

## 회절광학소자를 이용한 Head Mounted Display용 광학계 설계

박성찬<sup>†</sup>

단국대학교 첨단과학부 전자물리학전공

⑧ 330-714 충남 천안시 안서동 산 29번지

(2001년 8월 21일 받음, 2001년 11월 7일 수정본 받음)

본 논문에서는 Head Mounted Display(HMD)용 광학계의 기하학적인 특징과 회절광학소자를 이용한 HMD용 광학계 설계의 개념에 대해 논의하였다. 사용자가 영상을 볼 때 편안함을 갖도록 HMD용 광학계는 경량화, 소형화 및 고해상도를 만족해야 한다. 이러한 요구조건들을 만족시키기 위해 본 논문에서는 회절광학소자와 양면 비구면화를 적용하여 색수차와 단색수차를 보정하였다. 또한 인간의 눈을 모델링하여 일반화한 모형안을 HMD용 광학계의 설계 및 성능평가에 적용하였다.

분류코드 : DT.010, IP.010, SM.010.

### I. 서 론

Head Mounted Display(HMD)는 머리에 장착하거나 안경처럼 사용하여 초대형 화면을 보는 듯한 효과를 낼 수 있는 휴대용 디스플레이 장치를 말한다. 또한 양안의 시차를 이용하여 3차원 영상디스플레이가 가능하다.

Head Mounted Display의 역사는 1960년대에 Ivan Sutherland가 고안한 최초의 HMD에서 시작되었다. 그럼 1은 HMD의 구성을 보여주고 있다. HMD의 구성요소는 이미지소스, 광학계, Head Mount로 나누어져 있다. 첫째로 이미지소스의 정보는 광학계의 물체 역할을 하며, 그 정보는 광학계를 통해 사람의 눈에 제공된다. 과거에는 이미지소스로서 CRT를 사용을 했으나 1990년대에 들어와 flat panel 소자인 LCD, FED 및 마이크로디스플레이 등을 이용하고 있다. 둘째로 디스플레이에서 나온 정보를 눈에 확대된 정립허상으로 보이게 만드는 HMD용 광학계는 크게 나누어 단순한 확대경 계통과 복합 현미경 계통의 광학계 구조를 갖는다. 마지막으로 Head Mount 부분은 머리에 고정하는 방법 따라 helmet, band 및 안경형태로 나눌 수 있다. HMD가 소형화 및 경량화 됨에 따라 helmet 형태에서 안경형태의 mount 구조로 변화되어 가고 있다.

본 논문에서는 HMD용 광학계가 필수적으로 만족해야 할 기하학적인 구조에 대하여 알아보고, HMD와 밀접한 상호관계에 있는 중요한 특성들에 대해 논의하겠다. 또한 HMD에서 상면이자 광학적 검출기라고 할 수 있는 사람의 눈을 고려하여 HMD용 광학계의 설계 및 성능을 평가하는 방법에 대해 논의하고자 한다. 최적 설계된 HMD용 광학계는 필수적으로 만족시켜야 할 HMD의 기하학적인 구조 및 특징을 고려하여 성능을 평가하였고, 또한 사용자가 HMD를 착용할 때 발생하는 눈의 상하좌우 이동과 밝기에 따른 동공 크기의 자동변화를 고려하여 평가하였다.

### II. HMD용 광학계의 기하학적인 특징

본 절에서는 HMD용 광학계 및 디스플레이의 특성을 각각 알아보고 상호관계에 대해 논의하겠다.<sup>[1,2]</sup>

HMD 광학계의 Field of View(FOV)는 디스플레이의 크기와 렌즈의 유효초점거리에 의해 결정된다. 즉 FOV는 사용자가 볼 수 있는 HMD의 허상에 대응하는 각이다. 그럼 2에서 단안(single eye)을 이용하는 monocular HMD의 광학적인 FOV 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$FOV = 2\arctan \left( \frac{S}{2F} \right) \text{ [degrees]} \quad (1)$$

위 식에서  $S$ 는 디스플레이의 크기이고  $F$ 는 확대경 렌즈의 유효 초점거리이다. 그럼 2에서 디스플레이의 크기가 커지거나 렌즈의 초점거리가 작아짐에 따라서 광학적인 FOV가 커짐을 알 수 있다. 렌즈의 직경이 매우 작고 눈동자 거리( $L_e$ )가 상당히 큰 경우, 렌즈의 직경에 의해 확대된 허상이 차단이 되어 전체상을 볼 수 없다. 그러므로 렌즈의 직경이 적절히 크고, 눈동자 거리도 적절히 확보할 수 있도록 광학계를 설계해야 한다.

LCD와 같은 픽셀구조의 디스플레이 장치에서, 단일 픽셀에 대응하는 각도는 동일한 1차원 영역에서 디스플레이의 FOV를 픽셀의 전체 개수로 나눈 것으로 주어진다. 디스플레이의 해상도(Res)에 관한 방정식은 다음과 같다.

$$Res = \frac{FOV}{N} \text{ [degrees/pixel]} \quad (2)$$

여기서  $N$ 은 전체 픽셀 수이고, FOV는 시야각이다. 디스플레이는 정해진 면적에 고정된 픽셀 수를 가지고 있기 때문에, FOV가 크면 클수록 단위 픽셀 당 각도가 커지므로 허상의 해상도는 떨어진다. 디스플레이에서 결상특성을 해상도가 visual limit에 얼마나 가깝게 일치하느냐에 따라 달라진다.

