



# 홀로그래픽 데이터 스토리지의 기록 및 재생 기술

글 ■ 박 주 연 / (주)대우일렉트로닉스, 책임연구원 e-mail ■ jooyoun@web.dwe.co.kr

이 글에서는 차세대 대용량 정보저장장치 중 중요한 역할이 기대되고 있는 홀로그래픽 데이터 스토리지의 기록·재생 원리 및 고밀도 기록을 가능하게 하는 핵심 기술인 데이터 다중화기법(Multiplexing Technique)에 대하여 알아 보 고자 한다.

정보저장장치는 정보통신, 정보처리와 함께 멀티미디어시대의 3대산업 중의 하나로써 정보저장장치는 현재 주로 문서와 영상을 저장하기 위한 용도로 수 기가 바이트의 용량을 가지나, 2005년 경에는 HDTV의 고 해상도 동영상, 의료용 영상, 가정용 서버, 네트워크 서버 등으로 이용 범위가 확대되면서 요구되어지는 저장 용량도 현재의 100 배 이상인 수백 기가 바이트 이상이 될 것으로 전망되고 있다. 따라서 이러한 거시적인 정보 저장장치의 환경 변화에 대응하기 위해서는 정보 저장매체의 초 대용량화, 초 고속화, 초소형화에 대한 요구가 더욱 절실해질 것으로 전망된다. 이러한 요구에 부응하기 위해서 최근 큰 주목하에 연구되고 있는 기술이 홀로그래픽 데이터 스토리지(holographic data storage) 또는 홀로그래픽 메모리(holographic memory)라고 부르는 홀로그래픽을 이용한 광 저장장치이다. 홀로그래픽 데이터 스토리지는 그 원리가 알려진 1960년대 이래로 많은 연구가 진행되었으나, 핵심 부품인 CCD, LCD 등 시스템 구성에 필요한 핵심부품 및 최적 저장물질의 부재로 상용화 시스템으로의 구현에 어

려움을 겪어 왔으나, 최근 들어 LCD와 CCD 등 전자기술의 눈부신 발전과 기능성 유기 광 저장물질인 포토폴리머(photopolymer)를 기반으로 한 최적 저장물질의 개발 및 정보화시대 도래에 따른 대용량 데이터 스토리지 시스템의 필요성에 힘입어 새롭게 각광 받고 있으며<sup>(1~3)</sup>, 현재, 상용화에 준하는 프로토타이프도 선보이고 있다<sup>(4~5)</sup>. 홀로그래픽 데이터 스토리지는 데이터 기록 및 재생의 원리상 페이지 지향적인 메모리(page-oriented memory)로서 입출력방식으로 LCD, CCD 등을 이용한 패러렐 방식을 사용함으로써 근본적으로 데이터 전송률(data transfer rate)을 1Gbps 정도로 고속화 시킬 수 있으며, 데이터 접근 시간(access time)도 수십  $\mu$ sec 수준으로 매우 빠르게 구현할 수 있으며, 저장밀도 측면에서도 이론적으로는 1Tbit/cm<sup>3</sup>의 고밀도 기록이 가능한 장점을 지니고 있다. 본문에서는 차세대 대용량 정보저장장치 중 중요한 역할이 기대되고 있는 홀로그래픽 데이터 스토리지의 기록·재생 원리 및 고밀도 기록을 가능하게 하는 핵심 기술인 데이터 다중화 기법(multiplexing technique)에 대



하여 알아 보고자 한다.

