

# 홀로그래픽 저장장치의 각/프랙탈 다중화 방식에서 균일한 회절 효율을 위한 기록 시간 분배

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

## The exposure-time schedule for uniform diffraction efficiency in angle/fractal multiplexing of holographic data storage

Jae Sung Lee<sup>†</sup>, Jin Young Choi\*, Hyun Seok Yang\*, Young Pil Park\* and No Chul Park\*

**Key Words :** holographic data storage(홀로그래픽 저장장치), multiplexing(다중화),  
exposure time schedule(시간 분배), diffraction efficiency(회절 효율)

### ABSTRACT

Because of the photorefractive recording dynamics, each newly recorded hologram partially erases all previously stored image. Thus achieving the desired diffraction efficiency profile for the entire sequence after all images have been recorded requires exposure time schedule. The often cited classical exposure-schedule model predicts a rising-exponential build-up and an exponential decay in  $\Delta n$  with an exposure time. However because we cannot directly measure the  $\Delta n$ , it's difficult to establish the relation of both. In this paper, we deduce the relation of diffraction efficiency and exposure time from experiment data and suggest an algorithm to make time schedule profile in angle/fractal multiplexing of holographic data storage. After that, we present simulated result with equal hologram diffraction efficiency for a sequence of 250 holograms recorded by angle/fractal multiplexing.

### 1. 서론

홀로그래픽 저장 장치는 빔의 간섭 현상을 이용하여 데이터를 기록하는 방식으로, 동일 공간에 2차원의 페이지 형태로 표현되는 데이터를 다중 기록할 수 있는 장치이다. 다중 기록 특성으로 인하여 고용량의 데이터 저장이 가능하고, 2차원의 페이지 단위로 데이터를 입출력이 이루어지므로 기존 광정보 저장장치에 비하여 빠른 데이터 전송

속도를 가진다. 따라서 홀로그래픽 저장장치는 차세대 대용량 광정보 저장장치로 근래 많은 관심을 많은 각광을 받고 있다.

광굴절 결정체인  $LiNbO_3$  를 이용한 홀로그래픽 저장은 동일 시간 기록시 앞서 기록된 홀로그램들이 나중에 기록되는 홀로그램들과 중첩되는 과정에서 지워지기 때문에 재생시 동일한 회절 효율을 얻을 수 없게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 각 홀로그램의 기록시간을 차등적으로 분배하고 기록하는 연구가 수행되고 있다.[1,4,6]

기존의 Mok 에 의해서 각 다중화 방식에서는 굴절율의 변화를 시상수와 시간의 관계로 규명하고, 이를 역재귀적인 방법으로 시간을 분배하는 방식이 연구 되었다.[1] 하지만 굴절율의 변화를 실험

---

<sup>†</sup> Yonsei University, CISD  
E-mail : pandora@yonsei.ac.kr  
TEL : (02)2123-4677 FAX : (02)361-8460  
\* Yonsei University, CISD

적으로 측정할 수 없기 때문에 실험 조건에 따라 달라질 수 있는 여러 물성치를 간접적인 방법으로 구할 필요가 있다.

이에 대해 본 연구에서는 굴절율과 회절효율과의 관계를 Kogelnik[2]의 “Coupled wave theory”를 통해 유도하고 이를 바탕으로, 실험적으로 얻은 회절 효율 데이터에서 역재귀적 방식으로 기록 시간을 분배하고자 한다.

또한 본 연구에 사용되는 홀로그래픽 저장 장치 시스템은 2축 갈바노 미러를 이용한 각/프랙탈 다중화 기법을 사용하였기에 때문에 양방향으로의 데이터 중첩이 이루어진다. 앞서 저장된 데이터는 양방향의 중첩 저장으로 지워지기 때문에 기록 방향과 순서에 따라 기록 시간의 분배가 필요하다.

이와 같은 다양한 조건에 따라 연속적인 저장과 재생을 위하여 필요한 실험 세트를 구성하고 이를 동기적으로 제어하기 위하여 윈도우 프로그래밍으로 자동화를 구현한다. 여러 실험을 통해 얻은 회절 효율 데이터로부터, 양방향을 고려하여 저장 기록 시간을 분배한 후 실제 시스템에 적용하였을 때 각/프랙탈 기록 방식에서 재생 시 균일한 회절 효율을 구현하고자 한다.

