

홀로그래픽 HMD 소자의 수차 및 시야각 향상에 관한 연구

김희동 · 정만호[†]

청주대학교 광학공학과

⊕ 360-764 충북 청주시 상당구 내덕동 36

(2001년 2월 27일 받음, 2001년 7월 19일 수정본 받음)

수차가 적고 넓은 시야각에 걸쳐 높은 회절효율을 보이는 홀로그래픽 HMD 소자를 설계, 제작하였다. 적은 수차를 갖는 홀로그래픽 광학소자를 설계하기 위하여 recursive 설계 방법이 사용되었다. 적은 수차뿐만 아니라 넓은 FOV에 걸쳐 높은 회절효율을 갖도록 하기 위해 매개 홀로그래프를 사용하였으며, 이를 이용해 수차가 보정된 홀로그래프의 격자 함수를 최종적인 홀로그래프에 전송하였다. 제작된 최종의 HMD용 홀로그래픽 광학소자의 수차는 보정 전보다 10배 가량 향상되었으며 FOV는 ±10°를 나타내었다.

분류코드 : DI.010, DT.010, IP.010.

I. 서 론

HMD(Head-Mounted Display) 시스템은 조종사의 시선 이동이 거의 없기 때문에 돌발사건의 위험이 낮을 뿐만 아니라 눈의 피로감도 적어 군사적으로 매우 유용한 장치이다. 일반적인 HMD의 영상은 CRT나 LCD로부터 나온 영상을 릴레이 광학계나 광섬유 등을 사용하여 직·간접적으로 무한대에 결상시키게 되고 이러한 시스템은 무겁고, 좁은 공간 내에 여러 소자를 장착해야 하는 어려움이 있다.^[1,2]

홀로그래픽 HMD 시스템은 HOE(Holographic Optical Element)를 사용하기 때문에 광학소자의 매수가 현저히 줄어 기존의 HMD 시스템보다 상당히 가볍고, 좁은 공간에서도 시스템을 구성할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 이러한 HMD 시스템에서 HOE의 역할은 2차원의 디스플레이 영상을 헬멧 착용자의 눈에 반사하여 결상시키는 것이다. 하지만 기존에 개발된 많은 홀로그래픽 HMD 시스템에서는 기록시와 다른 재생 구조로 인해 수차가 발생되고 이는 영상의 질을 저하시키는 원인이 되었다.

이러한 문제점들을 보완하기 위해 최근에는 단순한 구면파 보다는 기존의 광학계 또는 컴퓨터 발생 홀로그래프로부터 얻어낸 비구면파를 기록파로 사용하는 여러 설계 방법들이 제안되었다.^[3,4] 그러나 이러한 방법들은 상당히 복잡하고 비싼 장비 사용해야 할 뿐만 아니라 기록과정에서 생기는 수차들을 완전히 제거할 수 없기 때문에, 재생과정에서 별도의 보정용 소자가 사용되어 결과적으로 전체적인 HMD 시스템이 복잡해진다는 문제를 안고 있다.

본 연구에서는 이러한 수차를 최소화하기 위해 recursive 설계 방법을 사용하였다.^[5-7] 이 방법에서는 별도의 수차 보정용 홀로그래프를 사용하여 비구면 파를 얻어내고 이를 수차가 최적화된 소자를 기록하기 위한 기준파로 사용한다.

수차가 보정된 HOE에서도 Bragg 각이 만족되지 않는 FOV(Field Of View)의 끝 부분에서는 회절효율은 상당히 떨어지게 된다. 본 연구에서는 수차가 적으면서 동시에 넓은 FOV에 걸쳐 높은 회절효율을 갖는 소자를 만들기 위해, 수차가 보정된 홀로그래픽 소자의 격자 함수를 매개 홀로그래프를 사용하여 고효율의 최종 홀로그래프에 전달하도록 하였다.

II. 이 론

2.1. Recursive 방법에 의한 수차보정

HOE에 의한 회절은 두 기록광에 의한 간섭무늬에서의 위상과 조명광에 대한 위상의 곱을 원점으로부터의 거리로 표현한 후 이를 급수 전개하고 다시 재생광에 대한 급수의 1차 항과 비교하여 Gauss 결상 관계식으로 나타낼 수 있다. 그림 1에서와 같이, $R_q(q=c, o, r)$ 는 홀로그램 중심과 각 점광원 사이의 거리, α_q 는 R 과 $\xi-\eta$ 평면 사이의 각도, β_q 는 R_q 의 $\xi-\zeta$ 평면상의 사영과 ζ 축과의 각도이다.

원하는 Gauss 위상이 실제 회절된 위상과 다르면 수차가 발생하게 되는데, 3차 항의 비교를 통하여 상면만곡 F, 구면수차 S, 코마 C, 비점수차 A의 수차계수에 대한 표현을 다음과 같이 얻을 수 있다.^[8,9]

$$F = \frac{1}{R_c} - \frac{1}{R_l} \pm \mu \left(\frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_r} \right)$$

$$S = \frac{1}{R_c^3} - \frac{1}{R_l^3} \pm \mu \left(\frac{1}{R_o^3} - \frac{1}{R_r^3} \right)$$

$$C_x = \frac{\cos \alpha_c \sin \beta_c}{R_c^2} - \frac{\cos \alpha_l \sin \beta_l}{R_l^2} \pm \mu \left(\frac{\cos \alpha_o \sin \beta_o}{R_o^2} - \frac{\cos \alpha_r \sin \beta_r}{R_r^2} \right)$$

$$C_y = \frac{\sin \alpha_c}{R_c^2} - \frac{\sin \alpha_l}{R_l^2} \pm \mu \left(\frac{\cos \alpha_o \sin \beta_o}{R_o^2} - \frac{\sin \beta_r}{R_r^2} \right)$$

