J. Korean Oph. Opt. Soc.
Vol. 13, No. 4, pp. 83-88, December 2008

HMD용 회전 비대칭 비구면 프리즘 렌즈 설계

박승환 · 이동희*
을지대학교 보건과학대학 의료공학과
*을지대학교 보건과학대학 안경광학과
투고일(2008년 10월 30일), 수정일(2008년 11월 15일), 게재확정일(2008년 12월 9일)

목적: HMD를 구성하는데 사용되는 회전 비대칭 비구면 프리즘 렌즈의 설계. **방법**: 먼저 사용자의 요구 스펙을 분석하여 프리즘 렌즈의 모양을 기하학적으로 캐드를 사용하여 그려서 설계에 필요한 각 면과의 거리 등 필요한 초기 데이터를 얻었다. 이 데이터를 기본으로 해서 광학설계 프로그램인 Code V를 사용하여 회전 비대칭 비구면 계수를 중요 변수로 하여 최적화를 진행하였다. DTM 가공에서 단가를 줄이기 위해 프리즘 렌즈의 3면 중에서 영상소자 쪽의 투과면은 평면으로 두고 최적화하였다. **결과**: 영상소자 12 mm×9 mm에 대해 유한광선 수차량 15 μm, 왜곡수차량 0.5%, 36 lp/mm에서 0.3 이상의 MTF 값을 갖는 회전 비대칭 비구면 프리즘 렌즈를 설계하였다. **결론**: HMD를 구성하는데 사용되는 프리즘 렌즈를 설계하였다. 설계된 프리즘 렌즈는 영상소자 12 mm×9 mm에 대해 유한광선 수차량 15 μm이고, 왜곡수차량 0.5%인 광학적 성능을 가지며, 36 lp/mm에서 0.3 이상의 MTF 값을 갖는 광학계가 되었다.

주제어: HMD, 회전 비대칭 비구면, 프리즘 렌즈, OLED, LCD

서 론

관찰자 눈 가까이 위치하는 LCD 또는 OLED 영상소자를 통하여 입체영상 또는 확대된 영상을 볼 수 있도록 구성된 헤드 마운트 디스플레이(Head Mount Display)는 차세대 영상기기로 향후 디스플레이 시장을 주도할 것으로 판단된다[1]. 헤드 마운트 디스플레이의 광학 시스템은 LCD 또는 OLED 영상소자의 화상 정보를 관찰자의 전방에 확대된 허상으로 나타나도록 하는 것으로, 구성요소의 배치 구조에 따라 다양하게 구성될 수 있다. 일반적으로 사용되는 광학 시스템은 Fig. 1과 같이 화상 정보를 나타내는 LCD 또는 OLED, 여러 매의 렌즈로 구성되는 접안렌즈부, 조명장치, 반사거울 등이 배치되는 구성을 갖는다[2].

그러나 상기와 같은 구성을 갖는 종래의 광학 시스템은 그 구성이 간단하여 제작비가 저렴하다는 장점은 가지고 있으나, 대화면을 실현하기 위해서 접안렌즈부 중심 두께를 두껍게 구성해야하기 때문에 깊은 설치공간이 필요하고 헤드 마운트 디스플레이 장비로서는 중량적으로 너무 무거워지는 등의 단점이 있다.

이러한 단점을 극복하기 위해 일본의 올림푸스 광학에서는 회전 비대칭 비구면 프리즘[3] 형태의 헤드 마운트 디스플레이용 광학 부품을 개발하여 미국 이매진사(eMagin Co.) 등을 통하여 세계 시장에 공급하고 있는 실정이다.

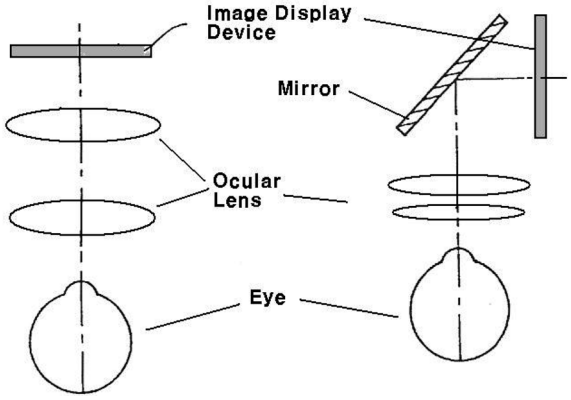

Fig. 1. Old structure of HMD[2].