### 홀로그래픽 데이터 스토리지의 고밀도 중첩 기록 원리

홀로그래픽 데이터 스토리지에 있어서 고밀도 기록을 가능하게 하는 핵심 원리는 CD/DVD 등과 같은 기존 광 저장장치와는 다르게 데이터를 공간적인 격리가 없이 저장물질의 동일 장소에 중첩 기록할 수 있다는 기록 원리에서 출발한다. 홀로그래픽 데이터 스토리지에서 이와 같이 동일 장소에 홀로그램을 중첩 기록하는 기법을 다중화 기법(multiplexing technique)이라고 부르는데 홀로그램의 다중화 기록·재생 방법으로는 각도 다중화(angle multiplexing), 파장 다중화(wavelength multiplexing), 위상코드 다중화(phase-coded multiplexing), 구면파 이동 다중화(spherical wave shift multiplexing) 등 여러가지 기법이 제안되어 있다. 이러한 다중화 방식은 모두 두꺼운 홀로그램의 브래그 선택성(bragg selectivity)에 기초하고 있다. 한편 브래그 선택성에 기초하지 않은 대표적인 다중화 기법으로는 기준광으로 스펙클 광파(speckle wave)를 사용하는 스펙클 이동 다중화(speckle shift multiplexing) 기법이 제안되어 있다. 이러한 여러가지 다중화 기법 중 각도 다중화 방식은 그 구성이 매우 간단하다는 장점이 있으므로 현재 홀로그램의 다중화 기록·재생에 널리 사용되는 방식이며, 본 장에서도 각도 다중화 기법에 준하여 홀로그래픽 데이터 스토리지의 중첩기록 원리에 대해서 설명하고자 한다.

일반적으로 각도 다중화 기법은 소정의 사잇각을 갖는 신호광과 기준광으로 기록된 두꺼운 홀로그램의 회절효율(diffraction efficiency)이 기록시 사용된 기록 기준광

(reference beam)과 재생시 사용된 재생 기준광(readout beam) 사이의 각도 차이에 매우 크게 의존한다는 사실에 기초하고 있다. 두꺼운 홀로그램의 이러한 특성을 각도 선택성(angular selectivity) 또는 각도 민감성(angular sensitivity)이라고 부른다. 각도 선택성은 그림 1에 나타난 것과 같이 신호광과 기준광을 평면파로 구성하여 기록된 간단한 정현파 회절격자(sinusoidal grating)의 경우에 가장 잘 설명되고 정량화 시킬 수 있다. 그림 1에서 기록시 신호광  $S$ 의 입사각  $\theta_s$ 와 기준광  $R$ 의 입사각  $\theta_r$ 은 저장 매체 내부에서 측정된 값이며, 저장매체의 두께는  $d$ , 진공 중의 레이저의 파장은  $\lambda$ , 저장매체의 굴절률은  $n$ , 굴절률 변화량은  $n_1$ 으로 표시된다. 이때 저장매체 내부에 형성된 홀로그램이 투과형 무손실 유전성 격자(lossless dielectric grating)이라고 가정하면 Kogelnik의 결합파 이론(coupled Wwave theory)로부터 재생시 출력 신호광  $\hat{S}$ 의 회절효율  $\eta$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(6)</sup>

$$\eta = \frac{|\hat{S}|^2}{|R|^2} = \frac{\sin^2(v^2 + \xi^2)^{1/2}}{1 + \frac{\xi^2}{v^2}} \quad (1)$$

여기서,  $v = \frac{\pi n_1 d}{\lambda(C_R C_S)^{1/2}}$ ,  $\xi = \frac{\delta d}{2C_S}$  이고,

$$C_R = \cos \theta_r, \quad C_S = -\cos(\theta - 2\theta\varphi)$$

이며,  $\delta = \Delta\theta K \sin(\varphi - \theta_r) - \frac{\Delta\lambda K^2}{4\pi n}$ ,

$$\varphi = 90^\circ + \frac{\theta_r - \theta_s}{2}, \quad K = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ 이다.}$$

또한 위식에서  $\Delta\theta$ 와  $\Delta\lambda$ 는 각각 기록시 사용한 기준광과 재생시 사용한 기준광의 각도와 파장의 차이 값을 나타낸다.

