

정밀모형안을 이용한 Head Mounted Display용 렌즈계 설계

박성찬[†] · 안현경

단국대학교 첨단과학대학 전자물리학과
☎ 330-714 충남 천안시 안서동 산 29번지

(2003년 2월 17일 받음, 2003년 4월 8일 수정본 받음)

본 논문에서는 구면수차와 Stiles-Crowford 효과를 고려하여 인간의 눈을 모델링한 정밀모형안과 등가인 렌즈모듈 모형안의 설계에 관하여 논의하였고, 렌즈모듈 모형안을 적용한 Head Mounted Display(HMD)용 광학계를 설계 및 평가하였다. HMD용 광학계에서 요구되는 소형화, 고성능 및 고해상도 등의 필수조건들을 만족시키기 위해 회절광학소자와 비구면을 이용하여 색수차와 단색수차를 보정하였다. SVGA급 480,000 화소를 갖는 0.47 인치 micro-display, 플라스틱 hybrid 렌즈, 그리고 렌즈모듈 모형안으로 HMD용 광학계를 구성하였다. 설계된 광학계의 초점거리는 31.25 mm, FOV는 24H×18V×30D degrees, 그리고 전장길이는 59.1 mm이다. 결과적으로, 사용자가 편안함을 느낄 수 있는 HMD에 유용한 광학계를 얻었다.

주제어 : schematic eye, micro-display, head mounted display, virtual image, aberration.

I. 서 론

Head Mounted Display(HMD)는 머리에 장착하거나 안경처럼 사용하여 초대형 화면을 보는 듯한 효과를 낼 수 있는 휴대용 디스플레이 장치를 말한다. HMD로 구현할 수 있는 화면의 크기는 점차 확대되어 2 m 앞에서 45인치 정도의 대화면을 볼 수 있으며, 또한 양안의 시차를 이용하여 고화질의 3차원 입체 영상을 표현하는 개인용 디스플레이 장치로 발전하고 있다.

HMD는 1960년대에 Ivan Sutherland가 고안한 HMD를 시작으로 1970년에 군사용으로 개발되었으며, 1980년대 말 이후부터 의학용, 게임용, 산업용, 통신용으로 개발되고, 1990년대부터 micro-display의 발달로 인해 HMD의 크기, 형태, 용도, 성능에 있어 많은 발전이 되어왔다. TFT-LCD와 같은 박막형의 micro-display 소자와 비구면 플라스틱 렌즈를 이용한 콤팩트한 광학계, 안경형태의 소형화된 head mount, VGA에서부터 SXGA에 대응하는 해상도를 지원하는 등 지금까지 각각의 분야에서 현저한 발전을 해 왔다. HMD용 광학계의 구조는 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 광학계의 물체라고 할 수 있는 이미지 소스, 이미지 소스에서 제공되는 영상을 확대된 정립허상으로 만들어 주는 렌즈 부분과 마지막으로 상면이자 광학적 검출기의 역할을 하는 사람의 눈으로 구성되어 있다.

본 논문에서는 HMD의 구조와 이에 적용되는 기하 광학 이론에 관해 설명하고, 또한 검출기에 해당하는 사람 눈의 기하학적 구조 및 수차 특성을 고려한 정밀모형안(finite schematic eye)에 관하여 논의하겠다. 현재까지 개발된 HMD용 광학계는 인간의 눈을 완전한 상을 얻는 이상적인 광학계로 가정하고 설계되었지만, 실제로 눈은 1차 광학적인 특성이 외에도 수차특성을 갖고 있으므로 이들을 고려하여 광학계를

구성하고 설계하는 것이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 눈의 수차특성을 포함하고 있는 정밀모형안 으로부터 이와 등가인 렌즈모듈 모형안을 설정하고, 이를 이용하여 HMD용 광학계의 설계 및 성능을 평가하는 방법에 대해 논의 하고자 한다. 광학계는 필수적으로 만족시켜야 할 HMD의 기하학적인 구조 및 특성을 고려하여 설계되었고, 또한 사용자가 HMD를 착용할 때 발생하는 눈의 상하좌우 이동과 밝기에 따른 동공 크기의 자동변화를 고려하여 평가하였다.

II. HMD용 광학계의 구조와 특징

2.1. HMD의 구조

그림 1에서 보듯이 HMD의 구성요소는 이미지 소스, 광학계, head mount로 크게 3가지로 나눌 수 있다.^[1] 이미지 소스로 사용되는 micro-display는 소형화 및 고화질을 구현할 수 있는 flat panel 소자인 LCD등이 널리 이용되고 있다. 디스플

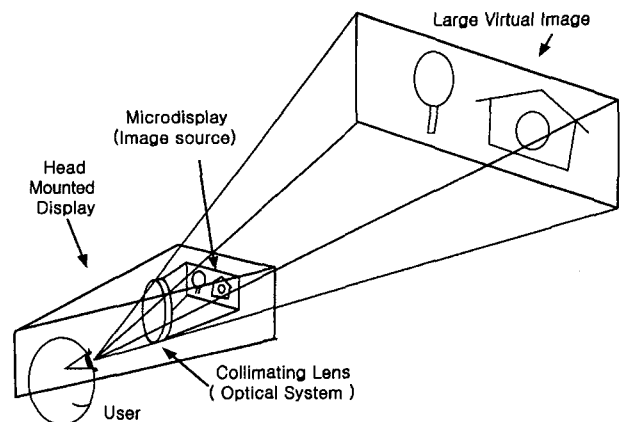


그림 1. Head mounted display의 구성도.

[†]E-mail: spark@dankook.ac.kr

레이에서 나온 정보를 확대된 정립허상으로 보이게 하는 광학계 구조는 단순확대경 계통이 일반적이고, 여기에 prism 또는 hybrid 광학계를 이용하여 소형화시키는 추세이다. Head mount 부분을 머리에 고정하는 방법에 따라 helmet형, band형, 안경형으로 나눌 수 있다.

