

# 위상공액재생을 이용한 디스크형 홀로그래픽 디지털 정보저장장치 (Disk type holographic digital data storage system using phase-conjugate readout)

## 1. 머리말

"인류는 지난 30만년동안 12 엑사바이트(exabyte:  $10^{18}$  byte)의 정보를 만들어냈지만, 이제는 이보다 많은 양의 정보를 앞으로 3년 내에 생성해 낼 것이다." 이와 같이 상상조차 하기 어려운 속도로 정보량이 증가하고 있으며, 컴퓨터, 인터넷, 통신의 발전으로 인하여 정보의 디지털화도 가속되고 있다. 정보의 디지털화, 대용량화는 이를 수용할 수 있는 대용량 디지털 정보저장장치를 필요로 한다.

현재의 정보저장장치의 기술로는 급증하는 정보 수요량을 감당하기 어렵기 때문에 선진국에서는 이미 수년 전부터 새로운 개념의 정보저장장치의 가능성을 탐색해 왔다. 국내에서도 일부기업과 학교를 중심으로

Applications	E-Commerce	Video Mail/Multimedia	E-Library
LAN server	0.1-10 TB 200 Mbit/s	1-30TB 300Mbit/s	10-100TB 10bit/s
Year	2000	2005	2010
Personal diskware	10-100 GB 30-100 Mbit/s	100 GB 100-200Mbit/s	1TB 10bit/s
Applications	Video RAM 2 bit	HDTV Video ROM 4 bit	3D Video

그림 1. 연도별 정보용량 및 검색속도의 수요예측 (WTEC, 1998)

storage), NFR (near-field recording), SDS (SPM-based data storage)가 개발기술분야이다. 이 중 HDDS분과는 삼성과 대우, 경희대, 부경대, 서울대, 한양대, 아이블포트닉스가 참여하고 있으며, 매달 기

## 특집 | 홀로그래픽 메모리와 근접장 메모리

# 위상공액재생을 이용한 디스크형 홀로그래픽 디지털 정보저장장치 Disk type holographic digital data storage system using phase-conjugate readout

이흥선\*, 백상은\*\*, 김지덕\*, 이서한\*

연구를 지속해 왔으나 국가적으로 통합된 연구진행은 없었다. 현재 저장장치의 주류인 자기테이프, CD-ROM, DVD, HDD의 뒤를 이을 차세대 정보저장장치 개발을 위한 범국가적인 연구개발사업의 필요성에 의해 1999년 10월부터 산업자원부의 지원아래 개발기간 10년의 차세대 대용량 정보저장장치개발사업이 시작되었다. 정보저장장치 관련 기술분야 중 현재 실용화되어 있지는 않지만 향후 10년 이내에 제품으로 발전할 가능성이 큰 HDDS (holographic digital data

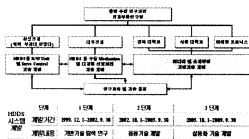


그림 2. HDDS분과 추진체계

\* 이색한연구원, 삼성종합기술원, 경기도 용인시 기흥읍 농서리 산14-1  
\*\* Storage Lab., 삼성종합기술원

술교류회 개회 등 활발한 교류를 하고있다(그림 2).

본고에서는 HDDS본과인 홀로그래픽 정보저장장치, 특히 디스크형 홀로그래픽 저장장치를 중심으로 소개하도록 하였다.

## 2. 홀로그래픽 정보저장장치 (Holographic digital data storage system)

### 2.1. 개요

홀로그래피는 1948년Dennis Garbor가 고안하였으며, 1963년에 Heerden에 의해 이를 정보저장에 이용하는 것이 제안되었고, 그 이후 실용화를 위한 많은 연구가 이루어져 왔다.

보통의 사진필름이 빛의 세기(intensity)만을 기록하는 데 반해 홀로그래프는 빛의 진폭(amplitude)과 위상(phase)을 모두 기록한다. 두가지 정보를 모두 기록하기 위해서는 빛이 하나 더 필요하는데, 두 빛이 만나서 생기는 간섭무늬가 매질에 굴절률의 변화로 기록되어 홀로그래피 형성된다. 물론, 이 때 간섭이 일어나기 위해서는 빛이 결맞음(coherence) 성질을 가지고 있어야 한다. 기록된 홀로그래프에 원래의 빛 중 하나를 입사시키면 나머지 한 빛이 회절되어 나오게 된다.