[†]E-mail: manho@chongju.ac.kr

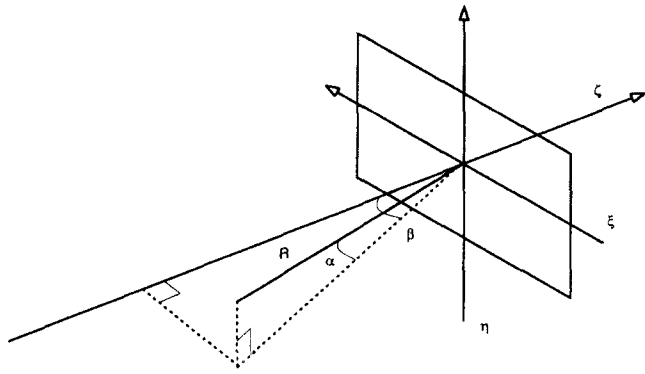


그림 1. 홀로그래프에서 구면파의 표현.

$$\begin{aligned}
 A_x &= \frac{\cos^2 \alpha_c \sin^2 \beta_c}{R_c} \frac{\cos^2 \alpha_r \sin^2 \beta_r}{R_r} \\
 &\quad \pm \mu \left(\frac{\cos \alpha_o \sin \beta_o}{R_o} - \frac{\cos \alpha_r \sin \beta_r}{R_r} \right) \\
 A_y &= \frac{\sin^2 \alpha_c}{R_c} \frac{\sin^2 \alpha_r}{R_r} \pm \mu \left(\frac{\sin^2 \alpha_o}{R_o} - \frac{\sin^2 \alpha_r}{R_r} \right) \\
 A_{xy} &= \frac{\cos \alpha_c \sin \alpha_c \sin \beta_c}{R_c} \frac{\cos \alpha_r \sin \alpha_r \sin \beta_r}{R_r} \\
 &\quad \pm \mu \left(\frac{\cos \alpha_o \sin \alpha_o \sin \beta_o}{R_o} - \frac{\cos \alpha_r \sin \alpha_r \sin \beta_r}{R_r} \right) \quad (1)
 \end{aligned}$$

일반적으로 홀로그래픽 HMD 시스템에서 단순한 형태의 반사형 HOE의 기록은 그림 2(a)와 같고, 여기서 기준파는 각도 β_r 의 평면파이고, 물체파는 각도 β_o , 거리 R_o 에서의 비축 구면파이다. 재생시 그림 2(b)에서처럼, 디스플레이 평면은 홀로그래프 중심으로부터 각도 $\beta_{dis}(=\beta_o)$, 거리 R_{dis} 에 있고 각도 β_{eye} , 거리 R_{eye} 에 위치한 관찰자의 눈에 디스플레이의 영상이 결상된다. 만약 그림 2(b)에서처럼, 동공의 크기가 홀로그래프보다 작다면 특정의 각도에 해당하는 단일 평면파는 전체 홀로그래프의 일부분만을 조명하게 되고, 따라서 각각의 시야각에 대

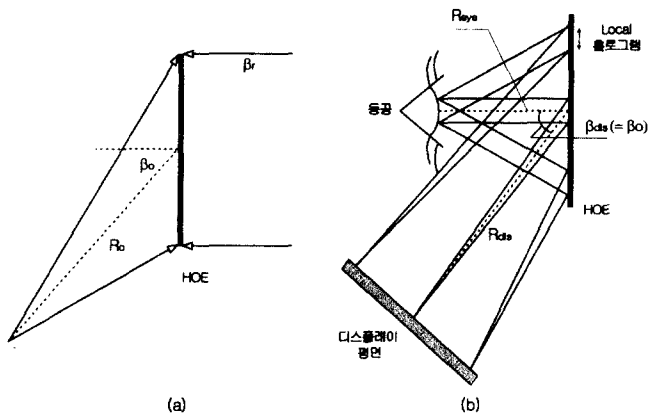


그림 2. 간단한 홀로그래픽 HMD 소자의 (a) 기록 및 (b) 재생.

해 수차들을 개별적으로 계산할 수 있는 local 홀로그래프를 정의할 수 있게 된다. 만일 기록 파장과 재생 파장의 비 $\mu=1$ 이라고 가정하면, 이 수차들은 전체 홀로그래프의 기하학적인 변수들과 ξ 와 η 축 상에서 local 홀로그래프 중심과 전체 홀로그래프 중심 사이의 거리 x 와 y 의 함수로 표현될 수 있다. 전체 홀로그래프에 대한 변수들은 R_q, β_q, α_q 로, local 홀로그래프에 대한 변수들은 $R_q(x, y), \beta_q(x, y), \alpha_q(x, y)$ 로 정의한다. 수차들을 계산하는 데 있어서 $d_{eye} \ll R_o$ 이므로 $F/\#$ 의 값이 매우 크고 또한 $\sin \beta_o > 1/2$ 이기 때문에 주된 수차는 비점수차 A_x, A_y, A_{xy} 가 된다. ξ 와 η 축을 따라 local 홀로그래프의 비점수차 $A_x(x, 0), A_y(0, y), A_{xy}(0, y)$ 를 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 A_x(x, 0) &\cong \frac{2 \sin \beta_o}{R_o R_{eye}} x + \frac{\sin \beta_o \sin \beta_i^2(x, 0)}{R_o R_{eye}} x \\
 A_y(0, y) &= \frac{y^2}{R_o R_{eye}} \left(-\frac{2}{R_o} + \frac{1}{R_{eye}} \right) \\
 A_{xy}(0, y) &\cong \frac{\sin \beta_o}{R_o R_{eye}} y \quad (2)
 \end{aligned}$$

