

## 프랙탈-공간 다중화를 이용한 홀로그래픽 메모리 시스템의 누화해석

(Crosstalk Analysis of Holographic Memory System using Fractal-Space Multiplexing)

김수길\* · 홍선기

(Soo - Gil Kim · Sun - Ki Hong)

### 요 약

움직이는 창(moving window; MW)을 이용한 프랙탈-공간 다중화 방법은 액정디스플레이(liquid crystal display; LCD) 상에서 수평, 수직방향으로 움직이는 창들을 통과한 기준빔으로 홀로그램을 다중화하는 방법이다. 그러나, 수직방향으로 인접한 MW사이에서 누화가 발생하여 고밀도의 정보저장 및 복원이 제한되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 고밀도의 정보저장을 위해 렌즈의 초점거리, MW의 간격, 다중화되는 홀로그램의 개수에 의한 누화를 이론적으로 분석하고, 체적형 광굴절결정과 디스크형 광폴리머를 이용한 프랙탈-공간 다중화 실험 결과를 제시하였다.

### Abstract

Fractal-space multiplexing using a moving window(MW) can multiplex holograms by moving a window left and right, and up and down. But, crosstalk occurs by two neighboring moving windows in the vertical direction of the holographic memory system and limits high-density information recording. Accordingly, we analyzed the crosstalk with the focal length of lens, the distance of MW, and the number of multiplexed hologram to record high-density information and presented the optical experimental results of fractal-space multiplexing using volumetric photorefractive crystal and disc type photopolymer.

Key Words : crosstalk, fractal-space multiplexing, holographic memory, moving window

### 1. 서론

일반적으로, 다중홀로그램(multiple hologram)은

병렬처리가 가능한 홀로그래픽 메모리, 광학적인 신경회로망, 광연결, 그리고 광상관기와 같은 폭넓은 분야에 응용이 가능하며 특히, 체적 홀로그래픽 메모리 시스템에서 광범위하게 연구되어 왔다[1].

다중홀로그램은 광굴절 매질(photorefractive medium)에 회절효율을 갖게하는 노출스케줄을 이용하여 순차적으로 기록될 수 있다. 이러한 체적 홀로그래픽 메모리는 짧은 액세스 타임과 높은 데이터

\* 주저자 : 호서대학교 전기정보통신공학부 조교수

Tel : 041-540-5676, Fax : 041-540-5693

E-mail : sgkim@office.hoseo.ac.kr

접수일자 : 2003년 8월 8일

1차심사 : 2003년 9월 4일

심사완료 : 2003년 11월 6일

전송률, 그리고 대용량의 저장능력 등으로 인해 차세대 초고속, 초대용량 데이터 저장장치에서 중요한 역할을 할 것으로 기대되고 있다.

광굴절 효과(photorefractive effect)[2]가 발견된 이후에 광굴절 매질에 보다 많은 양의 정보를 저장하기 위한 다양한 구조의 다중화 기법이 제안되었고 그것들의 구현 가능성으로 인해 체적 홀로그래픽 메모리(volume holographic memory) 기술은 국내외 여러 연구자들에 의해 다양한 방법들이 제시되고 실험을 통해 입증되었다[1].

기준빔의 각도를 이용하는 각 다중화(angular multiplexing)[3], 가변되는 파장의 광원을 이용하는 파장 다중화(wavelength multiplexing)[4], 서로 직교하는 위상을 이용하는 위상 다중화(phase multiplexing)[5] 기법 등이 공통의 기록매질에 독립적인 데이터 페이지의 저장과 재생을 가능하게 하는 가장 유망한 홀로그래픽 다중화 기록방법들이다. 이러한 방법들 외에 광섬유의 스펙클 패턴을 이용한 기법과[6] 또한, 앞에서 언급한 방법들을 2개 이상 결합한 복합다중화 구조도 제안되고 있다[7].

