

# 홀로그램의 실상 재생 geometry 연구

## Study of real image reconstruction by hologram

백성훈, 홍서경, 김철중  
한국 원자력 연구소 전자광학 연구실

결상 홀로그램(image hologram)을 제작할 때 물체의 실상을 얻는 방법으로는 렌즈등의 광학계를 이용하거나 다른 홀로그램에서 재생된 실상을 이용하는 방법등이 있다. 본 연구에서는 결상 홀로그램을 제작하기 위하여 홀로그램에서 실상을 재생할 때, 재생빔으로 diverging spherical wave 를 사용하는 geometry 를 제안하고 이 때의 문제점-재생된 실상의 상배울 변화와 홀로그램 수차 들을 논의하였다.

### 1. 서 론

반사형 홀로그램은 백색광 재생시 상의 선명도를 향상시키기 위하여 홀로그램 면 근처에 상을 맺어 제작하는 방법을 많이 사용한다[1]. 물체의 상을 맺는 방법으로 다른 홀로그램(master hologram)에서 재생된 실상을 이용하는 방법을 많이 쓰는데, 이때 재생빔으로 기준빔의 위상공역파를 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 이 경우에는 홀로그램의 크기보다 큰 집속렌즈가 필요하며, 집속렌즈의 수차가 큰 경우 상특성을 많이 저하시키는 단점이 있다.

본 연구에서는 집속렌즈가 없이도 대형 결상 홀로그램을 제작할 수 있도록, 그림 1 과 같이 기준빔과 재생빔으로 diverging spherical wave 를 사용하는 geometry 를 제안하고 이의 문제점 및 적용 가능성을 논의하였다. 이 geometry 의 가장 큰 문제점은 재생시 링배울과 종배울의 차이에 의한 상의 distortion[2]과 홀로그램 수차에 의한 상특성의 저하이다. 배울 차이에 의한 상의 distortion 은 완전히 없앨 수 없으므로 이

geometry 를 사용하는대의 제한점이 되지만, 수차에 의한 상특성의 저하는 변수들을 적절히 선택하여 대부분 제거할 수 있었다.

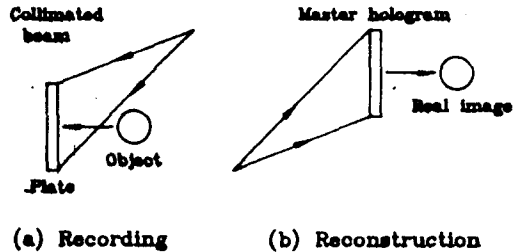


그림 1. 실상재생 홀로그램의 제작 및 재생 geometry

### 2. 상배울의 변화 및 상의 distortion

홀로그램에서 재생된 실상은 depth 가 뒤바뀐 pseudoscopic 실상이므로 바로된 물체의 상을 보기 위해서는 반사형 홀로그램을 재생할 때도 기준빔과 반대 방향의 재생빔을 사용한다. 이 때도 역시 기준빔과 재생빔 모두 diverging spherical wave 를 사용하게

되면 master hologram 에서의 실상 재생시와 같은 문제를 일으킨다. 그러나 결상 홀로그램은 물체에서 홀로그램까지의 거리가 가까와 이 때 발생하는 문제가 크지 않으므로 본 연구에서는 master hologram에서 실상 재생시 발생하는 문제만을 다루었다.