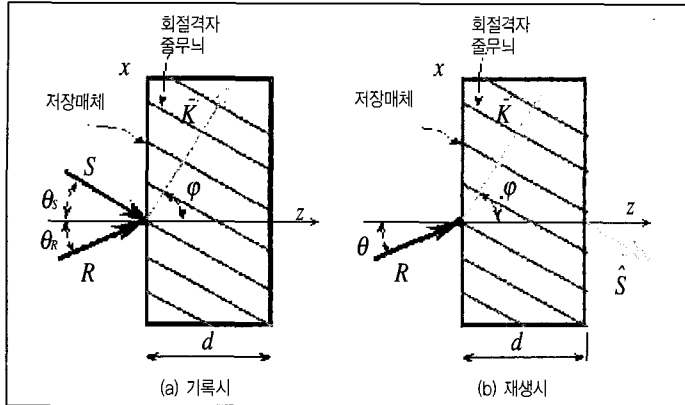


그림 1 각도 중첩 홀로그램의 기록 및 재생 모식도

이제 식 (1)로 표시되는 재생 신호광의 회절효율을 기록시 사용한 기준광과 재생시 사용한 기준광의 각도와 파장의 차이 값인  $\Delta\theta$  와  $\Delta\lambda$  의 함수인  $\xi$  에 대해서 계산해 보면 그림 2와 같은 결과를 얻을 수 있다.

그림 2의 회절효율 곡선도에서 보듯이  $\xi$  값의 변화에 따라서 회절효율이 0이 되는 점이 존재한다는 사실을 알 수 있다. 즉, 이것은 기록시 사용한 기준광과 재생시 사용한 기준광의 각도의 차이 값인  $\Delta\theta$  와 파장의 차이 값인  $\Delta\lambda$  를 잘 조정하여 재생시 기

준광으로 사용하면 재생 신호광이 전혀 출력되지 않게 할 수 있다는 점을 의미한다. 이와 같이 재생시 회절효율이 0이 되는 첫 번째 점(first null point)을 만드는  $\Delta\theta$ 와  $\Delta\lambda$ 의 조건을 각각 각도 선택도 (angle selectivity) 및 파장 선택도 (wavelength selectivity)라고 정의한다. 이러한 각도 선택도 및 파장 선택도를 식 (1)에서 재생 회절효율을 0으로 하는 조건으

로부터 구하면 다음과 같다.

$$\Delta\theta = \frac{\lambda \cos \theta_s}{nd \sin(\theta_r + \theta_s)} \quad (\text{각도 선택도, } \Delta\lambda = 0) \quad (2)$$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2 \cos \theta_s}{2nd \sin^2(\theta_r + \theta_s)} \quad (\text{파장 선택도, } \Delta\theta = 0) \quad (3)$$

이와 같이 기록시 사용한 기준광과 각도 및 파장이 동일한 조건으로 홀로그램을 재생하면 최대의 회절효율을 얻을 수 있고, 위에서 계산된 각도 선택도 및 파장 선택도의 조건을 적용하여 기록시 사용한 기준광을 각도 선택도 및 파장 선택도 만큼 다르게 변경시켜 홀로그램을 재생하면 회절효율이 0이 되어 재생 신호광이 출력되지 않음을 알 수 있다. 이러한 현상을 반대로 유지하여 소정의 신호광과 기준광을 이용하여 첫 번째 홀로그램을 저장물질에 기록한 후 저장물질의 동일 공간에 신호광은 그대로 두고 위의 각도 선택도 및 파장 선택도 만큼 기준광만을 변경시켜 두 번째 홀로그램을 완전히 중첩하여 기록한 경우를 고찰해 보자. 이 경우 첫 번째 홀로그램의 재생 신호광을 얻기 위해서 첫 번째