최근에는 액정디스플레이(liquid crystal display; LCD)에서 움직이는 창(moving window; MW)의 개념을 이용하여 기계적인 동작을 없애면서 전자적으로 기준빔의 각도를 제어함으로써 보다 간단하면서도 안정적인 다중화 방법이 제시되었다[8]. 그러나, 일반적으로 공간다중화 기록시 수직방향에서는 물체빔의 수직공간 대역폭보다 기준빔의 수직방향으로의 편향이 크도록 인접한 기준빔간의 간격을 유지해야 누화(crosstalk) 없이 재생되므로[9] 공간 다중화 기록시 고밀도 정보저장이 제한되게 된다. 새로이 제시된 MW를 이용한 프랙탈-공간 다중화 시스템은 MW를 평행하게 통과한 빛이 렌즈에 의해 각각 다른 파벡터를 갖도록 설계되어있다. 따라서, 렌즈의 초점거리의 변화에 따라 신호대잡음비(SNR)가 달라진다. 또한, 사용된 MW사이의 거리와 홀로그래프의 개수도 복원시 영상의 누화에 영향을 주기 때문에 영상누화 없는 효과적인 정보 저장 및 재생을 위해서는 이에 대한 이론 및 실험적 분석이 중요하다.

따라서, 본 논문에서는 기존에 제안된 MW를 이용한 프랙탈-공간 다중화 시스템에서 렌즈의 초점

거리와 MW 사이의 거리 및 기록된 홀로그래프 개수 등에 따른 누화현상에 대한 이론적 분석과 광학 실험 결과에 대해서 논하고자 한다.

## 2. 움직이는 창을 이용한 프랙탈-공간 다중화

MW를 이용한 프랙탈-공간 다중화 기법(fractal-space multiplexing)은 기계적인 동작을 없애면서도 전자적으로 기준빔의 각도를 바꿈으로써 간단하면서도 안정적으로 많은 정보를 저장할 수 있는 새로운 다중화 방법으로 제시되었다.

일반적으로 LCD는 반도체 공정을 이용하여 제작되며, 수십 만개의 화소들로 이루어져 있으며, 각 화소는 전자적으로 온, 오프상태로 제어될 수 있다. 이러한 LCD의 특성을 이용하여 LCD 화소들의 일정 부분은 온시키고 나머지 부분은 오프시킴으로써 MW를 만들 수 있으며, 여기에 광을 입사시켜 통과하게 한 다음에 렌즈를 이용하여 특정부분으로 입사시킴으로써 간단한 프랙탈-공간 다중화 시스템을 구현할 수 있다. 특히, 화소들은 전자적으로 제어할 수 있기 때문에 기존의 각다중화 방법에서 발생하는 기계적 오차의 제거와 함께 전자적인 방법에 의해 간단하게 다른 파벡터(wave vector)를 갖는 기준빔의 생성이 가능하다. 또한, 다른 다중화 방법들에 비해 저렴한 장비를 이용하여 간단하게 시스템을 구성할 수 있다[8].

그림 1은 LCD화면에서 MW를 만들고 이동하는 것을 도식적으로 보여주는 그림이다.

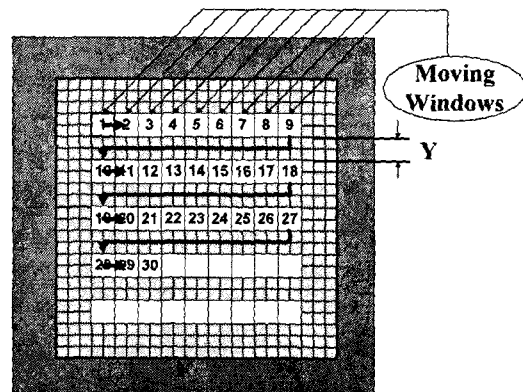


그림 1. LCD에서 MW에 대한 개념도  
Fig. 1. Schematic diagram of moving window on LCD

본 논문에서는 MW를 이용한 각다중화와 영상누화를 해석하기 위해 “20 × 20”의 화소수를 갖는 MW를 프로그램으로 제작하여 이 부분만을 on시키고 나머지는 off시키는 방법으로 프랙탈-공간 다중화를 위한 기준빔의 어드레스를 생성시켰다. 이때, 생성되는 MW의 크기는 임의적으로 조정될 수 있으며 창의 크기는 기준빔의 광량에 비례하기 때문에 창의 크기가 클수록 기록속도도 빨라지게 된다.