2.2. HMD용 광학계의 기하학적인 이론

HMD용 광학계에서 시야 각(Field of View: FOV)과 해상도는 중요한 특성이다. 확대경 계통의 monocular HMD를 이용해 FOV를 논의하겠다. 그림 2에서 광학적인 FOV는 사용자가 볼 수 있는 HMD의 허상에 대응하는 각이다. 사각형 모양의 디스플레이 경우 FOV는 수직과 수평에 대응하는 시야 각 또는 대각선에 대응하는 시야 각으로, 디스플레이의 크기와 렌즈의 초점거리에 의해 결정된다. 광학적인 FOV는 다음과 같은 식으로 주어진다.^[2]

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

위 식에서 S는 디스플레이의 크기이고 F는 확대경 렌즈의 초점거리이다. 그림 2에서 디스플레이의 크기가 커지거나 렌즈의 초점거리가 짧아짐에 따라서 광학적인 FOV가 커짐을 알 수 있다. 렌즈의 직경이 매우 작고 눈동자 거리(L_e)가 상당히 큰 경우, 확대된 허상이 차단되어 전체 상을 볼 수 없다. 그러므로 렌즈의 직경이 적절히 크고, 눈동자 거리도 적절히 확보할 수 있도록 광학계를 구성해야 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 N은 전체 픽셀 수이다. 디스플레이는 정해진 면적에 고정된 픽셀 수를 가지고 있기 때문에, FOV가 크면 클수록 단위 픽셀 당 각도가 커지므로 허상의 해상도는 떨어진다. 디스플레이에서 결상 특성은 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 거리를 확보하는 이유는 안경을 착용할 공간을 제공하기 위해서이

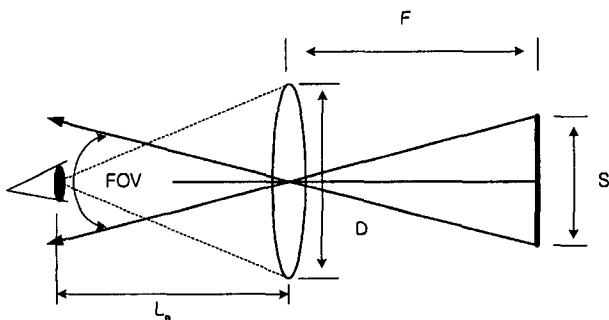


그림 2. FOV를 계산하기 위한 기하학적인 구조.

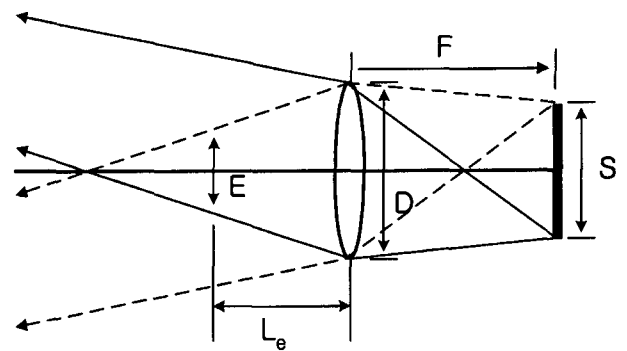


그림 3. Eye motion box(E)와 눈동자 거리(L_e)와의 관계.

다. 초점조절장치가 장착되어 있는 HMD 경우에는 안경을 착용할 필요가 없으나 시스템의 소형화에는 단점으로 작용하게 된다. 눈동자 거리의 확보 범위는 20~30 mm 정도가 적당하며 일반적으로 약 25 mm가 널리 이용되고 있다. 만약 광학계의 배율과 초점거리가 일정하면 렌즈의 유효구경은 눈동자 거리에 비례한다. 즉, 눈동자 거리가 길면 렌즈의 유효구경이 큰 것을 사용해야하나 눈동자 거리가 작으면 유효구경이 작은 렌즈를 사용해도 디스플레이의 전체 영역의 정보를 볼 수 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. 눈의 동공(pupil)의 크기는 희미한 빛에서 직경이 $\Phi 6 \sim 7$ mm 정도이고, 밝은 빛에서 $\Phi 2 \sim 3$ mm 정도이다. 그리고 양안단상을 위해 눈동자는 회전하게 된다. 이러한 조건을 고려하여, 광학계의 출사동 크기를 적절히 확보해야 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 60~70 mm가 적당하다. 평균적으로 65 mm 정도이다. 이 거리를 확보해야 HMD를 특정 사람이 아닌 많은 사람이 사용할 수 있다.

2.3. 초점 조절

초점거리와 micro-display의 위치에 따라 허상의 위치가 결정된다. 만약 렌즈의 초점거리에 micro-display가 위치하면 확대된 허상은 무한대에 나타나게 된다. 이때 사람의 눈은 무한대에 위치한 상에 수정체의 초점조절 능력을 이용하여 망막에서 선명한 상을 형성하게 된다. 만약 눈동자 거리가 안경을 이용할 만큼 충분하면 확대된 허상이 무한대에 위치하도록 초점거리를 고정시킬 수 있고, 초점조절장치가 필요 없기 때문에 HMD의 크기와 무게를 줄일 수 있다. 그러나 눈동자 거리가 안경을 이용할 수 없을 만큼 짧다면, 근시나 원시를 가진 사람들을 위해 HMD 내부에 초점조절장치를 장착해야 한다.

그림 4에서 볼 수 있듯이, 초점조절은 micro-display에 가까이 또는 멀어지게 렌즈를 이동함에 의해 조절을 할 수 있다. 즉, 렌즈의 초점거리를 기준으로 하여 micro-display의 위치를

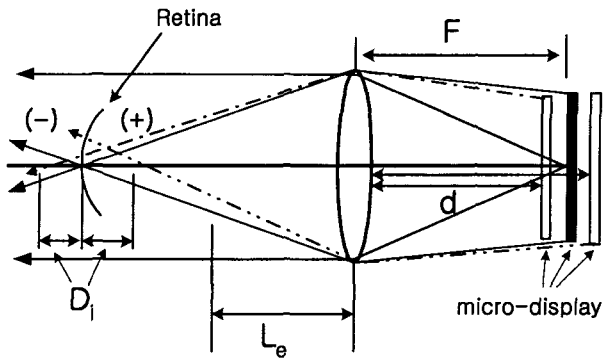


그림 4. Micro-display의 위치와 확대된 허상과의 관계.