눈동자 거리(Eye Relief)는 눈의 위치로부터 가장 가까운 광학계의 렌즈 또는 소자까지의 물리적인 거리( $L_e$ )이다. 이 거리

<sup>†</sup>E-mail: scspark@anseo.dankook.ac.kr

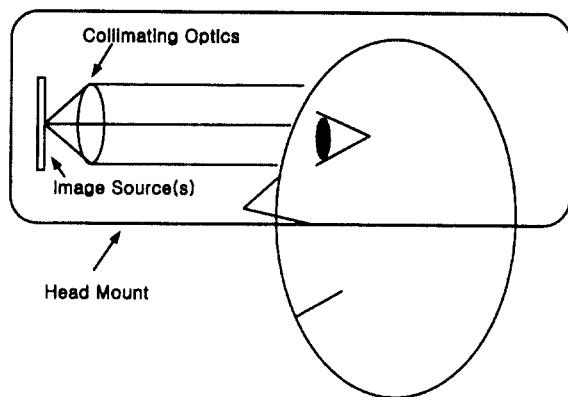


그림 1. Head Mounted Display의 구성도.

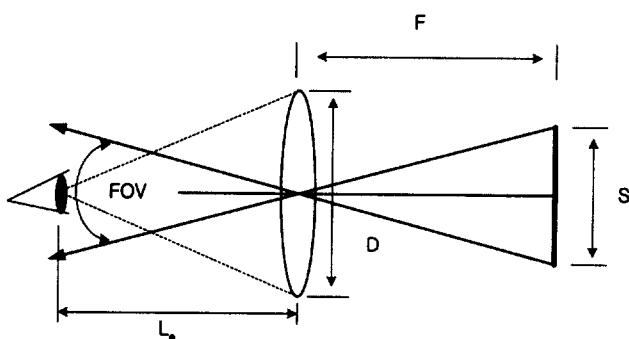


그림 2. FOV을 계산하기 위한 기하학적인 구조.

를 확보하는 이유는 안경을 착용할 공간을 제공하기 위해서이다. 눈동자 거리의 확보 범위는 20~30 mm정도가 적당하며 일반적으로 약 25 mm가 널리 이용되고 있다.

Eye motion box와 눈동자 거리는 눈의 위치에 의해 결정되며, 서로 반비례 관계에 있다. 그림 3에서 보듯이, 단순한 확대경 계통의 HMD는 가상의 출사동을 형성하고 cone 형태의 영역 안에 사용자 눈의 동공이 위치할 때, 상하로 눈동자가 움직여도 디스플레이의 전체 정보를 볼 수 있다. 즉, 눈동자가 그림 3의 E 영역 내에 있을 때 사용자는 전체 상을 볼 수 있다. Eye motion box E의 방정식은 다음과 같다.

$$E = D - \frac{L_e S}{F} \quad (3)$$

여기서  $D$ 는 렌즈의 직경,  $S$ 는 디스플레이의 크기,  $F$ 는 렌즈의 유효초점 거리이고,  $L_e$ 는 눈동자 거리이다. 눈의 동공의 크기는 희미한 빛에서 직경이  $\Phi 6\sim7$  mm정도이고, 밝은 빛에서  $\Phi 2\sim3$  mm정도이다. 그리고 양안단상을 위해 눈동자는 회전하게 된다. 이러한 조건을 고려하여, 광학계의 출사동 크기는 적어도 8~12 mm정도는 확보되어야 한다.

InterPupillary Distance(IPD)의 정의는, 두 눈이 무한대에 수렴할 때, 두 눈의 동공 중심 사이의 거리로 정의된다. 동·서양 사람의 IPD 조절 범위는 약 50~76 mm가 적당하다. 평균적으로 65 mm 정도이다. 이 거리를 확보해야 HMD를 특정 사람이 아닌 많은 사람이 사용을 할 수 있다.

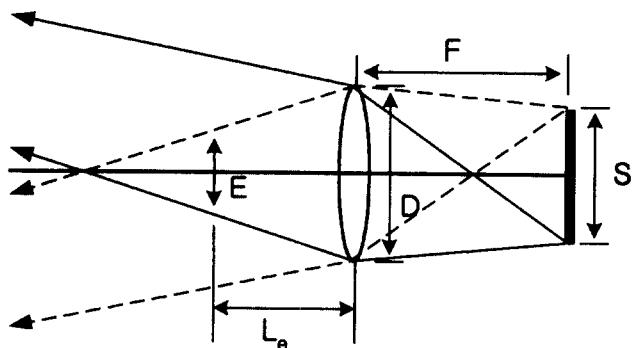


그림 3. 눈동자 거리와 eye motion box의 관계.