홀로그래프에서의 수차는 홀로그래프의 $F/\#$ 가 증가하거나 기록파장과 재생파장의 차이가 클 때 커지게 된다. 이러한 수차를 보정하는 방법으로는 먼저 파면수차 서로간의 상쇄를 통해 보정하는 방법이 있고,^[8] 홀로그래프 기록시에 보상 수차를 포함한 기준파를 사용하는 것이 있다.^[10] 주된 수차인 식 (2)의 비점수차들은 완전한 평면파보다는 보상수차를 포함하는 왜곡된 파를 사용하여 줄일 수 있다. 보상 수차를 포함한 필요한 기준파를 발생시키기 위해서는 기록시와 다른 조건들로 재생되는 수차 보정용 홀로그래프를 만들어야 한다. 결과적으로 이러한 왜곡된 파면은 최적 홀로그래프의 기준파로 사용된다.

각각의 local 홀로그래프에 대한 최종적인 수차 $Q'(x, y) (Q=F, S, C_x, C_y, A_x, A_y, A_{xy})$ 는 보정되지 않은 홀로그래프의 수차 $Q(x, y)$ 와 수차 보정용 홀로그래프의 수차 $Q''(x, y)$ 의 두 부분으로 나뉘고 가능한 한 $Q'(x, y)$ 를 작게 하기 위해, 수차 보정용 홀로그래프의 여러 수차들이 보정되지 않은 홀로그래프의 수차들을 다음과 같이 보상해야만 한다.

$$\begin{aligned}
 Q'(x, y) &= Q(x, y) + Q''(x, y) \\
 Q''(x, y) &\cong -Q(x, y) \quad (3)
 \end{aligned}$$

수차 보정용 홀로그래프에 해당하는 변수들을 나타내는 관계식들을 다음의 6개 방정식들로 표현하고 이 방정식들을 풀어 수차 보정용 홀로그래프의 변수들을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \sin \beta'_c + \mu^r (\sin \beta'_o - \sin \beta'_r) &= -\sin \beta_{eye} \\
 \frac{1}{R'_c} + \mu^r \left(\frac{1}{R'_o} - \frac{1}{R'_r} \right) &= 0 \\
 \frac{1}{(R'_c)^3} + \mu^r \left[\frac{1}{(R'_o)^3} - \frac{1}{(R'_r)^3} \right] &= \frac{1/R_{eye} - 1/R_o}{R_o R_{eye}}
 \end{aligned}$$

$$\frac{\sin^2 \beta'_c}{R'_c} + \mu^r \left[\frac{\sin^2 \beta'_o}{R'_o} - \frac{\sin^2 \beta'_r}{R'_r} \right] = 0$$

$$\frac{\sin^2 \beta'_c}{(R'_c)^2} + \mu^r \left[\frac{\sin \beta'_o}{(R'_o)^2} - \frac{\sin \beta'_r}{(R'_r)^2} \right] = \frac{\sin \beta}{R_o R_{eye}}$$

$$\frac{\sin^3 \beta'_c}{(R'_c)^2} + \mu^r \left[\frac{\sin^3 \beta'_o}{(R'_o)^2} - \frac{\sin^3 \beta'_r}{(R'_r)^2} \right] = \frac{\sin \beta_o}{3R_o R_{eye}} \quad (4)$$

2.2. 반사형 체적 홀로그래프에 대한 결합과 이론

반사형 홀로그래프는 파장 및 각도 선택성이 매우 크므로 응용분야에 맞는 효율특성의 조절이 필요하며 이를 분석하여 홀로그래픽 HMD 소자의 FOV를 결정하게 된다. 본 연구에서 반사형 홀로그래프의 회절효율 분석은 Kogelnik의 결합과 이론을 사용하였고, 체적형 홀로그래프의 파장 및 각도에 대한 특성뿐만 아니라 높은 효율을 갖기 위한 매질의 두께 및 굴절률 변조 조건 등을 예측할 수 있다.^[11]

무손실 유전체 내에 생성된 반사형 체적 홀로그래프에서 결합과 방정식의 해는 아래와 같다.

$$S = \frac{\left(\frac{c_R}{c_S}\right)^{1/2}}{\left[j \frac{\xi}{v} + \left(1 - \frac{\xi^2}{v^2}\right) \cdot \coth(v^2 - \xi^2)^{1/2} \right]}$$

$$v = \frac{j \pi n_1 d}{\lambda (c_R c_S)^{1/2}}, \quad \xi = -\frac{\Gamma d}{2c_S}$$

$$\Gamma = \Delta \theta K \sin(\phi - \theta_0) - \Delta \lambda \frac{K^2}{4\pi n}$$

$$c_R = \cos \psi, \quad c_S = \cos \psi - \frac{K}{\beta} \cos \phi' \quad (5)$$

이 때의 회절효율은 전장의 제곱으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta = \frac{|c_S|}{c_R} S S^* = \frac{1}{1 + \frac{(1 - \xi^2/v^2)}{\sinh^2(v^2 - \xi^2)^{1/2}}} \quad (6)$$

