

# WMoving Window를 이용한 각다중화 홀로그래픽 메모리 시스템의 영상누화

정회원 김규태\*, 김수길\*\*, 김은수\*

## Crosstalk of Angular Multiplexed Holographic Memory System using Moving Window

Kyu-Tae Kim\*, Soo-Gil Kim\*\*, and Eun-Soo Kim\* *Regular Members*

### 요 약

본 논문에서는 LCD MW를 이용한 각다중화 시스템에서 인접한 수직방향 MW사이에서 발생하는 영상누화현상에 대해 분석하였다. LCD MW를 이용한 각다중화 방법으로 LCD 상에서 수평, 수직방향으로 움직이는 각 창들을 통과한 기준빔이 서로 다른 파벡터로 입사되기 때문에 이러한 창들의 전자적인 제어만으로 효과적인 각다중화된 홀로그램을 얻을 수 있다. 그러나, 수직방향으로 인접한 MW사이에서 영상누화가 발생하기 때문에 공간적으로 고밀도의 정보저장 및 복원이 제한되고 있다.

따라서, 본 논문에서는 고밀도의 정보저장을 위해 여러가지 요소들에 의한 영상누화를 이론적으로 분석하고 이에 대한 광학 실험 결과를 제시하였다.

### ABSTRACT

We analyzed the crosstalk of the holographic memory system using a moving window(MW), which can multiplex holograms by moving the window left and right, and up and down. But, crosstalk occurs by two neighboring moving windows in the vertical direction of the MW holographic memory system and limits high-density information recording. Accordingly, the crosstalk noise analysis with various parameters of the MW holographic memory system was presented to record high-density information and optical experiments in relation to it was also shown.

### 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.<sup>[1]</sup> 다중홀로그램은 광굴절 매질(photorefractive medium)이나 폴리머(polymer)에 회절효율을 갖게하는 노출스케줄을 이용하여 순차적으로 기록될 수 있다. 이러

한 체적 홀로그래픽 메모리는 짧은 액세스 타임과 높은 데이터 전송률, 그리고 대용량의 저장능력 등으로 인해 차세대 초고속, 초대용량 데이터 저장장치에서 중요한 역할을 할 것으로 기대되고 있다.

홀로그래픽 메모리 시스템에서 페이지정보를 가지고 있는 물체빔은 광굴절매질에서 임의로 선정된 기준빔과 간섭되어 홀로그램형태로 기록된다. 이와 같은 기록과정은 다른 모든 물체빔과 기준빔에 대해 반복되어 기록되며 기록 후 임의의 물체 정보는 대응하는 기준빔으로 체적 홀로그램을 읽음으로써

\* 광운대학교 전자공학부

\*\* 호서대학교 전기공학부

논문번호: 000001-1024, 접수일자: 2000년 10월 24일

엑세스될 수 있는데 이것을 다중화(multiplexing) 기록이라 한다.

광굴절 효과(photorefractive effect)<sup>[2]</sup>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.<sup>[3]</sup>

기준빔의 각도를 이용하는 각 다중화(angular multiplexing)<sup>[4]</sup>, 가변되는 파장의 광원을 이용하는 파장 다중화(wavelength multiplexing)<sup>[5]</sup>, 서로 직교하는 위상을 이용하는 위상 다중화(phase multiplexing)<sup>[6][7]</sup> 기법 등이 공통의 기록매질에 독립적인 데이터 페이지의 저장과 재생을 가능하게 하는 가장 유망한 홀로그래픽 다중화 기록방법들이다. 이러한 방법들 외에 광섬유의 스페클 패턴을 이용한 기법과<sup>[8]</sup> 또한, 앞에서 언급한 방법들을 2개 이상 결합한 복합다중화 구조도 제안되고 있다.<sup>[9]</sup>

