

홍채인식용 광학계 설계

홍경희[†]

육군사관학교 물리학과

④ 139-799 서울시 노원구 공릉2동 사서함 77호

(2000년 7월 28일 받음, 2000년 11월 20일 수정본 받음)

사람의 홍채 인식을 통하여 보안 통제를 하기 위한 광학계를 설계하였다. 이 렌즈는 종색수차와 Petzval sum을 최소로 하는 triplet형이다. 초점거리를 50 mm 유효경을 10 mm로 하였고 물체로부터 상까지의 거리는 200 mm~300 mm로 고려하였다. 눈을 고려한 전체 광학계의 성능은 ray-fan과 spot diagram 그리고 회절광학적인 MTF를 계산하여 평가하였다. 홍채의 크기 를 고려하여 물체 높이 0 mm, 4 mm 그리고 6 mm에 대하여, 파장은 Fraunhofer C, d 및 F-line에 대하여 모두 계산한 결과 spot 크기는 0.05 mm 직경을 벗어나지 않았고 MTF 값도 물체 높이 6 mm에 대한 486 nm 파장의 sagittal MTF를 제외하고는 20 lines/mm의 공간주파수에서 0.5 이상이 되었다.

OCIS code : 220.0220.

I. 서 론

보안을 위하여 비밀 취급자들의 출입을 통제하는 방법에는 여러 가지가 있다. 경비원이 있을 때에는 신분증을 제시하는 것이 보편적이라고 할 수 있지만 극비를 취급하는 특수한 영역을 출입할 때는 경비도 없고 전자기적으로 ID카드를 만들어 출입을 통제한다. 그러나 요즈음에는 그것도 신뢰도가 떨어져 지문 인식방법을 사용하는데 이것도 지문을 지우거나 위조를 하는 경우가 발생하여 만족할만한 보안통제가 불가능하다. 사람의 동공의 홍채 모양은 사람마다 모두 다르며 지문보다는 위조하기가 어려울 것이다. 그리하여 선진국에서는 사람의 눈의 동공의 홍채를 인식하는 방법으로 보안통제를 하는 방법이 개발되어 사용하고 있다. 본 연구에서는 저렴한 가격으로 이러한 목적에 적합한 광학계를 개발할 수 있는 기술 기반을 마련하기 위하여 광학계를 설계하여 보았다. 사용의 편의상 물체로부터 상까지의 거리를 200 mm~300 mm 정도로 하고 분해능은 0.1 mm 이상으로 고려하였다. 가능하면 초점심도가 클수록 좋고 인종에 따라 홍채의 색깔이 다르므로 색 수차도 제거되어야 한다.

II. 사람의 눈

사람의 눈의 구조가 물론 사람마다 조금씩 다르겠지만 대체로 건강한 사람을 평균하여 발표된 바에 의하면 그림 1과 같이 각막에서 홍채까지의 거리가 3.54 mm이고 홍채(iris)의 직경은 12 mm~13 mm 정도이다.^[1] 홍채 앞에는 각막(cornea)이 있으며 표 1에서 보는 바와 같이 표면의 곡률 반경은 7.8 mm 내부 면의 곡률 반경은 6.8 mm이며 두께는 1.15 mm이고 굴절률은 1.376이다. 각막과 crystal lens 사이에는 수액(aqueous humor)으로서 굴절률 1.336의 액체 방으로 이루어져 있고 각막 내부 표면 정점에서 홍채까지의 거리는 2.39 mm이다.^[2] 실제로는 이들이 완전한 구면도 아니고 완전한 등방 균질성도 아니지만 대략으로 평균하여 그렇게 알려져 있다. 홍채는 수액 뒤에 수정체(crystalline lens)의 표면과 접하여 그림 1처럼 위치하고 있으며 염밀히 평면을 이루고 있지는 아니하나 본 연구에서는 대략 평면으로 간주하고 광학계를 설계하였다. 왜냐하면 그 이상의 홍채가 평면으로부터 벗어나는 거리는 설계하고자 하는 렌즈로부터 눈까지의 거리, 150 mm에 비하면 매우 작으므로 그다지 문제가 되지 않을 것으로 판단되기 때문이다.

액(aqueous humor)으로서 굴절률 1.336의 액체 방으로 이루어져 있고 각막 내부 표면 정점에서 홍채까지의 거리는 2.39 mm이다.^[2] 실제로는 이들이 완전한 구면도 아니고 완전한 등방 균질성도 아니지만 대략으로 평균하여 그렇게 알려져 있다. 홍채는 수액 뒤에 수정체(crystalline lens)의 표면과 접하여 그림 1처럼 위치하고 있으며 염밀히 평면을 이루고 있지는 아니하나 본 연구에서는 대략 평면으로 간주하고 광학계를 설계하였다. 왜냐하면 그 이상의 홍채가 평면으로부터 벗어나는 거리는 설계하고자 하는 렌즈로부터 눈까지의 거리, 150 mm에 비하면 매우 작으므로 그다지 문제가 되지 않을 것으로 판단되기 때문이다.