이 프리즘은 삼각프리즘 형태에 3개의 반사면으로 구성되어있는데 제 1면은 눈으로의 투과면 겸 전반사면, 제 2면은 반사면, 제 3면은 LCD 또는 OLED 영상소자 화면에서 발산하는 영상 광선의 입사면으로 구성된다.

올림푸스가 특허권[3]을 가지고 2015년까지 세계시장에 거의 독점적으로 HMD용 회전 비대칭 비구면 삼각 프리즘 부품을 공급 할 것으로 예상된다. 그렇지만 2015년 이

교신저자 연락처: 이동희, 461-250 경기도 성남시 수정구 양지동 212 을지대학교 보건과학대학 안경광학과
TEL: 011-9785-4132, FAX: 031-740-7365, E-mail: dhlee@eulji.ac.kr

후의 시장에 대해 적극적으로 참여하기 위해서는 독자적인 국내 개발이 반드시 필요하게 된다.

회전 비대칭 비구면 프리즘 렌즈 설계 이론

비대칭 비구면 프리즘 렌즈의 응용의 한 예는 Fig. 2, 3과 같은 휴대용 디스플레이 장치[4]이다. 기존 모니터 혹은 프로젝터로 스크린에 투사하는 방식의 시뮬레이터의 영상 재현장치를 개별 HMD방식의 디스플레이 소자용 회전 비대칭 비구면 삼각 프리즘 렌즈를 적용한 휴대용 디스플레이 영상 재현장치로 대체할 경우 휴대가 가능하고 다른 사람의 업무에 방해하지 않으면서 시뮬레이션 영상이 사용자의 눈 전방 안면에 선명하게 나타나기 때문에 보다 큰 시각적 효과가 있는 정보 전달이 가능하게 된다.

또한 Fig. 3과 같은 장비로 양안에 시용할 경우는 입체감이 있는 정보전달을 구현할 수도 있다.

이러한 부품의 설계에 이용되는 비구면 방정식과 회전 비대칭 비구면 방정식은 아래와 같다.

비구면(aspherical surface) 방정식

$$z = \frac{cr^2}{1+\sqrt{1-(1+k)c^2r^2}} + A_4r^4 + A_6r^6 + A_8r^8 + A_{10}r^{10} \quad (1)$$

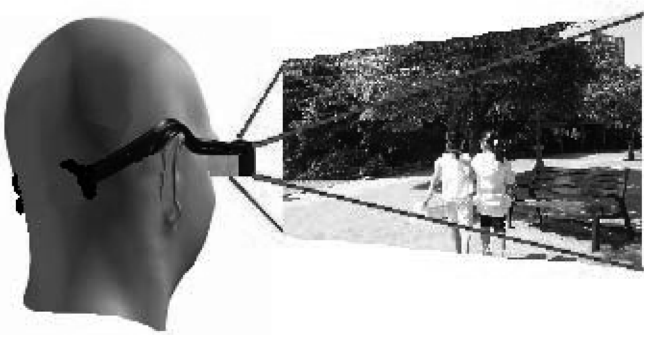

Fig. 2. One example of the virtual large screen composed to the HMD type.

Fig. 3. One example to which the anamorphic aspherical prism lenses are applied (quoted from reference 4).

여기서 c는 근축영역의 곡률반경의 역수 즉 곡률이고, k는 코닉(conic)계수이고 A_4, A_6, A_8, A_{10}은 비구면 계수이다.

