

## Head-Up Display용 홀로그래픽 광결합기의 설계 및 제작

유호식 · 정만호

청주대학교 광학공학과

(1999년 1월 25일 받음, 1999년 3월 29일 수정본 받음)

Head-Up Display(HUD)에 사용되는 홀로그래픽 광결합기의 회절 효율 및 결상 특성을 분석하고 제작하였다. Kogelnik의 결합파이론을 통해 반사형 체적 홀로그래프에 대한 각도 및 분광 대역 특성을 수치계산하고 홀로그래픽 광학소자에서의 파장 변화에 의한 색수차의 최소화 방법을 HUD의 재생각 및 초점거리 보정에 응용하였다. 또한 자동차에 사용되는 형태로 등각형(conformal type)과 비등각형(non-conformal type)의 홀로그래픽 광결합기를 비교하고 대역 특성을 실험적으로 분석하였다. 실제적으로 등각형 보다 넓은 각도 대역폭을 보이며 광학적 배율(optical power)을 지니는 홀로그래픽 광결합기를 설계, 제작하였다.

### I. 서 론

Head-Up Display(HUD) 시스템은 운전자 또는 조종사의 시선과 눈의 초점 수렴거리를 크게 변화시키지 않고 주행에 필요한 요소 즉, 속도, 안전표지, 방향안내 등의 현재 상태를 볼 수 있도록 하여 눈의 피로를 줄이고 시선 이동에 의한 돌발사고의 위험을 감소시켜 주는 장치이다. 근래에는 이러한 HUD를 항공기뿐만 아니라 자동차에도 응용하기 위한 연구가 계속적으로 이루어지고 있다.<sup>[1,3]</sup>

광결합기의 반사율을 높이고 충분한 투과율을 갖도록 하기 위해 높은 파장 선택성을 가지는 거울 또는 광 대역 거울이 사용될 수 있으나 후자의 경우 반사율의 방향 의존성이 크다. 파장 선택성을 크게 하는 것은 높은 반사율을 매우 좁은 분광 영역에 제한되도록 함을 의미한다. 두 가지 형태의 고반사 거울 모두 유전체 다층막을 통해 얻어질 수 있으나 매우 많은 층을 필요로 하고 광결합기 전체에 대해서 광학적 두께가 매우 정확하고 일정해야 하며 배율을 가지는 형태로 제작할 수 없다. 따라서 동일한 광학적 효과를 얻기 위해서 이러한 층을 체적형 기록매질에 홀로그래피를 이용하여 기록하는 것이 유리하다.

홀로그래픽 광결합기는 광속 분할기 또는 다층막막을 이용한 재래식 광결합기에 비하여 높은 회절 효율과 각도 및 분광 선택성을 갖는 체적형 홀로그래프에 기록되어 높은 반사율 및 투과율을 얻을 수 있고 사용되는 광학소자의 수를 줄일 수 있어 좁은 공간에 장착할 수 있다는 장점이 있다.<sup>[4]</sup>

HUD용 홀로그래픽 광결합기는 크게 등각(conformal, unpowered) 홀로그래프와 비등각(non-conformal, powered) 홀로그래프의 형태로 나뉘어진다.<sup>[1]</sup> 등각 홀로그래프는 격자벡터가 기판의 수직벡터와 평행한 반사형 필터의 형태를 지닌다.<sup>[5,6]</sup> 비등각 홀로그래프는 격자벡터가 기판에 평행하지 않고 기울기를 가지고 있거나 일정하지 않은 간격을 가진다. 등각 홀로그래프의 경우 재생상이 홀로그래프면에서의 반사광과 겹쳐져 상이 흐

러지는 단점을 지나 제작이 용이하며 비등각 홀로그래프는 회절광의 색분산을 유발할 수 있고 외부시야의 투과시에 특히, 태양광이나 가로등 불빛이 분산되어 운전자의 눈에 들어올 수 있으나 광학적 배율을 갖는 형태로 제작되어 광학계의 설계시 추가적인 장점을 얻을 수 있으므로 자동차용 HUD에서와 같이 좁은 공간에서의 설치를 필요로 하는 경우에 유리하다.<sup>[3]</sup>

본 연구에서는 수치계산을 통해 반사형 홀로그래프 설계시의 회절 효율과 각도 및 분광 대역폭을 조절하는 방법을 이론적으로 보이고 대역 특성에 영향을 미치는 파라미터간의 관계를 분석하였다. 또한 반사형 HOE(holographic optical element)를 DuPont사의 OmniDex 706 광폴리머(photopolymer) 필름<sup>[7]</sup>에 기록하여 결상 및 회절 특성 조사하고 수치계산 결과와 비교하였다. 그리고 제작된 반사형 HOE를 HUD용 홀로그래픽 광결합기에 응용할 수 있음을 보였다.

### II. 이 론

#### 2.1. 반사형 체적 홀로그래프에 대한 결합파이론

반사형 체적 홀로그래프는 제한된 파장 및 각도 영역 내에서 100%에 가까운 반사율을 얻을 수 있는데 이러한 체적형 홀로그래프의 이론적 모델은 Kogelnik의 2광파 1차 결합파이론을 통해서 분석될 수 있다.<sup>[8]</sup> Kogelnik의 이론은 홀로그래프 내부에서의 전자장을 표현하고 입사광  $R$ 과 회절광  $S$ 만을 고려하며 1차 회절광 이외의 고차 회절광을 무시하는 2광파 1차 근사이론이다.

Kogelnik 이론에서 손실이 없는 유전체에 형성된 반사형 체적 홀로그래프에 대한 해는 회절광의 진폭  $S$ 에 대한 다음 식으로 표현된다.