### III. 눈의 기하학적인 구조 및 특징

인간의 눈은 광학기기와 많은 유사점들을 가진 세련된 광전자 이미지 처리 시스템이다. 예를 들면, 눈은 넓은 시야를 가진 고급 비디오 카메라, 자동초점 및 자동노출 광학계, 그리고 RGB 3색 채널 및 고 감각의 흑백 채널을 가진 가변 분해능 센서에 비유할 수 있다. 그럼 4는 광학적으로 중요하게 다루어지는 눈의 명칭 및 단면도를 보여준다.<sup>[3]</sup>

시력이 1.0인 인간의 눈의 한계분해능은 약 1.0 arc minute이다. 따라서 명시거리 250 mm에서 대략 6.88 lp/mm 정도에 해당되는 흑·백 막대(bar)로 구성된 표적을 분해할 수 있다. 그러나 눈은 물체의 밝기와 선명도의 감소에 따라 급격히 분해능이 저하되어진다. 만약 명시거리인 250 mm에 위치한 물체에 초점조절이 되었을 때, 동공의 직경 4 mm에서 수정체의 전후 곡률 반경은 6 mm 정도로 거의 같다. 사람의 눈이 무한물체에서 유한 물체로 초점조절을 할 때 눈의 유효초점거리는 17.4 mm에서 16.7 mm로 줄어든다. Best 초점에서, 축상 MTF는 공간주파수 100 lp/mm정도에서 약 20% 정도이다. 이 같은 조건은 사람이 분해할 수 있는 최대 공간주파수이기도 하다.

본 논문에서는 인간의 모형안의 기하학적인 구조를 이용하여 HMD용 광학계에 perfect 렌즈를 적용하고, 이 모형안의 평가특성을 고려하여 최적화된 HMD용 광학계를 평가하였다.

### IV. 회절광학소자를 이용한 HMD용 광학계 설계

#### 4.1. 설계목표 사양 및 디스플레이 규격

본 절에서는 HMD의 이미지소스, 광학계, 그리고 사람과 HMD 사이에 상호관련 있는 중요한 매개변수를 고려하여 설계 및 평가 기준과 사용자로 하여금 편안함을 느낄 수 있는 HMD 설계기준을 결정하는데 있다. HMD용 광학계에서, 렌즈의 유효초점거리, FOV, 출사동의 직경 및 눈동자 거리는 중요하게 고려되는 대표적인 기하학적인 구조이다. 또한 HMD에서만 볼 수 있는 first orders 특성을 사용하여 최적화할 때 구속조건으로 설정하였다.

HMD용 광학계 규격, 디스플레이 규격 및 인간의 눈, 이 세 가지 요소를 적절히 고려하여 설계목표 사양을 결정해야 한다.

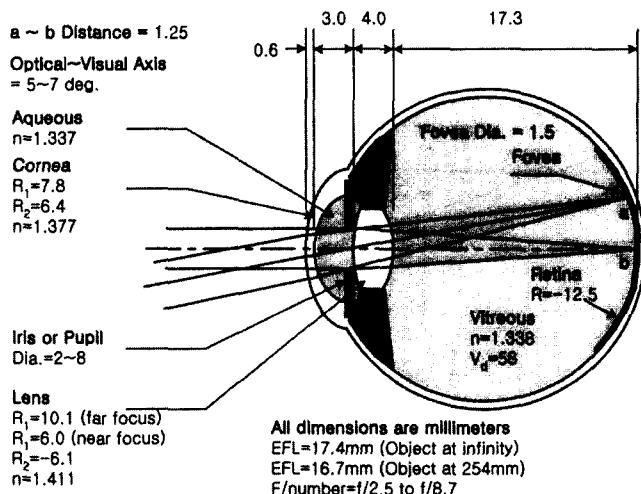


그림 4. 광학적으로 중요한 사람 눈의 명칭 및 단면도.

표 1의 오른쪽 열은 광학계의 설계목표 사양 및 성능평가 기준을 열거하고 있다. 일반적으로, HMD용 광학계의 유효초점거리는 20~30 mm정도 범위가 적절하고, 시야의 범위는 디스플레이의 해상도와 눈의 분해능을 고려하여 25~35°(수평) × 20~25°(수직) 정도로 설정하였다. 그리고 광학계는 양면 비구면과 회절광학소자를 적용한 hybrid 플라스틱 렌즈를 채택하였다. 또한 눈동자 거리의 범위는 안경을 착용하기 위해 20~30 mm정도의 공간을 설정하였고, 출사동의 직경의 크기는 양안단시를 위한 눈동자의 회전과 눈의 좌우상하 이동을 고려하여  $\Phi$ 10~12 mm정도로 설정하였다.

