

# X-Y 갈바노 미러를 이용한 홀로그래픽 저장 장치의 프랙탈/각 다중화 구현 및 임의 탐색 성능의 평가

## Realization of Fractal/ Angle Multiplexing using X-Y Galvano Mirrors and Evaluation of Random Access Performance in Holographic Digital Data Storage

최진영<sup>†</sup>, 이재성\*, 김상훈\*, 김장현\*, 양현석\*, 박노철\*, 박영필\*, 박주연\*\*

Jin-Young Choi<sup>†</sup>, Jae-Sung Lee\*, Sang-Hoon Kim\*, Jang-Hyun Kim\*, Hyun Seok Yang\*, No-Cheol Park\*, Young-Pil Park\* and Joo-Youn Park\*\*

### Abstract

Fractal/angle multiplexing in a *LiNbO<sub>3</sub>* crystal using a X-Y Galvano mirror, and the random access concept in fractal/angle multiplexing are discussed in this paper. First, the brief introduction of the designed holographic digital data storage system is presented. Then, the average access time concept for the storage system is newly defined, and the comparison of the average access time between the holographic storage and a conventional optical disk is performed. Second, the basic simulation and experiment to find the X-Y Galvano mirror dynamics are conducted. From this analysis, we find that the average access time in our HDDS which has 6 degree scan angle is about 5 msec. This result is very high performance when it compared with the average access time of a conventional optical disk. Finally, some recording results using fractal/angle multiplexing are presented, then, the relationship between bit error rate and angle mismatch for the each multiplexing are discussed.

**Key Words :** 홀로그래픽 (Hographic), 정보저장장치(Data Storage Device), 프랙탈/각 다중화 (Fractal/Angle Multiplexing), 갈바노 미러(Galvano Mirror), 임의 탐색 (Random Access)

### 1. 서론

현재 사용되고 있는 정보저장기기의 저장 방식은 매우 다양하며, 크게 자기/광/반도체를 이용한 방식으로 분류할 수 있다. 이들 저장 방식에서 광기록 방식의 ODD(Optical Disk Drive)는 여타의 다른 저장기와 비교 하였을 때, 데이터의 배포성 및 호환성에서 매우 우수하여 현재까지 정보저장기기의 주요한 위치를 차지해 왔다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 HDD(Hard Disk Drive)와 같

은 타 정보저장장치와 비교하였을 때, 낮은 저장용량과 느린 데이터 전송 속도가 큰 단점으로 지적되고 있다. 근래 HD-DVD(High Density Digital Versatile Disk)나 BD(Blu-ray Disk)등이 등장하면서 저장용량에 대한 요구는 어느 정도 충족하게 되었지만, 여전히 낮은 데이터 전송 속도는 앞으로 해결해야 할 문제로 남아있다.

따라서 기존의 광 기록 방식의 모든 장점을 가지면서 빠른 데이터 전송속도를 구현할 수 있는 홀로그래픽 디지털 정보저장장치(Holographic Digital Data Storage: HDDS)에 근래 보다 많은 관심이 집중되고 있다. 1991 년 Mok 이 실험적인 결과를 통하여 홀로그래픽 저장장치의 구체적 가능성을 보인 이후[1], 많은 활발한 연구들이 HDDS 분야에서 진행되어 왔다.[2,3,4,5,6] 그러나 기존의 선행 연구 중에서, 정보저장기기의 주요 성능 지표인 임의 탐색(random access) 성능을 HDDS 에 맞게

<sup>†</sup> CISD, Yonsei University  
E-mail : mithra@yonsei.ac.kr  
TEL : (02)123-1234

\* CISD, Yonsei University

\*\* Digital Media Lab., A/V Group, Daewoo Electronics  
논문접수일 (2005 년 10 월 6 일)

새롭게 정의하고 이를 평가한 연구는 진행된 바 없었다.