프랙탈-공간 다중화에 사용되는 MW는 수평방향으로 제어될 경우 창의 크기에 관계없이 인접하는 창들의 중첩만 발생하지 않는다면 서로 다른 파벳터를 갖기 때문에 영상의 누화없이 완전한 영상의 기록과 복원이 가능하다. 그러나, 수직방향에서의 MW는 인접하는 창들의 입사각 변화가 수평방향에 비해 작기 때문에 수직방향에서 영상누화의 발생을 방지하기 위해서는 브래그 조건을 만족할 수 있는 수직각선택도가 필요하다.[9] 그림 2는 수직방향의 각선택도가 필요하다는 것을 보여주기 위한 파벳터도이고 그림에서  $k_s$ 와  $k_r$ ,  $K_r'$ 은 각각 물체빔과 기준빔 그리고 변화된 기준빔의 파벳터를 나타내고  $k_{g1}$ 과  $k_{g2}$ 는 홀로그램 기록시에 생성된 격자의 파벳터를 나타낸다.

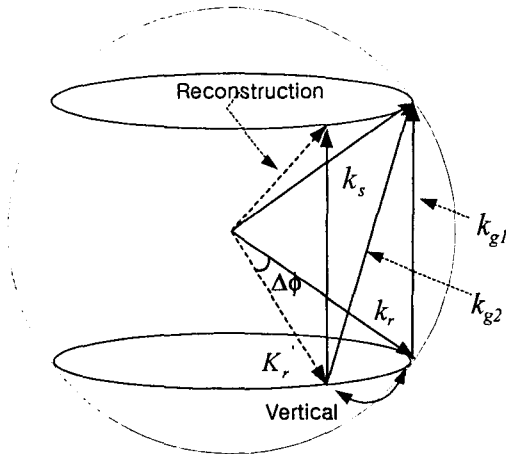


그림 2. 복원하는 기준빔이 기록시의 기준빔과 방위각이 차이가 나는 경우에 대한 파벳터도  
 Fig. 2. Wave vector diagram showing the difference when reconstructed reference beam has azimuthal angle deviation with respect to recording reference beam

수직방향으로  $\Delta\phi$ 만큼 편향된 기준빔 ( $K_r'$ )으로 읽는 경우  $k_{g1}$ 에 의해 재생된 정보가 본래의 물체빔 축상에서 벗어나 있게 되므로 물체빔의 수직 공간 대역폭이 제한된다. 따라서,  $k_{g2}$ 에 의해 재생된 물체빔과 수직 공간에서 겹치지 않기 위해서는 물체빔의 수직 공간대역폭보다 기준빔의 수직방향으로의 편향이 커야한다. 이와 같은 조건을 만족하면 물체빔의 수직 공간 대역폭보다 재생된 정보의 수직편향이 크게 되어 물체빔 축상의 중심에 위치하는 검출기에 의해 검출되지 않는다[3,9].

### 3. 프랙탈-공간 다중화 실험

#### 3.1. 체적형 광굴절매질의 경우

MW를 이용한 프랙탈-공간 다중화 및 누화 현상을 분석하기 위해서 그림 3과 같은 실험 시스템을 구성하였다. 광학실험에 사용된 광원은 출력이 100 [mW]이고 파장이 532.8[nm]인 frequency-doubled Nd-YAG 레이저를 사용하였다. 또한, 각다중화에 사용된 LCD는 Epson사 제품으로 해상도가 640 × 480이며 화소의 크기가 42[ $\mu$ m] × 42[ $\mu$ m]이다. 그리고, 초점거리가 120[mm]인 렌즈를 사용하여 크기가 1 [cm] × 1[cm] × 1[cm]인 Fe-LiNbO<sub>3</sub> 광굴절매질에 영상을 기록하였다.

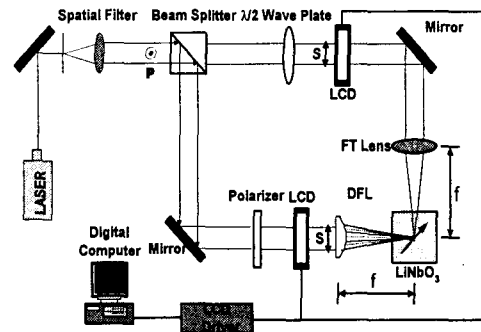


그림 3. 프랙탈-공간 다중화 시스템  
 Fig. 3. Fractal-space multiplexing system

그림 3에서 보는 바와 같이 수직편광 상태를 갖는 광원에 의해 입사된 빔은 광분할기를 통해 기준빔과 물체빔으로 분리되어 다른 경로로 진행된다. 이때,