이러한 다중화기법 중에서 각 다중화 방법은 다른 방법들에 비해 보다 고밀도의 정보저장이 가능하여 가장 널리 사용되는 구조중의 하나이다. 각 다중화 방법은 일반적으로 물체 평면파의 입사각을 고정시키고 서로 다른 입사각을 가진 여러 개의 기준평면파를 이용하여 많은 양의 정보를 다중화하여 저장하게 된다. 이때, 기준평면파의 입사각은 스테핑모터(steping motor)나 음향광편향기(AOD: acousto-optic deflector)등을 이용하여 각 저장정보에 대한 입력 어드레스를 제어하게 된다. 스테핑모터를 이용하는 기계적인 입력주소 제어 방법은 비교적 간단한 구조로 많은 정보를 저장할 수 있는 장점은 있지만, 정보를 저장할 때와 복원할 때에 정확하게 맞지 않는 기계적 오차로 인해 브래그 조건(Bragg condition)을 만족시키기 어려워 복원 정보의 crosstalk 및 신호 대 잡음비가 낮아지는 단점이 있다. 또한, AOD를 이용한 전자적 제어 방법은 기계적 오차로 인한 복원 정보의 crosstalk을 방지할 수 있고 보다 빠르고 정확하게 정보를 복원할 수 있는 안정된 시스템이지만 가격이 비싸고 시스템구성이 복잡하여 구현에 어려움이 있다.

최근에는 LCD(liquid crystal display) 공간광변조기의 MW(moving window)의 개념을 이용하여 기계적인 동작을 없애면서 전자적으로 기준빔의 각도를 제어함으로써 기계적 및 전자적 각 다중화 기법의 장점만을 취한 보다 간단하면서도 안정적인 각

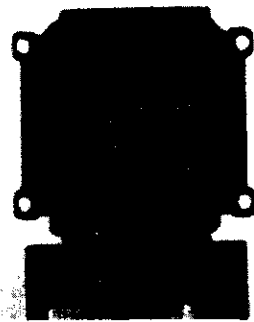
다중화 방법이 제시되었다.<sup>[10]</sup> 그러나, 일반적으로 공간다중화 기록시 수평방향에서의 브래그 조건에 의한 각선택도가 수직방향에서는 수평방향 각선택도의 2배 이상 띄워주어야 영상누화(crosstalk) 없이 재생됨으로<sup>[11]</sup> 공간 다중화 기록시 고밀도 정보저장이 제한되게 된다. 새로이 제시된 LCD MW를 이용한 각다중화 시스템 역시 MW를 평행하게 통과된 빛이 렌즈에 의해 각각 다른 파벳터를 갖도록 설계되어서 렌즈의 초점거리에 의해 기록 가능한 홀로그램의 개수와 영상누화의 발생등에 영향을 주게 된다. 또한, 사용된 MW사이의 거리와 홀로그램의 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 LCD MW를 이용한 각다중화 시스템에서 사용된 렌즈의 초점길이와 어드레스로 사용된 MW 사이의 거리 및 기록된 홀로그램 개수 등에 따른 영상누화 현상에 대한 이론적 분석과 광학 실험 결과에 대해서 논하고자 한다.

## II. LCD상에서 MW를 이용한 각다중화

LCD상에서 MW를 이용한 각다중화 기법은 기계적인 동작을 없애면서 전자적으로 기준빔의 각도를 제어가능케 하여 보다 간단하면서도 안정적으로 많은 정보를 저장할 수 있는 새로운 각다중화 방법으로 제시되었다.

일반적으로, LCD는 반도체 공정을 이용하여 제작되며, 수십 만개의 화소들로 이루어져 있으며, 각 화소는 전자적으로 on, off 상태로 제어될 수 있는 구조를 가지고 있다. 그림 1은 본 논문의 실험에 사용된 LCD의 외관과 화소구조를 나타낸 사진이다.