따라서 본 논문에서 각형(cubic type) 광굴절(photorefractive) 기록 물질을 사용하는 경우에 대하여, 임의 탐색을 정의하고 구현된 시스템을 이용하여 이를 평가하였다. 평가 시스템은 X-Y 갈바노 미러를 이용하여 프렉탈(fractal)/각(angle) 다중화를 구현한 HDDS 이다. 먼저 프렉탈/각 다중화 방식의 평균 탐색(average access) 시간에 대한 정의를 새롭게 내리고, 이에 대한 평가를 수행하였다. 수행 결과로부터 현재 구성된 HDDS 의 평균 액세스 타임은 제어를 하였을 때 5msec 내외가 될 수 있음을 보였다. 마지막으로 구현된 프렉탈/각 다중화를 위한 HDDS 를 이용한 기록 결과 및 임의 탐색 정밀도와 BER 의 관계를 간단히 다루었다.

## 2. 디지털 홀로그래픽 저장 장치

### 2.1 홀로그래픽 디지털 정보저장장치

HDDS 는 빔의 간섭(interference) 현상을 이용하여 정보를 기록하는 방법으로, 1948 년대 Gabor 가 최초로 그 아이디어를 제안한 이후 지속적인 관심을 받아왔다. HDDS 의 가장 큰 특징은 체적 기록(volume recording)이 가능하다는 점과, 데이터가 2 차원의 페이지 단위로 입출력이 이루어 진다는 점이다. 체적 기록 방식을 통하여 고용량/고밀도 정보저장이 가능하며, 페이지 단위의 입출력으로 부터 빠른 데이터 전송 속도를 구현이 가능하다.

### 2.2 각/프렉탈 다중화(multiplexing)

HDDS 에서 매질의 동일 공간에 여러 페이지의 데이터를 기록하는 방법을 다중화라 하며, 이러한 다중화 기법은 데이터 저장밀도에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 현재까지 많은 연구들이 진행되어 왔으며, 대표적인 다중화 기법으로 이동(shift) 다중화, 각(angle) 다중화, 공간(spatial) 다중화 등이 있고, 기록 밀도의 증가를 위하여 대부분 이들 방법을 혼합하여 사용하고 있다.[2,3,4,6]

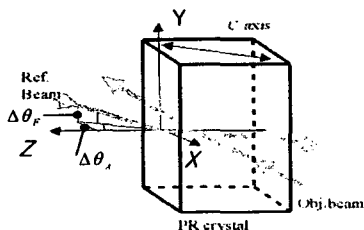


Fig. 1 Fractal/angle multiplexing in a photorefractive crystal

이러한 다중화 기법에서 각 다중화는 구조가 간단하고 구현이 용이하므로 많이 사용되는 다중화 방법이다. 각 다중화에서 각 선택도(angle selectivity)는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta\theta_A = \frac{\lambda \cos\theta_s}{nd \sin(\theta_r + \theta_s)} \quad (1)$$

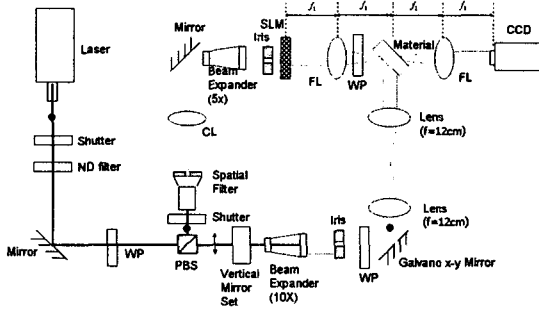
여기서  $n$  은 매질의 굴절률,  $\lambda$  는 레이저의 파장,  $d$  는 매질의 두께, 그리고  $\theta_r$  과  $\theta_s$  는 각각 기준빔(reference beam)과 신호 빔(signal beam)이 매질 경계면의 법선 방향과 이루는 각도를 의미한다. Fig.1 과 같이 기록 물질의 광축(optical axis)이 주어진 경우, 각 다중화는 광축 상에서 수평 방향으로 기준빔의 각을 변화하는 방법이며(X-Z 평면), 프렉탈(fractal) 다중화는 수직 방향으로 기준 빔의 각도를 변화시키는(Y-Z 평면) 방법이다. 프렉탈 다중화의 경우 각 다중화와는 달리, 상당히 큰 각 선택도를 가진다.[6]