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

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

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

$$c_R = \frac{\rho_z}{\beta} = \cos\theta$$

$$c_S = \frac{\sigma_z}{\beta} = \cos\theta - \frac{K}{\beta} \cos\phi$$

식 (1)에서 Bragg 조건으로부터 벗어나는 정도를 나타내는 위상어긋남(dephasing measure)  $\Gamma$ 이  $\Delta\theta$ 와  $\Delta\lambda$ 항을 포함하며, 이를 통해 각도 및 분광 대역 특성을 예측할 수 있다. (1)식으로부터 반사형 홀로그램의 회절 효율을 (2)식과 같이 쓸 수 있다.

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

Kogelnik 이론은 수직편광을 기본 가정으로 하고 있으나 파동 방정식을 벡터의 형태로 표현하고 기준파와 신호파에 각각의 편광 벡터를 곱해 그 외의 편광에 대한 회절 효율을 예측할 수 있다. 수직편광이 아닌 방향으로 선형편광된 광의 입사는 결과적으로 결합상수에 영향을 미치게 되는데 이 경우의 회절 효율은 기준파·신호파 각각에 대한 편광벡터의 내적을 수직편광에 대한 효율에 곱한 것과 같다.

입사편광이 수직편광과 이루는 각을  $\psi$ 로 하면 기준파  $\vec{r}$ 과 신호파  $\vec{s}$ 에 대한 편광벡터의 각 방향 성분을

$$\vec{r} = \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{pmatrix} = r \begin{pmatrix} \cos\psi \\ \sin\psi \cos\theta \\ \sin\psi \sin\theta \end{pmatrix}, \quad \vec{s} = \begin{pmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} \cos\psi' \\ \sin\psi' \cos\theta' \\ \sin\psi' \sin\theta' \end{pmatrix} \quad (3)$$

와 같이 쓸 수 있고 식 (4)와 같이 각 편광벡터의 내적을 구해 이것을 결합상수  $\kappa$ 에 곱하여 수직편광이 아닌 방향으로 선형편광된 입사광에 대한 회절 효율을 얻는다.

$$\vec{r} \cdot \vec{s} = \cos^2\psi - \sin^2\psi \cos^2(\theta - \phi) \quad (4)$$

따라서 수직편광이 아닌 경우 기준파와 신호파의 결합은 적어지며 회절 효율의 감소로 나타난다. 편광이 되지 않은 광원에 대한 회절 효율은  $\psi=0$ (수직편광)인 경우와  $\psi=\pi/2$ (수평편광)일 때의 효율을 평균하여 얻는다.

Fig. 1은 재생 중심 파장을 514.5 nm로 하였을 때 두께 및 굴절률변조량의 변화에 따른 회절 효율의 분광 선택성을 나타낸다. Fig. 1(a)에서는 굴절률변조량을 0.01로 고정하고 기록매질의 두께를 10~50  $\mu\text{m}$ 로 변화 시켰으며, Fig. 1(b)에서는 기록매질의 두께를 20  $\mu\text{m}$ , 굴절률변조량을 0~0.04로 하여 수치계산 하였고 계산시 모든 광원은 편광되지 않은 것으로 가정하였다. Fig. 1(a)에서 두께의 변화는 분광 대역폭에는 큰 영향을 주지 않으며 효율의 증가에만 작용함을 알 수 있다. 반면에 굴절률변조량의 증가는 Fig. 1(b)과 같이 대역폭의 증가에 직접적으로 관계한다.

Fig. 2는 마찬가지로 514.5 nm의 재생 중심 파장과 60°의

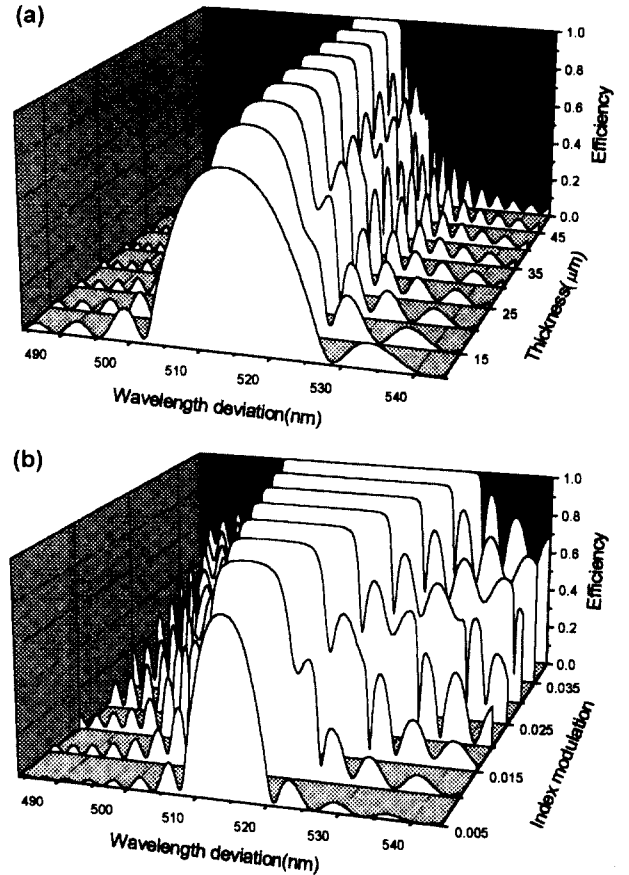


Fig. 1. Spectral selectivity of reflection hologram with respect to (a) material thickness and (b) refractive index modulation (central wavelength 514.5 nm,  $\theta_0 = 60^\circ$ ).

Bragg각을 갖는 반사형 홀로그램의 각도 선택성을 나타낸다. Fig. 2(a)는 굴절률변조량과 두께를 각각 0.01, 10~50  $\mu\text{m}$  그리고 Fig. 2(b)는 각각 0~0.04, 20  $\mu\text{m}$ 에서 수치계산 하였다. Fig. 2와 같이 두께와 굴절률변조량은 각도 대역폭에도 분광대역 특성과 동일한 효과를 준다.

