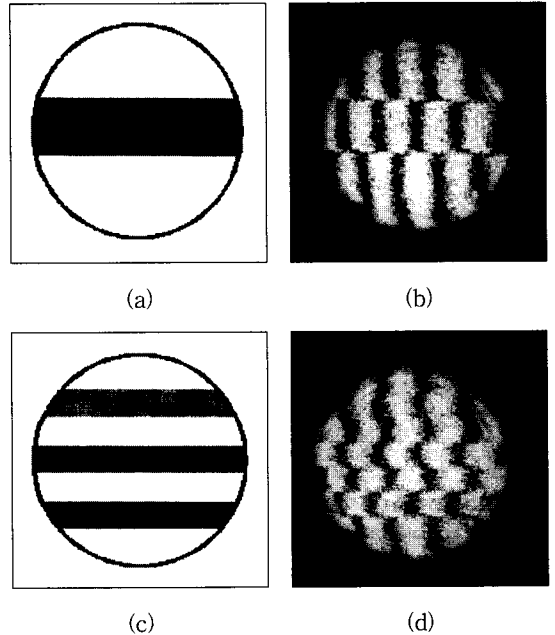


그림 1. LCTV에 인가되는 입력 패턴과 간섭 무늬  
 Fig. 1. Input patterns which applied on the LCTV and interferograms.



그림 2. 입력 영상 (a) 기존의 방법 (b) 제안된 방법  
 Fig. 2. Input image. (a) conventional method, (b) proposed method

본 논문에서는 SA 알고리즘을 이용하여 각도 다중화 방법에서 사용되는 기준빔들을 최적으로 생성하기 위한 BPH를 설계하였다. 기준빔 함수  $h(x,y)$ 는 SA 알고리즘을 통해 설계된 위상 홀로그램  $H(u,v)$ 을 푸

리에 역변환 하여 얻는다. 각 함수는  $N \times N$  화소들로 구성되어 있을 때, 이들의 이산적인 표현은

$$h_{mn} = \frac{1}{N^2} \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \sum_{l=-N/2}^{N/2-1} H_{kl} \exp\left(j2\pi\left(\frac{km}{N} + \frac{ln}{N}\right)\right) \quad (8)$$

와 같다. 여기서  $H_{kl}$  는  $H(u,v)$ 의  $(k,l)$ 번째 표본화 값이며,  $h_{mn}$  는  $h(x,y)$  의  $(m,n)$ 번째 표본화 값이다. 기준빔 생성을 위해 SA 알고리즘에서 사용된 비용함수를

$$E = \left( \frac{\eta}{AB} - I_{AB} \right)^2 \quad (9)$$

로 정의하였으며, 여기서  $\eta$  는 목표 효율이고, 이상치는 '1'이다.  $I_{AB}$  는  $(A,B)$  위치에서의 빔의 세기이다.  $A$  와  $B$  는 공간 영역에서 기준빔의 위치를 나타내며, 기준빔의 위치를 달리 하므로써 입사각도를 제어할 수 있다. 기준빔 생성을 위한 SA 알고리즘 과정은  $H_{kl}$  의 초기값을 '1', 또는 '-1' 로 무작위 선택하고, 비용함수  $E^{old}$  를 계산한 후, 이로부터 SA 알고리즘에 사용되는 초기온도  $T_{init}$ , 냉각속도  $D_i$ , 그리고 반복 횟수  $N$  를 결정한다.  $H_{kl}$  의 한 화소를 1에서 -1로 또는 -1에서 1로 바꾼후 비용함수를 새로이 계산한다. 만약 바꾼 화소값에 의해 새로이 계산된 비용함수가 감소하면 그 변화를 무조건 받아들이고, 그렇지 않으면 무조건 배척하는 것이 아니라 다음과 같은 확률을 도입하여 조건적으로 받아들인다.

$$P(\Delta E) = \exp(-\Delta E / T_n), \quad T_n = (D_i)^n T_{init} \quad (10)$$

여기서  $P$  는 수용 확률을 나타내고,  $\Delta E$  는 비용함수의 변화량을 나타낸다. 그리고  $T_n$  는  $n$ 번째 반복과정에서의 온도를 나타내는 매개 변수이다. 위의 과정이 모든 화소에 대하여 반복 수행된다. 홀로그램을 구성하는 모든 화소들이 선택되면 한 번의 반복 과정이 끝나게 되고, 위에서 설명한 일련의 과정을 반복 횟수만큼 수행하게 된다. SA 알고리즘을 이용하여 BPH를 설계하고, 이를 푸리에 변환하여 기준빔을 생성하는 과정을 컴퓨터 시뮬레이션 하였다. 그림 3은 SA 알고리즘에 의해 설계된 BPH이며, 그림 4는 그림 3을 푸리에 변환 하므로써 얻은 기준빔을 나타낸다. 기준빔의 위치는 BPH를 설계할 때 미리 결정할 수 있으므로 조절이 가능하고, 기준빔의 위치가 입사각도의 변화를 가져오므로 각 영상에 대한 주소를 쉽게 제어

할 수 있게 된다.