홀로그램 제작시의 파장과 재생시의 파장이 같다고 하면, 그림 2 와 같은 좌표계에서 홀로그램 재생상의 위치는 다음식으로 주어진다 [3,4].

$$\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_c} = \pm \left( \frac{1}{r_o} - \frac{1}{r_r} \right) \quad (1)$$

$$K_i \sin \alpha_i - K_c \sin \alpha_c = \pm (K_o \sin \alpha_o - K_r \sin \alpha_r) \quad (2)$$

$$K_i \cos \alpha_i \sin \beta_i - K_c \cos \alpha_c \sin \beta_c = \pm (K_o \cos \alpha_o \sin \beta_o - K_r \cos \alpha_r \sin \beta_r) \quad (3)$$

$\alpha_i$  : y-z plane 과의 각도

$\beta_i$  : x-z plane 과의 각도

이 식에서 첨자 i 는 image 를 나타내고, c 는 재생빔, o 는 물체, r 은 기준빔을 나타낸다. 식의  $\pm$  는  $\pm 1$  order 의 회절을 나타내는데, 일반적으로 실상의 경우 -, 허상의 경우 + 가 된다.  $r_i$  ( $r_l, r_c, r_r, r_o$ ) 는 그 점에서 원점(홀로그램 중심) 까지의 거리로 converging wavefront 이면 양수, diverging wavefront 이면 음수가 된다.  $K_i$  는 방향을 나타내는 항으로 +z 방향의 wavefront 이면 +1, -z 방향의 wavefront 이면 -1 값이다.

이 식들에서 재생상의 물체에 대한 배율을 구할 수 있다. x 방향의 각배율을  $M_x$ , x 방향의 횡배율을  $M_x$  라하고, 종배율을  $M_r$  이라하면 각각은

$$M_x = \frac{\delta \alpha_i}{\delta \alpha_o} = \pm \frac{\cos \alpha_o}{\cos \alpha_i} \quad (4)$$

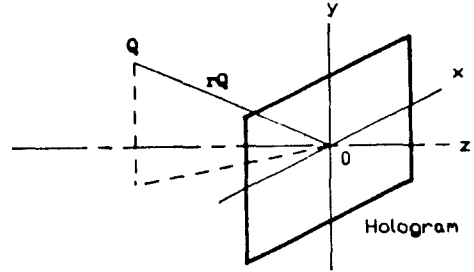


그림 2. 홀로그램 제작 및 재생 좌표계

$$M_x = \frac{\cos \alpha_o}{\cos \alpha_i} \frac{1}{(1 \pm r_o/r_c - r_o/r_r)} \quad (5)$$

$$M_r = \pm \left[ \frac{1}{(1 \pm r_o/r_c - r_o/r_r)} \right]' \quad (6)$$

로 주어진다. 제작시의 기준빔이나 기준빔의 위상 공역파로 재생하면  $M_x=1, M_r=\pm 1$  이 되어 물체와 동일한 상이 재생된다. 그러나 본 연구에서 제안한 geometry 로 재생할 경우 실상의 배율은

$$M_x = -1$$

$$M_x = \frac{1}{(1 - r_o/r_c - r_o/r_r)} \quad (7)$$

$$M_r = -M_x'$$

이 되어 물체와 다른 상이 재생된다. 또  $M_x$  와  $M_r$  의 값도 달라 상의 distortion 이 나타나게 된다. 제안된 geometry 에서 이 배율의 차이는 없앨 수 없는 것이므로 상의 확대 및 distortion 을 줄이려면  $r_r$  과  $r_c$  를 아주 크게하거나  $r_o$  를 작게해야 한다. 그림 3 은  $r_o$  가 10 cm 일 때  $r_r=r_c$  를 변수로 하여 배율을 계산한 그래프이고, 그림 4 는  $r_r=r_c$  가 200 cm 일 때  $r_o$  에 따른 배율을 계산한 것이다. 보통의 실험 조건에서  $r_r$ 과  $r_c$  는 200 cm,  $r_o$  는 10 cm 정도가 된다면 배율은  $M_x = 1.11, M_r = -1.23$  이다.