렌즈의 초점거리보다 가깝게 할 때 근시인 눈을 보상할 수 있고, micro-display의 위치를 렌즈의 초점거리보다 멀게 할 때 원시인 눈을 보상할 수 있다.^[2]

III. 눈의 구조 및 모형안

3.1. 눈의 기하학적인 구조

인간의 눈은 여러 개의 굴절면과 가변 굴절률 매질의 렌즈로 구성되어 있으므로 단순한 방정식이나 모형안에 의해 쉽게 설명할 수 없는 복잡한 생물학적 시스템이다. 또한 넓은 시야(FOV)를 가진 고급 비디오 카메라, 자동초점(A/F) 및 자동노출(A/E) 광학계, 그리고 RGB 3색 채널 및 고감각의 흑백 채널을 가진 가변 분해능 센서에 비유할 수 있는 광학적 시스템이다. 그림 5는 광학적으로 중요하게 다루어지는 눈의 명칭 및 단면도를 보여준다.^[3]

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 분해능이 저하되어진다. 만약 명시거리인 250 mm에 위치한 물체에 초점조절이 되었을 때, 동공 직경 4 mm에서 수정체의 전후 곡률 반경은 6 mm 정도로 거의 같다. 사람의 눈이 무한 물체에

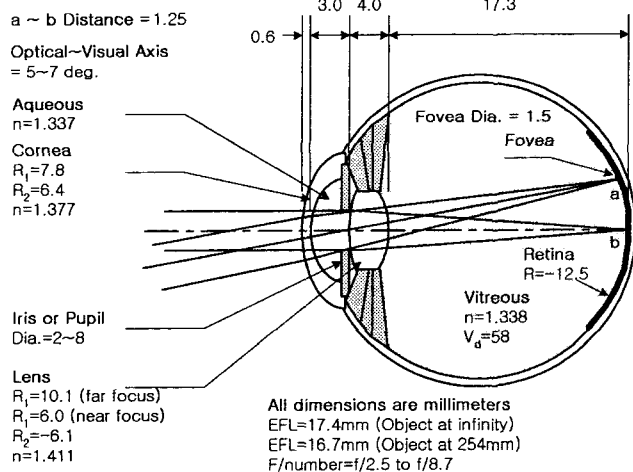


그림 5. 사람 눈의 명칭 및 단면도.

서 유한 거리에 위치한 물체로 초점조절을 할 때 눈의 초점거리는 짧아져서 일정한 위치에 있는 망막에 상을 맺히게 한다.

3.2. 근축모형안 과 정밀모형안

인간의 눈을 모델링한 모형안은 근축 모형안(paraxial schematic eye)과 정밀모형안(finite schematic eye)로 크게 분류된다. 근축모형안이란 근축 광학이 적용되는 모형안이다. 따라서 수차나 비축광선에 대하여는 정확한 예측이 불가능하나, 근축영역에서 상거리, 상크기, 배율, 망막조도, 면반사, 입사동, 출사동, 그리고 수정체가 조절할 때 주요점의 이동 등과 같은 것을 알 수 있다.

근축 모형안에 관하여 많은 연구가 이루어 졌으나, 근대의 정량적인 근축 모형안은 1851년 Listing에 의해 고정된 굴절률을 가진 균일한 매질의 구면으로 이루어진 모형안이 고안되었고, 그후 다양한 모델이 개발되었다. 근축 모형안들은 구면으로 만들어졌으나 초점거리, blur circles, 상 위치, 상의 크기 에 대한 근축 계산이 강조됨으로 인하여 이러한 모델들은 수차를 무시하였다. 대표적인 근축 모델로 1924년 Gullstrand의 모형안을 들 수 있다. 이 모형안은 두 개의 굴절률을 가지는 grin 렌즈의 개념을 도입했고, 6개의 면으로 구성되어 있다.^[4]

정밀모형안은 4면 이상의 비구면을 가지고, 근축모형안의 광학적인 성질을 포함하며, 근축모형안보다는 상대적으로 큰 망막 상 크기와 수차, 회절, Stiles-Crawford 효과 등에 의한 상의 특성을 예측 할 수 있는 모형안이다. 또한 안구의 시기능을 예측하고, 안광학계 각각의 광학적 요소가 안구 전체의 시기능 변화에 어떠한 영향을 주는지 예상하기 위해 제안된 것이다. 시기능은 단색수차와 색수차, 횡조점이동, 편심, 노안에 따른 수정체의 손상, 망막 위치의 불일치, 선명하지 않은 상에 의한 눈의 피로나 혼란 등으로 제한을 받게 된다. 안구의 각면의 곡률, 중심두께, 비구면도, 구면수차, Stiles-Crawford 계수 등이 평균값으로 측정되지만, 시기능의 제한 때문에 상대적으로 큰 표준편차를 갖게 된다. 또한 광학계는 광학요소 간의 종속적인 관계에 의하여 구성되므로 독립적으로 측정된 평균값을 가지고 안구 고유의 광학적 특성을 가지는 모형안을 만드는 것은 매우 어렵다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 측정값들을 구속조건으로 최적화의 방법을 통하여 얻은 정밀 모형안이 제안되었다.^[5,6]

본 논문에서 이용하게될 정밀모형안은 한국인 정시 75 정시안(emmetropia)을 대상으로 측정된 평균 측정값을 기초 설계값으로 하여 명소시(photopic vision)에서 동공 직경이 4 mm 일 때 측정점을 기준으로 설계되었다.^[5] 최적화된 정밀모형안은 안구 광학면의 곡률, 두께, 비구면도들이 안광학계에 최적의 성능을 갖도록 설계된 것이다. 안광학계의 특성에 대한 목표 값이 정해진 상태에서 안구의 곡률, 두께, 비구면도를 결정하게 된다. 목표 값으로 눈의 1차 광학적인 특성, 구면수차 및 Stiles-Crawford 효과가 사용되었다. 표 1은 최적화 과정으로부터 얻은 모형안의 설계데이터이다. 제안된 정밀모형안은 Navarro의 모형안에 비해 각막전면과 후면의 곡률반경이 작고, 수정체 전면과 후면의 곡률반경의 절대값이 작다. 곡률반경과 중심두께가 한국인 75 정시안을 기초로 하여 설계되었고, 한

표 1. 정밀모형안의 설계데이터(단위: mm)

NO	곡률 반경	두께	굴절률	Abbe 수
OBJ	INFINITY	2000	(d-line)	
1	7.535 비구면 : $K = -0.28$	0.5745	1.37638	51.27
2	5.984 비구면 : $K = -0.18$	3.3780	1.33605	47.10
STO	7.983 비구면 : $K = -4.02$	3.4040	1.41984	49.44
4	-5.358 비구면 : $K = -1.86$	15.7150	1.33566	51.81
IMG	INFINITY	0.00	AIR	

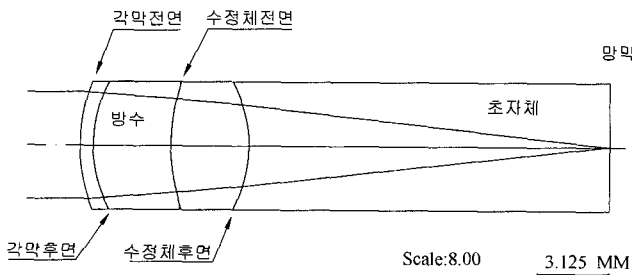


그림 6. 정밀 모형안의 구성도.