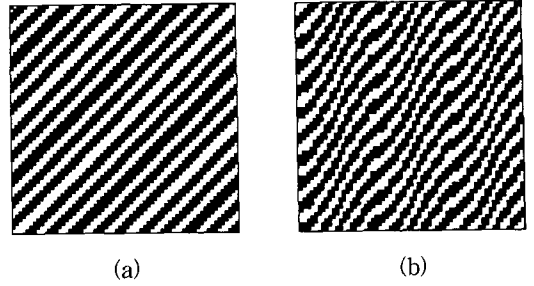


그림 3. 기준빔 생성을 위한 BPH  
(a) 한 개의 기준빔 (b) 세 개의 기준 빔  
Fig. 3. BPH for reference beam generation.  
(a) one reference beam, (b) three reference beams.

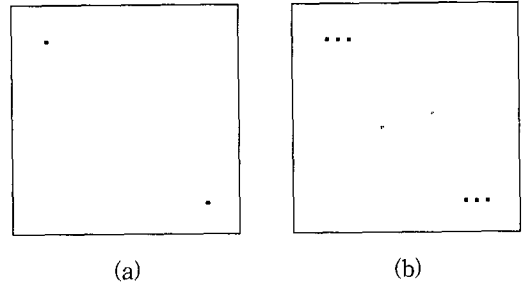


그림 4. 그림 3의 푸리에 변환에 의한 기준빔들  
(a) 한 개의 기준빔 (b) 세 개의 기준 빔  
Fig. 4. Reference beams by Fourier transform of Fig. 3.  
(a) one reference beam, (b) three reference beams.

기준빔은 컴퓨터로 제어되는 LCTV에 인가된 BPH를 광학적으로 푸리에 변환하므로써 실시간적으로 생성할 수 있다. 만약 기준빔 생성을 위한 BPH가 컴퓨터 메모리에 저장되어 있다면 실시간적으로 기준빔을 생성할 수 있으며, 이를 영상 다중화에 이용할 수 있다. 그림 5는 광학적으로 기준빔을 생성할 수 있는 실험장치의 구성도이다.  $\lambda/2$  평판은 사용된 빛의 편향 방향과 LCTV 표면의 액정 방향을 평행하게 하기 위해 사용되었으며, 공간 필터(S. F.)는 화소들 사이의 투명전극에 의한 고조성분과 dc성분을 제거하기 위해 사용되었다.

그림 6은 그림 3에 있는 BPH를 그림 5의 실험 구성도를 이용하여 광학적인 푸리에 변환에 의해 생성된 기준빔들이며, 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 결과와 일치함을 알 수 있다.

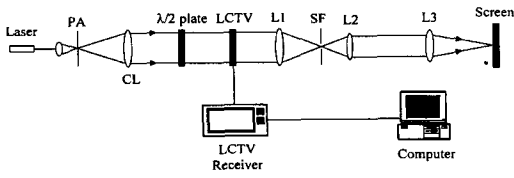


그림 5. 광학적 기준빔 생성을 위한 실험 구성도  
 Fig. 5. Schematic diagram of the experimental system for optical reference beam generation.

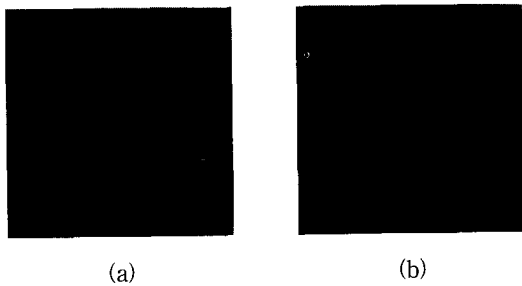


그림 6. 그림 3의 광학적 푸리에 변환에 의한 기준빔들 (a) 한 개의 기준빔 (b) 세 개의 기준빔  
 Fig. 6. Reference beams by optical Fourier transform of Fig. 3. (a) one reference beam, (b) three reference beams.