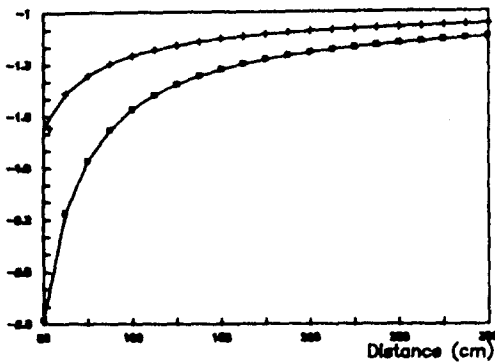


그림 3. 기준빔과 재생빔에 따른 상태를

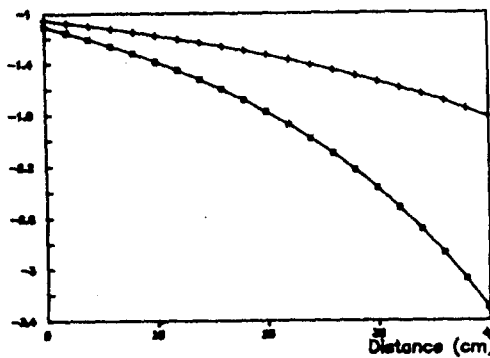


그림 4. 홀로그래프에서 물체까지의 거리에 따른 상태를

실제 홀로그래프 제작에서 물체와 홀로그래프의 거리는 홀로그래프 기준빔 및 재생빔의 각도와 관계된다. 물체까지의 거리가 작으면 기준빔의 각도가 커질 수 밖에 없고, 따라서 수차를 유발시켜 또 다른 상특성의 저하를 가져오는데 이 효과는 뒤에 다시 논의하기로 한다.

이상의 결과에서, 제안된 geometry 를 사용하는 경우 배율의 변화를 완전히 없앨 수는 없다. 따라서 이 geometry 는 재생상의 크기 규격이 중요할 때는 사용할 수 없다. 그러나 대체적인 계산에서 보았듯이 배율의 변화를 가능한 한 줄이는 경우 홀로그래피 전신물동 정확한 크기의 재생상이 중요하지 않은 경우에는 적용이 가능하다.

### 3. 홀로그래프 수차

홀로그래프의 processing 이 이상적이라면  $rc=rr$  인 경우 홀로그래프 수차는 0 이 되고 따라서 물체와 동일한 상이 재생된다. 그러나 제안된 geometry 에서는  $rc$  와  $rr$  의 곡면 방향 차이가 홀로그래프의 수차를 유발시킨다. 홀로그래프 수차 이론에 의하면[5] 3 차 order phase mismatch 에 의해 다음과 같은 Seidel 수차가 생긴다. 홀로그래프의 제작과 재생은  $x-z$  평면, 즉  $\beta=0$  인 면에서 이루어지므로  $y$  방향의 함은 무시하였다.

$$W = -1/8 \rho'^2 S + 1/2 \rho' \cos \theta Cx + -1/2 \rho' \cos' \theta Ax$$

$$\rho \theta : \text{홀로그래프 면에서의 각 좌표} \quad (8)$$

(a) spherical aberration

$$S = \frac{1}{rc^2} \pm \left( \frac{1}{ra^2} - \frac{1}{rr^2} \right) - \frac{1}{rl^2} \quad (9)$$

(b) coma

$$Cx = \frac{xc}{rc^2} \pm \left( \frac{xo}{ro^2} - \frac{xr}{rr^2} \right) - \frac{xI}{rl^2} \quad (10)$$

(c) astigmatism

$$Ax = \frac{xc'}{rc^2} \pm \left( \frac{xo'}{ro^2} - \frac{xr'}{rr^2} \right) - \frac{xI'}{rl^2} \quad (11)$$

구면수차가 있으면 best focus 의 위치가 paraxial focus 의 위치와 달라져 defocus 를 일으키게 되고, 이 best focus 의 크기에 의한 image blur 를 일으킨다. 이 defocus 와 image blur 를 각각  $\delta rI$ ,  $\phi$  라 하면