회전 비대칭 비구면(anamorphic aspherical surface) 방정식[3,5]

$$z = \frac{\frac{x^2}{r_x}+\frac{y^2}{r_y}}{1+\sqrt{1-(1+k_x)\frac{x^2}{r_x^2}-(1+k_y)\frac{y^2}{r_y^2}}} + AR((1-AP)x^2+(1+AP)y^2)^2 + BR((1-BP)x^2+(1+BP)y^2)^3 \quad (2)$$

여기서 r_y는 YZ 평면에서의 근축 곡률반경, r_x는 XZ 평면에서의 근축 곡률반경, k_x는 XZ 평면에서의 코닉계수, k_y는 YZ 평면에서의 코닉계수, AR과 BR은 Z축에 대해서 회전 대칭인 각각 4차와 6차 비구면계수, AP와 BP는 Z축에 대해서 회전 비대칭인 각각 4차와 6차 비구면계수를 나타낸다.

그리고 회전 비대칭 비구면 프리즘 렌즈는 비축 광학계이므로 비축 광학계에 대한 수차를 계산해서 평가하여 광학계 최적화를 하여야 하는데 우리는 이를 상용 프로그램 Code V를 통해 진행하기로 한다.

Code V에는 비축 광학계의 편심에 대해 7가지 정도의 모드[6]가 있는데 이번 설계에서는 Fig. 4에서와 같이 Decenter & Return과 Basic Decenter 모드를 적용하였다. 개발하려고 하는 회전 비대칭 비구면 프리즘 렌즈의 광경로를 살펴보면 눈에서 프리즘렌즈의 제1면을 지나고 제2면에서는 반사되어 다시 제1면으로 입사해서 되반사되어 진행하여 프리즘 렌즈의 상측 면을 지나 영상소자에 이르게 된다.

회전 비대칭 비구면 프리즘 렌즈 설계 조건

본 설계에서 이루고자 하는 회전 비대칭 비구면 프리즘 렌즈 사양은 Table 1에서 확인할 수 있다. 이 사양은 제작자의 제품 전체의 크기와 연관되어 결정되어진 것이다.

설계에서 지켜야 할 조건을 적어 보면 아래와 같다. Stop과 제 1면까지의 거리를 27 mm로 하고, Stop의 크기는 4 mm로, 왜곡 수차량이 최대 필드에서 0.5% 이내 일 것이며, 영상소자의 크기가 12 mm×9 mm이기 때문에 대각선 방향의 필드 크기는 15 mm로 유지해야 한다. 물론 이런 조건을 유지하면서 유한 광선 수차량을 30 μm 이하

Table 1. The design specification demanded by user

Focal length (mm)		23~24
Eye Relief (mm)		27
Pupil Dia (mm)		4
Finite ray aberration (μm)		<30
Distortion (%) max		<0.5
MTF		>0.3 at 30 lp/mm
Video Input Size		12 mm × 9mm
Dimensions	W(mm)	<45
	H(mm)	<45
	D(mm)	<20

로 유지할 수 있도록 최적화해 나가야 한다. MTF는 30 lp/mm에서 0.3 이상을 유지해야 한다. 이는 영상소자의 크기가 12 mm×9 mm인 것을 고려하면 720×540=39만화소를 분해할 수 있는 성능이 된다. 이정도의 분해능이면 중 정도의 해상도이기 때문에 최적화에서 프리즘 렌즈의 세면을 모두 사용하여 최적화 할 필요가 없다.

따라서 프리즘 렌즈의 제3면을 변수에서 제외하여 DTM 가공에서 비구면의 가공 면의 수를 줄여 가공비를 줄이고자한다.

유한광선 수차와 MTF는 서로의 관련성이 크기 때문에 2가지 제한 조건 중에서 분해능이 좋게 되는 쪽을 만족시키도록 최적화를 하면 2가지 조건을 동시에 충족하게 될 것이다.

Table 1의 조건을 만족하도록 프리즘 렌즈의 모양을 간단한 기하학적 모양으로 캐드로 스케치 하여 제1면, 제 2면, 제3면, 영상소자의 위치 정보를 확인하여 초기 설계 입력 값을 선정하였다. 물론 초기 Decenter & Return과 Basic Decenter 설정에 필요한 수치도 캐드 파일에서 구하였다.

이러한 조건을 Code V 프로그램에 적용하여 최적화에 사용할 변수를 설정하여 최적화 작업을 진행하였다.