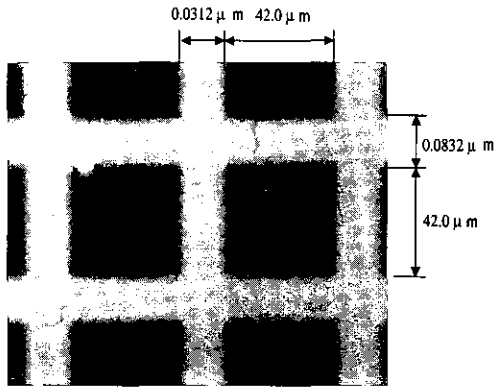


그림 1. LCD의 외관과 화소구조

LCD의 앞, 뒤에 있는 편광기와 검광기 그리고 LCD의 각 화소에 연결되어 있는 전극에 전압을 인가하여 액정의 편향각을 조정함으로써 각 화소의 on, off를 제어할 수 있다. 이러한 LCD의 간단한 특성을 이용하여 LCD 화소들의 일정부분은 on시키고 나머지 부분은 off시키며 이것을 렌즈를 이용하여 특정부분으로 입사시킴으로서 매우 간단한 각다중화 시스템을 구현할 수 있다. 특히, 화소들의 on, off는 전자적으로 크기와 위치를 제어할 수 있기 때문에 기존에 각다중화 방법에서 발생하는 기계적 오차의 제거와 함께 전자적인 방법에 의해 간단하게 다른 파벳터(wave vector)를 갖는 기준빔의 생성이 가능하다. 또한, 다른 각다중화 방법들에 비해 저렴한 장비를 이용하여 간단하게 시스템을 구성할 수 있다.<sup>[10]</sup>

그림 2는 LCD화면에서 창(window)을 만들고 이동(moving)하는 것을 도식적으로 보여주는 그림이다.

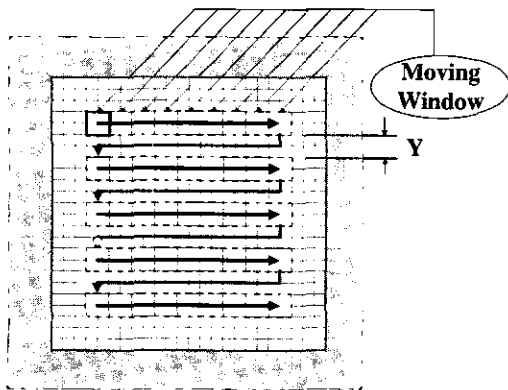


그림 2. LCD에서 MW에 대한 개념도

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

각다중화에 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.<sup>[11]</sup> 그림 3은 수직방향의 각선택도가 필요하다는 것을 보여주기 위한 파벳터도이고 그림에서  $k_o$ 와  $k_n$ 는 물체빔과 기준빔의 파벳터를 각각 나타내고,  $k_r$ 은 홀로그램의 복원시에 사용된 기준빔의 파벳터를 나타낸다.

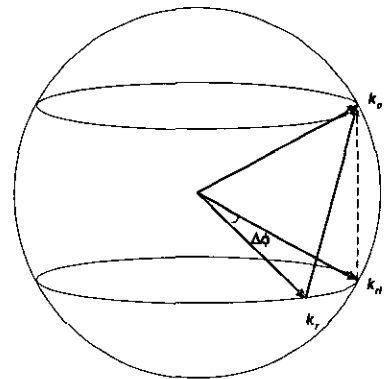


그림 3. 복원하는 기준빔이 기록시의 기준빔과 방위각이 차이가 나는 경우에 대한 파벳터도

그림 3에서와 같이 수직방향으로  $\Delta\phi$ 만큼 기록시의 기준빔에 대하여 각을 이동시켜서 홀로그램을 복원하게 되면 이론적으로 위상불일치가 나타나게 되어 누화가 일어나지 않아야 한다. 그러나, 실제로는 수평방향에서도 각 선택도 이상으로 홀로그램을 기록하고 복원해야만 누화가 없듯이 수직방향에서도 수직방향의 각 선택도가 존재하여 수직방향의 각선택도보다 작은 각을 갖는 기록시의 기준빔과 다른 기준빔을 이용하여 홀로그램을 복원하면 영상누화현

상이 발생하게 된다. 따라서, 수직방향의 기준빔끼리 영상누화를 일으키지 않기 위해서는 수평방향 각선택도의 2배 이상으로 기준빔을 이동시키면서 홀로그램을 다중화시켜야 한다.<sup>[4][11]</sup>

## II. 시스템 구성 및 각다중화 실험

LCD MW를 이용한 각다중화 및 영상누화 현상을 분석하기 위해서 그림 4와 같은 실험 시스템을 구성하였다. 광학실험에 사용된 광원은 출력이 100mW이고 파장이 532.8nm인 Nd-YAG 레이저를 사용하였다. 또한, 각다중화에 사용된 LCD는 Epson 사 제품으로 해상도가 640×480이며 화소의 크기가 42μm×42μm이다. 그리고, 초점길이가 120mm인 렌즈를 사용하여 크기가 1cm×1cm×1cm인 Fe-LiNbO<sub>3</sub> 광굴절매질에 영상을 기록하였다.