#### IV. 광 실험 결과 및 고찰

제안한 입력 방법과 각도 다중화 방법을 이용한 홀로그래픽 광 메모리 시스템의 구현 가능성을 알아보기 위해 그림 7과 같은 실험 장치를 구성하여 세 개의 이진 영문자 영상들을 45° cut BaTiO<sub>3</sub>(7.3×6.7×6.5mm)에 저장하고 재생하는 실험을 하였다. 그리고 빛 투과율이 다른 여러 형태의 영상들을 저장하고 재생하는 실험도 하였다. He-Ne 레이저( $\lambda = 632.8\text{nm}$ )로부터 나온 수평 편향된 빔이 BS에 의해 두 빔으로 나누어 진 후, 한 빔(물체빔)은 LCTV에 인가된 영상에 조사되고, 다른 빔은 기준빔 생성을 위해 LCTV에 인가된 BPH에 조사된다. 그리고 각각 푸리에 변환되며 이 때 LCTV의 투명전극에 의해 생기는 고조 성분을 제거한 후, 매질에 입사시켰다. 두 빔의 외부 입사각도는 11°로 하였으며, 각 영상이 저장될 때마다 BPH를 이용하여 1°씩 증가시켰다. 실험에 사용된 기준빔과 물체빔의 세기는 각각 650 $\mu\text{W}$ , 310 $\mu\text{W}$ 이며, 저장할 각 영상의 기록 시간을 결정하기 위해 측정된 기록 시정수와 삭제 시정수는 각각 12초와 15초이다.

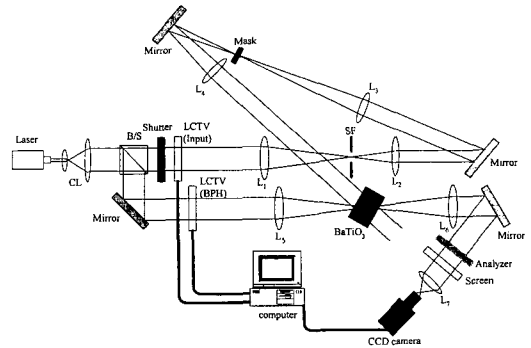


그림 7. 제안된 홀로그래픽 광 메모리 시스템  
 Fig. 7. The configuration of proposed holographic optical memory system.

그리고 각 영상의 저장 시간은 계획적 기록 방법에 의해 결정하였다. 이와 같은 조건으로 이진 영문자 'O', 'S', 'P' 세 영상을 위상 변조하여 순서대로 저장하고, 이를 저장한 역순으로 재생하는 실험을 하였다. 푸리에 변환을 통해 재생된 영상은 다시 편광기를 통과시켜 이진 영상으로 만들었으며 스크린에 맺히는 영상을 CCD 카메라로 획득하였다. 그리고 빛 투과율이 다른 영상의 저장 및 재생 실험을 위해 위와 같은 실험 조건으로 영문자 'A'를 크기를 달리하고 명암도 영상인 Lena 영상을 새로운 입력 방법으로 위상 변조하여 사용하였다. 그림 8은 실험에 사용된 입력 영상들을 나타내며, 실제로는 밝기 정보를 위상 정보로 변환하여 균일한 빔을 입력시켰다. 그림 9는 광 실험을 통해 재생된 영상들을 나타낸다. 그림 8(e)의 입력 영상은 기존의 방식으로는 빛의 투과율이 너무 작아서 기존의 기록 시간 결정 방법을 적용시키기가 어렵고, 재생시킬 때 저장된 영상이 나타나지 않을 수 있다. 제안된 방법은 입력 영상의 위상성분을 이용하므로 어떤 형태의 입력에 대해서도 균일한 입력빔을 만들 수 있어 기존의 계획적 기록 방법을 적용시킬 수 있으며, 저장된 영상 정보를 재생할 수 있다. 제안된 방법은 입력 영상의 위상성분을 이용하므로 어떤 형태의 입력에 대해서도 균일한 입력 빔을 만들 수 있어, 계획적 기록 방법의 가정을 만족시킬 수 있다. 그러나 LCTV의 위상 변조 능력이 선형적이지 못하고, CCD 카메라로 영상을 획득하였으므로 재생된 이진 영상과 명암도 영상이 선명하지 못하다. 특히 재생된 명암도 영상은 편광기의 방향으로 인해 음영상으로 표현되었고 눈으로 식별하는데 문제점을 지니고 있다. 만약 성능이 좋은

LCTV를 사용한다면 보다 깨끗한 영상을 실시간으로 얻을 수 있을 것이다.