사용된 초자는 설계의뢰자가 제공하였는데 굴절률 분석의 결과 Table 2와 같았다. Code V의 초자코드표 525645_OHARA와 거의 유사하여 설계에는 오하라 코드 값을 사용하였다.

Table 2. Characteristics of the lens material used in designing

wavelength (nm)	refractive index
656	1.522922
588	1.525397
486	1.531062

회전 비대칭 비구면 프리즘 렌즈 설계 결과 분석

초기 조건을 단순히 기하학적 모양의 분석에서 값들을 입력하고, Fig. 4에서와 같이 식 (2)에 나타나는 모든 계수를 최적화 변수로 취하여 최적화 한 결과를 Fig. 4~10에 나타내 보았다.

Fig. 4에서 보면 면2와 면4의 데이터는 일치하는데 이는 프리즘 렌즈의 1면을 통과한 광선이 프리즘렌즈의 2면을 반사하고 되 돌아와 다시 1면에 반사되기 때문에 설계에서는 PickUp 모드를 사용하여 두면의 데이터를 일치시킬 수 있는 것이다.

Fig. 4에서 2면, 3면, 4면, image면의 편심을 제어하기 위해 Decenter & Return 모드를 사용하였고, 5면은 Basic Decenter 모드를 사용하였음을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 4의 제 2면의 식 (2)에 따르는 회전 비대칭 비구면 형상의 계수를 보여주고 있고, Fig. 6은 Fig. 4의 제 3면의 식 (2)에 따르는 회전 비대칭 비구면 형상의 계수를 보여주고 있다. 이 들 계수의 결정에도 DTM 가공기에 따라야 취할 수 없는 것도 있기 때문에 설계에서는

Surface #	Surface Type	Y Radius	X Radius	Thickness	Glass
Object	Sphere	Infinity	Infinity	Infinity	
Stop	Sphere	Infinity	Infinity	27.00000	
2	Anamorphic	-182.74167 V	-64.36292 V	9.00000	525645_OH
3	Anamorphic	-53.73519 V	-43.35020 V	-9.00000	525645_OH
4	Anamorphic P	-182.74167 P	-64.36292 P	6.00000	525645_OH
5	Y Toroid	Infinity	Infinity	15.68909 S	
Image	Sphere	Infinity	Infinity	-9.66812 V	

Surface #	Refract Mode	Y Semi-Aperture	X Semi-Aperture	
Object	Refract			
Stop	Refract	2.00000	2.00000	
2	Refract	30.00000	30.00000	Decenter & Return
3	Reflect	28.28427	28.28427	Decenter & Return
4	Reflect	50.00000	50.00000	Decenter & Return
5	Refract	21.21320	21.21320	Basic Decenter
Image	Refract	15.00000	15.00000	Decenter & Return

Fig. 4. Design Data of the designed prism lens.

Parameter	Value
X Radius	-64.36292 V
Y Radius	-182.74167 V
Y Conic Constant	42.12507 V
4th Order Rotationally Sym	-7.34829e-007 V
6th Order Rotationally Sym	1.95532e-008 V
8th Order Rotationally Sym	0.00000
10th Order Rotationally Sy	0.00000
X Conic Constant	33.19192 V
4th Order Asymmetric Coe	-0.37438 V
6th Order Asymmetric Coe	-0.83397 V
8th Order Asymmetric Coe	0.00000
10th Order Asymmetric Co	0.00000
End Of Data	

Fig. 5. 2nd surface coefficients of the designed prism lens.

Parameter	Value
X Radius	-43.35020 V
Y Radius	-53.73519 V
Y Conic Constant	1.08904 V
4th Order Rotationally Sym	3.01434e-007 V
6th Order Rotationally Sym	-6.76723e-010 V
8th Order Rotationally Sym	0.00000
10th Order Rotationally Sy	0.00000
X Conic Constant	1.72240 V
4th Order Asymmetric Coe	-0.10511 V
6th Order Asymmetric Coe	-0.92935 V
8th Order Asymmetric Coe	0.00000
10th Order Asymmetric Co	0.00000
End Of Data	

Fig. 6. 3rd surface coefficients of the designed prism lens.