$$\delta rI = 12 F\#^2 W040 = (3/8) rI \rho' S \quad (12)$$

$$\phi = 4 F\# W040 = (1/4) rI \rho' S \quad (13)$$

로 주어진다. 실제 홀로그램 제작시의 구면수차 효과를 보면,  $rr = rc = 200 \text{ cm}$ ,  $ro = 20 \text{ cm}$ ,  $\rho = 10 \text{ cm}$  일 때  $\delta r_1 = 1.4 \text{ cm}$ ,  $\phi = 3.8 \text{ mm}$  이다. 따라서 image 위치에 screen 을 놓고 홀로그램 전체에서 재생된 빛으로 상을 맺으면 약 4 mm 정도의 image blur 가 있다. 그러나 실제로 관찰자가 홀로그램에서 재생된 실상을 볼 때에는 홀로그램의 극히 일부에서 회절된(재생된) 빛만을 보기때문에 이때의 부분적인  $\rho$  는 아주 작으며 따라서 관찰되는 image blur 도 작게 된다. 눈의 각분해능이 0.5 mrad 정도 이므로 홀로그램을 2 m 거리에서 관찰할 때의 분해능은 1 mm 정도임을 생각할 때 홀로그램의 일부에서 일으키는 구면수차에 의한 image blur 는 무시될 수 있다. 또 defocus 는 상 배울 차이에 의한 shift 보다 작은 값이므로 역시 무시될 수 있다.

홀로그램 coma 에 의한 상특성의 변화로는 comatic image 에 의한 image blur 를 들 수 있다. Coma 에 의한 최대 image blur 를 나타내는 tangential coma 는

$$cT = -6 F\# W131 h \rho' = (3/2) Cx \rho' r_1 \quad (14)$$

로 주어진다. 실제 홀로그램에서  $rr = rc = 200 \text{ cm}$ ,  $\theta = 40^\circ$ ,  $ro = 20 \text{ cm}$ ,  $\rho = 10 \text{ cm}$  인 경우  $cT = 1.2 \text{ mm}$  가 되어 무시될 수 있다.

Astigmatism 은 tangential focus 와 sagittal focus 의 차이를 일으키는데 식 (11) 에서 알 수 있듯이 홀로그램에서의 astigmatism 은 field height(h) - dependence 가 없는 constant astigmatism 으로, 일반적인 광학계에서의 astigmatism 이 radial 방향의 focus 위치와 angle 방향의 focus 차이로 나타나는 것과 달리 홀로그램에서의 astigmatism 은 x 방향과 y 방향의 focus 차이로 나타난다.

앞에서 간단히 언급하였듯이 홀로그램 제작 및 재생 geometry 는 x-z plane 에서 이루어지므로 Ax 가 주로

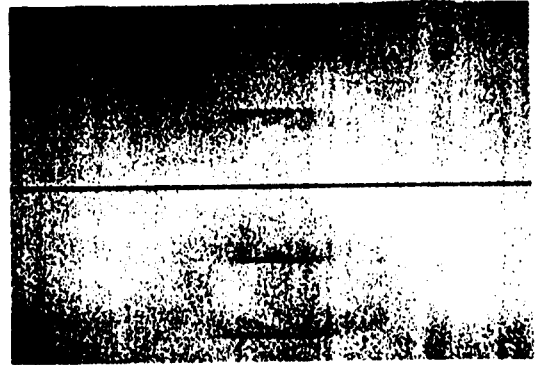


사진 1. Astigmatism 에 의한 focus shift

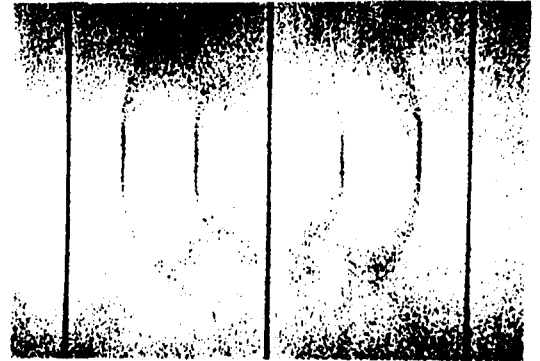


사진 2. Astigmatism 에 의한 focus shift

나타난다. 따라서 가로 선은 astigmatism 이 없는 원래의 위치에서 focusing 되고, 세로 선은 astigmatism 에 의해 focus 위치가 변하게 된다. 사진 1 과 사진 2 는 실제 홀로그램 재생상을 screen 에 맺은 사진으로 사진 1 은 astigmatism 이 없는 가로 선 focus 면에서의 사진이고, 사진 2 는 astigmatism 에 의해 앞당겨진 세로 선 focus 면에서의 사진이다.