III. 홀로그래픽 HMD 소자의 설계

3.1. 설계 변수 및 결상 분석

HMD 소자의 설계에 recursive 기술이 적용된다. 이 기법에서는 원하는 최종의 홀로그래프를 기록하기 위해 다른 홀로그래프들로부터 얻어낸 비구면의 파들을 사용한다. 또한 이런 다른 홀로그래프들로부터 얻어낸 구면 또는 비구면의 파들로 기록될 수 있다. 홀로그래픽 HMD 소자를 제작하기 위한 주요 변수들을 표 1의 왼쪽 열에 나타내었다. 최적의 홀로그래픽 소자를 위한 왜곡된 기준파를 얻기 위해 표 1의 오른쪽 열에 있는 변수들을 사용하여 수차 보정용 홀로그래프를 기록한다.

표 1. 수차가 보정되지 않은 홀로그래프와 수차 보정용 홀로그래프의 설계 변수

수차 보정 전 홀로그래프		수차 보정용 홀로그래프	
R_r	∞	R'_r	200 mm
β_r	180°	β'_r	70°
$R_o (=R_{dis})$	100 mm	R'_o	-189.4 mm
$\beta_o (= \beta_{dis})$	35°	β'_o	15°
$R_c (=R_{eye})$	76 mm	R'_c	97.3 mm
$\beta_c (= \beta_{eye})$	0°	β'_c	43°
μ	1	μ_r	1
FOV	$\pm 10^\circ$		

관찰자의 눈이 홀로그래프를 통해 보게 되는 디스플레이 평면에서의 상점의 크기와 모양을 벡터 광선 추적법을 사용하여 각각의 시야각에 대해 계산하였다. 그림 3과 그림 4에 각각 보정되기 전의 홀로그래프와 수차가 보정된 후 홀로그래프의 상점의 형태를 $\pm 10^\circ$ 에 해당하는 FOV까지 계산하였다. 그림 3에서의 상점들은 FOV가 커짐에 따라서 비점수차가 상당히 증가하는 형태를 보인다. 그림 4의 상점들은 모두 코마를 갖는 형태를 보이는데 이 상점들의 크기는 그림 3에서의 수차가 보정되기 전 홀로그래프의 상점들에 비해 약 10배 정도 작은 크기를 갖는다.

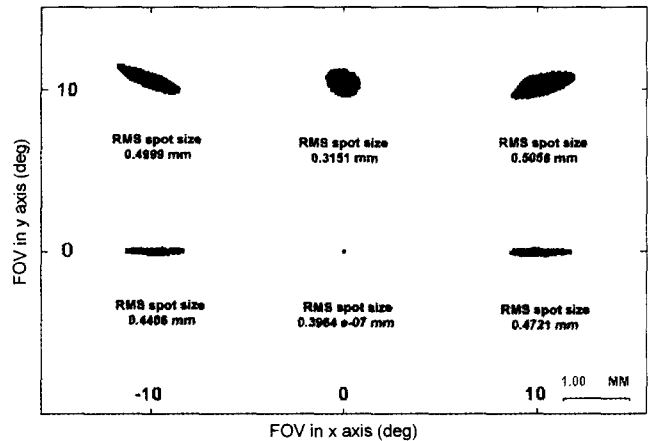


그림 3. 수차가 보정되기 전 홀로그래프의 계산된 상점의 형태.

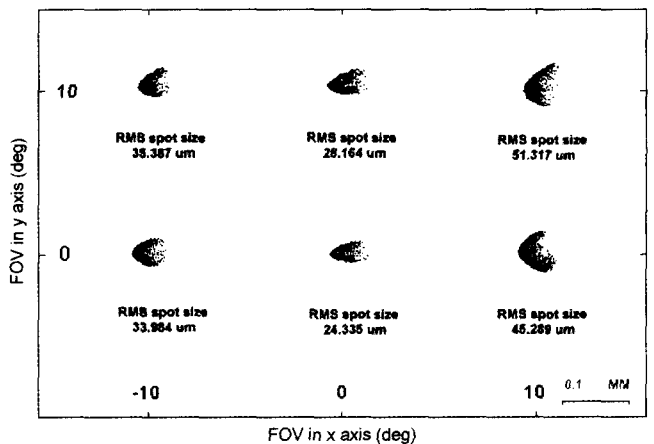


그림 4. 수차가 보정된 후 홀로그래프의 계산된 상점의 형태.

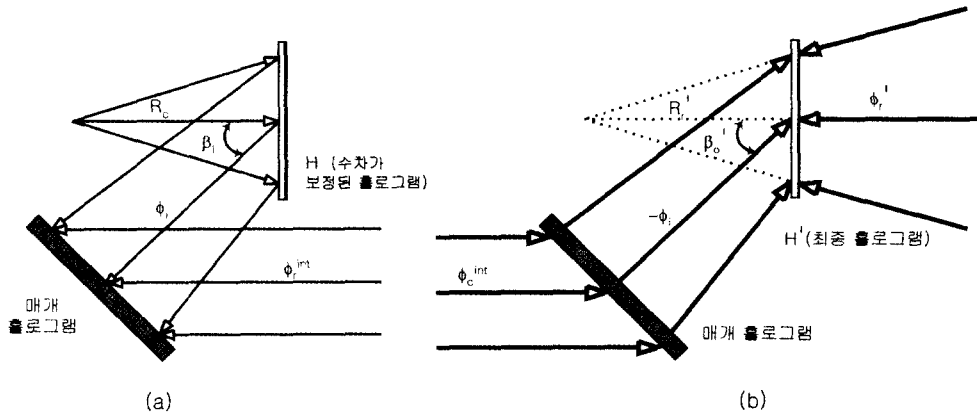


그림 5. (a) 수차가 보정된 홀로그램의 격자함수를 매개 홀로그램에 전송. (b) 최종 홀로그램의 기록.