홀로그래프를 정보저장에 이용하기 위해서는, 두 빔 중 한쪽에 원하는 정보를 2차원 광패턴(ON-OFF pattern)으로 실어놓고(신호빔) 이를 다른 빔(기준빔)과 간섭시켜 기록매질에 저장한 후, 이렇게 저장된 홀로그래프를 필요할 때에 기준빔 만을 입사시켜 신호빔을 읽어낸다. 한정된 기록매질에 많은 양의 정보를 저장하기 위해서는 어드레싱방법이 필요한데, 홀로그래픽 저장장치에서는 다중화(multiplexing)이라는 용어를 사용한다. 다중화방법에는 각다중화<sup>1)</sup>, 위상다중화<sup>2)</sup>, 위치다중화<sup>3)</sup>, 파장다중화<sup>4)</sup> 등의 여러가지 방법이 있는데, 혼합된 형태의 다중화방법도 가능하다. 기존의 HDD나 CD가 기록매질의 표면에만 정보가 기록되는 반면, 홀로그래프는 체적에 기록되기 때문에 이러한 다중화가 가능하게 된다. 따라서, 기록매질이 두꺼워질수록 다중화 개수가 늘어난다. 홀로그래픽 저장장치에

서는 기록/재생의 단위가 페이지이기 때문에 한 페이지가 가지는 총 비트수와 다중화 수의 곱으로 기록매질의 저장용량이 결정된다. 표면에 정보를 기록하는 광기록 방식(CD, DVD)이나 자기기록 방식(HDD, magnetic tape)과는 다르게 기록매질의 체적에 정보를 기록하기 때문에 기록밀도를 말할 때는 면밀도가 아닌 체적밀도를 말하는 것이 정확하다. 그러나, 여타 기술과의 비교를 위해서 면밀도로 언급하기도 한다. 홀로그래프의 이론적인 단위체적당 기록밀도는  $1/\lambda^3$ 이며, 파장을 532nm로 가정하면 6.64 bits/ $\mu\text{m}^3$ 가 된다. 따라서, 만약 기록매질의 두께를 1mm로 가정하면 6640 bits/ $\mu\text{m}^2$ 가 된다. 물론, 이론적인 값이지만 CD ~0.7 bits/ $\mu\text{m}^2$ , DVD ~4.5 bits/ $\mu\text{m}^2$ , 1GB IBM MicroDrive ~23 bits/ $\mu\text{m}^2$ 와 비교하면 홀로그래픽 저장장치의 잠재력을 짐작할 수 있다. 또한, 페이지단위의 재생이므로 한 번의 access 시간동안 한 페이지의 데이터를 얻을 수 있는 장점도 있다. 예를 들어 페이지당 1Mbits이고, access 시간이 1ms라면 data rate은 1Gbps를 얻을 수 있다.

### 2.2. 기록매질

광굴절결정(photorefractive crystal)과 포토폴리머(photo polymer)가 있는데, 전자의 경우는 빛의 세기 분포에 따라 발생한 내부전계로 인하여 굴절률이 변화하는 광전효과(electro-optic effect)를 이용하여 기록 및 소거가 가능하여 기록/소거형(R/W) 저장장치에 사용 가능하다. 그러나, 소거가 가능하다는 것은 한편으로는 기록된 유용한 정보도 지워질 수 있다는 것이므로 이를 극복하기 위하여 기록과 재생에 다른 파장을 이용하는 등의 극복 노력이 계속되고 있다. 후자의 경우는 비가역적인 중합반응(polymerization)을 이용하기 때문에 기록 후 소거가 불가능하다. Dupont사에서 개발된 폴리머는 기록 후 후처리 과정에서 수축에 의한 문제점이 있었으나, Polaroid사에서 분사한 Aprilis사의 폴리머는 cationic ring-opening 중합을 이용하여 수축문제를 감소시켰다<sup>5)</sup>. 이는 ROM(read only memory)형태나 WORM(write once read many)형태의 저장장치에 이용될 수 있다. 그 밖에도 여러 가지의 기록매질이 개발되고 있는 것으로 알고

## 위상공액재생을 이용한 디스크형 홀로그래픽 디지털 정보저장장치

(Disk type holographic digital data storage system using phase-conjugate readout)

이지만, 현재 정보저장장치 시험에 가장 널리 사용되고 있는 것은  $\text{LiNbO}_3$ 와 Dupont/Aprilis의 포토폴리머이다.