Fig. 3은 기록 매질의 두께가 20  $\mu\text{m}$ 인 경우 Bragg각의 변화가 대역 특성에 미치는 영향을 나타내는데 분광 대역폭의 완만한 변화와는 대조적으로 각도 대역폭은 Bragg각이 줄어들 때 큰 폭으로 증가함을 알 수 있다.

## 2.2. 홀로그래픽 광학소자의 결상이론

HOE의 결상식은 두 개의 기록광에 의해 간섭무늬 내에 기록된 위상과 조명광에 대한 위상의 곱을 원점으로부터의 거리로 나타낸 것을 급수전개하고 이것을 재생광에 대한 급수의 1차 항과 비교하여 얻을 수 있다. 또한 3차 항을 비교하여 수차계수의 표현을 얻을 수 있다. 이들 수차계수의 형태는 재래식 렌즈에서 사용되는 것을 그대로 따르는데 이는 두 경우 모두 경로 및 위상차에 대한 제곱근의 급수전개를 통해서 얻어지기 때문이다.<sup>[9]</sup>

기록광을 침차  $R$ 과  $O$ , 재생광을  $C$ 와  $I$ 로 나타내고 Fig. 4와 같이 홀로그램 중심으로부터의 거리를  $R$ ,  $z$ 축과 이루는 각을

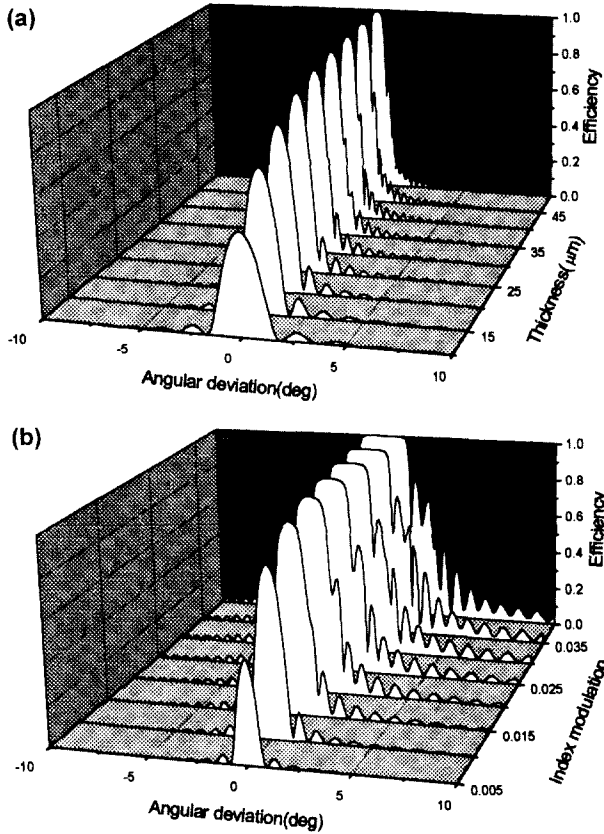


Fig. 2. Angular selectivity of reflection hologram with respect to (a) material thickness and (b) refractive index modulation (central wavelength 514.5 nm,  $\theta_b = 60^\circ$ ).

$\alpha$ 로 표현하면 경로차에 대한 급수식에서 1차 항의 비교를 통해 Gauss상점의 위치 및 방향에 대한 표현을 (5)식과 같이 얻는다. 여기서  $\mu$ 는 기록 및 재생 파장의 비  $\lambda_c / \lambda_r$ 을 나타낸다.

$$\frac{1}{R_I} = \frac{1}{R_C} \pm \mu \left( \frac{1}{R_O} - \frac{1}{R_R} \right)$$

$$\sin \alpha_I = \sin \alpha_C \pm \mu (\sin \alpha_O - \sin \alpha_R) \tag{5}$$

3차 항의 비교를 통해 얻는 구면수차 S, 코마 C, 비점수차 A의 x방향 성분은 다음과 같다.

$$S = \frac{1}{R_C^3} - \frac{1}{R_I^3} \pm \mu \left( \frac{1}{R_O^3} - \frac{1}{R_R^3} \right) \tag{6}$$

$$C_x = \frac{\sin \alpha_C}{R_C^2} - \frac{\sin \alpha_I}{R_I^2} \pm \mu \left( \frac{\sin \alpha_O}{R_O^2} - \frac{\sin \alpha_R}{R_R^2} \right) \tag{7}$$

$$A_x = \frac{\sin^2 \alpha_C}{R_C} - \frac{\sin^2 \alpha_I}{R_I} \pm \mu \left( \frac{\sin^2 \alpha_O}{R_O} - \frac{\sin^2 \alpha_R}{R_R} \right) \tag{8}$$