3.2. 높은 회절효율을 위한 설계

일반적으로 회절효율은 Bragg 각이 만족되지 않는 FOV의 끝 부분에서는 상당히 떨어지게 된다. 따라서 수차가 적으면 서도 전체 FOV에 걸쳐 높은 회절효율을 갖는 소자를 설계해 야 한다.

높은 회절효율뿐만 아니라 수차들이 적은 홀로그램을 만들 기 위해, 적은 수차를 갖도록 보정된 홀로그래픽 소자를 동일 한 격자 함수와 높은 회절효율을 갖는 최종적인 홀로그램에 결합시켜야 한다. 이는 그림 5에서처럼 매개 홀로그램을 사용 하여 할 수 있다. 최종적인 홀로그램을 기록하기 위한 파들에 대한 변수를 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$R_r' = R_r^B, \beta_r' = \beta_r^B$$

$$\frac{1}{R_o'} = \frac{1}{R_r^B} + \frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_r} = \frac{1}{R_o}$$

$$\sin \beta_o' = \sin \beta_r^B + \sin \beta_o - \sin \beta_r = \sin \beta_o^B \tag{7}$$

그림 6과 7은 각각 FOV ±10°에 걸쳐 x축에 대해 수차가 최적화된 홀로그램 H와 수차뿐만 아니라 넓은 FOV에 걸쳐

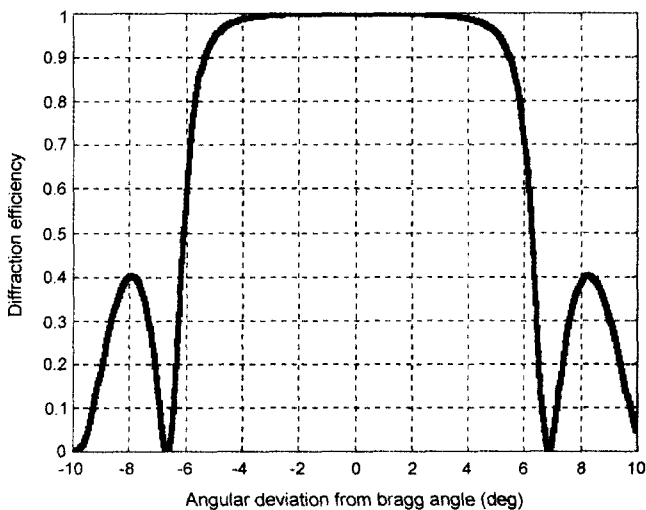


그림 6. 수차가 보정된 홀로그램의 계산된 회절효율.

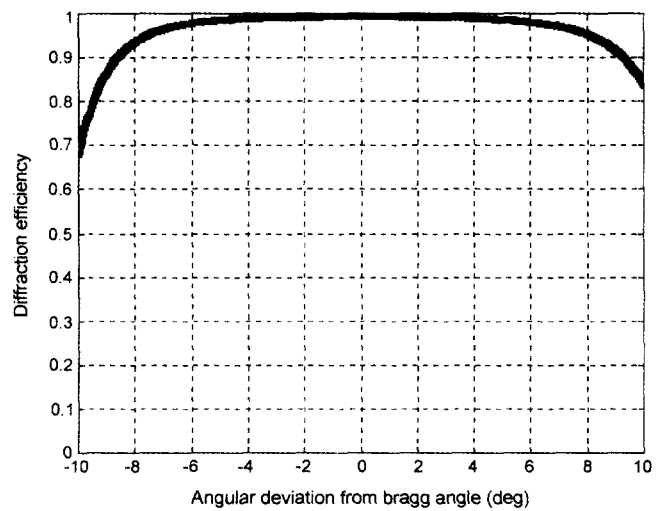


그림 7. 최종 홀로그램의 계산된 회절효율.

회절효율도 개선된 최종 홀로그램 H'의 계산된 회절효율을 보 여준다. 이때 홀로그램 매질의 두께는 5 μm, 평균 굴절률은 1.64, 굴절을 변조량은 0.06으로 제작 실험시와 동일한 조건으 로 하였다. 그림 6에서는 FOV가 ±5° 근처에서 홀로그램 H 의 회절효율이 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 반면에 그 림 7에서는 FOV가 전체 영역 ±10°내에서 높은 회절효율을 고르게 보이는 것을 알 수 있다.

IV. 제작실험 및 결과

수차가 적으면서도 넓은 FOV에서 회절효율이 높은 홀로그 래픽 HMD 소자를 제작하기 위해, recursive 설계 기술로부터 기록변수들을 얻어 그림 8과 같은 방법으로 수차가 보정된 최 적 홀로그램을 제작하였다. 또한 수차가 보정된 최적의 홀로 그래픽 소자의 효율을 전체 FOV에 대해 높이기 위해 그림 9 와 같은 방법으로 매개 홀로그램을 이용해 최종의 홀로그램을 기록, 제작하였다.