LCD로 입사되는 기준빔은 LCD에 부착된 편광기에 의해 수평편광으로 바뀌어 렌즈를 통해 광굴절매질로 입사된다. 반면에 물체빔은 광원이 본래 갖고있는 수직편광 상태를  $\lambda/2$  파장판(wave plate)을 사용하여 수평편광상태로 변환시켜 광굴절매질로 입사되도록 시스템을 구성하였다. LCD에서 MW는 프로그램에 의해 미리 설계되어 전자적으로 수평, 수직 방향의 움직임이 제어된다. 이러한 MW에 의해 서로 다른 파벳으로 입사된 기준빔이 물체빔과 광굴절매질내에서 간섭을 일으켜 다른 형태의 회절격자를 형성하게 된다. 실험에 사용된 창 크기는 화소수가  $20 \times 20$ 로 구성되며 전체적인 LCD의 화소수에 대해  $24 \times 16$ 의 MW를 생성할 수 있다. 즉, 384개의 다른 파벳을 갖는 어드레스를 생성시킬 수 있다.

일반적으로, LCD에서 MW에 의한 홀로그램의 다중화 정도는 창 크기와 렌즈의 초점거리에 의해 결정되는데, 본 논문에서는 MW에 의한 어드레스의 개수보다 영상누화 현상에 대한 실험을 수행하기 위해  $20 \times 20$ 의 크기를 갖는 창을 사용하였다.

광학실험을 통하여 프랙탈-공간 다중화 기법을 검증하기 위해 그림 1에서와 같이 수평방향으로 각각의 이웃하는 창들이 중첩되지 않도록 이동시키면서 다른 입사각으로 진행시켜 영상을 기록한 후 복원하였다. 그림 4는 복원영상을 나타낸 것이다.



그림 4. MW를 이용한 복원영상  
Fig. 4. Reconstructed images using moving windows

그림 4에서와 같이 영상의 누화없는 완전한 영상 복원이 가능하며 이러한 영상의 복원은 이론적으로 LCD의 화소수 만큼 기록하는 것이 가능하다. 그러나, 실제적으로 기준빔의 어드레스 개수는 렌즈의 구경(aperture)과 MW의 수직방향 폭에 의해서 제한되게 된다. 즉, MW를 통해 진행되는 광보다 렌즈의

구경이 충분히 커야되고 수직방향의 창들은 영상누화 현상을 제거할 수 있는 조건을 만족하는 간격이 상으로 떨어져 입사되어야 한다.

그림 3과 같은 프랙탈-공간 다중화는 광굴절매질에서 기준빔과 물체빔을 일치시키는 것이 어렵다. 그림 3의 시스템에서 광굴절매질내에서 기준빔의 초점은 물체빔의 초점과 일치해야 한다. 그렇지 않으면 기준빔과 물체빔의 일부만이 간섭하고 회절효율은 복원시에 급속하게 떨어진다. 또한, 이런 경우에 있어서 복원영상의 질은 균일하지 않게 된다. 시스템의 정렬을 쉽게하고 균일한 복원영상을 얻기위해 세로형 줄무늬(stripe) 형태의  $4 \times 640$  크기의 움직이는 창을 이용하여 영상을 기록하고 복원하였다. 실험결과를 그림 5와 같다. 이 경우의 복원영상은 정사각형 형태의 움직이는 창을 이용하여 영상을 기록하고 복원한 결과보다 더 선명하고 균일한 영상을 보여주고 있다. 그러나, 이와 같은 다중화방법은 저장밀도가 높지않기 때문에 보다 효과적인 프랙탈-공간 다중화방법이 연구되어야 할 것이다.

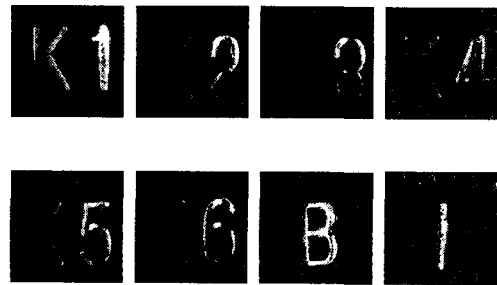


그림 5. 줄무늬형 창을 이용한 복원영상  
Fig. 5. Reconstructed images using stripe type window

### 3.2. 포토폴리머의 경우

본 논문에서는 광굴절결정외에도 디스크형태의 광폴리머(photopolymer)를 이용한 홀로그래픽 메모리 시스템을 구현하였으며, 전체적인 시스템은 그림 3과 거의 같으며, 다만  $\text{LiNbO}_3$  대신에 디스크형의 광폴리머를 저장매질로 사용하는 것이 다른 점이다. 디스크형 광폴리머를 이용한 기록구조를 상세히 나타내면 그림 6과 같다. 제안된 시스템은 정보를 디스크형 광폴리머에 움직이는 창을 이용한 프랙탈-공