DTM 가공기의 성능을 고려하여야 한다. Fig. 4~6에서 변수 옆에 v로 표기 된 것은 최적화 과정에서 변수로 취급되는 것이다. 초기 조건에서 최적화를 진행해 갈 때는 모든 항을 변수로 취하면 원하는 결과에 도달하지 못할 수도 있고 도달하기에 많은 시간을 요할 수 있다. 따라서 적절한 설계 변수의 선택은 설계 전 과정에서 경험적으로 잘 이루어져야 한다.

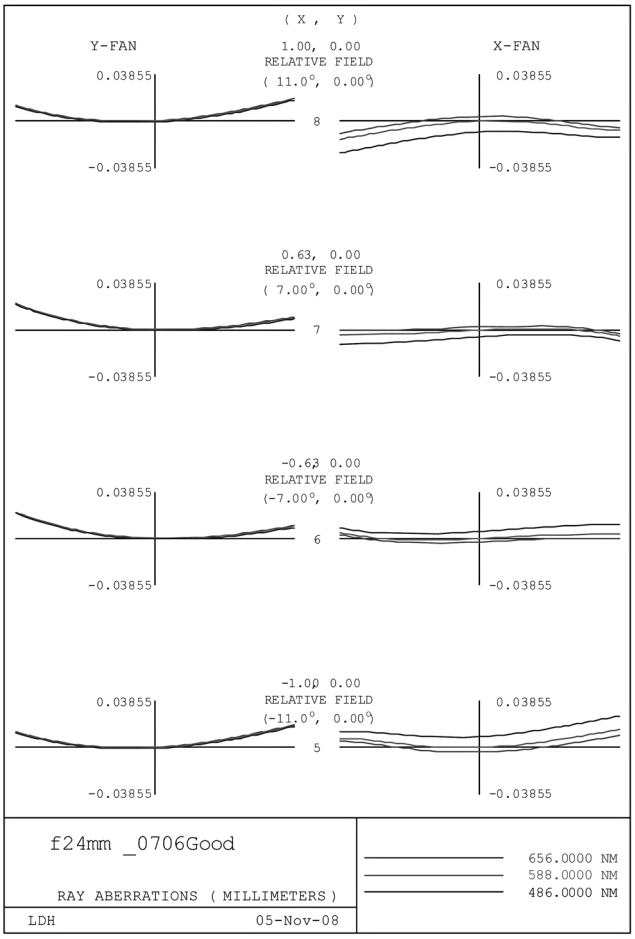

Fig. 7. Finite ray aberrations of the designed prism lens.

Fig. 7은 최적화하여 결정된 프리즘 렌즈의 유한광선 수차도를 보여 준다. 1가지의 초자로 설계 되어있기 때문에 X-Fan 광선에 의한 색 수차가 발생되어 있는 것을 확인할 수 있다. 설계에 사용된 파장이 F, d, C 라인의 파장인데 색수차 량은 약 20 μm임을 확인할 수 있다. 현재 1종류의 초자 사용으로는 20 μm 이하로 색수차를 제거하기는 어려울 것으로 판단된다. 따라서 앞으로 분해능이 뛰어난 영상소자를 사용하는 HD급의 프리즘 렌즈 개발에서는 2종류 이상의 초자가 사용되어 광학계를 구성하여야 할 것으로 판단된다. Fig. 7에서 나타나는 유한 광선 수차량은 약 15 μm 정도로 평가되어 Table 1의 초기 설계 Spec을 충분히 만족하는 것으로 생각된다.

Fig. 8은 설계된 회전 비대칭 비구면 프리즘 렌즈의 MTF를 보여주고 있는데 최소 분해능이 36 lp/mm에서 0.3 이상임을 나타내고 있다. 이는 현재 영상소자 크기 12 mm×9 mm를 고려하면 864×648 ≅ 56만화소를 구현해 낼 수 있는 SVGA(800×600)[3]급 광학계임을 보여주고 있다. Table 1에서 목표로 하는 약 39만화소 이상을 표현할 수 있는 광학계이기 때문에 우수하게 설계된 것으로 판단된다.