## 2. 이론

### 2.1 각/프랙탈 다중화

홀로그래픽 저장장치에서 각 다중화란 저장물질의 고정된 지점에 대하여 참조빔의 각을 변경하며 새로운 데이터 페이지를 중첩 기록하는 방식이다. 참조빔 각을 변화시킬 경우, 어느 각에서 이전에 저장된 격자에 의한 회절빔의 강도가 약해져서 이전 데이터가 재생되지 않는 위치가 발생한다. 이 위치에 새로운 페이지를 저장할 수 있다. 이는 재생 과정에서도 같은 원리로 적용되며 이때의 각을 각선택도(angle selectivity)라 한다.

이때 참조빔과 신호빔이 이루는 평면상에서 각을

변경하는 것을 각다중화(Angle multiplexing)라 하고 이에 대해 수직인 방향으로 각도를 변경하여 저장하는 것을 프랙탈 다중화(Fractal multiplexing)라 한다. 본 연구에서는 2 개의 미러를 가진 갈바노 미러와 각을 변경하더라도 일정한 위치에서 각도만을 변경위하여 2 개의 렌즈를 포함시켜 각/프랙탈 다중화를 구성하였다(그림 1).

### 2.2 광굴절 효과

체적 홀로그램 기록은 광굴절 효과를 이용한 것이며, 이러한 광굴절 효과는 빛으로 인해 광굴절 매질에서 국부적인 굴절율의 변화를 의미한다. 기본적인 매커니즘은 매질에 두빔이 입사 후 간섭할 때, 광 이온화, 확산, 재결합, 공간 전하 형성, 전계 형성을 거쳐 굴절율을 변화시켜 정보를 기록하게 된다. 즉, 매질 내부적으로 안정된 수위의 원자 결합에 어느 수위의 전계가 형성되면 전하는 보다 안정될 수 있는 정공으로 결합하며, 균일했던 매질은 불균일한 전하 분포를 갖게 된다. 이는 물질의 내부적인 굴절율을 변화시키게 되어 격자를 형성하게 된다. 이러한 격자에 Bragg 조건을 만족하는 빛을 입사시킬 경우 회절 되어 정보를 재생할 수 있다.

본 연구에서는 데이터 저장 소자로 가장 일반적이고 효과적인 광굴절 매질  $LiNbO_3:Fe$ 를 사용하였다. 이 매체는 데이터를 저장하기 위해서는 수  $mW/cm^2$  정도에 해당하는 입사광의 세기만 요구되고, Z 축 방향으로 강한 광전압 효과를 본질적으로 지닌다.

광굴절 효과는 내부적인 전하의 재배치로 발생하기 때문에 전하의 이동을 위한 최소한의 빔세기에 대해서는 다른 조건에서 기록이 이루어 지더라도 전하는 이동할 수 있다. 이는 홀로그램의 저장에 한정된 공간을 공유하기 때문에 반드시 발생한다. 이는 앞서 결정된 굴절율 변화를 점차 감소시키게 되어 회절 효율 감소를 야기한다.

이러한 관계를 Mok 은 저장 조건에 따른 기록과 삭제 시상수들을 통해 식(1)과 같이 표현하였다.

$$\Delta n_m = \Delta n_s \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t_m}{\tau_w}\right) \right] \exp\left(-\sum_{i=m+1}^M \frac{t_i}{\tau_e}\right) \quad (1)$$

이 식은 굴절율의 변화가 기록, 소멸에서 지수적인 특징을 갖는다는 가정하에 각각 시상수에 따라 M 개의 홀로그램이 저장될 때의 굴절율의 변화를 나타내고 있다. 여기서  $\Delta n_m$ ,  $\Delta n_s$ 는 각각 m 번째와

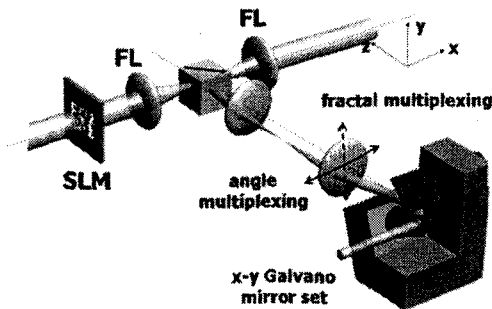


Fig 1. The angle/fractal multiplexing using galvano mirrors

최대 굴절율의 변화를 의미하고,  $\tau_w, \tau_e$  는 기록, 삭제 시상수 이다.