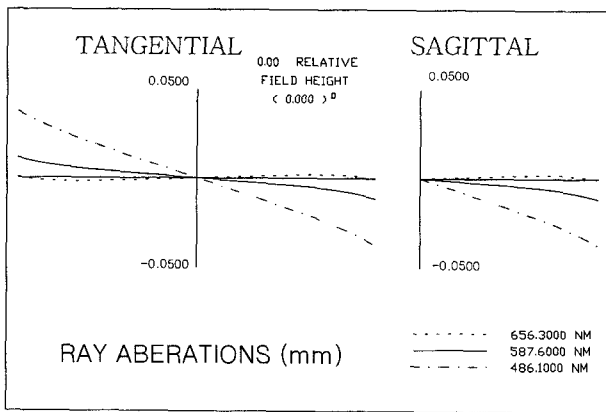


그림 7. 정밀 모형안의 횡광선수차 특성.

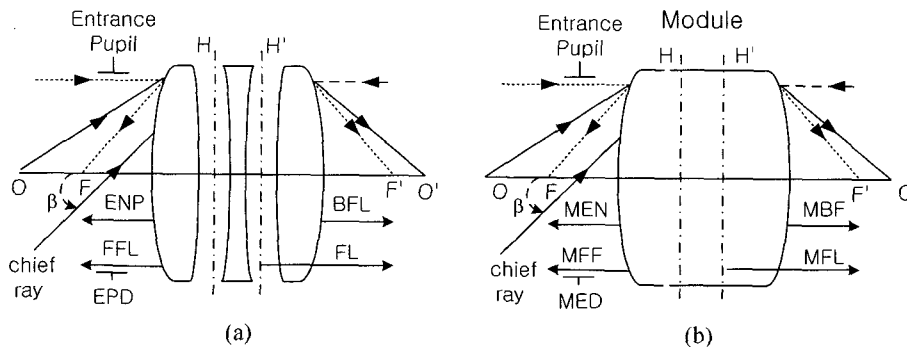


그림 8. 실제 광학계(a)와 렌즈모듈(b)의 등가관계.

국인 눈의 초점거리와 안축 길이가 외국인 것보다 약간 짧은 것으로 보고되었다.¹⁶⁾

정밀모형안의 MTF 특성을 살펴보면, 눈의 분해능이 30 cycles/degree가 되면 시력이 1.0인 눈을 표현하는데, 모형안에 의해 설계된 것은 32 cycles/degree이므로 시력이 1.0인 안구임을 알 수 있다. 그림 6은 제안된 정밀모형안의 구성도이고, 그림 7은 수차특성이다. 본 논문에서는 이러한 특징을 갖는 모형안을 렌즈모듈 개념을 적용하여 단순화하고, 이와 등가인 렌즈모듈 모형안으로 전환하여 이것을 HMD용 광학계 설계에 적용하고자 한다.

IV. 렌즈모듈 모형안 설계

렌즈 모듈은 곡률, 두께 및 굴절률과 같은 변수를 이용하여 광학계의 특성을 기술하는 대신 임의의 물상점(conjugates)에서 주어진 Eikonal 함수의 특성에 의해 주어진다. 렌즈모듈의 파라미터는 초점거리(MFL), 전초점거리(MFF) 후초점거리(MBF), 배율(MRD), 입사동 거리(MEN), 입사동의 직경(MED), field의 크기(MFD), 기준파장(MWL) 및 3차수차량으로 주어지므로 상세한 설계 데이터 없이도 복잡한 광학계를 모델링하여 설계는 물론 평가하는 것이 가능하다. 광학계의 고차수차를 무시한다면, 광학계의 특성은 1차량과 3차수차량으로 정확하게 표현되므로 임의의 실제렌즈의 1차량과 3차수차량을 렌즈모듈에 대응시키면 두 광학계는 3차수차 특성 내에서 서로 등가(equivalent)의 관계가 성립한다. 따라서 그림 8과 같이 실제 광학계와 동일한 1차량 및 3차 수차 특성을 갖는 두꺼운 렌즈모듈로 대체하는 것이 가능하다.¹⁷⁾

앞 절에서 제안된 정밀모형안과 등가인 렌즈모듈을 설계하기 위해서는 우선 모형안과 동일한 두께 및 1차량을 모듈에 입력한다. 렌즈모듈은 1차량과 3차 수차량만 다루는데, 3차 수차는 근축 영역에서 우세하므로 광학계의 구경(aperture)과 상 크기(image field size)를 작게 설정하는 것이 바람직하다.

본 연구에서 고차수차를 무시하고, 표 1과 그림 7에서 주어진 정밀모형안의 1차량과 구면수차 및 Stiles-Crowford 효과를 이용하여 등가 관계에 있는 렌즈모듈 모형안을 설계하였다. 표 2는 정밀모형안과 등가인 렌즈모듈 모형안의 설계 파라미터들을 열거하고 있다. 표 2에서 MFL, MFF, MBF, MEN, MRD는 주요면과 공액점의 위치를 결정한다. 이때 모듈의 MED와

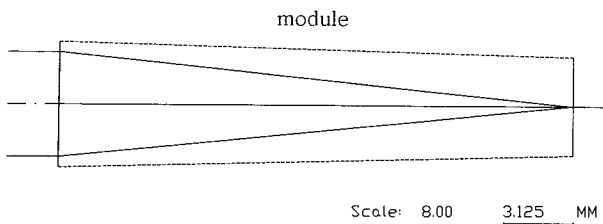


그림 9. 정밀 모형안과 등가인 렌즈모듈 모형안의 구성도.