### 2.3. 파면수차의 균형을 통한 색수차의 보정

홀로그래프에서의 색수차는 기록파장과 재생파장의 불일치

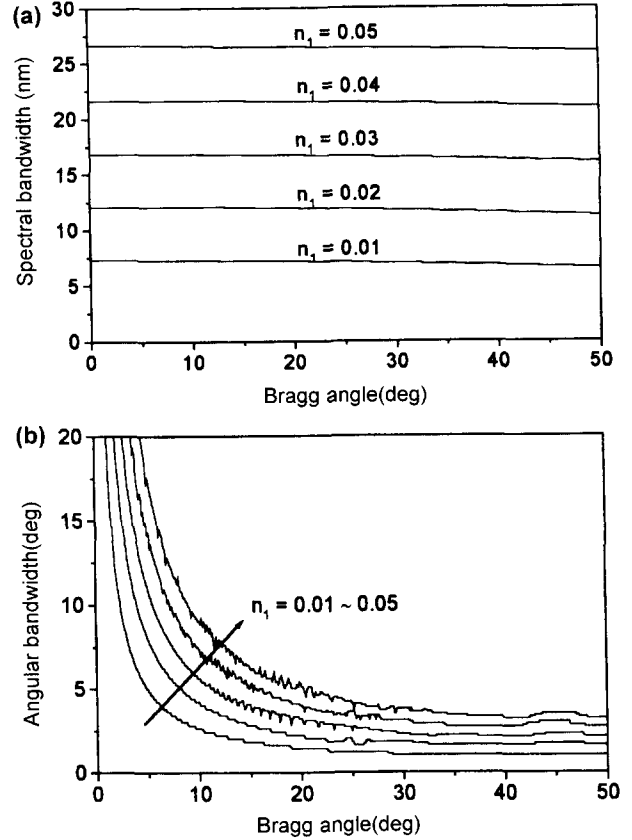


Fig. 3. (a) Angular and (b) spectral bandwidth vs. Bragg angle.

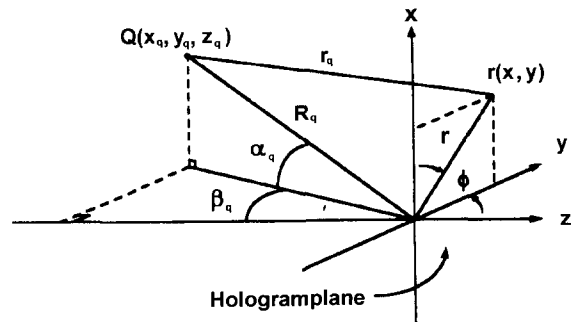


Fig. 4. Coordinate geometry of an arbitrary point source  $Q$  at  $x_q, y_q, z_q$  situated in  $x, y, z$  space in front of a hologram in the  $x-y$  plane.

에서 발생하는데 두 기록광 사이의 각이 커지거나 제작되는 홀로그래프의 F/#가 증가할 때 또는 기록파장과 재생파장의 차이가 클 때 더욱 증가하게 된다. 이러한 색수차는 파면수차계수의 상쇄를 이용하여 보정할 수 있다.<sup>[10]</sup> 파면수차의 균형을 통해 색수차를 보정하는 것은 Gauss 결상식뿐만 아니라 수차계수들 또한 파장비  $\mu = \lambda_c / \lambda_o$ 의 영향을 받기 때문에 가능하다. 본 논문에서는 비축상 홀로그래프에서 색수차를 상쇄시키는 방법을 논의하였다.

일반적인 홀로그래픽 광학소자에서 각 수차계수에 의해 발생하는 파면수차의 크기를 살펴보면 Fig. 5와 같이 코마의 경우 홀로그래프의 중심에 대해 비대칭적인 형태를 보이거나 구면

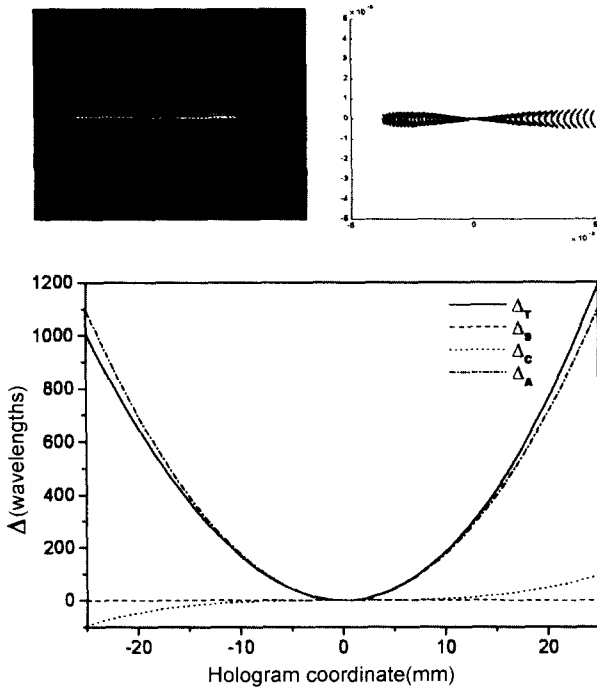


Fig. 5. Wavelength shift aberrations and spot distribution ( $\lambda_o = 514.5$  nm,  $\lambda_c = 632.8$  nm,  $\rho_m = 25$  mm,  $R_R = 40$  cm,  $\alpha_R = 30^\circ$ ,  $R_O = 200$  cm,  $\alpha_O = 50^\circ$ ,  $R_C = 40$  cm,  $\alpha_C = 30^\circ$ , computed spot size :  $10 \times 10$  mm).

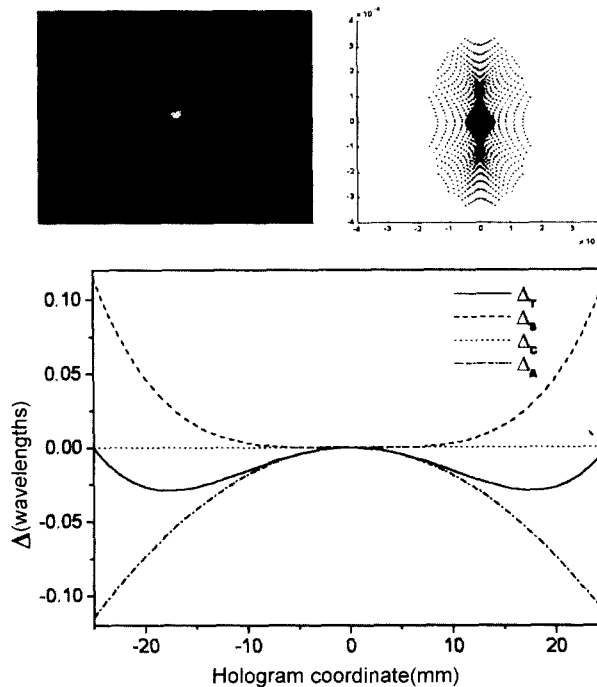


Fig. 6. Aberrations are balanced for the virtual image by wavelength compensation technique ( $\lambda_o = 514.5$  nm,  $\lambda_c = 632.8$  nm,  $\rho_m = 25$  mm,  $R_R = 44.104$  cm,  $\alpha_R = 31.539^\circ$ ,  $R_O = 155.936$  cm,  $\alpha_O = 47.679^\circ$ ,  $R_C = 40$  cm,  $\alpha_C = 30^\circ$ , computed spot size :  $8 \times 8$   $\mu$ m).