그림 5 는  $rr = rc = 200 \text{ cm}$ ,  $ro = 20 \text{ cm}$  일 때 홀로그램 기준면의 각  $\theta$  에 따라 astigmatism 에 의한 focus shift 를 계산한 것이고, 그림 6 은  $rr = rc = 200 \text{ cm}$ ,  $\theta = 45^\circ$  일 때  $ro$  에 따른 focus shift 를 계산한 것이다. 이 그림과 사진에서 알 수 있듯이 astigmatism 에 의한 focus shift 는 상당히 큰 값을 갖고 있으며 따라서 본 geometry 에서의 수차중 가장 큰

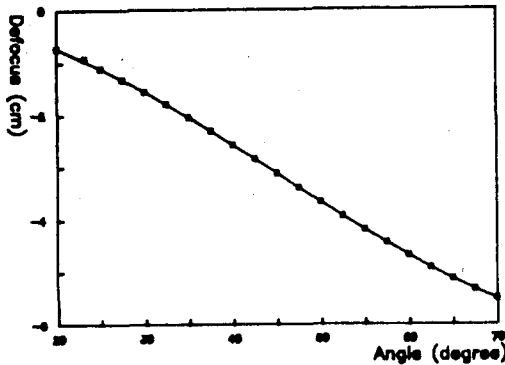


그림 5. Astigmatism에 의한 focus shift

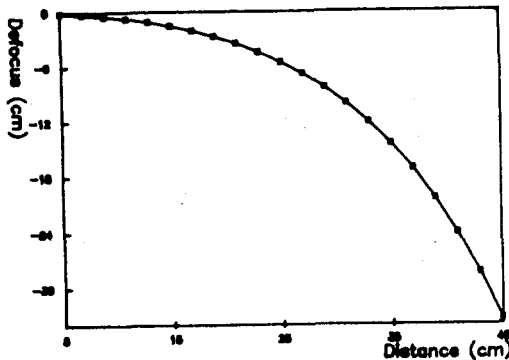


그림 6. Astigmatism에 의한 focus shift

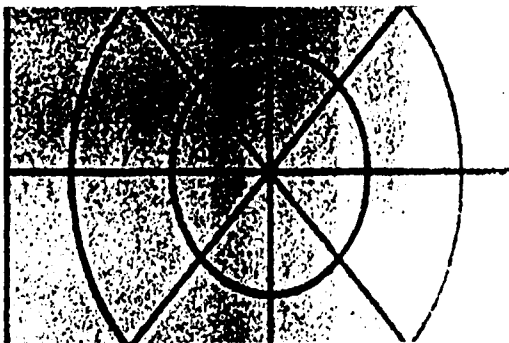


사진 3. Astigmatism에 의한 distortion

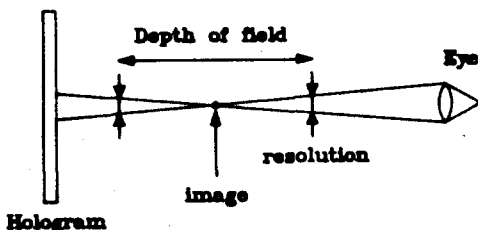


그림 7. Astigmatism에 의한 distortion의 원리

factor가 된다.