### 2.3. 해외동향

미국에서는 DARPA의 지원을 받은 PRISM (photorefractive information storage materials)과 HDSS(holographic data storage system)가 완료되었고, 2000년 11월에 저장밀도 250Gbits/in<sup>2</sup>, data rate 10Gbits/s인 HDSS ultra-high-speed holographic disk demo system을 선보였다(그림 3). IBM은 광결정결정을 이용한 시험에 대한 발표를 꾸준히 하고 있으며, 2001년 4월에 user bit 241.5bits/μm<sup>2</sup>의 기록밀도를 발표하였다<sup>30</sup>. 2001년 1월에는 고성능 홀로그래픽 정보저장 기록매질 및

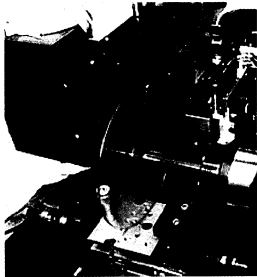


그림 3. HDSS 데모시스템



그림 4. 기록/재생장치 (파이오니아)

시스템의 개발 및 상용화를 목표로 Lucent에서 분사하여 InPhase Technologies를 설립하였다.

일본에서는 CD/DVD등 광저장장치에 주력하지만, 최근(2001.10.)에 일본 과학기술청과 파이오니아 주식회사에서 홀로그래피용 고성능 재료와 이를 이용한 소형 기록/재생장치를 개발했다고 발표하였다(그림 4).

유럽의 경우, 2001년 3월에 Optostor(독일) 벤처회사가 Cevit에서 홀로그래프를 이용한 대용량 정보저장장치를 전시했다고 하며, 스웨덴의 벤처회사인 Optilink는 미니 홀로그래프 저장장치를 개발 중이라고 발표했다.

## 3. 픽셀매칭과 위상공액재생 (pixel matching and phase-conjugate readout)

### 3.1. 개요

홀로그래픽 저장장치의 저장용량을 크게하는 방법 중의 하나는 단위 페이지당 bit 수를 늘리는 것이다. 재생된 이미지를 검출하기 위해서는 평면에 분포되어 있는 detector array가 필요한데, charge coupled device(CCD)나 CMOS detector가 이용된다. CCD나 CMOS는 모두 픽셀 단위로 구성되어 있고, 따라서 CCD/CMOS 픽셀 하나에 1 bit의 정보가 검출되는 것이 가장 큰 기록 밀도를 가지게 된다<sup>30</sup>.

저장되어 있는 홀로그래프를 재생하는 방법으로는 원래의 기준빔을 이용하는 방법과 위상공액 기준빔을 이용하는 방법이 있다. 원래의 기준빔을 이용하는 경우는 재생시 imaging을 위한 inverse Fourier lens가 필요하다. 렌즈의 초점거리를 조절하면 상의 크기를 CCD 픽셀의 크기에 맞출 수는 있으나, 이 경우 수차 및 왜곡이 없고 짧은 초점거리를 갖는 고가의 광학계가 필요하다. 반면에 위상공액 기준빔을 이용하면 재생할 때 위상공액된 신호빔이 기록시의 광경로를 그대로 되돌아가기 때문에 광학계의 위상오차가 누적되지 않게 되어 고가의 렌즈가 필요하지 않으며, 설계에 따라 렌즈가 없는 시스템도 구성할 수 있다. 위상공액 기

준빔으로 재생하면 SLM의 위치에 다시 재생상이 생기기 때문에 SLM 픽셀크기가 CCD 픽셀크기의 정수배가 되어야 매칭이 가능하며, SLM 픽셀크기와 CCD 픽셀크기가 같을 때 일대일 픽셀매칭(1-1 pixel matching)을 구현할 수 있다. 이 경우 재생되는 이미지가 정확한 SLM과 같기 때문에 회전, 수평이동, 확대/축소 등에 의해 이미지가 왜곡되기 쉽다. 따라서, 정확한 픽셀매칭을 위해서는 정밀한 정렬 조절이 필요하다.