## 3. 각/프렉탈 다중화를 위한 홀로그래픽 저장장치의 구현

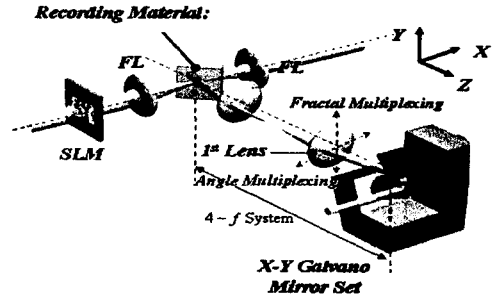
### 3.1 프렉탈/각 다중화 구현을 위한 세트의 구성

X-Y 갈바노 미러를 이용한 프렉탈/각 다중화 구현을 위한 시스템의 개략도를 Fig.2 에 제시하였다. 이 때, 매질에 입사되는 기준 빔의 각을 수평/수직으로 자유롭게 조절하기 위하여, 4-f 시스템을 채택하였다. X 방향의 갈바노 미러를 이용하여 수평 방향 기준 빔의 입사각을 조절하며, Y 방향의 갈바노 미러를 이용하여 수직 방향의 기준 빔의 입사각을 조절한다. 4-f 구조를 채택하는 경우, Fig. 3 에서 보여지는 바와 같이 X-Y 갈바노 미러 바로 앞의 렌즈 편면상에 위치하는 빔의 각도가 기록 매질에 입사되는 각이 된다.

세트 구성을 위해 사용된 주요 컴퍼넌트의 주요 사양은 Table.1 과 같으며, SLM 과 CCD(charge coupled device) 카메라는 1:16 오버 샘플링(over sampling)을 적용하였다. 데이터의 페이지는 120×90 픽셀이며, CCD 카메라는 1 초당 15 프레



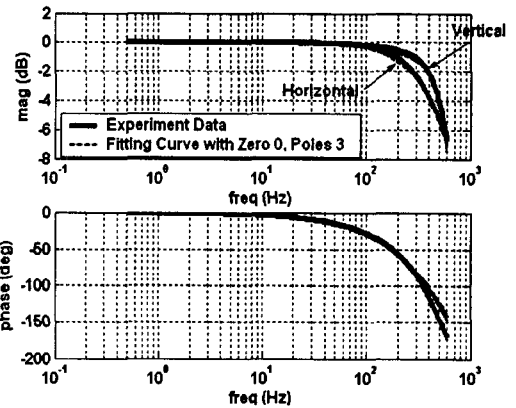
**Fig. 2** System set-up for fractal/angle multiplexing  
 WP:  $(1/2)\lambda$  Wave Plate, FL: Fourier Lens, CL: Collimate  
 Lens PBS: Polarized Beam Splitter  
 SLM: Spatial Light Modulator



**Fig. 3** X-Y Galvano mirror set and 4-f system for fractal/angle multiplexing

**Table 1** Various devices and the specification of it

Laser (Coherent)	532nm, 150 mW
SLM (CRC Opto.)	1024 × 768 pixels, 36 μm pixel pitch
CCD (Redlake)	1008 × 1018 pixels, 9 μm pixel pitch
FL (Newport)	$E.F.L. = 12\text{ cm}$
Test Image	120 × 90 pixels,



**Fig. 4** Dynamics of X-Y Galvano mirror

임의 속도를 가진다.

**3.2 X-Y 갈바노 미러의 동특성 평가**

X-Y 갈바노 미러의 동특성은 HDDS의 제어 정밀도 및 임의 탐색 제어 성능에 중요한 영향을 미치므로, 이에 대한 평가가 반드시 이루어져야 한다. 논문에서 사용된 X-Y 갈바노 미러(6450, Cambridge Technology 社)의 동특성을 동적 신호 분석기(dynamic signal analyzer, 35670A)를 이용하여 측정하였다. 실험에 사용된 X-Y 갈바노 미러는 회전각을 검출하기 위한 엔코더(encoder)를 내장하고 있다. X-축 방향의 미러의 동역학을  $G_H(s)$  [deg/V], 프랙탈 다중화를 위한 Y-축 방향의 미러의 동역학을  $G_V(s)$  [deg/V]라 하면, 실험 결과는 Fig.4와 같으며 곡선 적합(curve fitting)을 통하여 각각 식 (2)와 식(3)의 결과를 얻을 수 있다.