Kogelnik 의 coupled wave theory 에서는 기하학적인 조건에서 굴절율의 변화와 회절 효율 관계를 식(2)와 같이 해석하였다. 여기서  $C_R, C_S$  은 각각 참조빔과 신호빔이 기록 매질의 광축, 즉 C-axis 의 수직벡터와 이루는 각도에 대한 코사인 값이고  $d$  는 매체의 두께이다.

$$\eta = \sin^2 \left( \frac{\pi \Delta n d}{\lambda \sqrt{C_R C_S}} \right) \approx \Delta n^2 \left( \frac{\pi d}{\lambda \sqrt{C_R C_S}} \right)^2 \quad (2)$$

이 식을 통하여 두 빔의 간섭이 이루어질 경우, 광굴절 효과에 따른 굴절율 변화와 회절효율과의 관계를 알 수 있다.

### 2.3 기록 시간과 회절 효율과의 관계

Mok 에 의해 제안된 시상수와 굴절율의 변화는 실제 시스템을 적용하기에는 어려움이 따른다. 굴절율의 변화를 수치적으로 측정하기에 어려움이 있다. 이에 대해 (1) 식을 (2) 에 대입하여 굴절율 변화 변수를 제거하며 정리하면,  $m$  번째 홀로그램에 대해,  $t_m$  시간 기록시 회절효율  $\eta_m$  을 식(3)에서 유도할 수 있다.

$$\eta_m \approx t_m^2 \left( \frac{\Delta n_s \pi d}{\tau_w \lambda G} \right) \exp \left[ - \sum_{i=m+1}^M \frac{t_i}{\tau_e / 2} \right] \quad (3)$$

이 식은 시간과 회절 효율과의 관계로, 실험적으로 측정된 회절효율을 통해 관련된 상수를 찾아 기록시간에 따른 회절 효율 관계를 얻을 수 있다.<sup>(4)</sup> 이 식에 앞서 기록된 홀로그램이 지워지는 영향을 고려하지 않은 회절효율을  $\eta'_m$  라 한다면 식(4)로 정리된다.

$$\eta'_m \approx t_m^2 \left( \frac{\Delta n_s \pi d}{\tau_w \lambda G} \right) = t_m^B \exp(A) \quad (4)$$

$$\ln(\eta'_m) \approx B \ln(t_m) + A \quad (5)$$

이때 실험적 변수인  $\left( \frac{\Delta n_s \pi d}{\tau_w \lambda G} \right) \rightarrow \exp(A)$ ,  $2 \rightarrow B$  로 단순화하고 로그 스케일로 정리하면 식(5)를 얻을 수 있다. 이 식에  $A, B$  는 실험 조건에 결정되는 값으로, 지워짐의 영향을 배제한 상수들이며 회절 효율과 기록 시간의 관계에서 얻게 된다.

(3) 식에서 아직 정할 수 없는 변수는  $\tau_e$  값이다.  $m$  번째 홀로그램의 지워짐 상수  $\tau_e$  는 (3) 식을 정

리하여 식(6)으로 유도된다.

$$\tau_{e,m} = 2 \sum_{i=m+1}^M t_i / \ln \left( \frac{t_m^B \exp(A)}{\eta_m} \right) \quad (6)$$

시간과 회절효율의 관계 식(3)에서, 동일한 회절 효율을 위한 조건인  $\eta_m = \eta_{m+1}$  을 통하여 역재귀적인 방법으로  $[1, M]$  범위의  $t_i$  를 구한다.

이때 설계자의 요구조건을 만족하는 회절효율은 식(5)의 함수  $t = f(\eta)$  에서  $t_M$  을 정할 수 있다.

식(7)이 균일 회절효율을 위한 시간 분배 식이다.

$$t_M = t_{\min} = f(\eta_{\text{desired}})$$

$$t_m = \exp \left[ \ln t_{m+1} + \frac{2}{B \tau_e} t_{m+1} \right], m < M \quad (7)$$

### 2.4 각/프랙탈 다중화를 위한 시간분배

본 연구는 2 축 갈바노 미러를 이용한 각/프랙탈 다중화에서의 시간분배를 위하여 앞선 언급한 이론들을 프랙탈 다중화에 확장 적용하였다.