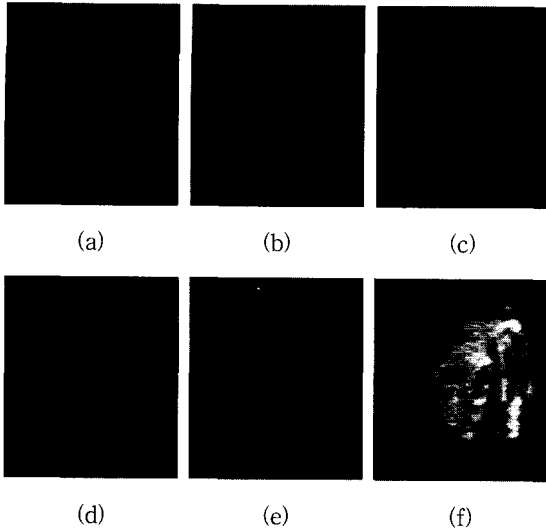


그림 8. 입력 영상  
Fig. 8. Input images.

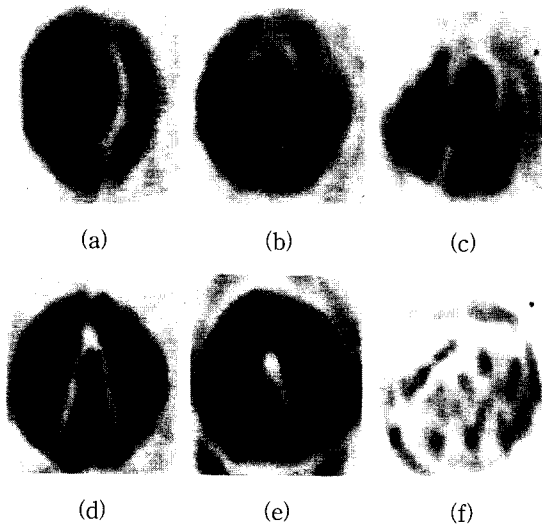


그림 9. 재생된 영상  
Fig. 9. Reconstructed images.

V. 결 론

새로운 입력 방법과 각도 다중화 방법을 이용한 홀로그래픽 광 메모리 시스템을 구현하여 다양한 형태의 영상들을 45° cut BaTiO<sub>3</sub> 단결정에 저장하고 재생하는 실험을 하였다. 기록시에 사용될 입력 영상은 액정판 앞뒤의 편광기를 제거한 LCTV에 표현하므로써

밝기 정보를 위상 정보로 변환하였다. 그러므로 영상의 형태나 전체 밝기에 상관없이 균일한 입력빔을 생성할 수 있었으며, 계획적 기록 방법의 가정을 만족시킬 수 있었다. 기준빔의 각도는 SA 알고리즘으로 설계한 BPH를 LCTV에 표현한 후, 푸리에 변환하므로써 제어하였다. 기준빔 생성을 위한 BPH를 미리 설계하여 컴퓨터 메모리에 저장한 후, 영상이 저장될 때마다 LCTV에 표현되는 BPH를 달리하므로써 쉽게 기준빔의 입사각도를 제어할 수 있었다. 제안된 홀로그래픽 광 메모리 시스템은 항상 균일한 세기의 입력빔을 만들 수 있으므로 빛 투과량이 적은 영상들을 저장 및 재생시킬수 있으며, 컴퓨터를 이용하여 기준빔의 입사각도를 제어할 수 있으므로 전체 시스템이 안정하다는 장점이 있다. 다양한 형태의 영상들을 저장 및 재생하는 광 실험을 통해 제안된 방법의 구현 가능성을 확인하였다. 그리고 홀로그래픽 광 메모리 기술은 디스크 또는 CD와 같은 기존의 메모리 기술과는 저장용량 및 처리 속도면에서 훨씬 우수하므로 미래 정보 산업 분야에 중추적인 역할을 하리라 기대된다.