기록 매질은 굴절률 변조형 매질인 은염 사진건판(Agfa

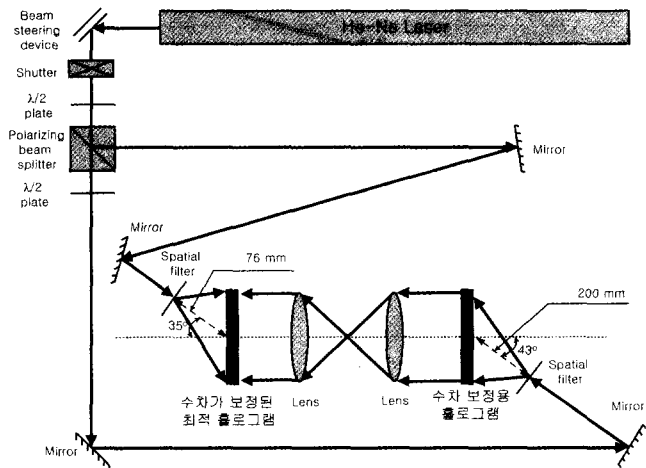


그림 8. 수차가 보정된 홀로그램의 기록.

8E75HD-Plate)을 사용하였다. 기록 매질은 약 $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 로 노광하였고, 은염 사진건판의 현상은 은염 재생성법(Fixation Free Rehalogenating Bleaching Method: Mod R-10)을 사용하였다.^[12]

그림 10은 표 1의 수차가 보정되지 않은 홀로그램의 변수들을 이용하여 제작된 홀로그램으로부터 얻어낸 상면에서의 재생상이다. 또한 그림 11은 수차가 보정된 최적의 홀로그램으로부터 얻어낸 상면에서의 재생상이다. 측정을 위해 칼라 CCD 카메라와 칼라 PCI frame grabber를 사용하였다. 그림 10과 11을 그림 3과 4와 각각 비교해보면 예상했던 대로 수차가 보정되지 않은 홀로그램에서는 주로 비점수차가 많은 경향을 보이고 있으나 수차가 보정된 최적의 홀로그램에서는 비점수차가 상당히 개선되었으며 약간의 코마를 포함하는 것으로 나타났다. 또한 상점의 크기를 비교해보면 수차가 보정되지 않은 홀로그램의 경우 대략 1 mm 정도의 크기를 보이는데, 수차가 보정된 홀로그램의 경우 약 $100 \mu\text{m}$ 정도의 크기로 약 10배 정도 작아진 것을 볼 수 있었다.

수차가 보정된 최적의 홀로그램 H와, 효율 증가를 위해 매

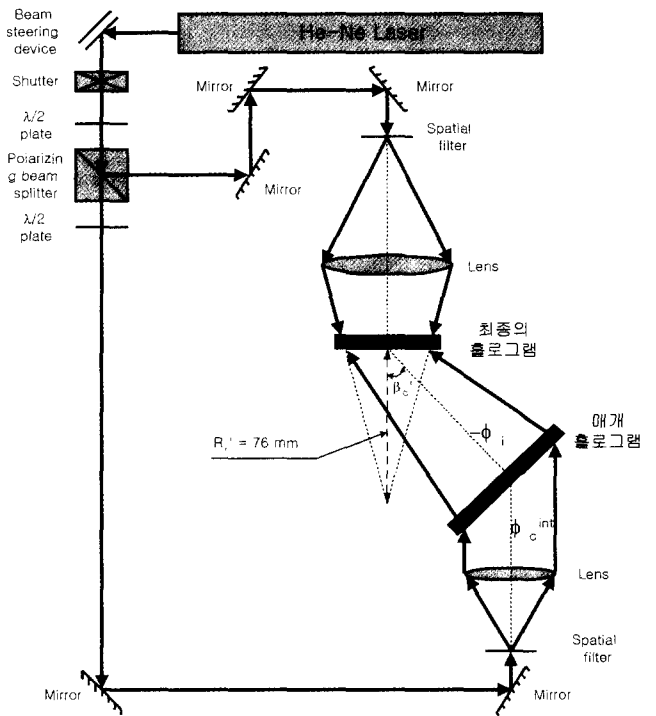


그림 9. 최종 홀로그램의 기록.

개 홀로그램을 사용하여 제작한 최종 홀로그램 H'의 측정된 회절효율을 각각 그림 12와 13에 보였다. 최적 홀로그램 H의 경우 $\text{FOV} \pm 4^\circ$ 근처에서 회절효율이 0으로 떨어졌으나 효율이 개선된 홀로그램 H'의 경우에는 전체적으로 $\pm 10^\circ$ 의 FOV에 걸쳐 거의 고른 회절효율을 보였다. 홀로그램 H'의 회절효율은 약 50% 이상으로 화학처리에 의한 간섭무늬의 변형으로 전체적인 회절효율의 감소가 발생하였다.