프랙탈 다중화의 경우 각선택도가 크기 때문에 지워짐 시상수는 각 다중화보다 크며, 같은 열(列)상에서 앞서 저장된 홀로그램에만 영향을 미친다는 가정하에 식(7)을 확장하였다.

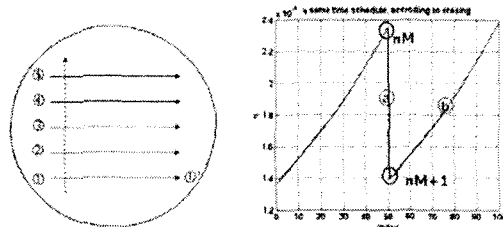


fig 2-1. Beam position on first mirror by angle/fractal multiplexing  
fig 2-2. diffraction efficiency difference by fractal multiplexing

그림 2-1 은 갈바노 미러 이후의 첫번째 렌즈상의 빔의 위치로 ① $\Rightarrow$ ①' 방향은 각다중화, ① $\Rightarrow$ ② 방향은 프랙탈 다중화를 의미한다. 이때 동일한 시간으로 다중화하며 저장할 경우 그림 2-1 과 같은 회절 효율 그래프를 얻는다.

②구간은 프랙탈 다중화 방향으로 이동함에 따라  $nM, nM+1$  번째 홀로그램은 각각 식(8)와 같은 회절효율을 갖는다. 여기서  $m, n, M, N$  은 각각 각/프랙탈 다중화 방향으로의 번지와 두 방향의 최대 개수를 의미한다.

$$\eta_{nM} = t_{nM}^B \exp(A) \exp\left(-\sum_{i=n+1}^N \frac{t_{iM}}{\tau_{ef}/2}\right) \quad (8)$$

$$\eta_{nM+1} = t_{nM+1}^B \exp(A) \exp\left(-\sum_{i=nM+2}^{(n+1)M} \frac{t_i}{\tau_{ef}/2}\right) \exp\left(-\sum_{i=n+2}^N \frac{t_{(i-1)M+1}}{\tau_{ef}/2}\right)$$

동일 회절 효율이기 위해  $\eta_{nM} = \eta_{nM+1}$  조건으로 정리하면 식 (9)를 유도할 수 있고,  $t_{nM}$  을  $t_{nM+1}$  을 통해 역 재귀적 방법으로 구한다.

$$t_{nM} = \exp\left[\ln t_{nM+1} - \frac{2}{B\tau_{ea}} \sum_{i=nM+2}^{(n+1)M} t_i + \frac{2}{B\tau_{ef}} \left(\sum_{i=n+1}^N t_{iM} - \sum_{i=n+2}^N t_{(i-1)M+1}\right)\right] \quad (9)$$

㉞구간은 각 다중화 방향으로 이동함에 따라  $(n-1)M+m$ ,  $(n-1)M+m+1$  번째 홀로그램은 각각 식 (10) 과 같은 회절효율을 갖는다.

$$\eta_{(n-1)M+m} = t_{(n-1)M+m}^B \exp(A) \times \exp\left(-\frac{2}{\tau_{ea}} \sum_{i=(n-1)M+m+1}^N t_i\right) \exp\left(-\frac{2}{\tau_{ef}} \sum_{i=n+1}^N t_{(i-1)M+m}\right)$$

$$\eta_{(n-1)M+m+1} = t_{(n-1)M+m+1}^B \exp(A) \times \exp\left(-\frac{2}{\tau_{ea}} \sum_{i=(n-1)M+m+2}^N t_i\right) \exp\left(-\frac{2}{\tau_{ef}} \sum_{i=n+1}^N t_{(i-1)M+m+1}\right) \quad (10)$$

동일 회절효율이기 위해  $\eta_{nM} = \eta_{nM+1}$  조건으로 정리하면 식 (11)를 유도할 수 있고  $t_{(n-1)M+m}$  을  $t_{(n-1)M+m+1}$  을 통해 역 재귀적 방법으로 구한다.

$$t_{(n-1)M+m} = \exp\left[\frac{2}{B\tau_{ef}} \left(\sum_{i=n+1}^N t_{(i-1)M+m} - \sum_{i=n+1}^N t_{(i-1)M+m+1}\right) + \ln t_{(n-1)M+m+1} - \frac{2}{B\tau_{ea}} t_{(n-1)M+m+1}\right] \quad (11)$$