$$G_H(s) = \frac{1.163 \times 10^8}{s^3 + 962.5s^2 + 5.958 \times 10^5 s + 1.16 \times 10^8} \quad (2)$$

$$G_V(s) = \frac{7.925 \times 10^7}{s^3 + 741.4s^2 + 3.929 \times 10^5 s + 7.912 \times 10^7} \quad (3)$$

**4. 홀로그래픽 저장 장치의 임의 탐색의 정의 및 평가**

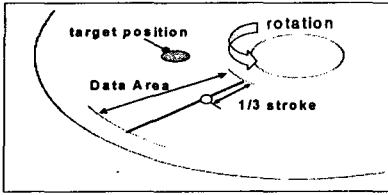
**4.1 HDDS 임의 탐색 성능의 정의**

정보저장기에서의 임의 탐색(random access) 성능은 데이터 전송률과 깊은 관련이 있다. 따라서 본 단락에서는 기존의 ODD와 논문에서 다루고 있는 프랙탈/각 다중화를 사용한 HDDS의 임의 탐색을 비교하였다. 각각의 시스템에서 임의 탐색에 필요한 시간을 각각 나타내면 식 (4)와 (5)로 표현 가능하다.

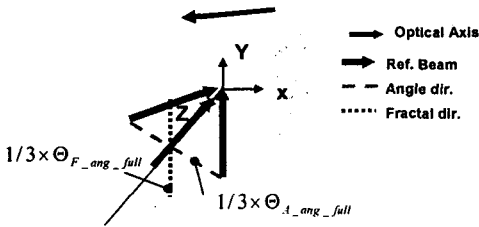
$$T_{ODD\_access} = T_{seek} + T_{res} + T_{pull-in} + T_{lat} \quad (4)$$

$$T_{HDDS\_access} = T_{seek} + T_{res} + T_{pull-in} \quad (5)$$

여기서  $T_{seek}$ 은 특정 데이터에서 다른 데이터로 이동하는데 소요되는 시간,  $T_{res}$ 는 액츄에이터가 목표치에서 허용 한계값 이하로 진동이 감쇄하는



(a) Average access time in a conventional ODD



(b) Average access time in a HDDS

Fig. 5 Average access time definition

데 걸리는 시간,  $T_{pull-in}$  는 목표 트랙 또는 목표 페이지로 정확하게 인입(pull-in) 하는데 걸리는 시간, 마지막으로  $T_{lat}$  는 현 트랙에서 디스크가 회전하면서 현재 빔으로 이동하는데 걸리는 시간(latency time)을 의미한다. 프렉탈/각 다중화만을 사용하는 HDDS 의 경우, 기록 매질이 이동하지 않으므로 기존 ODD 와 같은  $T_{lat}$  은 존재하지 않는다.

임의 탐색 성능과 더불어 시스템 성능의 주요한 파라미터는 평균 탐색(average access) 시간이다. 기존 ODD 에서는, 디스크 정보 영역의 내주에서 외주로 방향으로 1/3 거리를 이동하여 정보를 읽는데 소요되는 시간으로 정의하고 있다. 그러나 프렉탈/각 다중화를 행하는 경우, 임의 탐색이 각변화에 의하여 이루어지기 때문에 새롭게 정의되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 다음과 같이 프렉탈과 각 다중화의 평균 탐색 시간을 각각 식(6) 과 식(7)로 새롭게 정의하였다.

$$T_{A\_avg} = 1/3 \Theta_{A\_ang\_full} \quad (6)$$

$$T_{F\_avg} = 1/3 \Theta_{F\_ang\_full} \quad (7)$$

여기서  $\Theta_{A\_ang\_full}$  와  $\Theta_{F\_ang\_full}$  는 각각 각 다중화와 프렉탈 다중화시 필요한 다이내믹 레인지(dynamic range)를 의미한다.