### 3.2. 위상공역재생시 Cross-talk

각다중화를 한 경우 위상공역재생시의 cross-talk을 계산하여 보고하였다<sup>[11]</sup>. 결론적으로 cross-talk을 최소화할 수 있는 최적의 각도간격(optimum angular separation)은 Fourier 홀로그래프의 경우와 동일한 값을 가지며, NSR(noise-to-signal ratio)은 image-plane hologram과 유사하게 재생면에서의 위치에 무관하다 (식(3.1)). 반면에 Fourier 홀로그래프의 경우에는 식(3.2)과 같이  $y_0'$ 에 따라 NSR이 변화한다.

$$NSR = \sum_{n \neq l} \text{sinc}^2 \left( \frac{f}{2} \left( \Delta K_{nx} - \frac{\Delta K'_{ny}}{2k} \right) \right) \quad (3.1)$$

$$NSR = \sum_{n \neq l} \text{sinc}^2 \left( \frac{f}{2} \left( \Delta K_{nx} + \frac{\Delta K_{ny} y_0'}{F} + \frac{\Delta K'_{ny}}{2k} \right) \right) \quad (3.2)$$

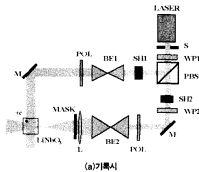
### 3.3. 위상공역재생을 이용한 일대일 픽셀매칭

위상공역기준빔을 만들어 주기 위해서는 phase-conjugate mirror(BaTiO<sub>3</sub> 이용)를 이용하여 real phase-conjugate beam을 만드는 방법<sup>[12]</sup>과 단순히 미러로 반사시켜 counter propagating 빔(기준빔이 평면파일 경우)을 이용하는 방법이 있다. 전자의 경우, 정확한 위상공역을 얻을 수 있기 때문에 왜곡이 적은 장점이 있는 반면 위상공역미러가 따로 필요하며 위상공역빔이 발생시키는 시간이 필요한 단점이 있다. 후자의 경우는 단순미러를 이용하기 때문에 정확한 위상공역파면을 제공하지 못해 이미지의 왜곡이 생기는 문제가 있음이 알려져 왔다. 따라서 1Mbits/page의 픽셀매칭은 위상공역미러를 이용하여 구현한 것만이 보고

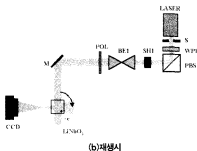
되었다<sup>[13]</sup>.

우리는 counter propagating 빔을 이용하여 1Mbits/page의 픽셀매칭을 성공하였으며, 더 나아가 6 sigma연구방법론을 도입하여 평균BER을  $4 \times 10^{-7}$ , 표준편차  $1.3 \times 10^{-6}$ 까지 낮추었다. 이는 한 페이지 1Mbits 중 평균적으로1개 이하의 오류만이 발생함을 뜻한다.

기록매질은 광굴절결정인 LiNbO<sub>3</sub>를, SLM은 Cr 마스크를, 검출기는  $12\mu\text{m} \times 12\mu\text{m}$  픽셀크기를 갖는 DALSA CCD를 이용하였다. Fourier면 근처에서 홀로그래프를 기록하였으며, 재생시 counter propagating 기준빔을 이용하였다. 실험장치 구성도와 픽셀매칭된 이미지를 그림 5와 6에 보였다. 또한, 오류를 감소시키기 위한 통계적인 기법을 이용하기 위해서는 반복실험이 필요하고 따라서 이를 용이하게 하기위하여



(a)기록시



(b)재생시

그림 5. 위상공역재생을 통한 1Mbits 픽셀매칭 실험구성도  
(BE1, BE2: beam expander, L: lens, M: mirror, PBS: polarizing beam splitter, POL: polarizer, S: slit, SH1, SH2: shutter, WP1, WP2: 0.2 wave plate)

## 위상공액재생을 이용한 디스크형 홀로그래픽 디지털 정보저장장치 (Disk type holographic digital data storage system using phase-conjugate readout)

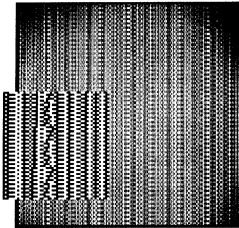


그림 6. 위상공액재생된 이미지(BER=0)

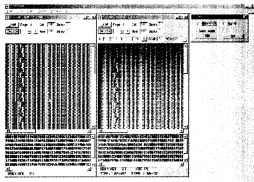


그림 7. GUI (SAITHOM) 화면

GUI(SAITHOM)를 자체개발하여 실험에 사용하였다(그림7).