간 다중화와 디스크의 회전에 의한 회전다중화에 의해 대용량의 정보를 저장할 수 있는 시스템이다. 이러한 형태의 시스템은 기존의 CD플레이어와 비슷한 구조를 가지고 있어서 홀로그래픽 메모리 시스템이 상용화될 경우에는 상당히 유리한 점이 많다.

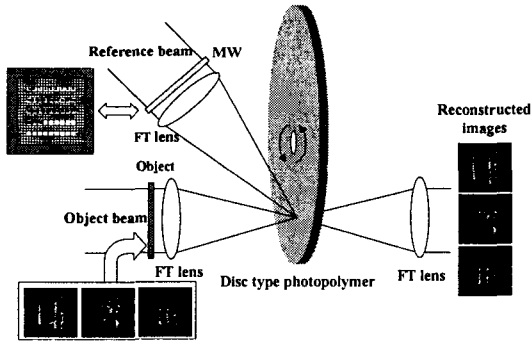


그림 6. 디스크형태의 포토폴리머를 이용한 홀로그래픽 메모리 시스템  
Fig. 6. Holographic memory system using disc type photopolymer

제안된 시스템에 사용된 광폴리머는 두께 100 $\mu$ m의 Dupont사 HRF150-100제품이다. 여기에서도 앞에서 제시한 것처럼 움직이는 창을 이용한 프랙탈-공간 다중화기법을 적용하였다. 본 논문에서는 광폴리머의 한 지점에 10개의 영상을 저장하고 복원하는 실험을 수행하였다. 이는 일반적으로 알려진 광폴리머의 경우 한 지점에서의 기록할 수 있는 영상의 개

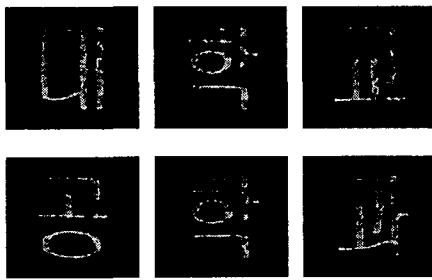


그림 7. 디스크형 광폴리머를 이용한 홀로그래픽 메모리 시스템의 복원영상  
Fig. 7. Reconstructed images of holographic memory system using disc type photopolymer

수는 렌즈의 초점거리, 렌즈의 직경, 기록매질의두께에 의해서 변화되지만 대략 16개 미만으로 알려지고 있어서 누화를 고려하여 저장영상을 10개로 선정하였다. 저장영상중에서 복원한 결과의 일부는 그림 7과 같다.

#### 4. 움직이는 창을 이용한 프랙탈-공간 다중화기법의 누화해석

MW를 이용한 홀로그래픽 메모리시스템에서 수직방향으로 프랙탈-공간 다중화를 수행할 경우 물체빔의 수직공간 대역폭보다 기준빔의 수직방향으로의 편향이 크도록 인접한 수직방향 창의 간격을 조정해야만 영상의 누화없이 복원된다. 그림 8은 이러한 조건을 만족하지 않는 인접한 MW를 이용하여 기록한 영상을 복원한 것인데 복원영상에 누화가 발생한 것을 알 수 있다. 그림 8의 (a)는 광굴절결정의 경우에 대하여, (b)는 광폴리머에서의 영상누화결과를 보여주는 것이다.

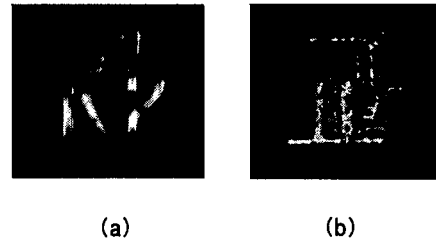


그림 8. 복원영상의 영상누화현상 (a) 광굴절결정의 경우 (b) 광폴리머의 경우  
Fig. 8. Crosstalk phenomena in the reconstructed images (a) the case of photorefractive crystal and (b) photopolymer

MW를 이용한 프랙탈-공간 다중화 방법은 LCD의 전체 픽셀수에 의해 저장용량이 결정되지만 단지 기준빔의 일부분만을 사용하기 때문에 광량이 적다는 단점을 갖고있다. 이러한 조건에서는 저장용량을 제한하는 홀로그램 메모리 시스템의 영상누화현상의 해석이 매우 중요하다. MW를 이용한 프랙탈-공간 다중화 시스템은 Gu[10]에 의해 제안된 각다중화 시스템의 영상누화 해석 방법을 적용하여 다음과 같

이 비교적 간단하게 해석할 수 있다.