Fig. 9는 전체 필드에서의 스폿 다이아그램을 보여 주고 있는데 색수차가 전체적으로 많이 발생되어 있는 것을 보여주고 있는데 이는 한 종류의 초자 사용에서 나타나는 한계로 볼 수 있겠다.

Fig. 10은 왜곡수차를 보여주고 있는데 최대 필드에서 약 0.5%의 수차량을 나타내는데 이는 Table 1에서의 설계 요구 성능을 만족하는 값이다.

Fig. 11은 이렇게 설계된 광학계의 측면도와 광선 추적도를 보여주고 있는데, 1차 광학량 EFL=23.100, BFL=

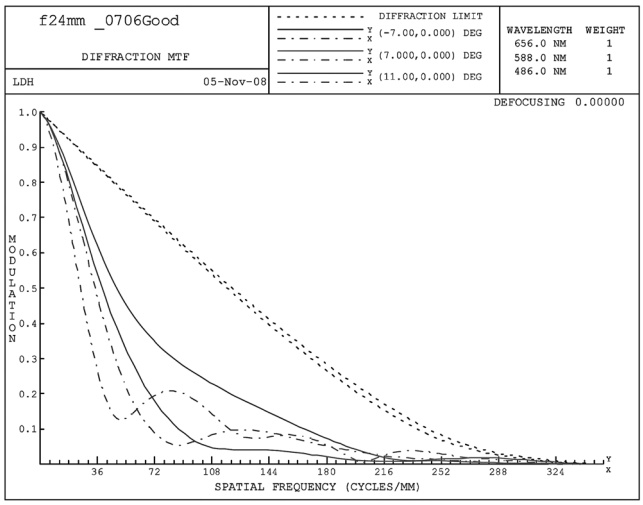

Fig. 8. MTF curves of the designed prism lens.

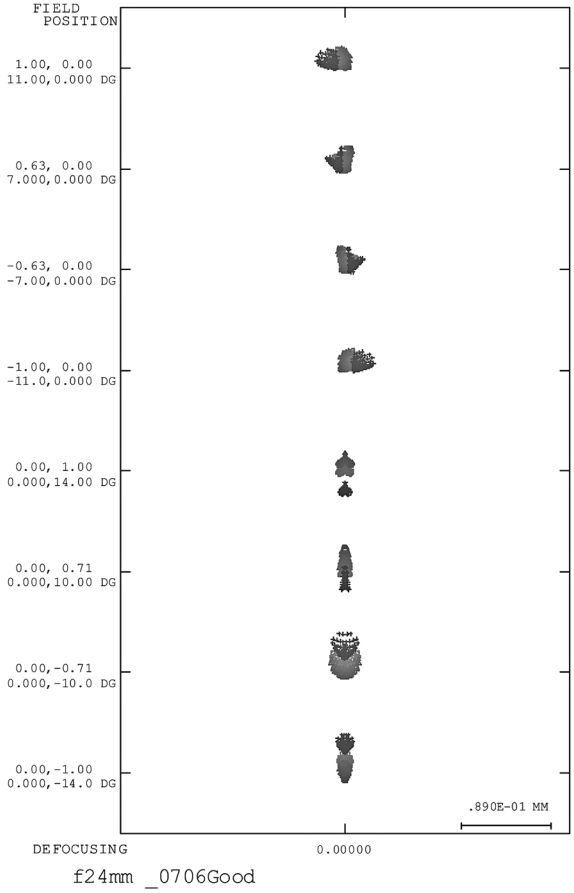

Fig. 9. Spot diagram of the designed prism lens.

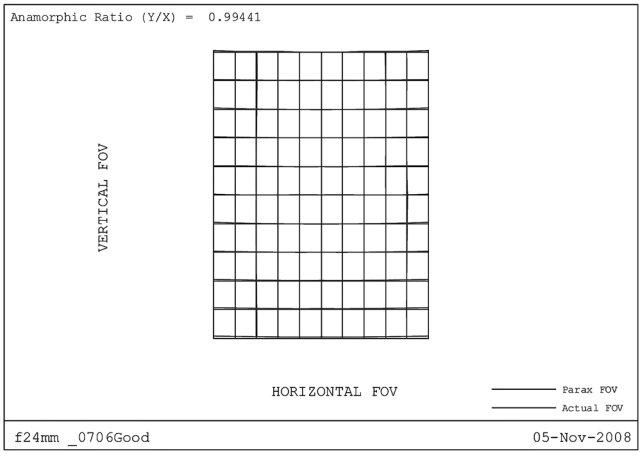

Fig. 10. Distortion characteristics of the designed prism lens.