### 3. 실험 및 결과

#### 3.1 실험 세트 구성

그림 3 는 본 연구의 실험 세트이다. 레이저는 150 mW 이고 저장 매체는 1cm<sup>3</sup> 의 LiNbO<sub>3</sub> 로 Fe 이 0.003% 도핑되어 있다. 신호빔과 참조빔을 S 편광 상태로 수직으로 간섭시키는 90° 투과형 구조의 시스템을 구성하였다. PBS1 에서 나누어질 때의 참조빔과 신호빔의 세기는 1:8 이고 SLM 을 통

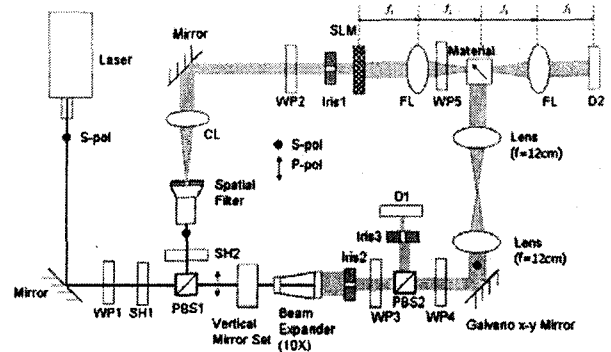


Fig 3. System Set-up for Fractal/Angle Multiplexing  
WP: (1/2) $\lambda$  Wave Plate, FL: Fourier Lens, CL: Collimate Lens  
SLM: Spatial Light Modulator, D: Power Meter, SH: Shutter

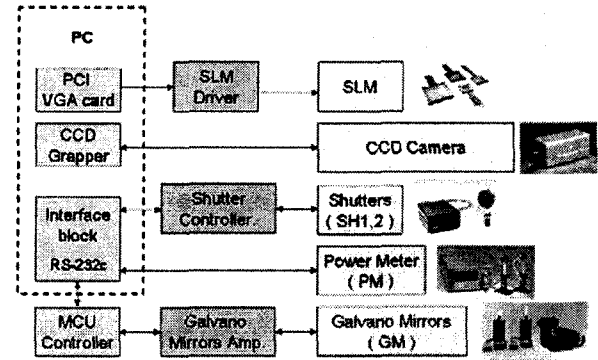


Fig 4. Structures for control of HDS system

과하는 빔의 사이즈는 20 mm, 매체에서 간섭하는 참조빔의 사이즈는 6 mm 이다. 갈바노 미러를 통해 각/다중화 다중화를 구현하고, 매체상의 동일 위치에 입사각만을 변화시키기 위하여 렌즈 2 개를 포함시켰다.

회절 효율은 PBS2 에서 나누어진 빔을 D1 에서 측정하고, 참조빔에 의해 저장 매체에서 회절된 빔을 D2 에서 측정하여 구하였다. 셔터 SH 1,2 를 통해 기록과 재생 과정을 제어하였다.

#### 3.2 시간분배 저장을 위한 자동화 시스템

기록시간을 위에서 언급한 시간 분배 알고리즘을 적용하여 실험하기 위해서는 각 장비들을 동기적으로 작동시키고 실시간적으로 데이터를 획득할 필요가 있다. 이에 PC 기반에서 제어하고자 그림 4 와 같이 장비제어를 PC 에서 처리할 수 있게 시스템을 구성하였다.

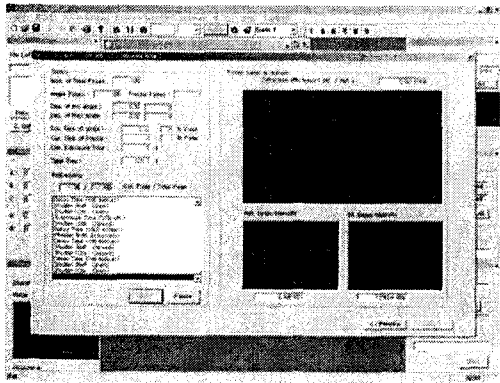


Fig 5. The automatically control program based on WinAPI

SLM 과 CCD 카메라의 경우 장비제어를 위한 드라이버를 사용하고 셔터와 파워 미터는 시리얼 통신으로 제어하였다. 갈바노 미러는 DA, AD converter 를 포함한 제어기를 마이크로 콘트롤러로 제작해 PC와 시리얼 통신으로 제어하였다.