Astigmatism에 의한 image blur를 사진 1이나 사진 2와 같이 한 방향이 in focus일 때 다른 방향이 focus를 맞지 않아 생기는 것으로 생각할 경우, image blur는 수 cm가 되어 홀로그램 재생상의 선명도는 크게 떨어진다. 그러나 직접 이 실상을 관찰하는 것은 앞에서 언급한 구면수차에 의한 image blur의 경우와 마찬가지로 screen을 놓고 관찰하는 경우와는 다르다.

사진 3은 screen이 없이 실제 홀로그램에서 재생된 실상을 찍은 사진으로 원이 타원이 되는 image distortion은 있으나 image blur는 별로 나타나지 않는다. 그 이유를 설명한 것이 그림 7로 실제로 물체의 실상을 볼 때 그 점을 재생하는 빛이 지나서 홀로그램 부위가 작아 depth가 깊어지므로 image blur는 나타나지 않는다. 물체의 모양이 타원으로 되는 것도 이 astigmatism에 의한 것으로 세로선의 focus는 astigmatism에 의해 약간 앞 쪽에 맞히기 때문이다.

홀로그램 재생상의 astigmatism은 홀로그램 관찰시 눈(또는 홀로그램)을 90° 회전시킴으로써 없앨 수 있다. 눈은 수평 방향의 시차(parallax)를 이용하여 거리를 인식하므로 세로선의 focus와 가로선의 focus 위치가 다를 경우 세로선의 focus의 위치로 인식한다. 따라서 관찰자가 홀로그램을 볼 때 세로선의 focus가 맞아 있는 면에 눈의 초점을 맞추게 된다. 홀로그램에서 세로선의 focus 위치는 astigmatism에 의해 이동되어 있는 면이므로 이 astigmatism에 의한 효과가 전부 느껴지지만, 만약에 제작된 홀로그램을 90° 돌리거나 관찰자의 얼굴을 90° 회전시켜 홀로그램을 보면 astigmatism이 없는 초점면을 보게 되어 홀로그램의 astigmatism 효과를 느끼지 않게 된다.

실제로 실험해 본 결과 홀로그램을 90° 돌려 놓고 볼 경우 초점면이 이동하여 물체의 위치가 뒤로 가며 (astigmatism에 의한 초점 이동이 앞 방향이므로), 물체의 distortion도 줄어드는 것을 관찰할 수 있었다. 이상과 같이 홀로그램의 astigmatism이 크더라도

홀로그램을 볼 때 상의 depth 가 깊고, 눈이 한쪽 방향으로 시차만 있는 이유로 별 문제가 되지 않는다.

#### 4. 결 론

결상 반사형 홀로그램 제작을 위하여 master hologram 에서 실상을 재생할 때, 대형 렌즈를 사용하지 않는 geometry 를 제안하고 이 때 발생하는 상배율 및 수차에 의한 문제점을 논의하였다. 그 결과 상배율의 변화 및 이에 따른 상의 distortion 은 없앨 수 없는 것으로 나타났으나, 수차에 의한 defocus 및 image blur 는 무시할 수 있었다. 특히 수차중 가장 큰 factor 로 나타난 astigmatism 에 대한 분석결과, 홀로그램에서는 constant astigmatism 을 가짐으로써 눈이 한쪽 방향의 시차로 물체의 위치를 인식하는 사실과 결부시켜 실제 관찰시 홀로그램의 astigmatism 효과를 없앨 수 있었다.

제안한 geometry 에 의한 홀로그램 실상 재생은 상배율에 따른 상의 distortion 이 있다는 단점이 있지만, 대형의 집속렌즈가 없어도 되는 장점으로 홀로그램 재생상의 dimension 이 중요치 않은 전시용의 대형 반사형 홀로그램 제작중에 유용할 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] P. Hariharan, "Optical Holography", Cambridge University Press, 1984, p.33
- [2] P. Hariharan, Opt. Commun., 17, 52(1976)
- [3] R.W Meier, J. Opt. Soc. Am., 55, 987(1965)
- [4] J.R. Andrews, Appl. Opt., 29, 2864(1990)
- [5] E.B. Champagne, J. Opt. Soc. Am., 57, 51(1967)