먼저, 기준빔  $R_m$ 은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_m = \exp(j\vec{k}_m \cdot \vec{r}) \quad (1)$$

여기서,  $k_m$ 은 평면파의 파벡터를 나타내고,  $m$ 은 각각의 창에 의해 기록되는 홀로그램을 나타낸다. 프랙탈-공간 다중화 시스템의 영상누화 해석은 등방성 광굴절 매질에 대해서 식 (2)에 의해 계산될 수 있다.

$$NSR = \sum_{m \neq j} \left| \text{sinc} \left[ \frac{t}{2\pi} \left( (\Delta K_{mj})_z + \frac{1}{F} \left( (\Delta K_{mj})_x x_2 + (\Delta K_{mj})_y y_2 \right) + \frac{\lambda}{4\pi} \left( (\Delta K_{mj})_x^2 + (\Delta K_{mj})_y^2 \right) \right) \right] \right|^2 \quad (2)$$

여기서,  $t$ 는 광굴절매질의 두께이고  $\lambda$ 는 광원의 파장을 각각 나타낸다. 그리고,  $\Delta K_{mj} = k_m - k_j$ 은 기록에 사용된 기준빔( $m$ )과 복원에 사용된 기준빔( $j$ ) 사이의 불일치를 나타내며,  $x_2$ 와  $y_2$ 는 출력 평면의 중앙으로부터 떨어진 거리를 각각 나타낸다.

식 (2)에 의한 SNR은  $y$ 축만을 적용한 1차원 기준빔에 대하여 계산하였다. 본 논문에서는 렌즈의 초점거리와 MW 사이의 거리 그리고 저장된 홀로그램의 개수에 따른 SNR 변화 추이를 각각 계산하였으며, 그 결과는 그림 9-11과 같다. 각 그림에서 가장 나쁜 SNR(worst SNR)은 기준빔( $j=1 \sim N$ )에 대하여 식 (2)에서 계산된 SNR의 최소값을 의미한다.

그림 9는 렌즈의 초점거리와 SNR 관계를 나타낸 것으로 렌즈의 초점거리가 증가할수록 푸리에 평면에서 각 홀로그램 사이의 실효 각선택도(effective angular selectivity)는 점점 감소하고 누화현상도 증가함을 알 수 있다. 그림 9에서 점선과 실선은  $N=50$ 개와  $N=100$ 개의 홀로그램을 저장했을 경우에 대한 SNR을 각각 나타낸 것인데, SNR은 렌즈의 초점거리가 20[mm]에서 120[mm]으로 변화에 따라 50[dB]에서 41[dB]까지 감소하였으나 저장된 홀로그램의 개수는 SNR에 거의 영향을 주지 않았다.

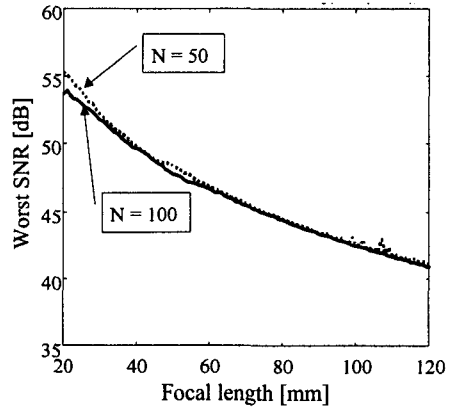


그림 9. 렌즈의 초점거리에 따른 SNR (MW간의 거리=420  $\mu$ m)

Fig. 9. The worst SNR as a function of focal length(window distance is fixed to 420  $\mu$ m for both cases)