그림 5 은 WinAPI 기반의 프로그램으로 실시간으로 장비를 제어하고 데이터를 획득하기 위하여 제작한 프로그램의 실행 화면이다. 본 프로그램으로 식(4)에서 식(11)에 필요한 모든 실험 데이터를 얻을 수 있다.

### 3.3 회절 효율과 기록 시간의 관계 실험

식(4)은 앞서 기록된 홀로그램의 지워짐 영향을 배제하고, 기록시간과 회절효율의 관계를 나타내는 식으로, 이에 대해 그림 6은 결과 그래프이다. 갈바노 미러의 각도를 ( $0^\circ, 0^\circ$ )로 하여 20s 간격으로 50 개를 저장하고, 신호빔을 차단 후 참조빔에 의해 회절된 빔을 측정하여 회절 효율을 얻었다.

이를 커브 피팅하여  $A = -16.21, B = 1.63$ 의 값을 구하고, 최소한의 회절효율을  $7.5e-5$ 로 정함으로써 지워짐 영향이 없는 마지막으로 기록될 홀로그램의 기록 시간을 결정하였다.

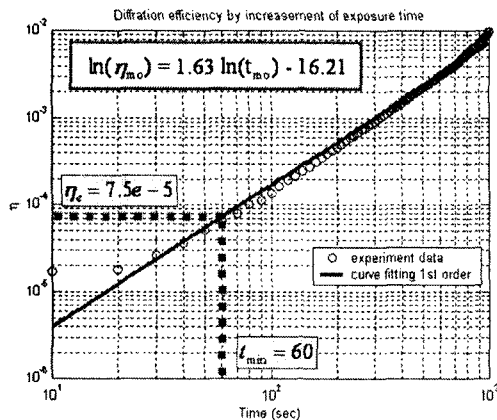


Fig 6. Diffraction efficiency by increment of exposure time

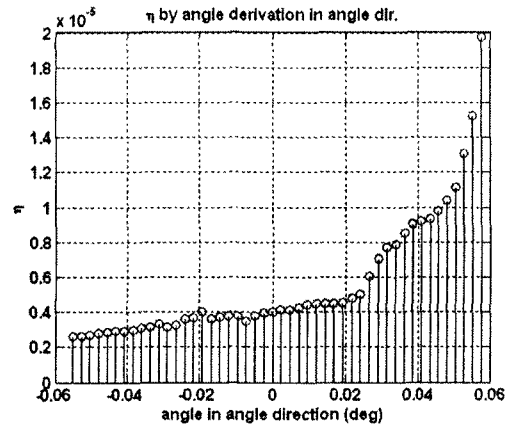


Fig 7. The decrement of diffraction efficiency of previous hologram by erasing effects

### 3.4 각 다중화를 통한 시상수 실험

식(4)는 동일 위치에 시간을 증가 시켜 가며 회절 효율의 변화를 실험하였다. 하지만 각을 바꾸어 가며 중첩 저장하는 각/프랙탈 다중화는 지워짐의 영향을 고려해야 한다.  $90^\circ$  두과형 구조의 시스템에서 각 선택도는 실험적으로  $0.0024^\circ$ 를 구할 수 있었고, 최대한 Crosstalk 를 줄이고자  $\Delta\theta = 0.024^\circ$ 의 간격으로 50 page 를 중첩 저장하였고, 이를 재생한 결과 그래프가 그림 7이다.

식(6)를 통해 얻은 각다중화 방향으로의 평균 지워짐 시상수  $\tau_m = 5512$ 이고, 같은 방법으로 프랙탈 방향의 시상수는  $\tau_f = 9325$ 를 얻을 수 있었다.