광학적인 검출기인 사람의 눈은 일반적인 CCD나 CMOS와는 달리 전 field에 대해 동일한 분해능을 갖고 있지 못하다. 눈의 망막에 있는 와(Fovea)를 중심으로 지름방향으로 분해능이 현저하게 떨어진다. 이러한 특징을 고려하여 각각의 field에 대한 성능평가 기준을 다르게 설정하였다. 눈의 모형안 구성을 afocal system이나 lens module를 이용하여 이상적인 렌즈로 구성할 수 있다. 본 논문에서는 afocal system을 이용하였고 인간의 모형안을 적용하여 눈의 초점거리를 16.7~17.4 mm로 설정하였다. 광학계의 수차들 중에서는 획색수차(TCA)

과 왜곡수차를 중요시 고려해야 한다.

디스플레이의 해상도는 광학계와 검출기의 성능에 관계되어 있다. HMD에서 검출기인 사람의 눈에 보이는 최종적인像是 렌즈에 의해 확대된 정립허상이다. 이러한 특성을 고려하여 디스플레이의 성능을 결정해야 한다. 본 논문에서는 이미지소스로서 화면의 종횡비가 4대 3이고, 대각선 직경이 0.7"인 마이크로디스플레이를 사용했고, 실제 사이즈는 14.4H×10.8V×18.0D mm이다. 또한 디스플레이의 포맷은 PC방식의 SVGA급에 해당되는 800H×600V(480,000) pixels이다. 예를 들어 설명하면, HMD용 광학계의 시야가 25~35°H×20~25°V이라고 할 때, 본 논문에서 채용한 마이크로디스플레이의 2.0~2.5 arc minutes/pixel 정도의 확대된 정립허상의 해상도를 구현할 수 있다는 의미를 갖는다.

#### 4.2. 초기설계 및 최적설계

HMD용 광학계에 흔히 이용되는 확대경 계통은 singlet의 bi-convex가 있고, achromatic doublet의 Fraunhofer와 Steinheil type이 있다.<sup>[4]</sup> 본 논문에서는 소형화 및 경량화를 위해 bi-convex singlet 형태의 플라스틱 hybrid 렌즈를 이용하였다. 양면의 비구면화를 통해 고차수차를 보정하여 결상 성능을 향상시키고, 색수차 보정을 위해 회절광학소자를 굴절렌즈에 적용시켰다.

일반적으로 눈과 관계된 확대경 및 현미경 계통의 광학계를 설계할 때 광학계를 거꾸로 구성하여 설계 및 평가를 한다. 즉 무한대에 위치한 정립허상을 물체로, 그리고 디스플레이 면을 상면으로 취급한다. 그러나 본 논문에서는 afocal system을 이용하여 사람 눈을 이상적인 렌즈로 설정하고, HMD용 광학계를 정 방향으로 구성하였다. 즉 디스플레이소자를 물체로, 사람 눈의 망막을 상면으로 취급하였다.

최적화 과정에 이용된 설계개념은 다음과 같다. 눈의 홍채(iris) 역할을 하는 조리개의 위치를 눈동자 거리에 위치시키고, 눈동자 거리를 변수로 설정하였다. 조리개의 위치 변화는 Seidel 3차 수차 중 코마, 비접수차, 왜곡수차 및 획색수차에 영향을 준다. 그리고 논문에서 이용되는 HMD용 광학계는 조리개와 출사동의 위치가 같다. 설계시 설정한 조리개의 크기는 동공의 크기를 포함해야 한다. 또한 출사동의 크기와 위치

표 1. HMD용 광학계의 목표사양 및 최적 설계된 사양

항 목	최적설계 사양		목표 사양
HMD용 Lens의 EFL	30.65 mm		20~30 mm
Field of View(deg.)	27H×20V×33D		25~35H×20~25 V
Eye Relief Range	25 mm(안경호환)		20~30 mm
Exit Pupil Diameter	$\Phi$ 10 mm(동공크기): $\Phi$ 2~8 mm)		$\Phi$ 10~12 mm
Perfect Lens EFL	16.84 mm		16.7~17.4 mm
Over All Length(OAL)	62 mm		60~65 mm
Virtual Image Size	47 Inches at 2 m		45~60"
Optical Distortion(%)	3% 이내		-3~+3%
Image Quality (MTF)	0.0F	70%이상 at 50 lp/mm	30% 이상
Focusing on Retina (EXPD:4 mm ≤ $\Phi$ ≤ 6 mm)	0.4F 0.7F 0.9F 1.0F	50%이상 at 35 lp/mm 40%이상 at 25 lp/mm 50%이상 at 20 lp/mm 50%이상 at 15 lp/mm	30% 이상 30% 이상 30% 이상 30% 이상

는 성능평가 할 때 중요하게 고려된다.

렌즈면에 비구면화는 수차에 영향을 줌으로써 광학계의 전체적인 성능을 향상시킨다. 즉 비구면 방정식의 conic 상수  $k$ 에 의해 원추곡면의 형태가 결정되고, 고차항들은 구면수차, 코마, 비점수차 및 왜곡수차에 영향을 줌으로써 3차 및 고차수차를 보정할 수 있다. 광축에 대해 회전대칭성 특성을 갖는 비구면 방정식은 다음과 같다.<sup>[5]</sup>

$$Z = \frac{h^2/r}{1 + \sqrt{1 - (1+k)h^2/r^2}} + Ah^4 + Bh^6 + Ch^8 + Dh^{10} + \dots \quad (4)$$

여기서  $h = \sqrt{x^2 + y^2}$  는 광축으로부터의 거리,  $k = -e^2$ 는 conic 상수, 그리고  $e$ 는 이심률(eccentricity)이다.