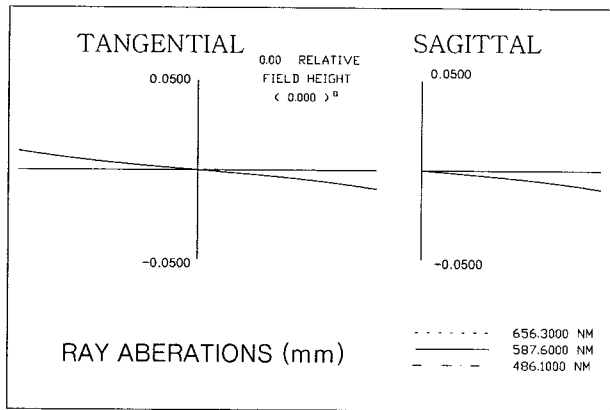


그림 10. 렌즈모듈을 이용한 모형안의 횡광선수차.

표 2. 정밀모형안과 등가인 렌즈모듈 모형안의 설계 데이터(단위: mm)

모형안		Module	
EFL	15.59	MFL	15.59
FFL	-13.853	MFF	-13.853
BFL	-0.1744	MBF	-0.1744
RED	0.0078	MRD	0.0078
EPD	4.7	MED	0.5
ANG	0	MFD	0
구면수차		W_{040}	0.000021

MFD의 값은 주어진 광학계의 구경 및 field와 정확히 일치할 필요는 없다. MED와 MFD는 scale factor로 작용하므로 가능한 근축 영역의 값을 이용하고 이 값을 확대 또는 축소에 의해서 실제 값에 적용할 수 있다.^[8] 설계된 모듈의 3차구면수차(W_{040})는 축상 물체점에서 출발하여 pupil의 가장자리를 지나는 주변광선과 기준광선과의 최대 OPD(optical path difference)를 파장(λ_d)단위로 측정된 값이다. 그림 9는 렌즈모듈 모형안의 구조이고, 그림 10은 렌즈모듈 모형안의 수차특성이다. 그림 6, 그림 7과, 그림 9, 그림 10, 그리고 표 2를 비교해 보면 정밀모형안과 렌즈모듈을 이용한 모델링에서 색수차를 제외하고 광학계의 1차광 및 구면수차가 동일함을 알 수 있고, 이 결과를 HMD용 광학계 설계에 적용 하고자 한다.

V. 모형안을 이용한 HMD용 광학계 최적설계

5.1. 설계목표 사양

HMD 시스템을 소형화에 시킴에 따라 micro-display 및 광학계의 크기가 점차 작아지는 추세이므로, 배율을 크게 하여

대화면을 구현할 수 있는 광학계가 요구된다. 또한 기존의 광학계가 검출기인 사람의 눈을 수차가 없는 이상적인 렌즈로 간주함에 따라 간과되었던 눈에 의한 수차의 영향을 고려한 광학계를 설계하는 것이 필요하다. 이러한 특징들과 HMD의 기하학적 매개변수인 렌즈의 초점거리, FOV, 출사동의 직경, 그리고 눈동자 거리등을 고려하여 광학계의 설계목표 사양, 디스플레이 규격, 그리고 성능평가 기준을 결정하고자 한다.^[9]

광학계의 초점거리는 25~30 mm 정도가 적절하고, 시야의 범위는 디스플레이의 해상도와 눈의 분해능을 고려하여 25~30°H×20~25°V 정도로 설정하였다. 이 범위 내에서 광학계를 통해 확대된 정립허상을 볼 수 있다. 광학계는 양면 비구면과 회절광학소자를 적용한 hybrid 플라스틱 렌즈를 채택하였다. 눈동자 거리의 범위는 안경을 착용하기 위해 20~30 mm 정도의 공간을 설정하였고, 출사동의 직경의 크기는 양안단시를 위한 눈동자의 회전과 눈의 좌우상하 이동을 고려하여 $\Phi 6\sim 8$ mm로 설정하였다. 광학적인 검출기인 사람의 눈은 결상 부분인 외를 중심으로 분해능이 현격하게 떨어지므로 전체 field에 대해 동일한 분해능을 갖지 않는다. 따라서 각각의 field에 대한 성능평가기준을 다르게 설정하였다.

이미지 소스인 0.47인치 micro-display의 크기는 9.6H×7.2V×12.0D mm이다. 따라서 대각선 길이의 1/2에 해당되는 6.0 mm가 회전대칭성 광학계의 물체크기로 사용된다. Micro-display의 포맷은 PC방식의 SVGA급 800H×600V 화소이며, 단일 화소의 크기는 12.0H×12.0V μ m이다. 이 값을 선형공간 주파수로 환산하면 약 40 lp/mm에 해당된다. Micro-display는 픽셀 사이에 black zone을 가지고 있다. 큰 배율을 갖는 HMD에서, 확대로 인한 픽셀구조의 희미한 잔상이 보일 수 있다. 이러한 현상을 제거하기 위해서 화질에 영향을 주지 않는 범위에서 전체의 상을 blur 하게 만든다. 이러한 기술을 depixelization이라고 한다. Depixelization은 holographic grating, 복굴절을 이용한 quartz 등을 이용하여 구현 할 수 있다.

본 연구에 적용할 모형안은 눈의 수차특성을 고려한 정밀모형안으로서 초점거리는 15.59 mm, 전장길이가 23.07 mm이다. 1차 및 3차 구면수차 특성 내에서 정밀모형안과 등가인 렌즈모듈을 설정하고, 이를 HMD용 광학계에 적용하였다. 즉 등가인 렌즈모듈 모형안으로 인간의 눈에 대한 광학계를 대체 하였다. 따라서 눈의 망막이 광학계의 최종적인 상면이 된다. 사람의 눈을 완벽한 결상계가 아닌 수차를 포함하는 광학계로 설정하고 HMD용 광학계를 설계함으로써 인간의 눈에 보다 적합한 HMD를 얻을 수 있다. 또한 micro-display에서부터 출사동의 위치까지의 거리를 최소화하여 시스템을 소형화하여야 한다. 본 연구에서는 광학계의 전장길이를 55~60 mm로 설정하였다. 광학계의 목표사양과 다음절에서 논의될 최적설계 사양을 비교한 것이 표 3이다.