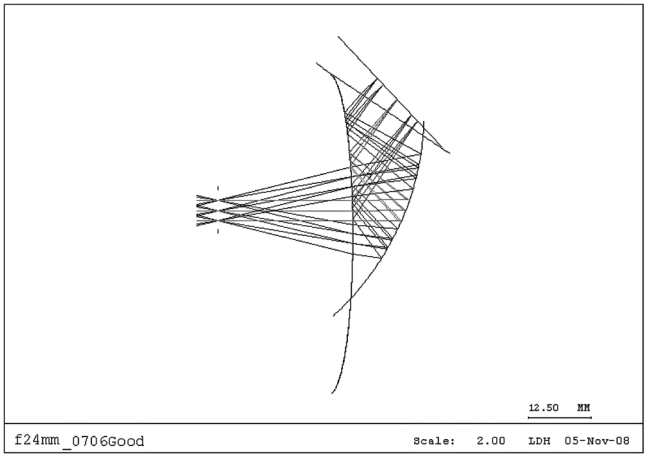

Fig. 11. Configuration of the designed prism lens.

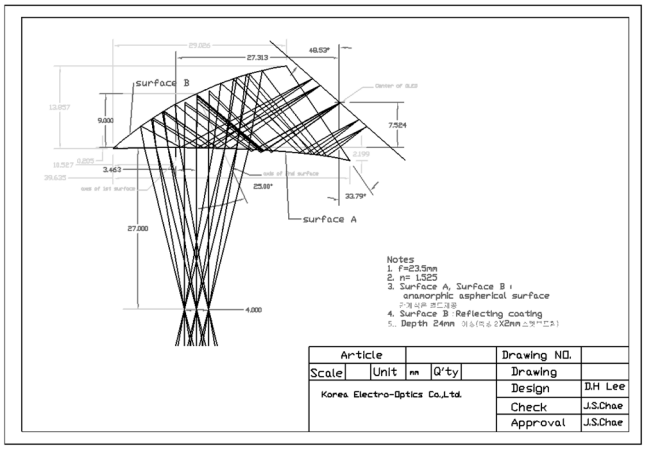

Fig. 12. Assembly drawing of the designed prism lens.

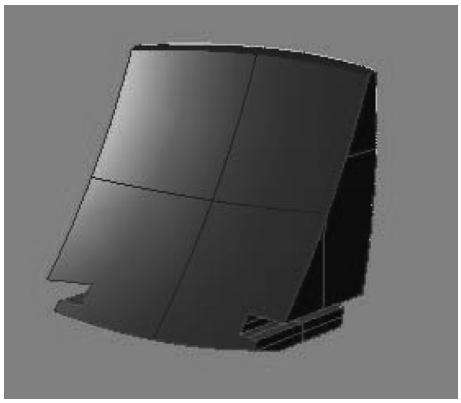

Fig. 13. 3D drawing of the designed prism lens.

15.689, FFL=7.848의 값을 갖는 광학계이다. 이 광선 추적도는 캐드 파일로 전환되기 때문에 시스템의 하우징 설계에서 필요한 자료가 될 것이다.

Fig. 12는 DTM 가공용 캐드 도면으로 DTM 가공기에 필요한 지그 등의 제작에 사용되는데, 회전 비대칭 비구면 계수는 따로 출력이 되어 DTM 가공업체에게 제공된다.

Fig. 13은 DTM 가공 전에 만들어본 3D용 IGS 파일로 작성된 개발제품의 모형도를 보여주고 있다.

개발된 제품의 향후 응용 분야를 살펴보면 다음과 같은 분야[7]가 될 수 있다.