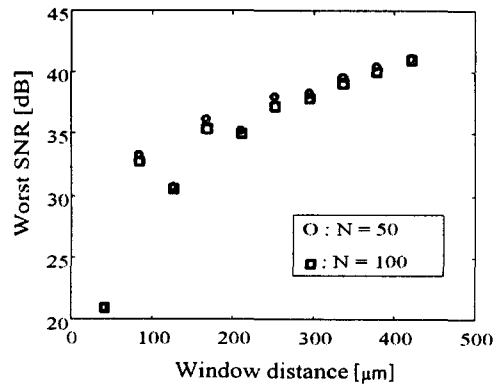
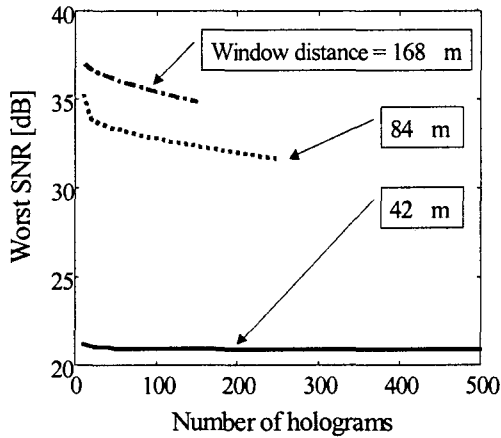


그림 10. 두 개의 이웃하는 창사이의 거리변화에 따른 SNR (초점거리=120 mm)

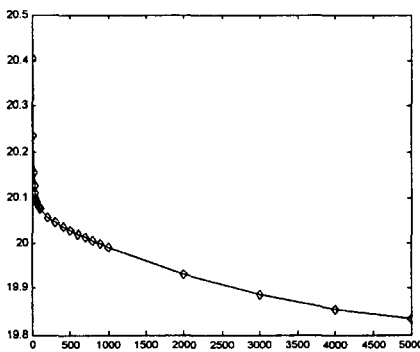
Fig. 10. The worst SNR as a function of the distance between two neighboring windows(focal length is fixed to 120 mm for both cases)

그림 10은 렌즈의 초점거리는 고정시키고 이웃하는 창사이의 거리를 변화시킴에 따라 SNR에 미치는 영향을 계산한 결과를 나타낸 것이다. 즉, 인접하는 창 사이의 간격이 커지면 각 홀로그램간의 각선택도가 증가하면서 영상누화에 의한 잡음영향이 줄어들어 SNR이 증가하게 된다. 그림 10의 경우에도 그림 9와 마찬가지로 홀로그램의 개수는 SNR에 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 이웃하는 창 사이의 거

리는 픽셀의 크기가 고정되어 있기 때문에 픽셀 크기의 정수배로 나타낼 수 있다. 본 논문에서는 계산의 편의를 위해 하나의 MW는 포인트 소스이면서 각각 분리되어 있다고 가정하였다. 따라서, MW의 폭에 의한 SNR에 영향은 고려 할 수 없지만 MW간의 거리차에 따른 SNR의 변화추이는 분석할 수 있다.



(a)



(b)

그림 11. 홀로그램 개수에 따른 SNR (초점거리 = 120mm) (a) 창의 간격이 42, 84, 168( $\mu\text{m}$ )의 경우 (b) 창의 간격이 42( $\mu\text{m}$ )의 경우

Fig. 11. The worst SNR as a function of the hologram number(focal length is fixed to 120 mm for all cases) (a) case of window distance 42, 84, 168( $\mu\text{m}$ ) (b) case of window distance 42( $\mu\text{m}$ )

그림 11은 홀로그램 개수의 증가에 따른 누화의

변화를 나타낸 것이다. 실험에 사용된 LCD의 픽셀 수가  $640 \times 480$ 이고 각 픽셀의 크기가  $42[\mu\text{m}] \times 42[\mu\text{m}]$ 이라면  $x$ 축에서 다중화될 수 있는 홀로그램 개수는 640개가 된다.