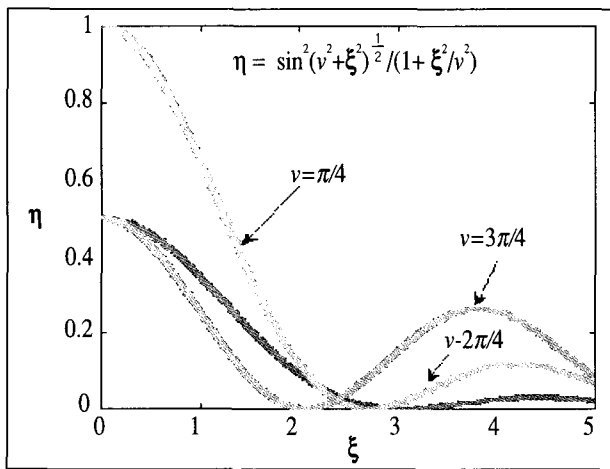


그림 2 각도 중첩 홀로그램의 재생효율 곡선

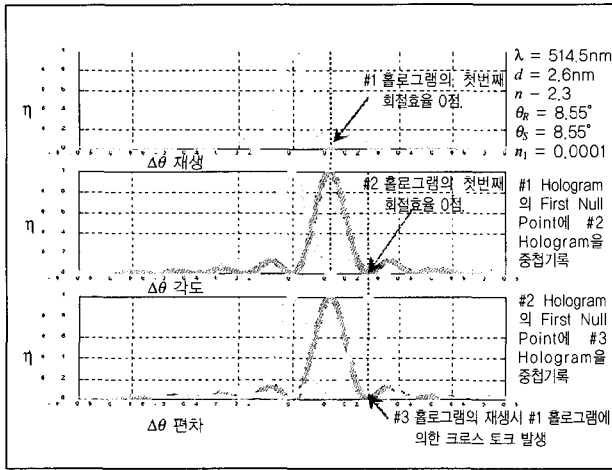


그림 3 홀로그래픽 데이터 스토리지의 중첩기록 원리도(각도 다중화 경우)

홀로그램 기록시 당시 사용한 기준광과 동일한 기준광을 홀로그램에 입사시키면 최대 회절효율을 갖는 첫 번째 홀로그램의 재생 신호광이 출력되지만 첫 번째 홀로그램과 동일 공간에 중첩 기록되어 있는 두 번째 홀로그램의 재생 신호광은 기록 당시 첫 번째 홀로그램의 각도 선택도 및 파장 선택도 만큼 기준광을 변경시켜 기록하였으므로 재생 회절효율이 0이 되어 전혀 출력되지 않게 된다. 반대로 두 번째 홀로그램을 재생하는 경우에도 위와 똑 같은 원리로 첫 번째 홀로그램은 재생효율이 0이 되어 출력되지 않고 두 번째 홀로그램만이 재생된다. 즉, 이것은 기록 과정에서 동일 공간에 완전히 중첩 기록된 홀로그램 들을 재생시 서로 완전히 분리하여 재생이 가능하다는 사실을 의미한다.

그림 3에 나타난 것처럼 이 과정을 반복하여 확장하면 저장물질의 동일 공간에 수많은 홀로그램을 각도 선택도 및 파장 선택도의 조건에 맞게만 중첩 기록하면 재생시 독립적이고도 선별적으로 원하는 홀로그램만을 재생하는 것이 가능하여 원하는 재생 신호를 얻을 수 있음을 의미하며, 이것이 홀

로그래픽 데이터 스토리지의 초고밀도 기록을 가능하게 하는 핵심적인 중첩기록 원리인 것이다.

### 홀로그래픽 데이터 스토리지의 다중화 기법

홀로그래픽 데이터 스토리지에서 저장물질의 동일 장소에 홀로그램을 중첩 기록하는 기법을 다중화 기법(multiplexing technique)이라고 부르는데 홀로그램의 다중화 기록·재생 방법으로는 각도 다중화(angle multiplexing), 파장 다중화(wave-length multiplexing), 구면파 이동 다중화(spherical wave shift multiplexing) 및 스펙클 이동 다중화(speckle shift multiplexing) 등 여러가지 기법이 제안되어 있는데 이러한 각각의 다중화 기법 별로 주요 특징을 요약하면 아래와 같다.

#### • 각도 다중화(Angle Multiplexing)

앞서 홀로그래픽 데이터 스토리지의 중첩 기록 원리에서 자세하게 설명한 바와 같이 두꺼운 홀로그램의 각도 선택성을 이용하여 데이터를 중첩 기록 재생하는 방법으로 간략

한 시스템 구성도를 그림 4에 나타내었다.