광학계의 색수차를 보정하기 위해 굴절광학소자에 회절광학소자를 적용한 hybrid bi-convex 렌즈를 이용하였다. 굴절광학소자는 단파장일수록 굴절이 잘 일어나는 반면에 회절광학소자는 장파장일수록 회절이 잘 일어난다. 이러한 성질을 이용하여 색수차를 보정할 수 있다.<sup>[6-10]</sup> 또한 회절광학소자를 이용하여 파면수차를 보정할 수 있다. 즉 식 (5)에서 주어진 회절광학소자의 위상함수에서,  $r^2$ 의 위상계수  $C_1$ 은 회절광학소자의 굴절능에 영향을 미치며  $r^4$  이상의 위상계수  $C_2, C_3, C_4$  등에 의해 파면의 모양이 결정됨으로 이들 계수를 적절히 조절하여 렌즈의 파면수차를 보정할 수 있다. 회절광학소자를 이용하여 설계할 때, 고려해야 할 점으로는 회절에 의한 굴절능을 되도록 작게하여 제조오차 및 온도변화에 의한 초점이동이 없도록 해야한다. 광축에 대해 회전대칭성 특성을 갖는 회절렌즈의 위상함수  $\Phi(r)$ 은 다음과 같이 주어진다.<sup>[5]</sup>

$$\Phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sum_{n=1} C_n r^{2n} = \frac{2\pi}{\lambda_0} (C_1 r^2 + C_2 r^4 + C_3 r^6 + C_4 r^8 + \dots) \quad (5)$$

여기서  $r$ 은 광축으로부터의 거리이다.

광학렌즈의 매질은 Zeonex사 E48R 플라스틱 재료를 사용하였다. 본 논문에서 광학유리 대신에 플라스틱을 사용하는 이유는 가볍고, 비구면과 회절광학소자의 형상을 새기기가 용이한데 있다. 또한 금형에 의한 복제가 쉬워 대량생산이 가능하고 가격이 저렴하다. 그러나 일반적으로 플라스틱의 재질은 굴절률이 낮고 품종이 다양하지 못하다. 또한 온도계수가 크고,

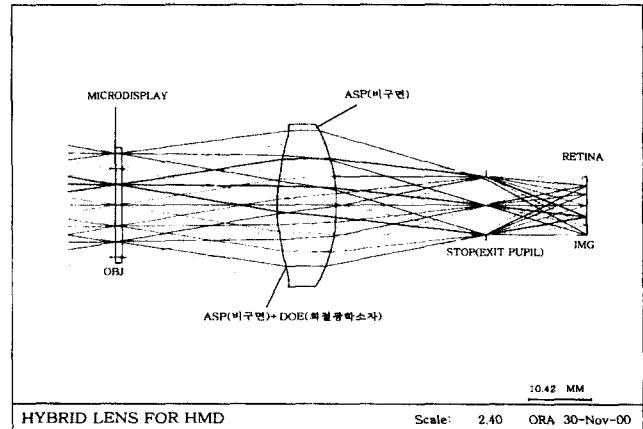


그림 5. 최적화된 HMD용 광학계의 구성도( $\Phi 10$  mm).

유는 가볍고, 비구면과 회절광학소자의 형상을 새기기가 용이한데 있다. 또한 금형에 의한 복제가 쉬워 대량생산이 가능하고 가격이 저렴하다. 그러나 일반적으로 플라스틱의 재질은 굴절률이 낮고 품종이 다양하지 못하다. 또한 온도계수가 크고,

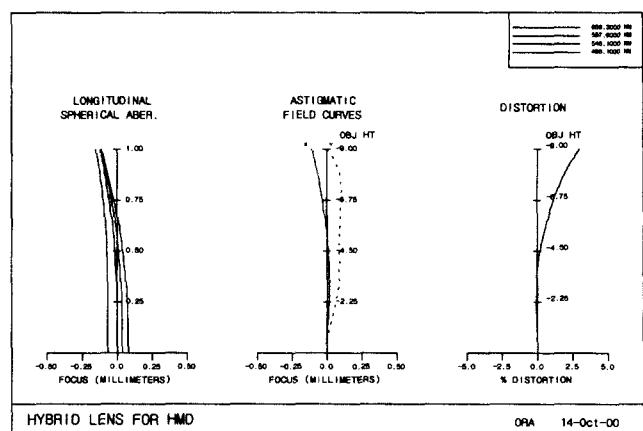


그림 6. 최적화된 HMD용 광학계의 Field수차( $\Phi 10$  mm).