#### 4.2 X-Y 갈바노 미러를 이용한 프렉탈/각 다중화의 임의 탐색

4-f 시스템을 이용하는 경우, 시스템의 첫번째

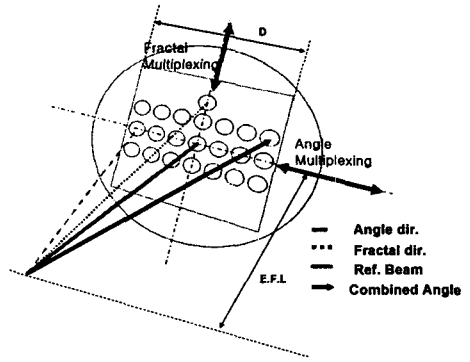


Fig. 6 Reference beam position on the lens during fractal/angle multiplexing

렌즈 상의 기준빔의 위치가 곧 프렉탈/각 다중화에 필요한 각을 결정한다(Fig.2, Fig.3 참조). 첫번째 렌즈의 구경을  $D$ , 그리고 그 렌즈의 유효 초점 거리를 E.F.L.(Effective Focal Length) 라고 하면, 기준 빔이 스캔(scan)할 수 있는 범위는, 기준 빔의 크기를 무시할 경우 다음과 같다.

$$\theta_{scan} = \pm \tan^{-1} \left( \frac{D/2}{E.F.L} \right) = \tan^{-1} (1/2 \times f/\#) \quad (8)$$

그러나 실제 사용 가능한 영역은, 구면 수차 등 여러가지 사항들을 고려하여 보다 적은 범위를 사용한다.

$$\theta_{A\_scan} < \theta_{scan}, \theta_{F\_scan} < \theta_{scan} \quad (9)$$

따라서 임의 탐색을 프렉탈/각 다중화로 기록한 모든 영역에서 수행하고자 하면, 현 지점에서 임의의 지점으로의 x 방향으로 이동하기 위한 시간  $T_{A\_max}$  와 y 방향으로 이동하기 위한 시간  $T_{F\_max}$  중 더 긴 시간에 의존하게 된다.

### 5. 임의 탐색 성능 평가를 위한

#### 시뮬레이션 및 실험

##### 5.1 임의 탐색 성능 평가를 위한 시뮬레이션

X-Y 갈바노 미러를 이용한 프렉탈/각 다중화의 임의 탐색 성능의 평가를 위하여, 먼저 갈바노 미러의 특성을 반영한 MATLAB 시뮬레이션을 수행하였다. X-Y 갈바노 미러를 블록 다이어그램으로 표현하면 Fig.7 과 같다. 여기서 입력  $R(s)$  과  $F(s)$  는 상수값으로 간주할 수 있으며 실험적으로 다음의 관계를 찾아내었다.

$$F(s) = 2 \text{ [deg/Volt]} \quad (10)$$

$$H(s) = 0.32 \text{ [Volt/deg]} \quad (11)$$

개루프(open loop)로 2°의 스텝 응답을 준 경우, 응답 특성을 시뮬레이션 하면 Fig. 8과 같다. 시뮬레이션 결과로부터 X-Y 방향 갈바노 미러의 모든 경우 대략 정착 시간(settling time) 2.5 msec 시간 이내임을 알 수 있다.

### 5.2 임의 탐색 성능 평가를 위한 기초 실험

시뮬레이션의 검증은 위하여, X-Y 갈바노 미러에 2°에 해당하는 입력을 DSP를 이용하여 적용하였다. 이것은 4.1 절에서 정의한 평균 탐색 시간 평가를 위한 입력에 해당된다. 이 때 사용된 DSP는 10kHz의 샘플링을 적용하였으며, 이는 시뮬레이션에서 사용하였던 샘플링 주파수와 동일하다. 엔코더의 출력값으로부터 회전각을 측정하여 결과를 Fig.9에 제시하였으며, 이로부터 정착 시간은 대략 2.3 msec 내외임을 찾았다. 이 수치는 시뮬레이션으로부터 얻어진 정착 시간과 거의 유사하고, 출력 파형도 시뮬레이션과 잘 일치함을 알 수 있다.