III. Triplet 설계

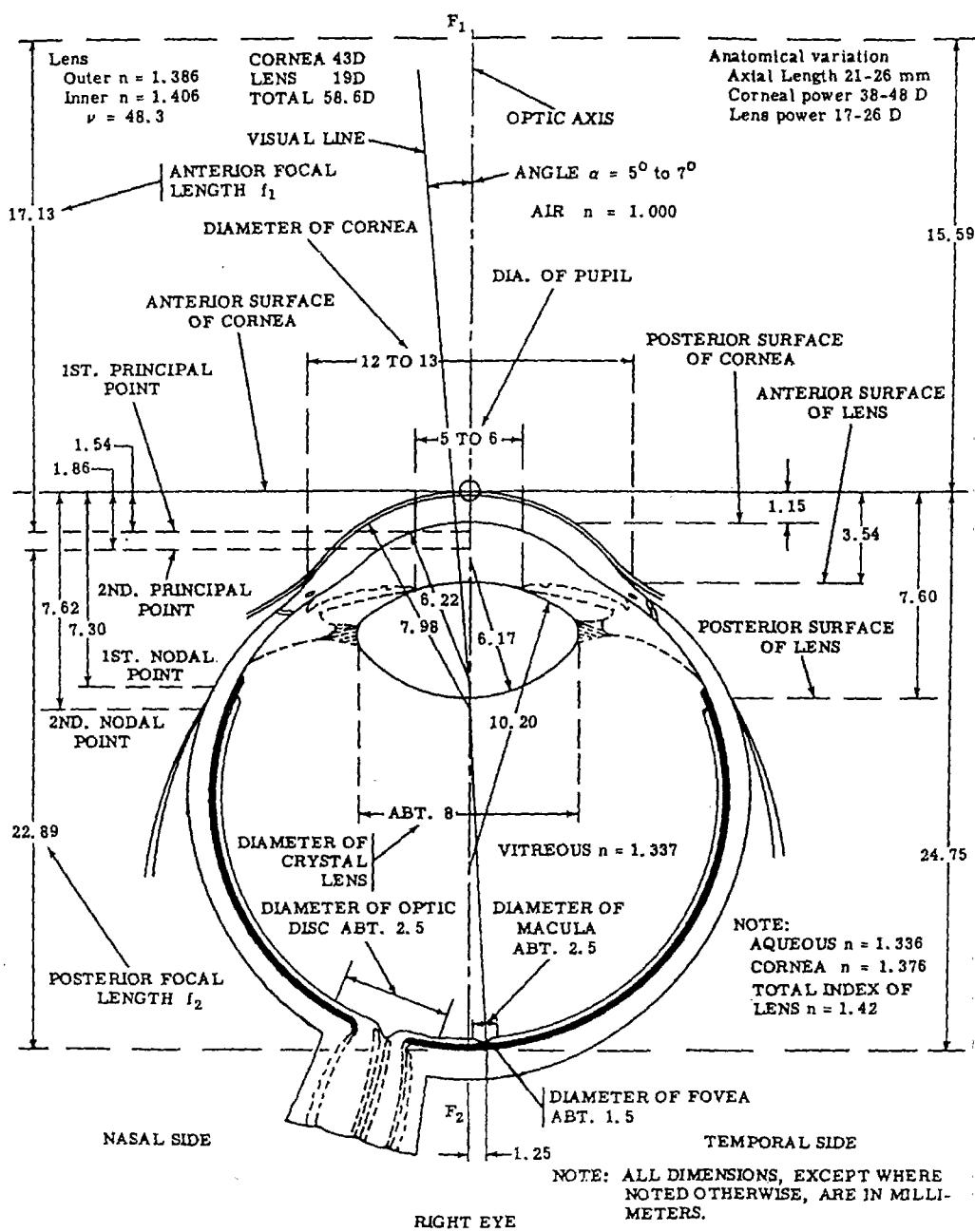
3.1. 계통의 확립

초점 심도가 깊도록 하기 위하여 F-number를 5로 정하고

표 1. Optical parameter of a normal human eye^[2]

Surface	Radius of curvature (mm)	Refractive index	Distance from anterior surface of cornea(mm)	Refractive power (Diopters)
Cornea				
Amterior	7.8	1.376	0.5	+48.2
Posterior	6.8			-5.9
Aqueous humor		1.336		
Lens				
Amterior	10.0*	1.386	3.6	+5.0
Posterior	-6.0		7.2	+8.3
Vitreous humor		1.336		
Retina			24.0	