표 2. 최적 설계된 HMD용 광학계의 데이터

NO.	Radius (mm)	Thickness (mm)	Glass
OBJ	Infinity	0.00	
1	Infinity	1.10	BK7
2	Infinity	26.12	Air
	29.49854	10.00	
3	DOE+비구면 : $C_{66} = -22.80500$ $C_1 : 0.29819e-15$ $C_2 : 0.25774e-04$ $C_3 : 0.25753e-06$ $C_4 : 0.81572e-09$ $C_{67} : 0.30837e-04$ $C_{68} : -0.37525e-06$ $C_{69} : 0.35545e-08$ $C_{70} : -0.12348e-10$	E48R ZEONEX $n_C (1.52713)$ $n_e (1.53226)$ $n_f (1.53662)$	
	-32.14215	25.12	
4	비구면 : $K = 0.75791$ $A : 0.37250e-05$ $B : -0.16066e-06$ $C : 0.17289e-08$ $D : -0.55567e-11$	Air	
STO	Infinity	16.84	Afocal System
IMG	Infinity	-	

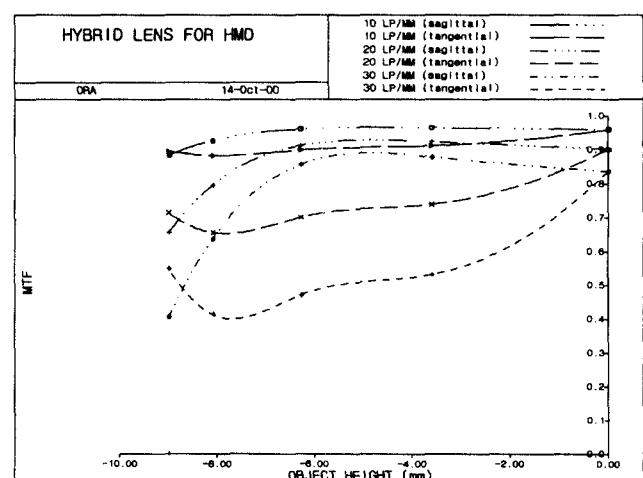


그림 7. 물체의 크기에 따른 MTF 변화( $\Phi 4.0$  mm).

접합과 무반사 박막이 어렵다. 플라스틱 광학재료인 E48R을 사용함에 따라 설계 시 주의해야 할 사항으로는 비구면과 회절광학소자의 형상이 매끄러워지도록 해야하고, 플라스틱 재료는 열에 대해 상당히 민감함으로 중심과 주변의 두께 차이가 크지 않도록 해야 한다. 또한 허용공차를 크게 할 수 있도록 함으로써 가공오차에 대한 성능의 안정성을 확보해야 한다.

#### 4.3. 설계결과 및 성능평가

표 2는 최적 설계된 HMD용 광학계의 설계데이터이며, 표 1은 최적 설계된 HMD용 광학계의 설계사양과 목표사양을 비교 열거하고 있다. 최적화된 광학계의 기하학적인 특성이 초기에 설정된 목표설계 사양을 모두 만족하는 것을 알 수 있으며, 회절광학소자의 위상계수  $C_1$ 은 거의 0에 가까운 것을 볼

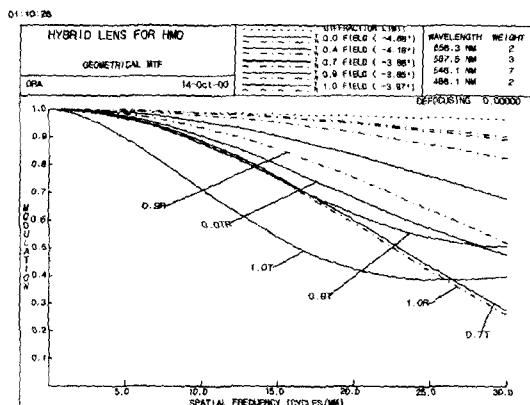
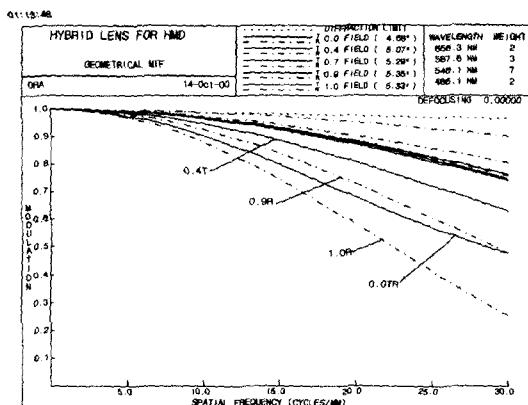
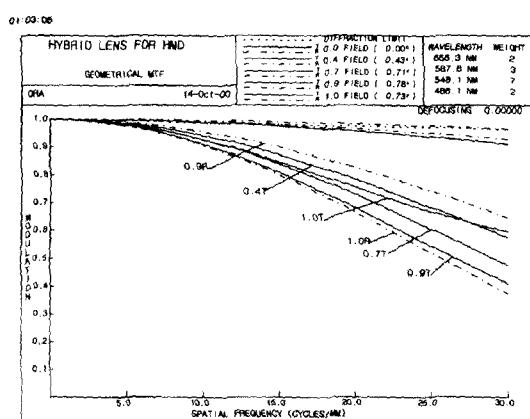
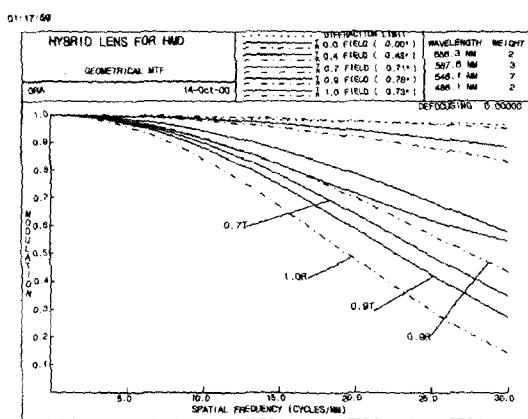
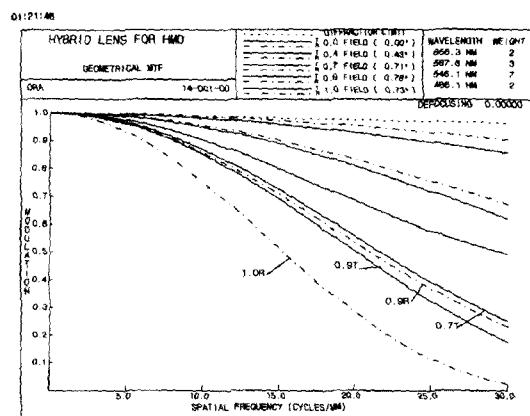
(a)  $\Phi 4.0$  mm, Y-2.5 mm(b)  $\Phi 4.0$  mm, Y+2.5 mm(c)  $\Phi 4.0$  mm, On Axis(d)  $\Phi 5.0$  mm, On Axis(e)  $\Phi 6.0$  mm, On Axis