### 5.3 HDDS의 평균 탐색 성능 평가 및 고찰

두께가 1 cm인 리튬니오베이트(LiNbO<sub>3</sub>) 크리스탈에 파장이 532 nm인 Nd-Yag 레이저를 기준 빔과 기록 빔이 90°로 만나게 기록한다고 가정하였을 경우, 식 (1)에 의하여 각 선택도는 0.0024°이다. 실험에 사용된 X-Y 갈바노 미러의 분해능이 각 선택도에 대략 1/8이 되므로 X-Y 갈바노 미러의 사용은 적절하다고 판단할 수 있다. 이와 같은 조건의 경우 대략 1°에 1,000 장을 기록할 수 있고, 현재 구성된 세트의 다이내믹 레인지가 대략 ±3°임을 고려할 때 최종적으로 각 다중화만을 이용하여 이론적으로 대략 6,000 개의 이미지를 저장할 수 있다.

따라서 본 논문에서 프렉탈/각 다중화가 구현된 평균 탐색을 위한 스캔 각을 2°로 정하였다. 실제 기록이 가능한 데이터의 개수는 이미지의 회전 효율 식 (12)과 관련되므로, 시스템의 특성을 고려하여야 한다.

$$\eta = \frac{\eta_{\max}}{M} \left( \frac{\tau_c^2}{\tau_w^2} \right) \quad (12)$$

여기서  $\eta_{\max}$ ,  $\tau_c$ ,  $\tau_w$ 는 최대 효율, 기록 및 지움

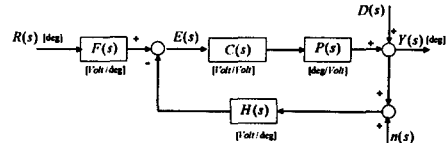


Fig. 7 Servo loop diagram for galvano mirror

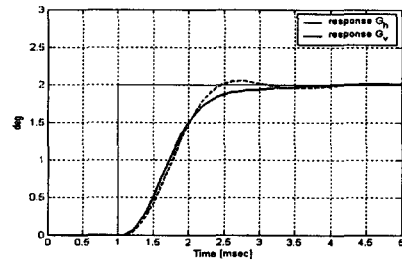


Fig. 8 Step response: simulation

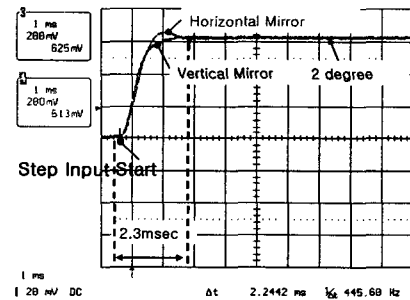


Fig. 9 Step response: real system

상수를 의미하며,  $M$ 은 중첩한 페이지의 수를 의미한다.

구성된 프렉탈/각 다중화를 위한 HDDS의 평균 탐색 성능 평가를 위하여 시뮬레이션을 수행하여, 그 결과를 Fig.10에 제시하였다. 개루프의 경우, 정상 상태에서 0.004°~0.005°의 정상 상태 오차가 보이는데 이는 앞선 조건에 의하여 목표 페이지에서 1~2 페이지를 벗어난다는 것을 알 수 있다. 이것은 페루프 제어를 통하여 보상을 할 수 있으며, 개루프 적용시 정착 시간이 2.3msec 내외이므로 제어를 행하는 경우 충분히 5msec 이내로 목표 페이지로 정확히 이동할 수 있을 것으로 예상된다. 만일 목표 페이지에서 CCD가 페이지를 읽어 들이는데 걸리는 시간을  $T_{read}$ 라고 하면, 프렉탈/각 다중화의 평균 탐색 시간은 최종적으로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$T_{HDDS} = 5[msec] + T_{read} \quad (13)$$