5.2. 최적설계 개념

HMD용 광학계를 설계하기 위해 meniscus형 플라스틱 hybrid 렌즈 1매를 이용하였다. 그리고 비구면화를 통해 수차를 보정하여 결상 성능을 향상시키고, 색수차 보정을 위해 회절광학소자를 렌즈에 적용시켰다.^[10,11] 광학계를 정 방향으로

표 3. HMD용 광학계의 목표사양 및 설계사양(단위: mm)

항목	목표 사양	설계 사양	
Lens의 EFL	25~30	31.25	
FOV (deg.)	25~30H × 20~25V	24H × 18V	
눈동자 거리	20~30	25	
동공 직경	Φ4~6	Φ4~6	
모형안의 EFL	15.59	15.59	
광학계의 전장	55~60	59.1	
허상 크기	40~50" @2 m	42 인치	
Display 크기	9.6H × 7.2V × 12D	± 6.0	
렌즈구성	Hybrid 렌즈 1매	비구면+DOE	
왜곡수차(%)	±3% 이하	-3 이하	
	0.0F	40% at 50 lp/mm	45% 이상
망막에서의 MTF (동공직경 Φ4)	0.4F	40% at 35 lp/mm	50% 이상
	0.7F	40% at 25 lp/mm	57% 이상
	0.9F	40% at 20 lp/mm	74% 이상
	1.0F	40% at 15 lp/mm	70% 이상

구성하여 micro-display를 물체로, 눈의 망막을 상면으로 취급 하였으며, 인간의 눈을 렌즈모듈 모형안 렌즈로 대체하고 최적화 설계를 하였다. 설계시 설정한 조리개의 크기는 동공의 크기를 포함하고 있으며, 출사동의 크기와 위치는 성능평가 할 때 중요하게 고려된다. 고차수차를 보정하기 위해 사용한 비구면 방정식은 다음과 같다.^[12]

$$Z = \frac{h^2/r}{1 + \sqrt{1 - (1+k)h^2/r^2}} + Ah^4 + Bh^6 + Ch^8 + Dh^{10} + Eh^{12} + Fh^{14} + Gh^{16} + Hh^{18} \dots \quad (3)$$

여기서, $h = \sqrt{x^2 + y^2}$ 는 x-y 좌표에서 광축으로부터 광선의 입사고까지 수직거리, $k = -e^2$ 는 conic 상수, 그리고 e 는 이심률 (eccentricity)이다.

회절광학소자를 이용하여 파면수차를 보정할 수 있다. 식 (4) 에서 주어진 회절광학소자의 위상함수에서, r^2 의 위상계수 C_1 은 회절광학소자의 굴절능에 해당되며, r^4 이상의 위상계수 C_2, C_3, C_4, \dots 에 의해 파면의 모양이 결정되므로 이들 계수를 적절히 조절하여 렌즈의 파면수차를 보정할 수 있다. 회절광학소자를 이용하여 설계할 때, 고려해야 할 점으로는 회절에 의한 굴절능을 되도록 작게 하여 제조오차 및 온도변화에 의한 초점이동이 없도록 해야한다. 광축에 대해 회진대칭성 특성을 갖는 회절렌즈의 위상함수 $\Phi(r)$ 은 다음과 같이 주어진다.

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

여기서, r 은 광축으로부터의 반경이다.

렌즈의 매질은 Zeonex사 E48R 플라스틱 재료를 사용하였다. 광학유리 대신에 플라스틱 재료를 사용하는 이유는 가볍고, 비구면과 회절광학소자의 형상을 새기기가 용이하고, 복제가 쉬워 대량생산이 가능하고 가격이 저렴하다. 그러나 플라스틱의 굴절률은 낮고 품종이 다양하지 못하다. 또한, 온도변화에 대한 열팽창계수와 굴절률의 변화가 매우 크다. 플라스틱 광학재

료를 사용하여 광학계를 설계 할 때 주의해야 할 점은 비구면과 회절광학소자의 형상이 매끄러워지도록 해야하고, 플라스틱 재료는 열에 대해 상당히 민감함으로 중심과 주변의 두께 차이가 크지 않도록 해야 한다.

5.3. 설계결과 및 평가

그림 11은 최적 설계된 HMD용 광학계의 구성도 이고, 표 4는 설계 데이터이며, 표 3은 설계 사양과 목표사양을 비교 열거하고 있다. 설계된 광학계의 기하학적인 특성이 목표사양을 모두 만족하는 것을 알 수 있으며, 표 4에서 회절광학소자의 위상계수 C_1 은 거의 0에 가까우므로 회절소자의 굴절능이 매우 작음을 의미한다.

그림 12는 동공 직경이 Φ4 mm에서 광학계의 수차특성을 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 전체적으로 field 수차가 안정적이다. 그러나 사람 눈의 위치가 축에서 벗어나면, field 수차 중 왜곡수차가 큰 영향을 받아 상의 찌그러짐이 발생하지

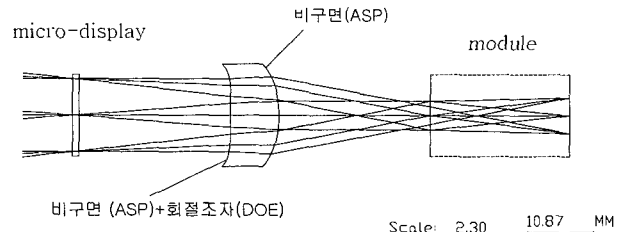


그림 11. 최적 설계된 HMD용 광학계의 구성도.

표 4. 최적 설계된 HMD용 광학계의 설계 데이터(단위: mm)

NO	곡률 반경	두께	Glass
OBJ	INFINITY	0.0	
1	INFINITY	1.1	BK7_Schott
2	INFINITY	25.0	
	193.49	8.0	
3	DOE + 비구면 : K = -3.94e+02 C ₁ = 0.7784e-05, C ₂ = 0.1812e-06 C ₃ = -0.4233e-08, C ₄ = -0.6354e-10 C ₅ = 0.2675e-11, C ₆ = 0.3466e-13 C ₇ = -0.9769e-15 A = -0.2107e-05, B = 0.6111e-08 C = -0.3672e-09, D = 0.2508e-11 E = 0.2029e-13, F = -0.5042e-15 G = -0.1333e-19, H = -0.8243e-22		Zeonex_E48R n _c = 1.52713 n _d = 1.52996 n _e = 1.53226 n _f = 1.53662
4	-18.79	25.0	
	비구면 : K = 3.3227 A = -0.3546e-04, B = -0.3976e-06 C = 0.1662e-07, D = 0.2820e-10 E = -0.1767e-11, F = 0.1767e-13		
STO	INFINITY	0.0	
6	INFINITY	23.0715	Lens Module
	MFL = 15.5854, MRD = 0.0078 MFF = -13.8528, MBF = -0.1744 MED = 0.5, MFD = 0.1716 C ₁₁ = 0.21e-06 (구면수차)		
IMG	INFINITY	-0.037	