따라서, 창의 크기가 커질수록 즉, 하나의 창을 이루는 픽셀의 개수가 많아질수록 각다중화에 사용될 창의 개수는 적어지게 된다. 본 논문에서는 홀로그램의 개수에 따라 정해지는 이동하는 각 창들의 크기에 따른 SNR 영향을 계산하였다. 즉, 창의 크기가  $x$ 축 방향에 대하여  $42[\mu\text{m}]$ ,  $84[\mu\text{m}]$ ,  $168[\mu\text{m}]$ 로 증가하면 사용가능한 창의 최대 개수는 640, 320, 160으로 감소하게 된다. 그림 11은 홀로그램의 개수가 증가함에 따라 누화가 증가하므로 SNR이 감소하는 것을 알 수 있으나 홀로그램 개수 변화에 의한 SNR 영향보다는 이동창간의 거리 변화가 SNR에 보다 커다란 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 그림 11의 (b)는  $42[\mu\text{m}]$  크기의 창에 대하여 SNR을 따로 나타낸 그림이다. (a)에서는 크기가  $42[\mu\text{m}]$ 인 창의 경우에는 홀로그램의 개수에 따른 SNR의 변화가 없는 것처럼 보여지고 있으나, 그림 (b)에 따로 나타낸 것을 보면 홀로그램의 개수가 증가함에 따라 SNR이 나빠지는 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

고밀도의 정보저장과 누화현상을 최소화하기 위하여 MW를 이용한 프랙탈-공간 다중화를 체적형 광굴절결정과 디스크형 광폴리머에 적용하여 구현하고 물리적 요소별로 누화를 분석하였다.

MW의 각다중화에 사용된 렌즈의 초점거리가 감소하고 이웃하는 MW 사이의 간격이 커질수록 복원 영상의 SNR은 향상되는 것으로 분석되었다. 또한, 홀로그램의 개수가 증가함에 따라 SNR이 감소하지만 다른 요소들에 비해 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 결과적으로 MW를 이용한 수직방향의 다중화의 경우 수평방향에 대한 각선택도와는 달리 인접한 수직방향 창의 간격을 물체빔의 수직 공간대역 폭보다 기준빔의 수직방향으로의 편향이 더 커지도록 유지해야만 누화현상이 복원될 수 있기 때문에 제안된 프랙탈-공간 다중화 방법은 수직방향의 제

한된 각선택도로 고밀도의 공간 다중화가 제한된다.

따라서, 앞으로 본 논문에서 분석된 수직방향에서의 영상누화현상을 효과적으로 제거함으로써 고밀도의 공간-각 다중화 기록이 가능한 새로운 다중화 기법의 연구가 요구된다.

### References

- [1] J. H. Hong, I. McMichael, T. Y. Chang, W. Christian, and E. C. Paek, "Volume holographic memory systems: techniques and architectures," *Opt. Eng.* vol. 34, no. 8, pp. 2193-2203, 1995.
- [2] P. J. Van Heerden, "Theory of optical information storage in solids," *Appl. Opt.* vol. 2, p. 393, 1963.
- [3] F. H. Mok, "Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate," *Opt. Lett.* vol. 18, no.11, pp. 915-917, 1993.
- [4] 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, 1992.
- [5] 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, 1991.
- [6] Y. H. Kang, K. H. Kim, and B. Lee, "Volume holgram scheme using optical fiber for spatial multiplexing," *Opt. Lett.* vol. 22, no. 10, pp. 739-741, 1997.
- [7] S. Tao, D. R. Selviah, and J. E. Midwinter, "Spatioangular multiplexed storage of 750 holograms in an Fe:LiNbO<sub>3</sub> crystal," *Opt. Lett.* vol. 18, no. 11, pp. 912-915, 1993.
- [8] S.-G. Kim, K.-T. Kim, and E.-S. Kim, "Non-mechanical angular multiplexed holographic memory system using moving window on liquid crystal display" *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 38, Pt.22, no. 1A/B, 1999.
- [9] H. Lee, X. Gu, and D. Psaltis, "Volume holographic interconnections with maximal capacity and minimal cross talk," *J. Appl. Phys.* vol. 65, no. 6, pp. 2191-2194, 1989.
- [10] C. Gu, J. Hong, I. McMichael, R. Saxena, and F. Mok, "Cross-talk limited storage capacity of volume holographic memory," *J. Opt. Soc. Am. A* vol. 9, 1978-1992, 1992.

### ◇ 저자소개 ◇

#### 김수길 (崔圭亨)

1965년 8월 2일생. 1988년 2월 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업(학사). 1991년 2월 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 2월 서울대학교 대학원 전기공학부 졸업(박사). 1997년 현재 호서대학교 전기정보통신공학부 조교수.

#### 홍선기 (洪瑄基)

1965년 1월 24일생. 1987년 2월 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업(학사). 1989년 2월 서울대학교 대학교 전기공학과 졸업(석사). 1993년 2월 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년 현재 호서대학교 전기정보통신공학부 부교수.