V. 결 론

홀로그래픽 HMD 소자로 사용하기 위하여 수차를 줄이고

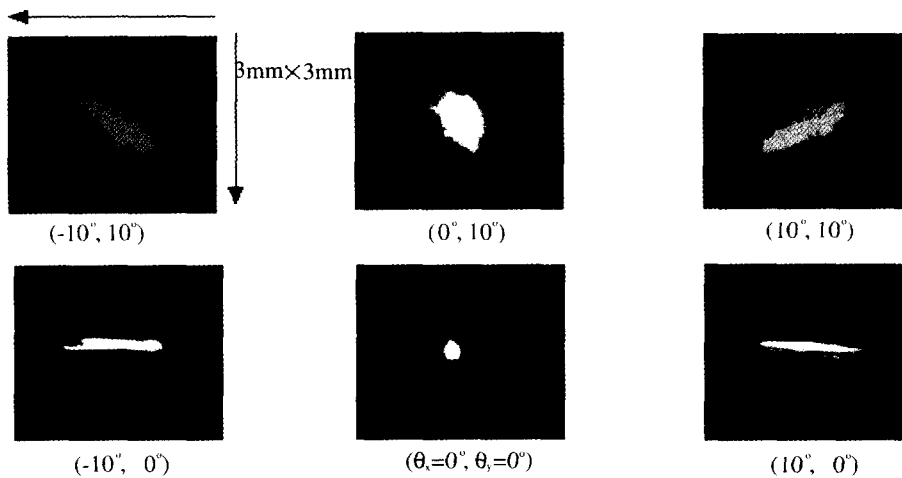


그림 10. 수차가 보정되지 않은 홀로그램의 촬영된 상점의 형태.

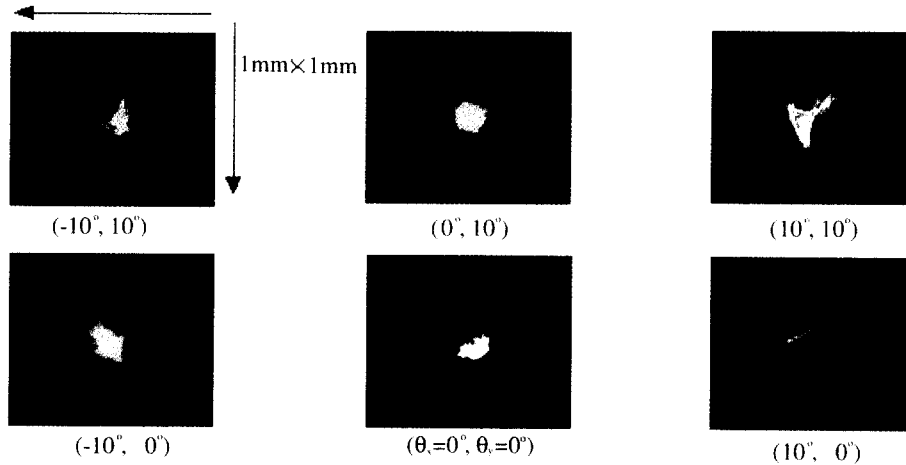


그림 11. 수차가 보정된 홀로그래프의 촬영된 상점의 형태.

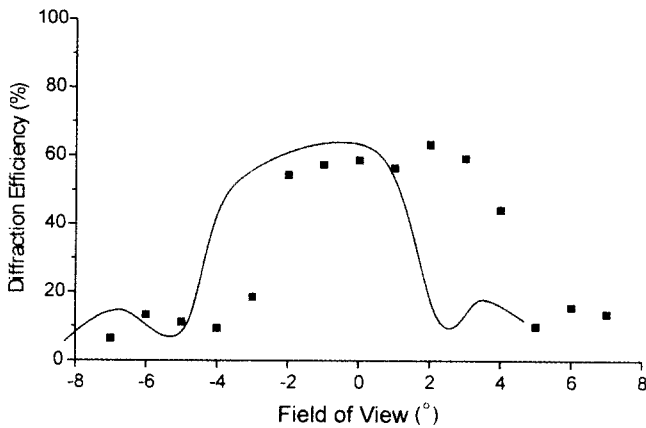


그림 12. 수차가 보정된 홀로그래프의 회절효율 측정값.

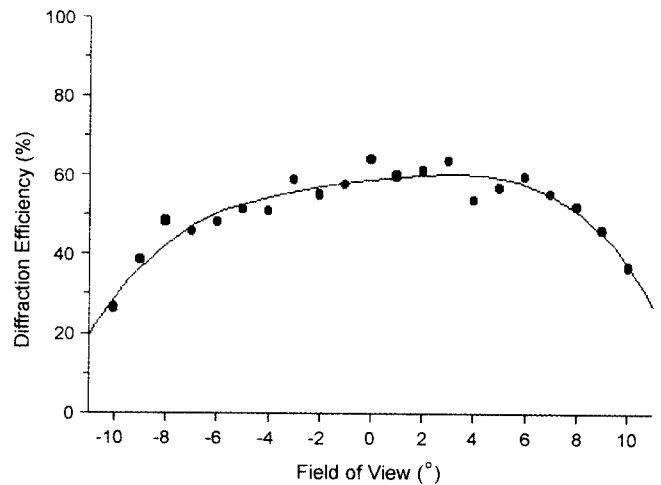


그림 13. FOV가 개선된 최종 홀로그래프의 회절효율 측정값.

동시에 넓은 FOV에 대하여 회절효율을 높인 개선된 홀로그래픽 HMD 광학소자를 설계 분석하였으며, 이를 제작한 후 실험 결과와 비교하였다. 개선된 홀로그래픽 HMD 소자는 기존의 HMD용 HOE가 가지고 있던 문제점인 수차의 발생과 좁은 FOV를 개선하여 수차가 감소되었고 넓은 FOV에서 회절효율의 증가를 보였다.