그림 8. (a) 조리개 위치의 편심에 따른 MTF 변화( $\Phi 4.0$  mm, Y-2.5 mm), (b) 조리개 위치의 편심에 따른 MTF 변화( $\Phi 4.0$  mm, Y+2.5 mm), (c) 조리개 위치의 편심에 따른 MTF 변화( $\Phi 4.0$  mm, On Axis), (d) 동공의 크기에 따른 MTF 변화( $\Phi 5.0$  mm, On Axis), (e) 동공의 크기에 따른 MTF 변화( $\Phi 6.0$  mm, On Axis).

수 있다. 최적 설계된 HMD용 광학계의 구성도를 보여주는 그림 5를 보면, 플라스틱 렌즈의 중심부와 가장자리의 두께의 차이를 50%정도 갖도록 하여 제조상의 안정성을 확보했으며, 양면에 적용된 비구면은 급격한 변곡점이 없도록 매끄럽게 설계하였다.

그림 6은 출사동의 직경이  $\Phi 10\text{ mm}$ 일때 최적 설계된 HMD용 광학계의 field 수차를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 전체적으로 field 수차가 안정적이다. 그리고 회절광학소자에 의한 색수차가 보정된 것을 구면수차 곡선에서 찾아 볼 수 있다. 그림 7은 공간주파수 10, 20, 30 lp/mm에서, field의 크기에 따른 MTF 특성의 변화를 보여준다. 전체적으로 만족할 만한 성능을 가지고 있다.

HMD 사용 시 발생하는 몇 가지 현상에 대해 시뮬레이션을 통해 평가한 결과는 다음과 같다. 우선 그림 5의 광학계 구성도에서 조리개를 축에 대해 상하방향으로  $\pm 2.5\text{ mm}$ 만큼씩 편심(YDE 0.0 mm, YDE -2.5 mm, YDE +2.5 mm)을 주었을 때, 그림 8(a)~8(c)는 동공의 직경  $\Phi 4\text{ mm}$  조건에서 조리개 위치의 편심에 따른 MTF 변화를 보여주고 있다. 그림 8(a)에서 1.0T의 MTF 특성은 저주파수영역에서 낮은 값을 갖고 있다. 그 이유는 축으로부터 멀어짐에 따른 코마, 비점수차 및 상면만곡의 증가때문이다. 그러나 그림 8(a)~8(c)에서 볼 수 있듯이 조리개 위치의 편심에 따른 MTF 변화는 전체 field에 대해 공간주파수 30 lp/mm에서 30%이상이므로 목표사양을 모두 만족을 한다.

동공의 직경이  $\Phi 4.0\text{--}6.0\text{ mm}$  변화에 따른 MTF 변화를 평가한 결과가 그림 8(c)~8(e)이다. 사람 눈의 분해능은 와(Fovea)를 중심으로 지름방향으로 현저하게 나빠지므로 눈의 분해능을 고려하여 표 1에서와 같이 각각의 field에 대해 서로 다른 공간주파수 기준을 설정했다. 최적설계 값은 목표설계 기준을 모두 만족시킨다.