그림 4의 각도 다중화 시스템은 기록시 기준광(reference beam)을 매 홀로그램의 기록 시마다

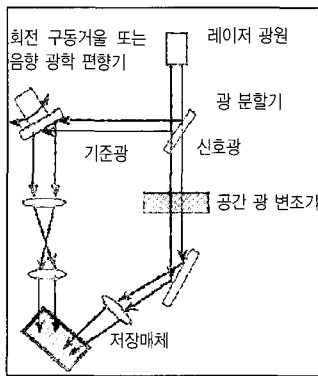


그림 4 각도 다중화 시스템 개략도



소정의 각도 선택도 만큼씩 편향 변화시켜 가면서 저장물질의 동일 장소에 홀로그램을 중첩 기록하는 방식으로 기준광을 편향시키는 소자로는 모터를 이용하여 거울을 회전 구동하는 방식 및 자기부양(magnetic levitation) 원리를 응용한 회전 구동거울(galvano mirror)을 이용하는 방식 등 기계적인 구동 방식과 초음파를 이용하여 기준광을 편향시키는 원리를 응용한 음향 광학 소자(AOM : Acousto Optic Modulator)를 이용하는 비기계적인 구동 방식이 대표적인데 특히, 음향광학 소자를 이용하는 시스템의 경우에는 기준광의 편향에 소요되는 시간을 수  $\mu\text{s}$  이하로 빠르게 구현할 수가 있어 데이터 접근 시간을 초고속화할 수 있는 장점이 있다. 각도 다중화 기법은 중첩 기록 및 재생시 시스템의 안정성이 높고 크로스토크(cross-talk) 측면에서 양호한 신호 대 잡음비(SNR : Signal to Noise Ratio)를 얻을 수 있는 장점이 있는 반면에 각도 선택도가 식 (2)에서 보듯이 저장물질의 두께에 크게 의존하여 두께가 얇은 저장물질의 경우에는 각도 선택도의 값이 매우 커져 저장물질에 입사시킬 수 있는 기준광의 갯수가 크게 제한되는 문제로 인하여 포토폴리머와 같이 두께가 얇은 저장물질에서는 고밀도 중첩 기록이 어려운 단점이 있다<sup>7)</sup>.

• 파장 다중화(Wavelength Multiplexing)

마찬가지로 앞서 홀로그래픽 데이터 스토리지의 중첩기록 원리에서 자세하게 설명한 바와 같이 두꺼운 홀로그램의 파장 선택성을 이용하여 데이터를 중첩 기록 재생하는 방법으로 간략한 시스템 구성도를 그림 5에 나타내었다.

그림 5의 파장 다중화 시스템은 기록시 기준광을 매 홀로그램의 기록시마다 소정의 파장 선택도만큼씩 변화시켜가면서 저장물

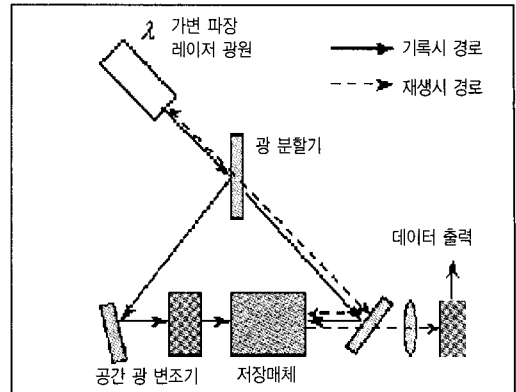


그림 5 파장 다중화 시스템 개략도

질의 동일 장소에 홀로그램을 중첩 기록하는 방식으로 기준광의 파장을 변화시키기 위해서는 가변 파장 광원(tunable laser)이 필요하다. 파장 다중화 기법은 단지 가변 파장 광원의 파장을 변화시키는 것만으로 중첩 기록 및 재생이 가능하므로 기계적인 구동을 배제할 수 있어 초고속 시스템의 구현이 용이하고 크로스 토크 측면에서 신호 대 잡음비 특성이 다른 다중화 기법과 비교하여 매우 우수하며, 파장 선택도가 식 (3)에서 보듯이 저장물질의 두께에 의존하지만 가변 파장 광원의 파장 변조 폭이 크다면 두께가 얇은 저장물질의 경우에도 고밀도 중첩 기록이 가능한 장점이 있는 반면에 고가의 가변 파장 광원이 소요되어 시스템 가격 측면에서 불리한 단점이 있다<sup>7)</sup>.

• 구면파 이동 다중화(Spherical Wave Shift Multiplexing)

앞의 각도 다중화 및 파장 다중화 경우에는 기록 및 재생시 기준광으로 평면파(plane wave)를 사용하는 데 비해서 구면파 이동 다중화 기법은 기록 및 재생시 기준광으로 구면파(spherical wave)를 사용한다는 점이 다르다. 이렇게 기준광으로 구면파를 사용하면 그림 6에서 보듯이 기준광



과 신호광은 고정하고 저장물질의 이동만으로 중첩 기록이 가능하게 되는데 이 경우 크로스 토크 없이 재생이 가능한 최소 이동량을 이동 선택도(shift selectivity)라고 부른다.