수차와 비점수차는 홀로그램의 중심에 대해 대칭적인 모양을 가짐을 알 수 있다. 그러나 대개의 경우 구면수차의 크기는 비점수차보다 크다. 따라서 코마를 없애는 조건을 찾는 동시에 구면수차를 일으켜 비점수차와 반대방향으로 크기가 같게 한다면 Fig. 6의 그래프와 같이 수차계수 간에 서로 상쇄되어 특정 결상점에서 전체 파면수차의 양  $\Delta_T$ 를 크게 줄일 수 있다. 이것을 나타내면 다음과 같다.

$$\text{Max } |\Delta_S| = -\text{Max } |\Delta_A| \quad (9)$$

$$\Delta_C = 0$$

수차들을 모두 동시에 없앨 수는 없는데 이는 구면수차가 동좌표의 4승에 비례하는 반면 비점수차는 제곱에 비례하기 때문이다. 위의 두 식을 동시에 만족하기 위해서는 홀로그램의 4개의 광 중 하나를 결정하기 위한 나머지 3개의 광을 명시할 수 없다. 대개의 경우 식 (9)는 만족되지 않으며 두 개의 기록광과 조명광을 정의한 뒤 마지막으로 재생광을 찾아내게 된다. 그러나 위의 균형조건이 만족되기 위해서는 두 개의 광을 정의하고 다른 두 개는 가우스 결상식과 균형조건을 만족하도록 찾아 주어야 한다. 조명광과 재생광을 임의로 정의 할 수 있다면 두 개의 기록광을 고정하여 나머지 두 개의 광을 결정할 수 있다.

기록광과 재생광을 분리하여 표현하기 위해 새로운 매개변수  $R_1, R_2, R_3, R_4, S_C$ 를 다음과 같이 정의한 뒤 이들을 (5)식의 결상식과 (9)식의 색수차 최소화 조건에 대입하여 풀면  $R_O$  또는  $R_R$ 에 대한 4차 식을 얻을 수 있고 이 식의 해가 파장변화에 따른 색수차를 최소화 할 수 있는 기록광의 위치가 된다.

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_I} - \frac{1}{R_C} = \pm \mu \left( \frac{1}{R_O} - \frac{1}{R_R} \right) \quad (10)$$

$$S_C = \sin \alpha_O - \sin \alpha_C = \pm \mu (\sin \alpha_O - \sin \alpha_R) \quad (11)$$

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_C^3} - \frac{1}{R_I^3} = S \mp \mu \left( \frac{1}{R_O^3} - \frac{1}{R_R^3} \right) \quad (12)$$

$$\frac{1}{R_3} = \frac{\sin \alpha_C}{R_C^2} - \frac{\sin \alpha_I}{R_I^2} = C_x \mp \mu \left( \frac{\sin \alpha_O}{R_O^2} - \frac{\sin \alpha_R}{R_R^2} \right) \quad (13)$$

$$\frac{1}{R_4} = \frac{\sin^2 \alpha_C}{R_C} - \frac{\sin^2 \alpha_I}{R_I} = A_x \mp \mu \left( \frac{\sin^2 \alpha_O}{R_O} - \frac{\sin^2 \alpha_R}{R_R} \right) \quad (14)$$

색수차가 최소화된 홀로그램의 파면수차를 통해 실제 파면을 구하고 이에 대한 법선이 상면과 만나는 점을 수치계산하여 상면에서의 상점 형태를 그릴 수 있다. 이렇게 얻은 상점의 형태는 격자방정식을 이용한 광선추적 결과와 잘 일치한다.

### III. 홀로그래픽 광결합기의 설계

자동차 HUD용 광결합기는 항공기의 응용과는 다른 몇 가지 차이를 지닌다. 자동차의 경우 항공기와 달리 외부시야의 물체가 가까이 있으므로 운전자의 초점수렴거리의 변화를 줄이기 위해 재생상도 수 m의 거리에 위치시켜야 한다. 균용기

의 경우 조준용 표적을 표시하기 위하여 매우 정확한 재생상의 위치제어가 필요하나 자동차용 HUD에 사용되는 기호들은 외부시계와는 무관한 자동차의 상태를 나타내므로 재생상의 위치 또는 수차에 의한 상변형은 중요하지 않다. 또한 장착 공간이 상대적으로 좁으므로 정밀하지는 않으나 소형화된 설계가 필요하다.<sup>[1,4]</sup>

자동차용 HUD 시스템은 항공기 또는 군용기에서의 응용과는 달리 운전자가 재생상을 계속 관측하면서 눈을 움직일 수 있는 범위를 나타내는 HMB(head motion box)가 상대적으로 크므로 넓은 범위에서 재생상을 관측할 수 있어야 한다. 따라서 눈의 위치에 무관하게 높은 반사율을 얻기 위하여 보다 넓은 각도 대역폭을 가지는 광결합기가 요구된다.<sup>[5]</sup>

등각형 광결합기의 주요한 성질은 회절 효율과 대역특성 그리고 재생 중심파장에 있으며 Kogelnik의 결합파이론을 통한 효율분석을 통해 이들의 관계를 살펴 볼 수 있다. 비등각형의 광결합기는 회절 효율 외에 결상특성에 대한 고려가 필요하므로 앞서 언급한 3차 수차 및 색수차의 보정을 주요 설계제원으로 다루었다.