– 휴대용 모바일 제품의 휴대용 디스플레이 장치
– 입체 영상 디스플레이장치 광학 소자
– 서바이벌 게임 및 레저용 사격 장치 모니터링 광학계

– 의료용 의사들의 휴대용 모니터 장치
– 항공기 시뮬레이션의 영상 구현 장치의 광학계

결 론

입체영상 또는 확대된 영상을 볼 수 있도록 구성된 헤드 마운트 디스플레이는 차세대 영상기기로 향후 디스플레이 시장을 주도할 것으로 판단된다. 국내에서도 HUD 부품 시장의 진입이 필요한데 특히 회전 비대칭 비구면 프리즘 렌즈가 고부가 가치를 갖는다.

따라서 이 부품의 개발로 향후 시장을 주도할 필요가 있다. 이에 우리는 HMD를 구성하는데 사용되는 회전 비대칭 비구면 프리즘 렌즈의 설계를 시도하였다.

먼저 사용자의 요구 스펙을 분석하여 프리즘 렌즈의 모양을 기하학적으로 캐드를 사용하여 그려서 설계에 필요한 각 면과의 거리 등 필요한 초기 데이터를 얻었다. 이 데이터를 기본으로 해서 광학설계 프로그램인 Code V를 사용하여 회전 비대칭 비구면 계수 등을 변수로 하여 최적화를 진행하였다. 이렇게 하여 완성된 설계의 광학적 성능은 영상소자 12 mm×9 mm에 대해 유한광선 수차량 15 μm, 왜곡수차량 0.5%, 36 lp/mm에서 0.3 이상의 MTF 값을 갖는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 (주)한국전광의 연구비 지원으로 수행되었음을 밝혀둡니다.

참고문헌

1. 서명덕, “[CES]머리에 쓰는 105인치 화면”, 세계일보 (2006.01.03).
2. 박종배, “헤드 마운트 디스플레이용 광학 시스템”, 대한민국특허 10-0354149, 2002.
3. Koichi Takahashi, “HEAD OR FACE MOUNTED IMAGE DISPLAY APPARATUS”, U.S., Patent 5875056, 1999.
4. http://www.3dvisor.com/blaze/index.html
5. 이동희, “안경렌즈 코아 가공을 위한 비구면 형상 도출 프로그램 개발”, 한국안광학회지, 12(4):91-94(2007).
6. CODE V9.7, “CodeV Introductory User's Guide”, OPTICAL RESEARCH ASSOCIATES, California, USA, pp. 181-200(2006).
7. Takashi Shibata, “Head mounted display”, Displays, 23:57-64(2002).

Design of an Anamorphic Aspherical Prism Lens for the Head Mount Display

Seung-Hwan Park and Dong-Hee Lee*

Department of Biomedical Engneering, College of Health Sciences, Eulji University
*Department of Optometry, College of Health Sciences, Eulji University
(Received October 30, 2008: Revised November 15, 2008: Accepted December 9, 2008)

Purpose: To design an anamorphic aspherical prism lens for the HMD optical system. **Methods:** First, we get the initial data, needed in design, which are distances between each surface etc., by analyzing user's demended specifications and by drawing geometrically the shape of prism lens by using CAD. Based on these data and using ‘Code V’ which is an optical design software, we could progress the optimization in which we treat the coefficients of the anamorphic aspherical surface as the principal variables. To reduce the cost in DTM manufacturing, we would optimize the optical system with the transmitting surface, existed in the direction of video device among 3 surfaces of the prism lens, remaining as a plane. **Results:** we could design one anamorphic aspherical prism lens which has the finite ray aberration of 15 μm, the distortion of 0.5%, and the MTF value of 0.3 over at 36 lp/mm for the video device of 12 mm × 9 mm size. **Conclusions:** We designed a prism lens used for HMD. This prism lens has the optical capacities of 15 μm finite ray aberration and 0.5% distortion for the video device of 12 mm × 9 mm size, and become the optical system having the MTF value of 0.3 over at 36 lp/mm.

Key words: HMD, anamorphic aspherical surface, prism lens, OLED, LCD