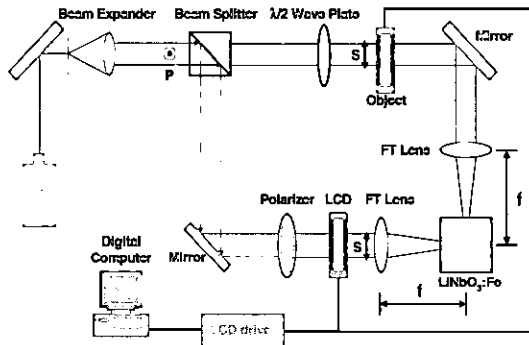


그림 4. MW에 의한 각다중화 시스템도

그림 4에서 보는 바와 같이 수직편광 상태를 갖는 광원에 의해 입사된 빔은 빔분할기를 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 λ/2 wave plate를 사용하여 수평편광상태로 변환시켜 광굴절매질로 입사되도록 시스템을 구성하였다. LCD에서 MW는 미리 설계되어 있는 프로그램에 의해 전자적으로 수평, 수직방향의 움직임이 제어된다. 이러한 MW에 의해서 다른 파벳터로 입사된 기준빔이 물체빔과 광굴절매질내에서 간섭을 일으켜 다른 형태의 회절격자를 형성하게 된다. 실험에 사용된 창 크기는 화소수가 20×20으로 구성되며 전체적인 LCD의 화소수에 대해 24×16의 MW를 생성할 수 있다. 즉,

384개의 다른 파벳터를 갖는 어드레스를 생성시킬 수 있다.

일반적으로, LCD에서 MW에 의한 홀로그램의 다중화 정도는 창 크기와 렌즈의 초점길이에 의해 결정되는데 본 논문에서는 MW에 의한 어드레스의 개수보다 영상누화 현상에 대한 실험을 수행하기 위해 20×20의 크기를 갖는 창을 사용하였다. 광학실험을 통하여 LCD MW 다중화 기법의 영상누화 현상을 검증하기 위해 그림 2에서와 같이 수평방향으로 각각의 이웃하는 창들이 중첩되지 않도록 이동시키면서 다른 입사각으로 진행시켜 영상을 기록한 후 복원하였다. 그림 5는 복원된 영상을 나타낸 것이다.

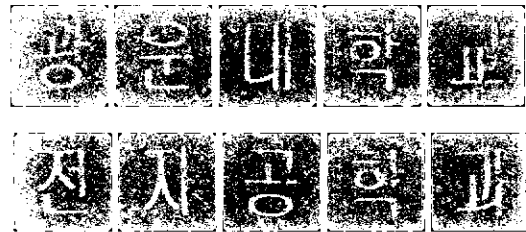


그림 5. MW를 이용한 복원영상

그림 5에서와 같이 영상의 누화없는 완전한 영상 복원이 가능하며 이러한 영상의 복원은 이론적으로 LCD의 화소수 만큼 기록하는 것이 가능하다. 그러나, 실제로 기준빔의 어드레스 개수는 렌즈의 구경(aperture)과 MW의 수직방향 폭에 의해서 제한되게 된다. 즉, MW를 통해 진행되는 광원보다 렌즈의 구경이 충분히 커야되고 수직방향의 창들은 영상누화 현상을 제거하기 위해서는 최소한 하나의 창폭(window width) 이상으로 떨어져 입사되어야 한다.

## IV. LCD MW 다중화 기법의 영상누화 해석

그림 2에서와 같이 수평방향에 대하여 MW를 좌, 우로 중첩되지 않도록 이동시키면서 기록을 하면, crosstalk 없이 복원될 수 있다. 제안된 방법의 수평방향 각선택도(angular selectivity)는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\theta_R = \lambda \cos\theta_O / nL_z \sin(\theta_R + \theta_O) \quad (1)$$

여기서,  $\theta_R$ 과  $\theta_O$ 은 광축에 대한 기준빔과 물체빔의 입사각을 각각 나타내고  $L_z$ 는 광굴절매질의 두

계를 나타낸다. 또한,  $n$ 과  $\lambda$ 는 광굴절매질의 굴절율과 광원의 파장을 각각 나타낸다. 본 논문에서는 수평방향의 각다중화 뿐만 아니라 수직방향으로의 다중화도 수행하였다. 수직방향으로 각다중화를 수행할 경우 인접한 수직방향 창들의 간격은 최소한 수평방향의 2배 이상으로 이동시켜야만 영상의 누화 없이 복원되었다. 그림 6은 복원영상에 누화가 발생한 것을 나타낸 것으로 그림 2에서 9번째 창과 수직방향으로 인접된 18번째 창과의 수직방향 영상누화에 의해 발생한 것이다. 따라서, 수직방향의 영상누화를 제거하기 위해서는 그림 2에서 나타낸 것과 같이 최소한 MW의 크기로 표시된 Y만큼의 간격으로 분리시켜서 기록을 하거나 수평방향 각선택도의 두 배 이상으로 분리시켜 기록해야 한다.