이러한 이동 선택도가 생기는 메커니즘은 원리적으로 구면파의 기록 및 재생 구조에서 발생하는 브래그 불일치(bragg-mismatch) 효과와 상쇄 간섭(destructive interference) 효과에서 기인하며 이동 선택도는 대략적으로 식 (4)과 같이 표시할 수 있다<sup>(8)</sup>.

$$\delta_i \ddot{O} = \frac{\lambda z_0}{d \tan \theta_s} \quad (4)$$

여기서  $d$  는 저장물질의 두께,  $\theta_s$  는 신호광의 입사각,  $\lambda$  는 광원의 파장이고  $z_0$  는 구면파의 원점에서 기록면까지의 거리이다.

구면파 이동 다중화 기법은 저장물질의 상대적인 이동 또는 회전만으로 중첩기록이 가능하므로 그림 6에서 보듯이 기존 CD/DVD와 같이 디스크 형태의 시스템으로 구현이 가능한 장점이 있고, 별도의 기준광을 편향하거나 변조하는 소자가 불필요하므로 시스템 제작시 가격적인 측면에서도 장

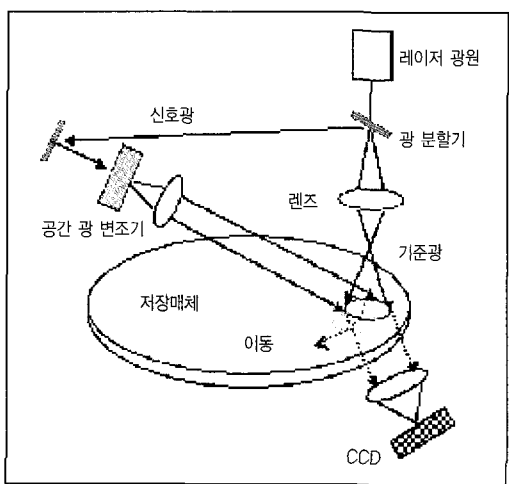


그림 6 구면파 이동 다중화 시스템 개략도

점이 있는 반면에 위의 이동 선택도 수식에서 보듯이 이동 선택도가 저장물질의 두께에 관계되므로 포토폴리머와 같이 두께가 얇은 저장물질에서는 고밀도 기록에 한계가 있으며, 디스크형 시스템으로 구현시 디스크 회전에 의한 면진동(wobble)에 신호광의 재생 효율 및 신호 대 잡음비가 크게 영향을 받는 단점이 있다.

### • 스펙클 이동 다중화(Spherical Wave Shift Multiplexing)

스펙클 이동 다중화 기법은 기준광으로 구면파를 사용하는 대신 랜덤한 위상(random phase)을 갖는 스펙클 광파(speckle wave)를 사용한 다는 점 외에는 시스템 구성상 구면파 이동 다중화 기법과 유사하지만 중첩 기록 원리는 완전히 다른 다중화 기법이다. 앞서 설명한 각도 다중화, 파장 다중화, 구면파 이동 다중화 기법의 중첩 기록 원리는 모두 브래그 선택성(bragg selectivity)에 기반을 두고 있는 다중화 기법임에 비하여 스펙클 다중화 기법은 브래그 선택성과는 전혀 무관하게 기록시 사용한 기준광 사이의 상관성(correlation)을 이용하여 중첩 기록 및 재생을 하는 다중화 기법이다<sup>(9)</sup>. 이렇게 기준광으로 스펙클 광파를 사용하면 구면파 이동 다중화 경우와 마찬가지로 그림 7에서 보듯이 기준광과 신호광은 고정하고 저장물질의 이동만으로 중첩 기록이 가능하게 되는데 이 경우 크로스 토크 없이 재생이 가능한 최소 이동량을 이동 선택도라고 부른다. 구면파 이동 다중화 경우에는 기준광과 신호광이 이루는 입사면에 평행한 방향으로만 이동 선택도가 발생되는데 비하여 스펙클 이동 다중화 경우에는 입사면에 평행한 방향 및 수직인 방향과 더불어 깊이 방향으로도 이동 선택도가 존재하



게 되어 저장물질의 두께 방향으로도 중첩 기록을 할 수가 있으므로 여타의 다중화 기법과 비교하여 기록 밀도를 획기적으로 향상시킬 수 있는 특징을 가지고 있다.