### 3.5 각/프랙탈 다중화를 위한 시간분배를 통한 모의 실험

3.3 과 3.4 실험을 통해 시간 분배를 하기 위한 물성치를 구하였고, 식(9), (11)을 통하여 각 다중화 방향으로 50 개, 프랙탈 다중화 방향으로 5 개씩 총 250 개의 홀로그램에 대한 기록 시간 분배를 그림 8과 같이 얻을 수 있다. 실험으로 이를 적용해 보진 못하고, 모의 실험을 통한 결과 그림

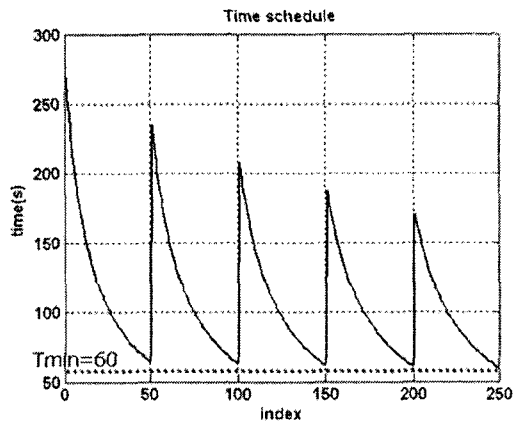


Fig 8. The exposure-Time schedule for uniform diffraction efficiency of angle/fractal multiplexing

과 같이  $t_{\min}$  으로 정한 회절효율  $7.5e-5$  로 재생시 동일한 회절 효율을 얻을 수 있었다.

#### 참고문헌

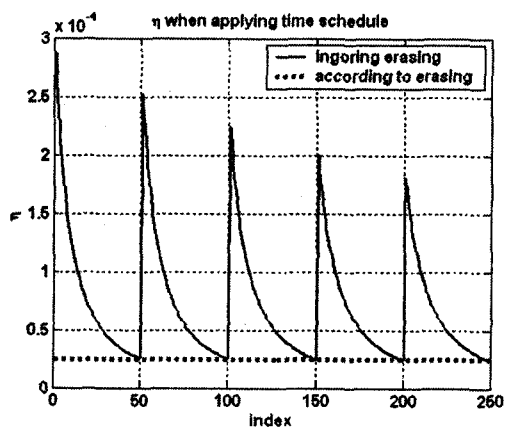


Fig 9. The diffraction efficiency applied time-schedule

#### 4. 결론

광굴절 물체인  $LiNbO_3:Fe$  을 이용한 홀로그램 저장은 중첩저장에 의하여 앞서 기록된 홀로그램의 굴절율에 영향을 주어 동일한 시간으로 기록시 동일한 회절 효율을 기대하기 어렵다.

이를 실험적으로 측정 가능한 회절효율과 시간과의 관계로 유도하고 원하는 회절효율을 갖기 위한 최소 시간으로부터 역 재귀적인 방식으로 시간분배를 하였다. 또한 각/프랙탈 다중화 방식의 중첩저장은 2 방향으로 이미 저장된 홀로그램에 영향을 주기 때문에 이를 고려하여 시간 분배 알고리즘을 제안하였다.

기록 시간과 효율과의 관계를 측정하고자 시스템을 구성하고 장비들의 동기적인 진행을 위하여 자체 개발한 자동화 프로그램을 통하여 실험하였다.

제안된 시간 분배를 적용한 실제 효율은 모의 실험에서 균일한 회절효율을 얻었지만, 실제 시스템에 적용하지는 못하였다. 이는 추후 시스템 개선을 통하여 연구할 예정이다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부의 차세대 대용량 정보저장장치 개발 사업(00008145)과 한국 과학 재단(R11-1997-042-11002-2)의 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분들께 감사 드립니다

- (1) F.H.Mok, M.C. Tachitt and H.M. Stroll, 1991, "Storage of 500 high-resolution holograms in a  $LiNbO_3$  Crystal", Opt. Lett. 16 605-607
- (2) H. kogelnik, 1969, "Coupled wave theory for thick hologram gratings", Bell Syst. Tech. J. 48, p2909-2947
- (3) Hanying Zhou, 1995, "Angle-dependent diffraction efficiency in a thick photorefractive hologram", Applied Opt., Vol. 34, No. 8, p1303-1309
- (4) Mark L. DeLong, 1998, "Parametric extension of the classical exposure-schedule theory for angle-multiplexed photorefractive recording over wide", Applied Opt. , Vol 37, No. 14, p3015-3030
- (5) J.M.Gonzalez-Leal, 2004, "Automated system for the study of volume holographic recording", AIP, Vol 75, No 9 p2899-2902
- (6) Xiaosu Ma, 2004 "Exposure-schedule study of uniform diffraction efficiency for DSSM holographic storage", Optics Express, Vol. 12, No. 6