위상공액재생에서는 여러 장의 홀로그램을 기록하고 재생하기 위해서 각 기준빔의 위상공액을 모두 만들어 주어야 하는 어려움이 있다. 이를 해소하는 방법으로 위상공액 신호빔 자체를 홀로그램으로 기록하는 방법이 제안되었고, 이 방법은 기록과 재생시 같은 기준빔을 이용할 수 있는 장점이 있다<sup>14</sup>. 이 방법도 역시 마찬가지로 재생시 렌즈없이 시스템을 구현할 수 있어, ROM 시스템의 경우 compact 하게 만들 수가 있으며, 위상공액재생의 특성으로 인하여 보다 쉬운 픽셀매칭이 가능하다. 먼저 master 홀로그램에서 위상공액 신호빔을 얻고, 이 위상공액 신호빔과 slave 기준빔을 간섭시켜 slave 홀로그램을 기록하는 방법을 이용한다.

## 4. 디스크형 홀로그래픽 정보저장장치 (Disk type holographic digital data storage system)

### 4.1. 개요

많은 양의 정보를 저장하고, 저장된 정보를 빠르게 읽어내는 것이 저장장치의 목표이다. 홀로그래픽 저장장치의 경우, 많은 양의 정보를 저장하기 위해서는 많은 다중화를 해야하는데 이는 두꺼운 기록매질이 필요하다. 광굴절결정은 두께가 충분히 크지만 앞서 말한 바와 같이 기록된 정보가 읽으면서 지워지는 문제가 있고, 고가이다. 가격경쟁력이 있는 포토폴리머의 경우는 두께가 현재 500 $\mu\text{m}$ 가 최대이다. 따라서 많은 양의 정보저장을 위해서는 각다중화 외에 위치다중화 즉, 넓은 면적에 기록을 해야 한다. 또한, 빠른 access를 위해서는 읽어내려는 위치에 빨리 도달해야 하는데 이는 기존의 CD, HDD에서와 같이 회전하는 디스크의 형태를 도입하면 된다<sup>15</sup>.

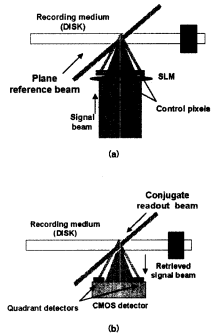


그림 8. 위상공액재생을 이용한 기록/재생

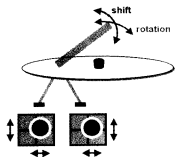
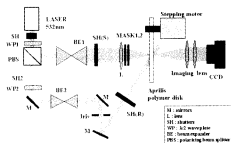


그림 9. 기준빔의 입사각의 변화에 대한 control pixel의 움직임

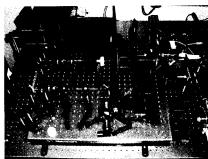
디스크형태의 포토폴리머(Aprilis)에 그림 8(a)와 같이 기준빔(평면파)과 신호빔을 간섭시켜 홀로그래름을 저장하고, 재생시에는 그림 8(b)와 같이 counter propagating 빔을 이용하여 위상공액재생을 한다. 디스크의 회전, 요동 등으로 인하여 재생상의 위치가 변화하게 되고 정확한 이미지를 검출할 수 없게된다. 따라서 이를 보정하기 위한 서보(servo)가 필요하며 서보신호를 얻기위한 control 픽셀을 image data와 같이 기록한다. 재생 시에는 quadrant detector에 들어오는 control 픽셀의 신호를 검출하고 그림 9와 같이 기준빔의 입사각도를 조절하여 image data가 정확한 위치에서 검출될 수 있도록 조절한다. 위상공액재생의 경우는 Poirier 홀로그래름의 경우<sup>18)</sup>와는 달리 x, y, z 변이에 대해서도 모두 조절해 주어야 하는 어려움이 있다.

## 4.2. 기록계

디스크 기록계 setup은 그림 10과 같다. 평원은 532nm 파장의 Coherent사 레이저를 이용하였고, 디스크의 회전은 stepping motor를 이용하며, 5도(72 spots) 간격으로 기록하였다. Control pixel 크기는 재생시 디스크중심을 기준으로 안쪽과 바깥쪽의 직경이 각각 75 $\mu$ m, 150 $\mu$ m이며, data pixel의 크기는 서보 쪽을 우선적으로 확인하기 위해 120 $\mu$ m  $\times$  120 $\mu$ m(102 $\times$ 102 pixels)로 비교적 크게 하였다. 한 스팟에서의 각다중화를 위해서는 기준빔 쪽에 4f 렌즈를 도입하여 구성하고 재생계에서도 4f를 추가해야한다. 이렇게 기록한 디스크를 뒤에 설명하는 재생계에 장착하여 정보를 읽어내게 된다.