일반적으로 자동차의 방풍창은 50~60°의 경사를 가지므로 등각형 홀로그램의 경우 방풍창 내에 박판으로 삽입될 때 재생파장에 대해서 운전자의 눈 높이를 고려하여 Fig. 7(a)와 같이 약 60°의 회절각을 갖도록 설계하였다.

반사형 체적 홀로그램의 회절특성은 기록매질의 두께 및 굴절률변조량과 기록시의 Bragg 각에 가장 큰 영향을 받는다. 굴절률변조량의 증가는 홀로그램의 효율을 높일 뿐만 아니라 분광 대역 및 각도 대역폭의 증가를 일으키지만 좁은 분광 대역폭과 넓은 각도 대역폭을 동시에 얻기 위한 요소로서 사용되기는 어렵다. Fig. 3에서 처럼 Bragg각의 변화는 각도 대역

Table 1. Recording geometry for the compensation of aberration due to wavelength shift ( $\lambda_c = 514.5 \text{ nm}$ ,  $\lambda_o = 632.8 \text{ nm}$ )

recording beam	reconstruction wavelength	
	514.5 nm	632.8 nm
$R_R$	40 cm	44.104 cm
$\alpha_R$	30°	31.539°
$R_O$	200 cm	155.936 cm
$\alpha_O$	50°	47.679°

폭에는 급격한 변화를 일으키나 분광 대역폭에는 큰 영향을 미치지 않는다. 따라서 두 조건을 만족하기 위해서는 Bragg 각을 작게 하여 설계된 광결합기가 유리함을 알 수 있으나 20° 미만의 Bragg 각을 지니지 않는 이상 Bragg 각의 조절을 통해 넓은 각도 대역을 얻기는 어려웠다.

기록된 격자가 광학적 배율을 갖는 비등각형 홀로그램의 경우 입사각과 회절각이 같을 때 홀로그램면에서의 반사광과 확대 또는 축소된 회절상이 겹치게 되므로 입사각·회절각을 다르게 설계해야 한다. 또한 수 m 앞에 허상을 재생해야 하며 장착 공간을 고려하여 물체거리는 짧게 해야 한다. 따라서 본 연구에는 그 예로서 방풍창 앞에 45°로 설치되는 장착형 광결합기를 설계하였다(Fig. 7(b)). 운전자의 눈 높이를 고려하면 재생각은 약 50°정도가 되어야 하며 따라서 반사광과 겹치지 않도록 하기 위하여 입사각은 30°로 하였다. 이때 상거리는 2 m, 물체거리는 40 cm로 하였다. 이러한 형태로 제작되는 광결합기의 재생파장이 632.8 nm일 경우 색수차를 보정하기 위한 새로운 기록광의 위치는 Table 1에 표시하였다.

IV. 실험 및 결과 분석

Fig. 7(a)의 형태로 등각형의 반사형 필터를 제작하고 대역특성을 조사하였다. Fig. 8과 같이 장치를 구성하고 Table 1의 형태로 비등각형의 반사형 HOE를 제작하였다. 기록된 반사형 HOE를 He-Ne 레이저를 사용하여 재생하고 재생 상점을 촬영하여 수치계산 결과와 비교하였다(Fig. 5, 6). 또한 이렇게 제작된 반사형 HOE를 HUD용 광결합기에 응용하여 resolution chart의 재생상을 촬영하였다.

HOE의 제작은 DuPont사의 OmniDex 706 반사형 필름을 사용하였다. 기록 광원은 Coherent사의 INNOVA 70 2W 급 Ar-ion 레이저를 사용하였고 기록 파장은 514.5nm를 사용하였다. 재생상의 촬영은 촬상면적 7.95×6.45 mm, 해상도 460×350의 컬러 CCD를 사용하였다. 홀로그래픽 반사형 필터에 대한 분광특성 측정에는 HITACHI사의 UV-VIS-Near IR 분광광도계(spectrophotometer)를 사용하였다.

실험에 사용된 OmniDex 706 필름에 대한 노광 및 처리방법은 아래와 같다.

- ① 514.5 nm를 기준으로 150 mJ/cm<sup>2</sup> 노출
- ② 확산시간 지연(diffusion time delay) 2분
- ③ Hg lamp로 2분간 UV 처리
- ④ 140°에서 8분간 열처리

광폴리머 필름은 노출 후에도 홀몸체의 확산이 계속 이루어

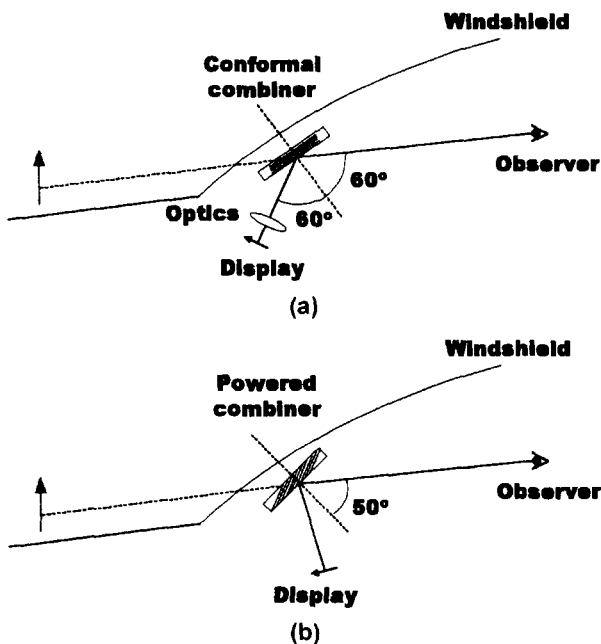


Fig. 7. Comparison of holographic combiner between (a) conformal and (b) non-conformal (powered) optical combiner.