[†]E-mail: khong@kma.ac.kr

그림 1. Optical constant of a standard eye.^[1]

물체로부터 상까지의 거리를 고려하여 초점거리는 50 mm로 하였다. 눈으로부터 거리를 150 mm 떨어지게 하면 대략 배율이 $1/2$ 이 되며, 200 mm 떨어지게 하면 배율이 약 $1/3$ 로 된다. 따라서 상의 크기는 직경이 6.5 mm 이하가 되므로 검출기의 크기는 $1/3$ inch \times $1/3$ inch 크기의 CCD array detector를 사용하면 충분할 것으로 예측하였다. 광선이 j 번째 면에서 굴절할 때, 굴절 전의 굴절률과 광축각이 각각 n_{j-1} , u_{j-1} 이고 굴절후의 굴절률과 광축각이 각각 n_j , u_j 이고 입사하는 광선이 굴절면과 만나는 입사고가 y_j 이라 하면 굴절 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\text{굴절 방정식} \quad n_j u_j = n_{j-1} u_{j-1} + y_j k_j \quad (1)$$

이 때 굴절면이 구면이고 곡률반경이 r_j 라면 곡률 $c_j = 1/r_j$ 이고

구면의 굴절능, k_j 는 식 (2)와 같다.

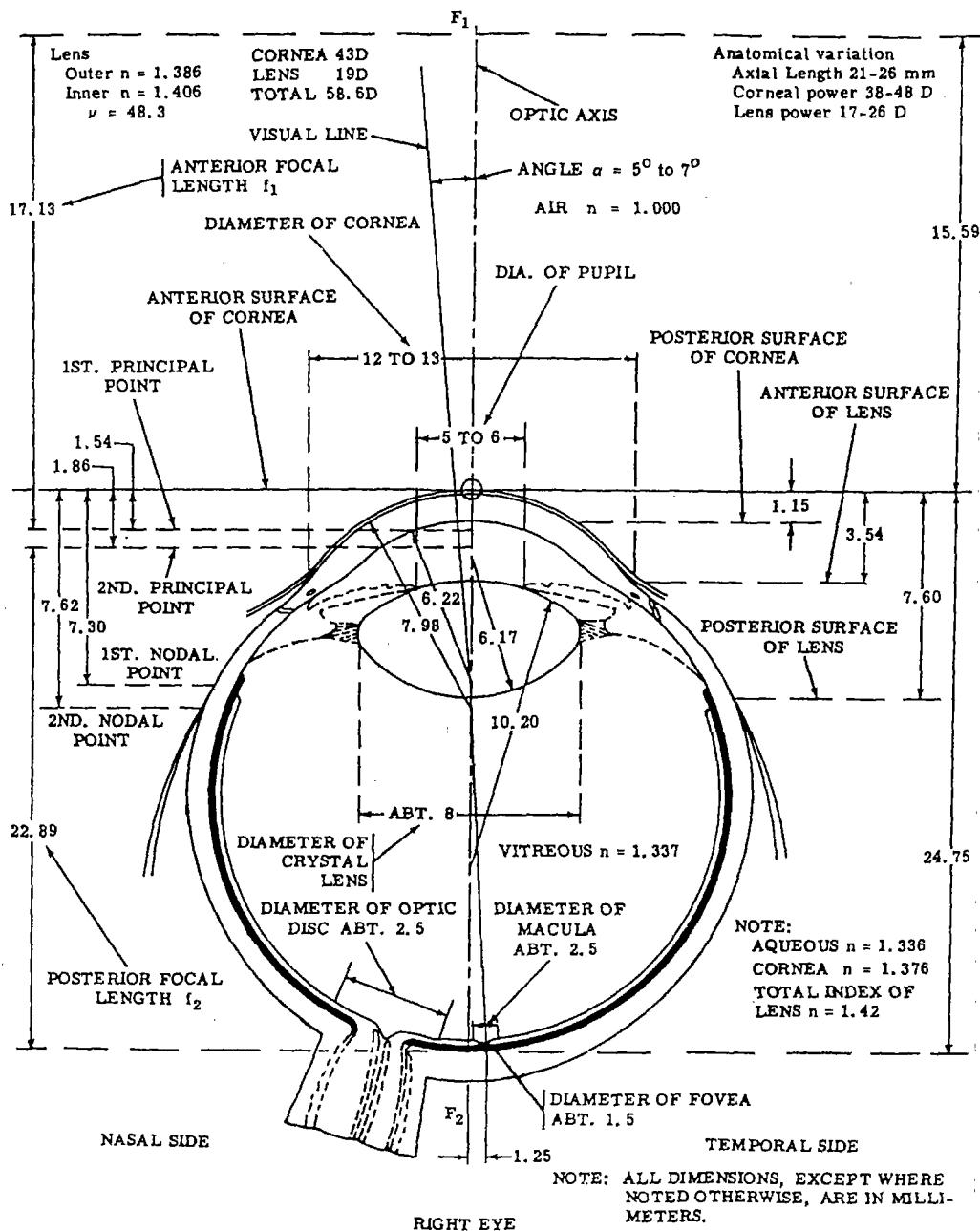
$$\text{구면의 굴절능} \quad k_j = c_j (n_j - n_{j-1}) \quad (2)$$