결과적으로 최적화된 HMD용 광학계는 필수적으로 요구되는 기하학적인 구조를 만족시켰으며, 디스플레이의 해상도, 사람 눈의 분해능 및 기하학적인 특성을 고려하여 광학계를 평가한 결과 충분한 성능을 얻었다. 또한 HMD 사용 시 발생을 할 수 있는 눈의 상하좌우 이동과 밝기에 따른 동공의 크기변화를 시뮬레이션 한 결과 만족할 만한 MTF 특성과 성능을 얻었다.

## V. 결 론

본 논문에서는 HMD의 구성요소인 이미지 소스, 광학계, 그리고 사람의 눈 사이에 중요한 상호관계를 논의하였고, HMD용 광학계에서만 볼 수 있는 기하학적인 구조와 특징을 알아보았다. 즉 FOV, 눈동자 거리, eye motion box, 결상특성 그리고 디스플레이의 해상도 및 눈의 분해능들 사이에 상호관계를 이해함으로써 사용자 중심의 HMD를 설계할 수 있는 기본 지식을 제공하였다. 추가적으로 광학적인 검출기인 사람 눈을 모델링한 모형안을 통해 눈의 기하학적인 구조와 특징을 고려하여 HMD용 광학계를 설계하였다.

본 논문에서는 확대경 계통의 singlet 광학계에 회절광학소자를 채용하여 색수차와 파면수차를 보정하였고, 고성능화를 위해 양면을 비구면화 하였다. 사람의 눈과 관련된 광학계 설계 시 광학계를 거꾸로 구성을 하던 전통적인 방법에서 벗어나 디스플레이, 광학계, 그리고 이상적인 렌즈 순으로 구성하여 망막에서의 결상 특성을 평가하였다. 또한 밝기에 따른 동공의 크기 변화와 사용할 때 사람 눈의 상하좌우이동으로 인한 광학계의 성능저하정도를 평가한 결과 만족할 만한 MTF 특성을 얻었다. 결과적으로 최적화된 HMD용 광학계는 HMD의 요구조건에 해당되는 소형화, 경량화 및 고정제화를 모두 만족시켰다.

현재 마이크로디스플레이의 발달로 인해 HMD 분야는 급속도로 발전하고 있으며, 그 응용분야는 야시장비를 위한 군사용, 수술을 위한 의학용에서부터, 휴대용 디스플레이 개념의 통신용, 그리고 컴퓨터 3D 게임 및 가상체험을 위한 게임용 HMD등으로 과거와 같이 특수 목적이 아닌 실생활에 널리 이용될 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 연구는 2000학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

## 참고문헌

- [1] J. E. Melzer and K. Moffitt, *Head Mounted Displays* (McGraw Hill, New York, 1997), pp. 1-11.
- [2] J. E. Melzer and K. Moffitt, *Head Mounted Displays* (McGraw Hill, New York, 1997), pp. 55-82.
- [3] P. Mouroulis, *Visual Instrumentation* (McGraw-Hill, New York, 1999), pp. 277-295.
- [4] W. J. Smith, *Modern Optical Engineering* (McGraw Hill, New York, 1990), pp. 375-384.
- [5] Optical Research Associates, *CODE-V Reference Manuals* Ver. 8.5 (Optical Research Associates, Pasadena, 2000), Chapter 2.
- [6] C. Londono, *Design and Fabrication of Surface Relief Diffractive Optical Elements or Kinoforms, with Examples for Optical Athermalization* (Tufts University Ph.D dissertation, Michigan, 1992), pp. 26-48.
- [7] W. C. Sweatt, "Achromatic triplet using holographic optical elements," *Appl. Opt.*, vol. 16, no. 5, pp. 1390-1391, 1977.
- [8] T. Stone and N. George, "Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats," *Appl. Opt.*, vol 24, no. 14, pp. 2960-2972, 1988.
- [9] D. Faklis and G. M. Morris, "Achromatic imaging with combinations of holographic and conventional lenses," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 3, no. 1, pp. 53-57, 1986.
- [10] O. Arnon, A. Reichert, and A. Avnour, "Achromatic combination of holographic and refractive optical elements," *Proc. SPIE*, vol. 554, pp. 518-525, 1985.

## Optical system design for head mounted display using diffractive optical elements

Sung Chan Park

*Department of Electronic Physics, School of Advanced Sciences, Dankook University, Cheonan 330-714, KOREA  
E-mail: scpark@anseo.dankook.ac.kr*

(Received August 21, 2001 ; revised manuscript received November 7, 2001)

In this paper, the geometrical properties of the optical system for Head Mounted Display (HMD) were investigated. Also, this work deals with the concept for an optical system design based on Diffractive Optical Elements (DOE). In designing the optical system for HMD, it is considered that the optical system should have compact, high performance, and comfortable properties while user sees the picture. In order to satisfy these requirements, we applied DOE and aspheric surfaces to the lens so that correction of color and monochromatic aberrations could be obtained. Also, the design and evaluation for the optical system were carried out using the generalized model of the human eye. Finally, it was expected to fulfill all the requirements of an HMD system.

*Classification codes :* DT.010, IP.010, SM.010.