(a) 기록계 setup



(b) 기록계 사진

그림 10. 기록계

## 4.3. 재생계(홀로그래픽 디스크 평가)

재생전용 홀로그래픽 디스크 평가기는 그림 11과 같이 구성된다. 레이저빔이 galvanometer G1, G2에 의해 디스크에 입사되는 각도가 변경되어 홀로그래름이 기록된 디스크면에 도달한다. 미러 M1, M2, M3는 레이저로부터 디스크까지의 광경로를 맞추기 위한 것이다. 디스크로부터 재생된 홀로그래름 data 이미지와 control pixel은 각각 CMOS 센서와 quadrant detector에 검출된다. 제어기는 quadrant detector에 검출된 control pixel 신호를 가지고 위치 오차를 계산하여 기준빔의 입사각도가 디스크에 기록된 홀로그래름 이미지에 정확히 맞도록 galvanometer G1, G2를 제어한다. 또한 디스크의 회전수를 일정하게 유지하기 위하여 spindle motor 제어가 별도로 구성되어 있다. 그림 12은 실제 실험장치를 보여주고 있다.

홀로그래름으로 저장된 데이터를 회전하는 디스크에서 읽기 위해서는 적절한 방법으로 재생된 이미지를 CMOS 센서에 픽셀매칭 시켜줘야 한다. 이상적인 경

## 위상공액재생을 이용한 디스크형 홀로그래픽 디지털 정보저장장치

(Disk type holographic digital data storage system using phase-conjugate readout)

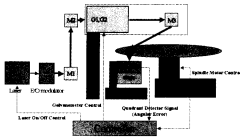


그림 11. 디스크형 홀로그래픽 저장장치방략도

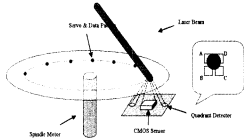


그림 13. Servo sectors

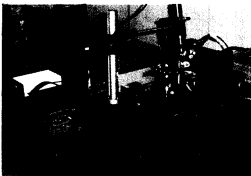


그림 12. 디스크형 위상공액재생 홀로그래픽 저장장치 사진

우로 디스크와 센서의 위치가 정확히 정렬되어 있다면, 이미지가 센서에 재생되는 순간 capture를 하면 되겠지만, 현실적으로는 항상 이것이 성립하지 않는다. 예러의 유형은 홀로그래를 다중화하는 방법과 architecture에 따라 다르다. 우리의 경우 각도 다중화를 사용하므로 입사하는 기준빔의 radial 각도와 그에 수직한 각도가 변수가 된다. 보통의 Fourier 홀로그래 방식에서는 이것이 진부이지만, 우리의 경우는 위상공액 재생 방식이고 이 경우 기준빔의 radial displacement와 그에 수직한 변위도 예러의 요인이 된다. 디스크가 회전할 때 발생하는 수평방향의 진동을 runout이라고 하는데, runout에는 반복적으로 생기는 repeatable runout(RRO)과 반복성이 없는 non-repeatable runout(NRRO)이 있다. NRRO의 경우 진동의 크기가 RRO보다 일반적으로 매우 작으므로 제어기의 입장에서는 RRO를 보상하는 것이 관건이다.

Control pixel이 quadrant detector의 중심에 위치할 때가 픽셀매칭이 된 경우이므로 제어기는 위에서

구한 오차에 의해 control pixel이 detector의 중심에 위치하도록 제어한다. 제어를 위해서는 디스크의 한 원주 상에 일정 간격으로 홀로그래 데이터를 저장할 필요가 있다. 이는 제어기가 디스크의 한 원주를 계속 tracking하려면 주기적으로 위치 오차를 계산하여 제어기에 이를 feedback 해주어야 하기 때문이다. 또한 control pixel이 quadrant detector에서 벗어나면 그 순간의 위치를 알 수 없으므로 디스크 runout의 최대 크기는 detector의 크기보다 작아야 한다.