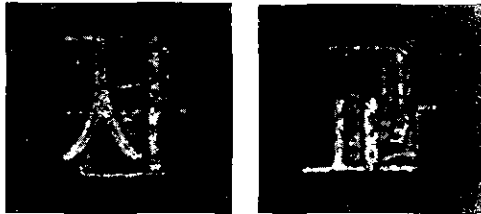


그림 6. 복원영상의 영상누화현상

LCD MW 각다중화 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. LCD MW 각다중화 시스템은 Gu에 의해 제안된 각다중화 시스템의 영상누화 해석 방법을 적용하여 다음과 같이 비교적 간단하게 해석할 수 있다.<sup>[12]</sup>

먼저, 기준빔  $R_m$ 은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_m = \exp(jk_m \cdot r) \tag{2}$$

여기서,  $k_m$ 은 평면파의 파벡터를 나타내고,  $m$ 은 각각의 창에 의해 기록되는 홀로그램을 나타낸다. LCD MW 각다중화 시스템의 영상누화 해석은 등방성 광굴절 매질에 대해서 식(3)에 의해 계산될 수 있다.

$$NSR = \sum_{m \neq j} \left| \text{sinc} \left[ \frac{t}{2\pi} \left( (\Delta K_{mj})_z + \frac{1}{F} \left( (\Delta K_{mj})_x x_2 + (\Delta K_{mj})_y y_2 \right) + \frac{\lambda}{4\pi} \left( (\Delta K_{mj})_x^2 + (\Delta K_{mj})_y^2 \right) \right) \right] \right|^2 \tag{3}$$

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 (3)에 의한 SNR은  $y$ 축만을 적용한 1차원 기준빔에 대하여 계산하였다. 본 논문에서는 렌즈의 초점길이와 MW 사이의 거리 그리고 저장된 홀로그램의 개수에 따른 SNR 변화 추이를 각각 계산하였으며 그 결과는 그림 7-9과 같다. 각 그림에서 worst SNR은 기준빔( $j=1 \sim N$ )에 대해서 식(3)에서 계산된 SNR의 최소값을 의미한다.

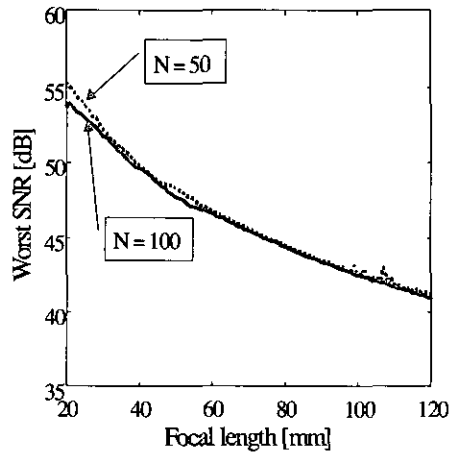


그림 7. 렌즈의 초점길이에 따른 SNR(MW간의 거리=420 $\mu$ m)

그림 7은 렌즈의 초점거리와 SNR 관계를 나타낸 것으로 렌즈의 초점길이가 증가할수록 푸리에 평면에서 각 홀로그램 사이의 실효 각선택도(effective angular selectivity)는 점점 감소하고 영상누화 현상도 증가함을 볼 수 있다. 그림 7에서 점선과 실선은  $N=50$ 개와  $N=100$ 개의 홀로그램을 저장했을 경우에 대한 SNR을 각각 나타낸 것이다. SNR은 렌즈의 초점길이가 20mm에서 120mm으로 변함에 따라 50dB에서 41dB까지 감소하였으나 그림 7에서 보는 바와 같이 저장된 홀로그램의 개수는 거의 영향을 주지 않았다.