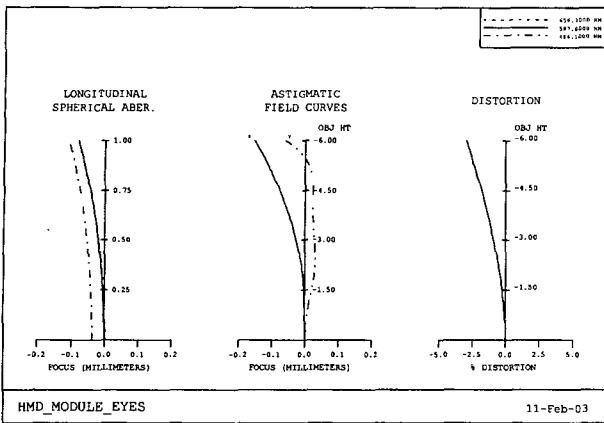


그림 12. 최적 설계된 HMD용 광학계의 수차.

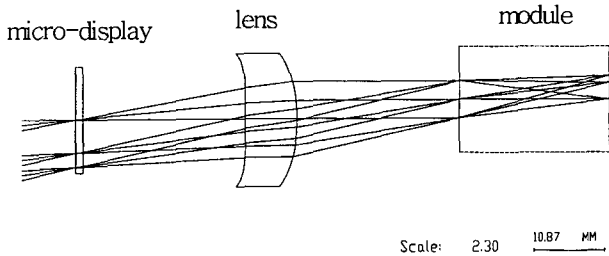


그림 13. 동공 직경 $\Phi 4$ mm에서 편심(YDE+2.5)에 따른 구성도.

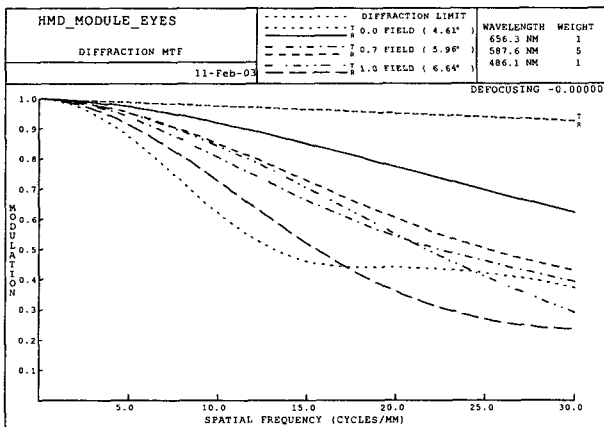


그림 14. 동공 직경 $\Phi 4$ mm에서 편심(YDE +2.5)에 따른 MTF 특성

만 허용할 수 있는 범위이며, 구면수차와 상면만곡에 대해서는 안정적이다. 사람 눈의 망막이 곡면이라는 사실은 어느 정도의 상면만곡은 망막에서 보상할 수 있음을 의미한다. 회절 광학소자에 의한 종색수차 보정은 구면수차 곡선에서 찾아 볼 수 있고, 왜곡수차는 -3% 이내로 보정되어있다.

HMD 사용 시 발생하는 몇 가지 현상에 대해 시뮬레이션을 통해 평가한 결과는 다음과 같다. 그림 11의 광학계 구성도에서 조리개를 광축에 대해 상방향으로 +2.5 mm만큼 편심(YDE +2.5 mm)을 준 것이 그림 13이고, 동공 직경 $\Phi 4$ mm에서 조리개 위치의 편심에 따른 MTF 특성을 나타낸 것이 그림 14이다. 조리개 위치의 편심에 따른 MTF 값은 전 Field에 대해

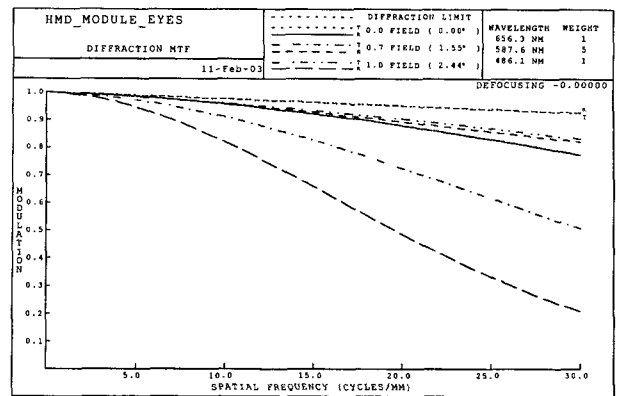


그림 15. 동공 직경 $\Phi 4$ mm에서 광학계의 MTF 특성.

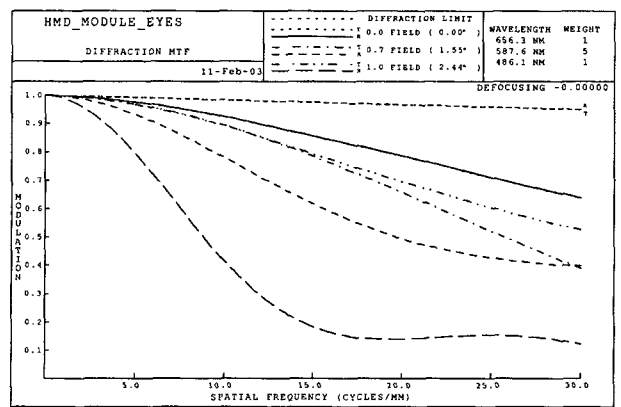


그림 16. 동공 직경 $\Phi 6$ mm에서 광학계의 MTF 특성.