현재 상용 ODD의 탐색 시간이 70msec~140msec 내외임을 고려할 때, 현재 구성된

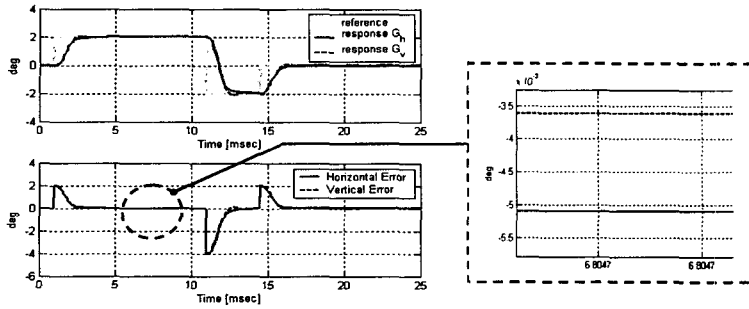


Fig. 10 Average access time simulation: no control

HDSS의 평균 탐색 시간은 상당히 우수함을 알 수 있다.

### 6. 임의 탐색 정확도와 BER의 관계

임의 탐색의 궁극적인 목표는 빠르고 정확하게 목표 페이지를 찾는 데 있다. Fig.2와 같이 구축된 시스템을 이용하여,  $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 의 0.03% Fe가 도핑(doping)된 리튬니오베이트( $\text{LiNbO}_3$ )에 각 다중화를 이용하여 기록한 결과를 Fig.11에 제시하였다. 기록한 데이터의 BER(Bit Error Rate)은 여러 요소에 의하여 좌우되지만, 기록시 기준빔의 각으로 재생하였을 때 가장 작게 검출된다. 따라서 임의 탐색 정확도와 BER은 매우 밀접한 관련을 가지며, 이를 살펴보기 위하여 각 다중화를 수행하였을 때, 회절 효율(diffraction efficiency)과 각 어긋남(angle mismatch)의 관계를 살펴보았다. 논문에 기술된 시스템의 경우, 각 다중화에 대한 정규화된 회절 효율과 각 어긋남의 관계는 Fig.12와 같다.

Fig.12가 시사하는 바는 정확한 임의 탐색이 이루어지지 않는 경우, 재생되는 데이터의 회절 효율이 떨어질 뿐 아니라 이로 인하여 BER에 영향

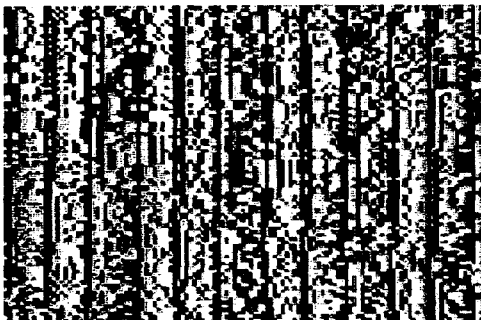


Fig. 11 Reconstructed data using angle multiplexing (experiment)

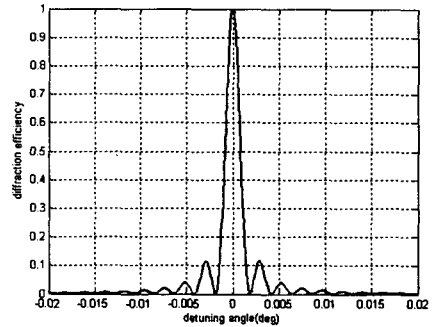


Fig. 12 Diffraction efficiency vs. angle mismatch for angle multiplexing (simulation)

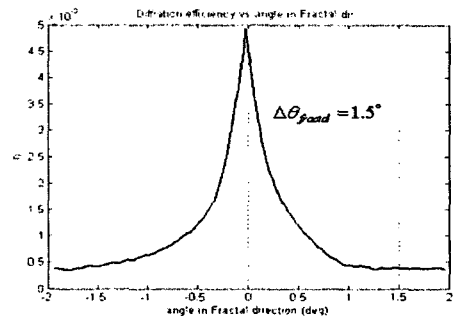


Fig. 13 Diffraction efficiency vs. angle mismatch for Fractal multiplexing (experiment)

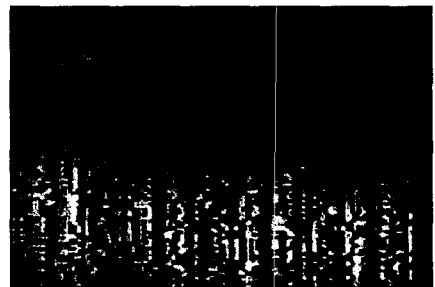


Fig. 14 Image shift phenomenon caused by angle mismatch (Fractal multiplexing, experiment)