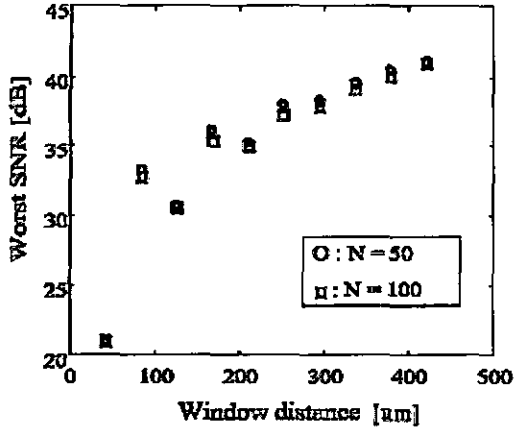


그림 8. 두 개의 이웃하는 창사이의 거리변화에 따른 SNR (초점길이=120mm)

그림 8은 마찬가지로 방법으로 렌즈의 초점길이는 고정시키고 이웃하는 창사이의 거리를 변화시킴에 따라 SNR에 미치는 영향을 계산한 결과를 나타낸 것이다. 즉, 인접하는 창 사이의 거리가 증가하게 되면 그림 8에서와 같이 각 홀로그래밍간의 각선택도가 증가하면서 영상누화에 의한 잡음영향이 줄어들어 SNR이 증가하게 된다. 그림 8의 경우에도 그림 7과 마찬가지로 홀로그래밍의 개수는 SNR에 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 이웃하는 창 사이의 거리는 픽셀의 크기가 고정되어 있기 때문에 픽셀 크기의 정수배로 나타낼 수 있다. 본 논문에서는 계산의 편의를 위해 하나의 MW은 포인트 소스이면서 각각 분리되어 있다고 가정하였다. 따라서, MW의 폭에 의한 SNR에 영향은 고려 할 수 없지만 MW간의 거리차에 따른 SNR의 변화추이는 분석할 수 있다.

그림 9는 홀로그래밍 개수의 증가에 따른 영상누화 변화를 나타낸 것이다. 실험에 사용된 LCD의 픽셀 수가 640×480이고 각 픽셀의 크기가 42μm×42μm 이라면 x축에서 다중화될 수 있는 홀로그래밍 개수는 640개가 된다.

따라서, 창의 크기가 커질수록 즉, 하나의 창을 이루는 픽셀의 개수가 많아질수록 각다중화에 사용될 창의 개수는 적어지게 된다. 본 논문에서는 홀로그래밍의 개수에 따라 정해지는 이동하는 각 창들의 크기에 따른 SNR 영향을 계산하였다. 즉, 창의 크기가 x축 방향에 대하여 42μm, 84μm, 168μm로 증가하면 이동하는 창의 최대 개수는 640, 320, 160으로 감소하게 된다. 그림 9는 홀로그래밍의 개수가 증

가함에 따라 영상누화의 영향이 증가하여 SNR이 감소하는 것을 알 수 있으나 홀로그래밍 개수 변화에 의한 SNR 영향보다는 이동창간의 거리 변화가 SNR에 보다 커다란 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

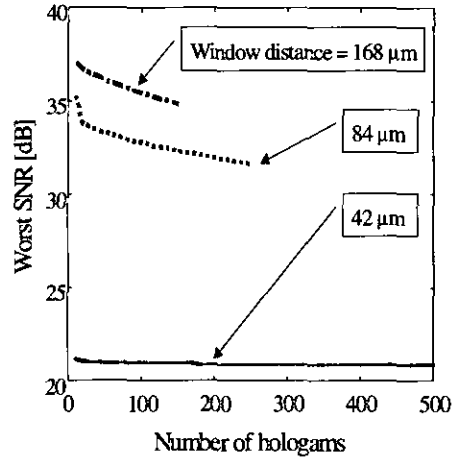


그림 9. 홀로그래밍 개수에 따른 SNR (초점거리=120mm)