그림 7에서 처럼 기준광을 랜덤한 위상을 갖는 스펙클 광파로 만들기 위해서는 확산판에 레이저 광원을 조사하면 되는데 이때 기준광에 포함된 스펙클의 크기와 이동 선택도는 서로 같다는 사실을 이용하면 그림 7에 표시된 것과 같이 X, Y, Z 방향의 이동 선택도를 계산할 수 있다. 먼저 횡단면의 스펙클 크기  $\delta_r$ 와 종단면의 스펙클 크기  $\delta_z$ 를 구하면 식 (5)와 같은데 여기서  $\lambda$ 는 광원의 파장,  $F$ 는 홀로그램과 Diffuser 사이의 거리,  $d_R$ 은 기준광의 생성에 기여하는 Diffuser의 길이이며  $n$ 은 저장물질의 굴절률이다.

$$\delta_r \approx 1.22\lambda = \frac{F}{d_R}, \quad \delta_z \approx 0.8\lambda n \left(\frac{F}{d_R}\right)^2 \quad (5)$$

따라서 X, Y, Z 방향의 이동 선택도는 식 (6)과 같다<sup>(10)</sup>.

$$\Delta x = \delta_r \approx 1.22\lambda = \frac{F}{d_R}, \quad \Delta y = \delta_r \approx 1.22\lambda = \frac{F}{d_R},$$

$$\Delta z = \delta_z \approx 0.8\lambda n \left(\frac{F}{d_R}\right)^2 \quad (6)$$

위의 이동 선택도 수식에서 보듯이 스펙클

이동 다중화 기법의 경우에는 이동 선택도가 저장물질의 두께에 전혀 무관함을 알 수 있고 따라서 포토폴리머와 같이 두께가 얇은 저장물질을 사용하는 경우에도 고밀도 기록이 가능하며, 두께가 두꺼운 저장물질을 사용하는 경우에는 Z 방향의 이동 선택도를 활용하여 저장물질의 두께 방향으로도 그림 7의 중첩 기록 과정에 보인 것처럼 가상 층(virtual layer)을 두는 형태로 중첩 기록이 가능하므로 초고밀도 기록이 가능하며 구면파 이동 다중화 기법과 마찬가지로 저장물질의 상대적인 이동 또는 회전만으로 중첩 기록이 가능하므로 기존 CD/DVD와 같이 디스크 형태의 시스템으로 구현이 가능한 장점이 있는 반면에 재생시 외부 환경 조건의 변화 등의 원인으로 기준광의 스펙클이 기록시와 상이하게 변동되는 경우 재생 신호광의 회절효율이 급격히 저하될 소지가 있으며 기록 감도(recording sensitivity)가 큰 저장물질을 사용하는 경우 기록시 기준광의 스펙클 패턴이 저장물질에 그대로 전사되어 노이즈의 원인으로 작용하고 이에 따라서 신호 대 잡음비가 나빠지는 단점이 있다.

### 맺음말

고도 정보화시대에는 필연적으로 데이터의 저장 및 입출력에 관계된 정보저장장치는 대용량화(high capacity)와 입출력속도의 고속화(fast data transfer rate) 및 보다 짧은 데이터 접근 시간(short data access time)을 갖도록 요구된다. 현재 광 및 자기 방식의 저장장치가 이러한 분야에 중요한 역할을 하고 있으나, 현