디스크의 runout 및 수직방향의 진동에 의한 기준빔 입사각 변화를 제어하기 위해서는 servo sector라는 개념이 필요하다. Servo sector는 디스크의 한 원주 상에 일정 간격으로 홀로그래 이미지와 함께 오차신호를 얻기 위한 control pixel을 기록하는 것이다. 그림 13에 servo sector의 구성을 보았다. Servo sector가 필요한 이유는 제어기가 원하는 위치를 추종하기 위해서 일정한 주기마다 현재의 위치를 feedback 받아야만 하기 때문이다. 이렇게 얻은 위치 값으로 현재의 위치 오차를 계산하여 제어기에 알려줌으로써 제어기는 적절한 제어 명령을 galvanometer에 내려줄 수 있다. Servo sector의 수는 제어기의 성능 및 CMOS 센서에 재생된 홀로그래 이미지를 메모리로 전송할 수 있는 최소 시간에 의해 결정된다.

위치 오차는 그림 13에서와 같이 quadrant detector의 4개의 photo-sensor A, B, C, D에서 얻은 진압으로부터 계산된다.

$$PES_x = ((A+B)-(C+D)) / (A+B+C+D) \quad (4.1)$$

$$PES_y = ((A+D)-(B+C)) / (A+B+C+D) \quad (4.2)$$

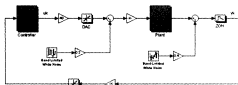


그림 14. 디지털 제어기 구성도

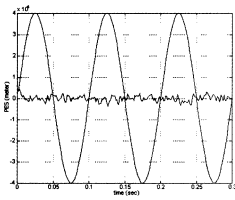


그림 15. 그림 28에 있는 디지털 제어기를 이용한 simulation결과

위 식에서 계산된 위치 오차가 실제 제어기에서 보 상되는 값이 된다. 각각의 A, B, C, D 센서에서 얻은 전압은 Analog-to-Digital(A/D) converter에 의해 digital data값으로 변환되고, DSP(Digital Signal Processor)에 의해 PES(Position Error Signal)가 계산된다.

위에서 잠깐 언급하였지만, 우리의 경우는 에러의 요인이 각도뿐만 아니라 displacement도 있다. 그러나 두 에러 요인이 분리해 안되어 있어서 quadrant detector는 복잡한 에러를 검출하게 된다. 그리고 현재는 galvanometer를 구동하면 reference beam이 미디어에 입사하는 각도만 바뀌는 것이 아니고 displacement도 발생하게 되어 있다. 향후에 필요하다면 이것은 광학계를 개선하여 제거할 수가 있다.

Galvanometer에 내장된 아날로그 제어기를 사용하여 이를 모의실험과 실제 실험을 통하여 디스크 runout 및 기타 외란이 일부 제거됨을 확인하였다. 디스크의 분당회전수를 600rpm으로 하고, servo sector 는 72개로 하였다. 따라서 제어 주기인 sampling time은  $1/(\text{servo sector 수} \times \text{초당 회전수}) = 1.389\text{msec}$ 가 된다. RRO의 크기를 40um, 주파수를

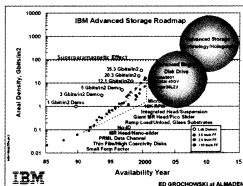


그림 16. Advanced storage roadmap (IBM, 2000)

10Hz로 실제 상황에 맞게 주고 모의실험한 결과 50%정도의 RRO 성분이 제거됨을 볼 수 있었다. 실제 실험에서는 위치오차가 26% 줄어들었다. 또한, galvanometer에 내장된 아날로그 제어기의 한계를 극복하기 위해 새로운 디지털 제어기를 설계하였으며, 모의실험을 통해 성능향상을 보였다(그림 14, 15).

추후 홀로그래픽 디스크 드라이브의 제어기를 디지털 제어 방식을 사용하여 실험하는 것이 필요하며, 이에 대한 제어 방식의 연구가 계속되어야 할 것이다.

## 5. 맺음말

홀로그래픽 정보저장장치에 대한 기대는 그 초기에 비해 약화되어 있다. 만족스러운 기록매질이 없다는 점이 큰 이유라고 할 수 있다. 그러나, 보다 근본적인 이유는 아직 대용량 저장장치시장이 무르익지 않아서 라고 생각된다. 아직은 또는 한두 해 동안은 DVD나 HDD로 충분할지 모른다. 그러나, 그 이후는? 홀로그래픽 저장장치가 차세대 저장장치의 대표주자가 될 가능성은 충분하며(그림 16) 시장의 요구가 거세질수록 개발의 열기는 더해갈 것이다. 준비하는 자에게 기회가 온다. 모든 준비를 마치고 기록매질을 기다리는 것도 시장이 열렸을 때 선두로 진입할 수 있는 방법 중의 하나가 될 수 있는 것이다.