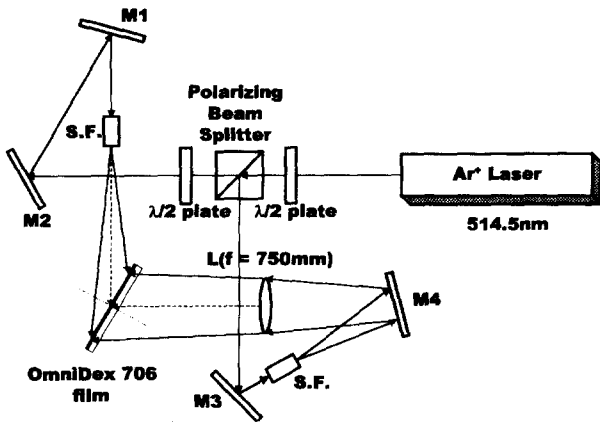


Fig. 8. Optical setup for the construction of reflective HOE.

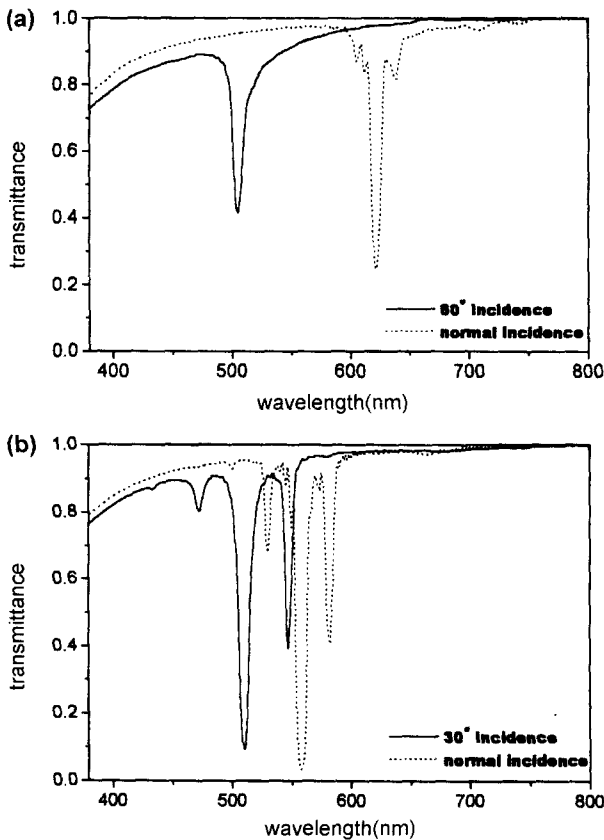


Fig. 9. Spectral selectivity of (a) conformal filter with 60° Bragg angle and (b) non-conformal hologram recorded with incidence angle of 50°, 30° at 514.5 nm.

어지므로 입사빔의 강도를 조절하거나 노출 후 UV 처리 전에 확산시간 지연을 줌으로써 효율을 10%가량 높일 수 있다.<sup>[5]</sup> 제작된 반사형 홀로그램은 90% 내외의 높은 회절 효율을 보였다.

OmniDex 706 필름은 두께 1 mm, 1.5 mm의 유리기판에 부착하여 사용하였는데 기판 뒷면에서의 반사에 의한 원치 않는 다중노출의 영향이 컸다. 따라서 기록시 보다 두꺼운 기판의 사용 및 가장자리에서의 산란을 막기 위한 방법이 필요하다.

514.5 nm에 대한 60° 등각형 거울의 경우 수직 입사시의 회

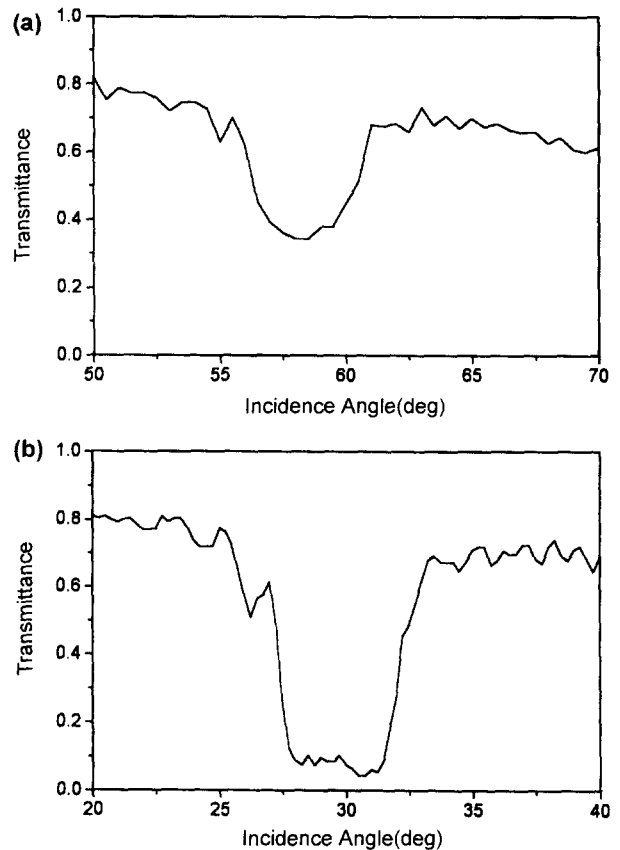


Fig. 10. Angular selectivity of (a) conformal and (b) non-conformal hologram.