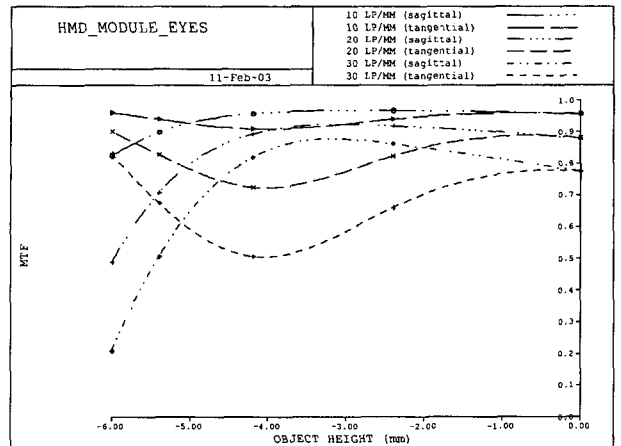


그림 17. 물체의 크기에 따른 MTF 변화($\Phi 4$ mm).

30 lp/mm에서 30% 이상을 만족시킨다.

다음으로, 동공의 크기가 $\Phi 4 \sim \Phi 6$ mm 변화에 따른 MTF 특성의 변화를 평가한 결과가 그림 15, 그림 16이다. 일반적인 눈의 동공 크기는 $\Phi 4$ mm 정도이고 이때의 MTF 곡선은 상당히 안정적이다. 그러나 설계 시 $\Phi 6$ mm 정도까지 고려해주는 이유는 눈의 동공이 회전을 하고, 사람마다 동공의 크기가 다를 수 있으며 HMD를 사용할 때 초점 조절을 위해 동공의 움직임을 고려해야 하기 때문이다. 그림 17은 공간주파

수 10, 20, 30 lp/mm에서, field의 크기에 따른 MTF 특성의 변화를 보여준다. 전체적으로 만족할 만한 성능을 가지고 있다.

결과적으로 설계된 광학계는 HMD에서 요구하는 조건들을 모두 만족를 시켰으며, micro-display의 해상도, 사람 눈의 분해능 그리고 기하학적인 특성을 고려한 광학계의 성능평가 결과 충분한 성능을 얻었다. HMD 사용 시 발생 할 수 있는 눈의 상하좌우 이동과 밝기에 따른 동공의 크기변화를 시뮬레이션 한 결과 만족할 만한 성능을 얻었다.

VI. 결 론

본 논문에서는 HMD의 구성요소인 이미지 소스, 광학계, 그리고 사람의 눈 사이에 중요한 상호관계를 논의하였고, HMD용 광학계에서만 볼 수 있는 기하학적인 구조와 특징을 알아 보았다. 즉 FOV, 눈동자 거리, eye motion box, 결상특성, 그리고 디스플레이의 해상도 및 눈의 특성들 사이에 상호관계를 이해함으로써 사용자 중심의 HMD를 설계할 수 있는 기본지식을 제공하였다. 추가적으로 광학적인 검출기인 사람 눈을 모델링한 정밀모형안과 등가인 렌즈모듈 모형안에 대해 논하였고, 이를 이용하여 광학계를 설계 및 평가하였다.

확대경 계통의 단일렌즈에 회절광학소자를 채용하여 색수차와 파면수차를 보정하였고, 고성능화를 위해 양면을 비구면화하였다. 사람의 눈과 관련된 광학계 설계 시 광학계를 거꾸로 구성을 하던 전통적인 방법에서 벗어나 디스플레이, 광학계, 그리고 렌즈모듈 모형안 순으로 구성하여 망막에서의 결상 특성을 평가하였다. 또한 밝기에 따른 동공의 크기 변화와 HMD를 사용할 때 사람 눈의 상하좌우이동으로 인한 광학계의 성능저하 정도를 평가한 결과 만족할 만한 성능을 얻었다. 결과적으로 최적 설계된 광학계는 HMD의 요구조건에 해당되는 인간의 눈과 조화, 소형화 및 고정세화를 만족시켰으며, 사용자가 좀 더 편안함을 느낄 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 2003학년도 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. 101- 115.
- [4] P. Mouroulis, *Visual Instrumentation* (McGraw-Hill, New York, 1999), pp. 277- 295.
- [5] 김상기, 박성찬, “구면수차를 이용한 정밀모형안의 최적화,” 한국광학회지, 제 13권 3호, pp. 266-271, 2002.
- [6] 김상기, 구면수차를 이용한 정밀모형안의 최적화 설계(단국대학교 대학원 박사학위논문, 2002), pp. 78-104.
- [7] 박성찬, 김영식, “렌즈 모듈을 이용한 광학계 설계 I: 줌렌즈의 First Order 최적설계,” 한국광학회지, 제 8권 2호, pp. 81-87, 1997.
- [8] Optical Research Associates, CODE-V Reference Manuals Ver. 8.4, (1999).
- [9] 박성찬, “회절광학소자를 이용한 Head Mounted Display용 광학계 설계,” 한국광학회지, 제 12권 6호, pp. 512-518, 2001.
- [10] W. C. Sweatt, “Achromatic triplet using holographic optical elements,” *Appl. Opt.*, vol. 16, no. 5, pp. 1390-1391, 1977.
- [11] D. Faklis and G. Michael Morris, “Achromatic Imaging with Combinations of Holographic and Conventional Lenses,” *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 3, pp. 53-57, 1986.
- [12] M. Young, “Zone Plates and Their Aberrations,” *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 62, no. 8, pp. 972-976, 1972.

Lens system design for head mounted display using schematic eyes

Sung Chan Park[†] and Hyun Kyoung An

Electro Physics Major, School of Advanced Sciences, Dankook University, Cheonan 330-714, KOREA

[†]E-mail: scpark@dankook.ac.kr

(Received February 17, 2003, Revised manuscript received April 8, 2003)

We discussed the design of lens module schematic eyes equivalent to finite model eyes, which are used to model the human eye based on spherical aberration and Stiles-Crowford effect. The optical system for head mounted display (HMD) is designed and evaluated using lens module schematic eyes. In addition to a compact HMD system, an optical system with high performance is required. To satisfy these requirements, we used diffractive optical elements and aspheric surfaces so that the color and monochromatic aberrations were corrected. The optical system for HMD is composed of 0.47 inch micro-display of SVGA grade with 480,000 pixels, a plastic hybrid lens for the virtual image, and the lens module schematic eyes. The designed optical system fulfills the current specifications of HMD: such as, EFL of 31.25 mm, FOV of 24H×18V×30D degrees, and overall length of 59.1 mm. As a result, we could design an optical system useful for HMD; the system is expected to be comfortable while the user wears it.

OCIS Codes : 080.1010, 080.3620, 120.2040, 220.4830, 330.2210.