본고의 내용은 산업자원의 차세대 대용량 정보저장장치 개발사업의 세부과제 "HDDS용 R/W Unit 및 Servo Control 기술개발"의 2차년도 보고서를 기초로 작성하였다<sup>7)</sup>.



# 위상공액재생을 이용한 디스크형 홀로그래픽 디지털 정보저장장치

(Disk type holographic digital data storage system using phase-conjugate readout)

## 참고 문헌

- (1) <http://www.sims.berkeley.edu/how-much-info/>, University of California, Berkeley, SIMS, 2000.
- (2) D. Gabor, A new microscope principle, *Nature*, 161, 777, 1948.
- (3) P. J. Van Haerden, Theory of optical information storage in solids, *Appl. Opt.* 2, 393, 1963.
- (4) J. J. Amodei and D. L. Staebler, Holographic recording in lithium niobate, *RCA Rev.* 33, 71, 1972.
- (5) C. Denz, G. Paslat, G. Roosen, and T. Tschudi, Volume hologram multiplexing using a deterministic phase encoding method, *Opt. Commun.* 85, 171, 1991.
- (6) D. Psaltis, Parallel optical memories, *Byte* 17, 179, 1992.
- (7) G. A. Rattujic, V. Leyva, and A. Yariv, Optical-data storage by using orthogonal wavelength-multiplexed volume holograms, *Opt. Lett.* 17, 1471, 1992.
- (8) D. A. Waldman, H.-Y. S. Li, and M. G. Homer, Volume shrinkage in slant fringe gratings of a cationic ring-opening holographic recording material, *J. Imag. Sci. Tech.* 41, 497, 1977.
- (9) G. W. Burr, et al., Volume holographic data storage at an areal density of 250 gigapixels/in<sup>2</sup>, *Opt. Lett.* 26, 444, 2001.
- (10) R.M. Shelby, et al., Pixel-matched holographic data storage with megabit pages, *Opt. Lett.* 22, 1509, 1997.
- (11) J. Kim, S. Lee, H.-S. Lee, and B. Lee, Cross-talk in the holographic memories with lensless phase-conjugate holograms, *J. Opt. Soc. Am. A* 17, 2056, 2000.
- (12) J. Feinberg, "Self-pumped, continuous-wave phase conjugator using internal reflection," *Opt. Lett.* 486, 1982.
- (13) G. W. Burr and R. M. Shelby, Pixel-matched phase conjugate readout for holographic data storage, *Proceedings of the SPIE* 3802, 122, 1999.
- (14) G. W. Burr and I. Leyva, Multiplexed phase-conjugate holographic data storage with a buffer hologram, *Opt. Lett.* 25, 499, 2000.
- (15) H.-Y. S. Li and D. Psaltis, 3D holographic disc, *Appl. Opt.* 33, 3764, 1994.
- (16) G. Zhou, X. An, A. Pu, D. Psaltis, and F. Mok, Holographic optical disc, *Proceedings of the SPIE* 3802, 2, 1999.
- (17) 산업자원부 차세대 대용량 정보저장장치 개발사업의 세부과제 "HDDS용 R/W Unit 및 Servo Control 기술개발"의 2차년도 보고서.

## 약 령

### 이홍식

1999년 서울대학교 전기공학(박사)  
현재 삼성종합기술원 이석한연구팀 전문연구원  
e-mail: ih1210@samsung.co.kr

### 백상은

현재 삼성종합기술원 Storage Lab. 전문연구원

### 김지덕

1992년 한국과학기술원 물리학(박사)  
현재 삼성종합기술원 이석한연구팀 전문연구원

### 이석한

1982년 Purdue University, West Lafayette, Electrical Engineering(박사)  
IEEE Fellow (1997), 한국 과학기술원회원 정회원(1999)  
현재 삼성종합기술원 CRO - Microsystems 총괄(전문), 특별연구원 팀장(겸)  
상군대학교 전기전자컴퓨터공학부 석좌교수