절중심파장이 625.8 nm로 필름의 평균 굴절률을 1.6으로 했을 때의 계산치인 632.5 nm 보다 다소 짧아지므로 처리시 두께의 감소가 있었음을 확인할 수 있다. 측정된 반치 분광 대역폭은 11.4 nm로 수치계산 결과와 비교해 약 0.01의 굴절률변조량을 얻었고 각도 대역폭은 4.1°로 약 0.02정도의 굴절률 변조에 해당하여 분광 및 각도 대역폭간의 약간의 차이를 보였다.

비등각형 거울의 경우 분광 및 각도 대역폭은 각각 10.7 nm, 5.5°로 분광 대역폭은 약간 감소했으며 각도 대역폭은 증가하였다. 수치계산 결과와 같이 두 기록광이 이루는 각이 작아지면 각도 대역폭이 증가하고 분광 대역폭에는 큰 변화가 나타나지 않음을 알 수 있다. Fig. 9, 10은 제작된 반사형 홀로그램의 분광 및 각도 대역 특성을 나타낸다.

결상특성은 재생 중심각뿐만 아니라 재생각 근처에서도 수차가 크게 감소했으며 수치계산 결과와 일치함을 확인하였다. 자동차용 HUD의 경우 결상의 정확도가 미치는 영향이 적으므로 충분히 사용될 수 있다. 광학적 배율을 갖는 광결합기를 사용했을 때에는 Fig. 11과 같이 0차에 비해 확대된 재생상을 얻을 수 있었다.

#### IV. 결 론

반사형 홀로그래픽 광학소자를 HUD용 광결합기, 특히 자동차에 응용하기 위하여 반사형 홀로그램의 회절 및 결상 특



(a)



(b)

Fig. 11. Images of resolution chart reconstructed from powered combiner (a) 0th order reflected image (b) 1st order diffracted image.

성을 수치계산하고 실험결과와 비교하였다.

반사형 홀로그래프의 경우 기록매질의 두께와 굴절률변조량이 회절 효율과 각도 및 분광 대역특성에 영향을 미치게 된다. 관측자의 눈이 움직이는 범위를 크게 하고 시야를 넓히기

위해서는 넓은 각도 대역폭이 요구되며 높은 투과율을 위해서는 좁은 분광 대역폭이 필요하다. 반사형 체적 홀로그래프에 대한 효율 분석을 통해 이러한 두 조건을 만족하기 위해서는 Bragg 각을 작게 설계해야 하나 Bragg 각을 20° 미만으로 크게 줄이지 않는 이상 Bragg 각을 통한 대역특성의 조절은 큰 효과가 없음을 수치계산을 통해 알 수 있었다. 따라서 넓은 각도 대역폭을 얻기 위해서는 허용되는 분광대역의 범위 내에서 굴절률 변조를 크게 해야 한다.

실제적인 제작에서는 수치계산을 통한 예측과 같이 등각형 (conformal type)의 4.1°에 비해 기록광이 이루는 각이 작은 비 등각형(non-conformal type) 홀로그래프의 각도 대역폭이 5.5°로 넓게 나타났으나 분광 대역폭은 각각 11.4 nm, 10.7 nm로 큰 차이가 없음을 실험적으로 확인하였다.

비등각형의 반사형 HOE를 514.5 nm의 Ar-ion 레이저를 사용하여 기록하고 632.8 nm로 재생할 경우에 대한 수차를 분석하고 색수차를 최소화 할 수 있는 기록위치를 수치계산하였다. 이에 대한 HUD용 광결합기를 제작하고 색수차가 효과적으로 감소됨을 확인하였다.

앞으로의 보완사항으로는 HUD용도에 보다 적합한 기록매질의 연구 및 상면 전체에서의 수차보정 해석, 그리고 컬러디스플레이 홀로그래픽 HUD에 대한 연구 등이 필요할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- [1] A. Ramsbottom, S. Sergeant, D. Sheel, Proc SPIE 1667, pp. 146-164 1992.
- [2] Weichung Chao, Sien Chi, J. Opt. 29, 95-103, 1998.
- [3] M. A. Beeck, T. Frost, W. Windeln, Proc SPIE 1507, 394 (1991).
- [4] 정만호, 송재봉, 한영수, 유연석, 한국광학회지, 5, 1994.
- [5] James M. Tedesco, Opt. Eng., 28, 1989.
- [6] H. R. Magarinos, D. J. Coleman, Opt. Eng. 24, 769 (1985).
- [7] 최윤선, 윤병호, 김 남, 한국광학회지, 9, 315 (1998).
- [8] H. Kogelnik, Bell Syst. Tech. J. 48, 2949 (1969).
- [9] E. B. Champagne, J. Opt. Soc. Am. 57, 51 (1967).
- [10] J. N. Latta, App. Opt. 10, 609 (1971).

## **Design and fabrication of holographic combiner for automotive head-up display**

Ho Sik You and Man Ho Jeong

*Department of Optical Engineering, Chongju University, Chongju 360-764, Korea*

(Received January 25, 1999, Revised manuscript received March 29, 1999)

We discussed two main types - conformal and non-conformal (powered) - of holographic combiner. A theoretical model based on the Kogelnik's coupled wave theory was used to illustrate bandwidth and efficiency properties. Also we showed numerical values for the aberrations that are induced by a wavelength shift from construction to reconstruction and found optimum coordinates to reduce the chromatic aberration of construction beams using aberration balancing techniques. The holographic combiner manufactured in conformal type with  $60^\circ$  incidence angle at 514.5 nm had narrow angular bandwidth (FWHM) of  $4.1^\circ$  and spectral bandwidth of 11.4 nm, while non-conformal one with  $50^\circ$ ,  $30^\circ$  incidence angle at 514.5 nm showed spectral and angular bandwidths of 10.7 nm and  $5.5^\circ$ , respectively.