수차가 적은 홀로그래픽 HMD 소자를 설계하기 위하여 recursive 설계 방법을 사용하였고, 이를 통해 비구면 파를 만들기 위한 수차 보정용 홀로그래프의 기록 조건을 얻었으며, 이때 얻은 수차 보정용 홀로그래프를 이용하여 수차가 적은 최적의 홀로그래프를 기록하였다. 백터 광선추적으로부터 수차가 보정되지 않은 홀로그래프에서는 비점수차가, 수차가 보정된 홀로그래프에서는 코마가 주된 수차임을 발견하였다. 또한 적은 수차를 가지면서 동시에 넓은 FOV에 걸쳐 높은 회절효율을 갖는 소자를 만들기 위해서 수차가 보정된 홀로그래픽 소자의 격자 함수를 매개 홀로그래프에 전송하여 수차는 적고 넓은 FOV에 대해 회절효율이 높은 홀로그래픽 HMD 소자를 제작하였다. 결합과 이론으로부터 수차가 보정된 홀로그래프는 약 $\pm 5^\circ$ 의 FOV를 나타냈고, 회절효율을 높인 홀로그래프에서는 전체 FOV $\pm 10^\circ$ 에서 고른 회절효율을 보였다.

눈으로부터 거리가 수직으로 76 mm의 위치에 놓여 있고, 디스플레이 면으로부터는 35° 의 각도를 이루며 100 mm의 위치에 놓여있는 홀로그래픽 HMD 소자를 제작, 실험하였다. CCD 카메라로 상점을 촬영한 결과, 수차가 보정되지 않은 홀로그래프에서는 주로 비점수차가 많은 경향을 보였으나 수차가 보정된 홀로그래프에서는 약간의 코마를 포함하는 것으로 나타났으며, 이는 계산 결과와 일치함을 보였다. 상점의 크기에 있어서도 약 1 mm에서 $100 \mu\text{m}$ 의 크기로 약 10배 정도 작아진 것을 볼 수 있었다. 수차가 보정된 홀로그래프의 회절효율은 약 60%로 이때의 FOV는 $\pm 4^\circ$ 내였으나, 매개 홀로그래프를 사용하여 FOV 개선 단계를 거쳐 얻어진 최종의 홀로그래프는 전체 FOV가 $\pm 10^\circ$ 로 상당히 넓어졌으며 이 범위 안에서 약 50% 이상의 고른 회절효율을 보였다.

본 연구를 통하여 수차가 적으면서도 넓은 FOV를 갖는 홀로그래픽 광학소자를 얻을 수 있음을 확인하였고, 헬멧 장착형 HMD 시스템에 응용될 수 있음을 제시하였다. 앞으로 회절효율을 향상시키기 위하여 은염 사진건판 뿐만 아니라 굴절률 변조가 높은 다른 매질에 대한 연구가 요구되며, 컬러 영상 디스플레이에 사용하기 위해서 분광대역 및 투과효율 등의

개선에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

[1] R. J. Withrington, "Optical design for a holographic vision helmet-mounted display," in *Computer-Aided Optical Design, Proc. SPIE*, vol. 147, pp. 161-170, 1978.

[2] H. R. Mararinos and D. J. Coleman, "Holographic mirrors," *Opt. Eng.*, vol. 24, no. 5, p. 769, 1985.

[3] J. Kedmi and A. A. Friesem, "Optimized holographic optical elements," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 3, pp. 2011-2018, 1986.

[4] J. N. Cederquist and J. R. Fienup, "Analytic design of optimum holographic optical elements," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 4, pp. 699-705, 1987.

[5] Y. Amitai and A. A. Friesem, "Recursive design techniques for Fourier transform holographic lenses," *Opt. Eng.*, vol. 26, pp. 1133-1139, 1987.

[6] Y. Amitai and A. A. Friesem, "Combining low aberrations

and high diffraction efficiency in holographic optical elements," *Opt. Lett.*, vol. 13, pp. 883-885, 1988.

[7] Y. Amitai, A. A. Friesem, and V. Weiss, "Holographic elements with high efficiency, and low aberrations for helmet displays," *Appl. Opt.*, vol. 28, no. 15, pp. 3405-3416, 1989.

[8] E. B. Champagne, "Nonparaxial imaging, magnification and aberration properties in holography," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 57, pp. 51-55, 1967.

[9] J. N. Latta, "Computer-based analysis of hologram imagery and aberrations. 1: hologram types and their nonchromatic aberrations," *Appl. Opt.*, vol. 10, pp. 599-608, 1971.

[10] K. A. Winick and J. F. Fienup, "Optimum holographic elements recorded with nonspherical wavefront," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 73, pp. 208-217, 1983.

[11] H. Kogelnik, "Coupled wave theory for thick hologram gratings," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 48, pp. 2909-2947, 1969.

[12] H. I. Bjelkhagen, *Silver-Halide Recording Materials for Holography and Their Processing* (Springer-Verlag, USA, 1993), Chapters 3, 5.

A study on aberration and FOV improvement of a holographic HMD element

Hee Dong Kim and Man Ho Jeong[†]

Department of Optical Engineering, Chongju University, Chongju 360-764, KOREA

[†]*E-mail: manho@chongju.ac.kr*

(Received February 27, 2001 ; revised manuscript received July 19, 2001)

A holographic HMD element having low aberrations and high diffraction efficiency over wide FOV has been fabricated. In order to design the HOE having low aberrations a recursive technique was used. To obtain the HOE having low aberrations as well as high diffraction efficiency over a wide FOV, we used an intermediate hologram and the grating function of the aberration corrected hologram was transferred to the final hologram through it. For the fabricated final HMD element, we got the results of spot size improved about 10 times and high diffraction efficiency over FOV of $\pm 10^\circ$.

Classification codes : DI.010, DT.010, IP.010.