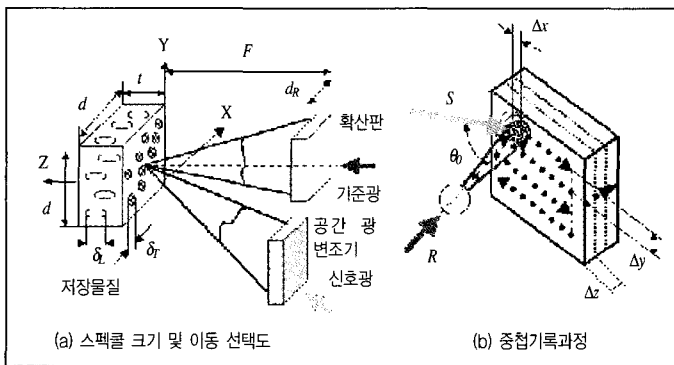


그림 7 스펙클 이동 다중화 시스템 개략도

재의 어떠한 대용량의 정보저장장치도 위의 세 가지 성능을 충분히 만족시키지는 못하고 있는 실정이다. 그런데 홀로그래픽 데이터 스토리지는 정보저장장치가 갖추어야 할 위의 세 가지 핵심적인 특징을 고루 갖추고 있어 차세대 대용량 정보저장장치로 각광을 받고 있고 상용화를 위한 연구 개발이 전세계적으로 활성화되고 있다. 또한 그 동안 홀로그래픽 데이터 스토리지의 상용화에 큰 걸림돌로 생각되어 왔던 최적 저장물질의 부재라는 문제는 그 동안 포토폴리머를 중심으로 많은 혁신적인 개선이 이루어져 상용화가 가능한 수준의 성능을 갖는 포토폴리머들이 개발됨으로써 홀로그래픽 데이터 스토리지의 상용화 가능성을 더욱 높게 만들고 있고, 현재의 개발 추세로 미루어 보면 2005년 경에는 회전 디스크 형태의 ROM 또는 WORM 기능을 갖춘 초기 제품이 등장할 것으로 예측되고 있다. 현재 이러한 홀로그래픽 데이터 스토리지의 상용화에 가장 앞서 있는 곳은 미국이지만, 국내에서도 차세대 대용량 정보저장장치 개발 국책과제를 통한 정부의 지원 및 개발 참여 기업의 자발적인 연구개발 노력으로 상당한 수준의 기술을 확보하게 되었으며, 정부의 정책적 지원과 학계 및 산업계의 관련 연구원들의 노력이 경주된다면, 현재의 CD/DVD 계열의 뒤를 이을 수 있는 초일류 상품으로 키워 나갈 수 있을 것으로 생각된다.

#### [참고문헌]

(1) J. F. Heanue, M.C. Bashaw, L. Hesselink, 1994, "Volume Holographic Storage and Retrieval of Digital Data," *Science*, Vol. 265.  
 (2) F. H. Mok, 1993, "Angle-multiplexed Storage of 5000 Holograms in Lithium Niobate," *Opt. Lett.* 18,

pp. 915~917.  
 (3) G. W. Burr, F. H. Mok, and D. Psaltis, 1994, "Storage of 10,000 holograms in LiNbO<sub>3</sub>: Fe," *Conf. On Laser and ElectroOptics (CLEO)*, Anaheim, CA.  
 (4) Allen Pu and D. Psaltis, 1996, "High-Density Recording in Photopolymer Based Holographic Three-Dimensional Disks," *Appl. Opt.* Vol. 35, No. 14, pp. 2389~2398.  
 (5) D. Psaltis and F. Mok, 1995, "Holographic Memory," *Scientific American*, Vol. 273, No. 5, pp. 70~75.  
 (6) H. Kogelnik, 1969, "Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings," *Bell System Technical Journal*, Vol. 48, No. 9, pp. 2902~2947.  
 (7) J. H. Hong, I. McMichael, T. Y. Chang, W. Christian, and E. Paek, 1995, "Volume Holographic Memory Systems—techniques and Architectures," *Opt. Eng.*, 34(8) pp. 2193~2203.  
 (8) G. Barbastathis, M. Levene, and D. Psaltis, 1996, "Shift Multiplexing with Spherical Reference Wave," *Appl. Opt.* 35, pp. 2403~2417.  
 (9) V.B. Markov and A.M. Darskii, 1988, "Shift selectivity of the Hologram with a Speckle Reference Wave," *Optica Spektroskopija*, Vol. 65, pp. 661~665.  
 (10) V.B. Markov, Y.N. Denisyuk and R. Amezcua, 1997, "3-D Speckle-shift Hologram and its Storage Capacity," *Optical Memory and Neural Networks*, Vol. 6 pp. 91~98.