## V. 결론

LCD의 MW을 이용한 각다중화 방법은 기존의 홀로그래픽 각다중화 시스템보다 간단하면서도 전자적으로 정확하게 기준빔의 각도를 제어할 수 있다는 장점이 있으나 서로 다른 파벳터를 갖으며 광굴절매질에 기준빔을 입사시켜 주는 렌즈의 초점거리와 MW사이의 거리 및 기록된 홀로그래밍의 개수 등에 의해 영상누화현상이 발생하여 복원영상의 SNR에 영향을 주게 된다. 따라서, 본 논문에서는 LCD MW 다중화 기록 시스템의 고밀도 다중화 및 영상누화현상을 최소화하기 위하여 실험에 사용된 물리적 요소별로 영상누화를 분석하였다. MW의 각다중화에 사용된 렌즈의 초점길이는 20mm에서 120mm으로 증가함에 따라 기준빔의 각선택도를 감소시켜 복원영상의 SNR이 50dB에서 41dB까지 감소되며 이웃하는 창 사이의 거리가 멀어질수록 영상누화에 의한 영향이 감소되어 복원영상의 SNR은 향상됨이 분석되었다. 또한, 홀로그래밍의 개수가 증가함에 따라 영상누화에 의한 영향도 커져서 복원영상의 SNR이 감소하지만 다른 요소들에 비해 비교적 큰 영향을 주지 않는 것으로 분석되었다. 결과적으로 MW을 이용한 수직방향의 각다중화의 경우 수평방향에 대한 각선택도와는 달리 인접한 수직방

향 창의 간격을 최소한 수평방향의 2배 이상으로 이동시켜야만 영상누화 없이 복원될 수 있기 때문에 제안된 LCD MW 각다중화 방법은 수직방향의 제한된 각선택도로 고밀도의 공간 다중화가 제한된다. 따라서, 앞으로 본 논문에서 분석된 수직방향에서의 영상누화현상을 효과적으로 제거함으로써 고밀도의 공간각 다중화 기록이 가능한 새로운 다중화 기법의 연구가 요구된다.

### 감사의 글

본 논문은 과학기술부 국가지정연구실사업(NRL) 연구비 지원으로 이루어짐.

### 참고 문헌

- [1] J. H. Hong, I. McMichael, T. Y. Chang, W. Christian, and E. G. Paek, *Opt. Eng.* vol. 34, no. 8, pp. 2193-2203, 1995.
- [2] Van Heerden, P. J., *Appl. Opt.* vol. 2, p. 393, 1963.
- [3] J. H. Hong, I. McMichael, T. Y. Chang, W. Christian, and E. G. Paek, *Opt. Eng.* vol. 34, no. 8, pp. 2193-2203, 1995.
- [4] F. H. Mok, *Opt. Lett.* vol. 18, no.11, pp. 915-917, 1993.
- [5] G. A. Rakuljic, V. Leyva, and A. Yariv, *Opt. Lett.* vol. 17, no. 20, pp. 1471-1473, 1992.
- [6] C. Denz, G. Pauliat, G. Roosen, and T. Tschudi, *Opt. Comm.* vol. 85, pp. 171-176, 1991.
- [7] K. T. Kim, B. C. Cho, E. S. Kim, S. K. Gil *Appl. Opt.* vol. 39, no. 23, 2000.
- [8] Y. H. Kang, K. H. Kim, and B. Lee, *Opt. Lett.* vol. 22, no. 10, pp. 739-741, 1997.
- [9] S. Tao, D. R. Selviah, and J. E. Midwinter, *Opt. Lett.* vol. 18, no. 11, pp. 912-915, 1993.
- [10] S.-G. Kim, K.-T. Kim, and E. S. Kim, *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 38, Pt.22, no. 1A/B, 1999.
- [11] H. Lee, X. Gu, and D. Psaltis, *J. Appl. Phys.* vol. 65, no. 6, pp. 2191-2194, 1989.
- [12] C. Gu, J. Hong, I. McMichael, R. Saxena, and F. Mok, *J. Opt. Soc. Am. A* 9, 1978-1992, 1997.

김 규 태(Kyu-Tae Kim)

한국통신학회논문지 Vol.24, No.9A 참조

김 수 길(Soo-Gil Kim)

1988년 2월: 서울대학교 전기공학과 졸업(공학사)

1991년 2월: 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업  
(공학석사)

1997년 2월: 서울대학교 대학원 전기공학부 졸업  
(공학박사)

1997년 3월~1997년 8월: 서울대학교 기초전력공학  
연구소 특별연구원

1997년 9월~현재: 호서대학교 전기공학부 정보제어  
전공 조교수

<주관심 분야> Three-dimensional display, Holo-  
graphic memory, Optical sensor, Optical  
information processing

김 은 수(Eun-Soo Kim)

한국통신학회논문지 Vol.24, No.9A 참조