을 줄 수 있음을 의미한다. 특히 이러한 현상은 기준빔의 분포가 불균일할 경우 더욱더 크게 나타난다. 또한 Fig.12 의 그림과 같은 결과는 프렉탈 다중화에도 나타나게 되는데, 기록된 데이터의 회절 효율과 각 어긋남의 관계는 각 다중화에 비하여 복잡할 뿐 아니라 보다 다양한 요소에 영향을 받는다. 기준빔의 직경을 약 2mm 로 하였을 때, 프렉탈 다중화에서 시스템의 회절 효율과 각 어긋남의 관계를 광 파워 미터(optical power meter)를 이용하여 실험적으로 구하면 Fig.13 과 같다. Fig.12 와 Fig.13 의 결과로부터, 각 어긋남에 대하여 재생되는 회절 효율의 관계가 각 다중화와 프렉탈 다중화가 매우 다름을 알 수 있다.

또 다른 특징은 CCD 에서 검출되는 이미지로부터 찾을 수 있다. 각 다중화를 하는 경우, 각 어긋남에 대하여 검출되는 기록된 데이터의 이미지는 CCD 카메라에서 이동하지 않고 Fig.12 와 같이 회절 효율만이 변한다. 그러나 프렉탈 다중화의 경우, 각 어긋남에 대하여 Fig.14 과 같이 기록된 이미지가 상하로 이동(shift)하게 된다. 따라서 CCD 카메라의 고정된 픽셀로 데이터를 판독하는 경우, 프렉탈 다중화 기법이 BER 에 보다 취약함을 알 수 있다.

## 7. 결 론

HDDS 의 중요 성능 지표의 하나인 임의 탐색에 대한 개념을 제안하고, 프렉탈/각 다중화를 위한 HDDS 의 기록 결과 및 임의 탐색 성능을 본 논문에서 다루었다. 프렉탈/각 다중화 구현시 임의 탐색 및 평균 탐색 성능은 기준빔의 각도 변화로 정의되며, 실험으로부터 상용 ODD 의 평균 탐색 성능보다 수십배 우수한 5 msec 내외의 평균 탐색 성능을 가지고 있음을 보였다.

또한 구성된 시스템을 이용하여 기록을 수행한 후, 각 어긋남 정도와 BER 의 관계가 다중화 방법에 따라 매우 다름을 시뮬레이션과 실험을 통하여 보였다. 그러나 BER 은 매우 다양한 요소에 영향을 받으므로 이에 대한 해석은 추가적으로 진행되어야 할 것이다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단(R11-1997-042-11002-0) 과 산업자원부 차세대 대용량 정보저장 장치 개발 사업(00008145) 지원으로 수행되었으며, 이에 관계

자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌

- [1] F. H. Mok, M.C. Tackitt and H. M. Stroll, 1991, "Storage of 500 high-resolution holograms in a *LiNbO<sub>3</sub>* Crystal", Opt. Lett. Vol.16, pp.605-607
- [2] K. Curtis, A. Pu and D. Psaltis, 1994, "Method for Holographic Storage using Peristrophic Multiplexing", Opt. Lett. , Vol.19, pp.993-994
- [3] S.-K. Kim, K.-T. Kim and E. S. Kim, 1999, "Non-Mechanical Angular Multiplexed Holographic Memory System using Moving Window on Liquid Crystal Display", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.38, No.38-40
- [4] J.-S. Jang, D.-H Shin and Y.-S Park., 2000, "Holographic data storage by combined use of Peristrophic, Angular and Spatial Multiplexing", Opt. Eng. , Voi.39, pp.2975-2980
- [5] Y. Sugiyama, N. Que and M. Yamamoto, 2004, "High Speed Data Position Detection Position of Holographic Memory", ISOM 2004, pp.190-191
- [6] Hans. J. C. et al., 2000, "Holographic Data Storage", Springer