참 고 문 헌

- [ 1 ] I. McMichael, W. Christian, D. Pletcher, T. Y. Chang, and J. H. Hong, "Compact holographic storage demonstrator with rapid access," *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 14, pp. 2375-2379, May 1996.
- [ 2 ] D. Psaltis and F. H. Mok, "Holographic memories", *Sci. Am.*, pp. 52-58, Nov., 1995.
- [ 3 ] J. H. Hong, I. McMichael, T. Y. Chang, W. Christian, E. G. Paek, "Volume holographic memory system : techniques and architectures," *Opt. Eng.* vol. 34, no. 8, pp. 2193-2203, Aug. 1995.
- [ 4 ] F. H. Mok, C. Tackitt, and H. M. Stoll, "Storage of 500 high-resolution hologram in a LiNbO<sub>3</sub> crystal," *Opt. Lett.*, vol. 10, no. 8, pp. 605-607, Apr. 1991.
- [ 5 ] F. H. Mok, "Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate," *Opt. Lett.*, vol. 18, no. 11, pp. 915-917, June 1993.
- [ 6 ] G. A. Rakuljic, V. Leyva, and A. Yariv,



“Optical data storage by orthogonal wavelength-multiplexed volume holograms,” *Opt. Lett.*, vol. 17, no. 20, pp. 1471-1473, Oct. 1992.

[ 7 ] C. Denz, G. Pauliat, G. Roosen, and T. Tschudi, “Volume hologram multiplexing using a deterministic phase encoding method,” *Opt. Comm.* vol. 85, pp. 171-176, Sept. 1991.

[ 8 ] C. Alves, G. Pauliat, and G. Roosen, “Dynamic phase-encoding storage of 64 images in BaTiO<sub>3</sub> photorefractive crystal,” *Opt. Lett.*, vol. 19, no. 22, pp. 1894-1896, Nov. 1994.

[ 9 ] D. Psaltis, D. Brady, and K. Wagner, “Adaptive optical networks using photorefractive crystals,” *Appl. Opt.*, vol. 27, no. 9, pp. 1752-1759, May 1988.

[ 10 ] D. Z. Anderson and D. M. Lininger, “Dynamic optical interconnections: volume holograms as optical two-port operators,” *Appl. Opt.*, vol. 26, no. 23, pp. 5031-5038, Dec. 1987.

[ 11 ] 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, Nov. 1991.

[ 12 ] 김철수, 노덕수, 김정우, 배장근, 도양희, 김수중, “BaTiO<sub>3</sub>에 영상저장을 위한 새로운 각도 다중화 방법,” *대한 전자 공학회 논문지*, 제 33B권 제 11호, pp. 89-96, 1996.

[ 13 ] 배장근, “액정 텔레비전 위상변조기를 이용한 오차확산 이진위상 홀로그램의 광학적 구현,” *경북대학교 석사학위 논문*, 1989.

[ 14 ] A. G. Kirk and T. J. Mall, “Design of binary computer generated holograms by simulated annealing: coding density and reconstruction error,” *Opt. Comm.*, vol. 94, no. 6, pp. 491-496, 1992.

[ 15 ] 김철수, 김정우, 배장근, 김수중, “Simulated Annealing 알고리즘에 의한 위상격자를 이용한 실시간 광 영상 생성,” *대한 전자 공학회 논문지*, 제 33B권 제 6호, pp. 1169-1175, 1996.

[ 16 ] P. Hariharan, *Optical Holography*, Cambridge University Press, Cambridge, 1984.

[ 17 ] P. Yeh, A. E. Chiou, J. Hong, P. Beckwith, T. Chang, and M. Khoshnevisan, “Photorefractive nonlinear optics and optical computing,” *Opt. Eng.*, vol. 28, no. 4, pp. 328-343, Apr. 1989.

저 자 소 개

金 喆 洙(正會員)

1995년 3월 ~ 현재 김천전문대학 전자통신과 전임강사.  
주관심분야는 광신호처리, 광메모리 및 광통신



朴 世 駿(正會員)

1965년 4월 1일생. 1993년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1997년 3월 ~ 현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학 중

宋 在 元(正會員) 第 33卷 A編 第 7號 參照

현재 경북대학교 전자공학과 교수



金 星 完(正會員)

1973년 7월 29일생. 1996년 2월 영남대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1998년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업 예정(공학석사). 주관심분야는 광굴절 홀로그램 및 실시간 광패턴인식



金 鍾 燦(正會員)

1964년 7월 3일생. 1986년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1989년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1992년 3월 ~ 현재 경북전문대학 전자과 조교수. 주관심분야는 광신호처리 및 형태인식

金 秀 重(正會員) 第 33卷 B編 第 7號 參照

현재 경북대학교 전자공학과 정교수