또한 그 앞면의 입사고가 y_{j-1} 이라 하고 $j-1$ 번째 면과 j 번째 면 사이의 거리가 d_{j-1} 이라 할 때 j 번째 면의 입사고는 식 (3)과 같이 된다.

$$\text{전환 방정식} \quad y_j = y_{j-1} - d_{j-1} u_{j-1} \quad (3)$$

렌즈의 형태는 triplet로 구상하였고 각 렌즈의 굴절능 배분은 굴절방정식과 전환 방정식 및 구면의 굴절능 공식을 이용하여 표 2와 같이 결정하였다.^[1,3]

굴절능을 k , 입사고를 y , 굴절률을 n 그리고 Abbe상수를 V

그림 1. Optical constant of a standard eye.^[1]

물체로부터 상까지의 거리를 고려하여 초점거리는 50mm로 하였다. 눈으로부터 거리를 150mm 떨어지게 하면 대략 배율이 1/2이 되며, 200mm 떨어지게 하면 배율이 약 1/3로 된다. 따라서 상의 크기는 직경이 6.5mm 이하가 되므로 검출기의 크기는 1/3 inch × 1/3 inch 크기의 CCD array detector를 사용하면 충분할 것으로 예측하였다. 광선이 j 번째 면에서 굴절할 때, 굴절 전의 굴절률과 광축각이 각각 n_{j-1} , u_{j-1} 이고 굴절후의 굴절률과 광축각이 각각 n_j , u_j 이고 입사하는 광선이 굴절면과 만나는 입사각이 y_j 이라 하면 굴절 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\text{굴절 방정식} \quad n_j u_j = n_{j-1} u_{j-1} + y_j k_j \quad (1)$$

이 때 굴절면이 구면이고 곡률반경이 r_j 이면 곡률 $c_j = 1/r_j$ 이고

구면의 굴절능, k_j 는 식 (2)와 같다.

$$\text{구면의 굴절능} \quad k_j = c_j (n_j - n_{j-1}) \quad (2)$$

또한 그 앞면의 입사각이 y_{j-1} 이라 하고 $j-1$ 번째 면과 j 번째 면 사이의 거리가 d_{j-1} 이라 할 때 j 번째 면의 입사각은 식 (3)과 같이 된다.

$$\text{전환 방정식} \quad y_j = y_{j-1} - d_{j-1} u_{j-1} \quad (3)$$

렌즈의 형태는 triplet로 구상하였고 각 렌즈의 굴절능 배분은 굴절방정식과 전환 방정식 및 구면의 굴절능 공식을 이용하여 표 2와 같이 결정하였다.^[1,3]

굴절능을 k , 입사각을 y , 굴절률을 n 그리고 Abbe상수를 V

표 2. Triplet의 굴절능 분배

면번호	1	2	3
설계 변수			
굴절능	0.04	-0.075	0.0444444
간격	5.0	5.0	45.0
입사고	5.0	4.0	
굴절 광축각	0.0	0.2	-0.1 4.5 0.1

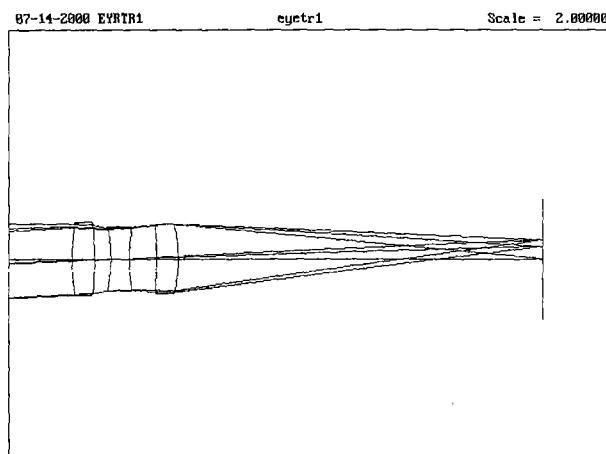


그림 2. Triplet에 의한 결상.

라고 하면 각 렌즈의 번호를 첨자로 나타내어 triplet의 종색수차, C_L 와 Petzval sum, $Petz$ 을 수식으로 표현하면,

$$C_L = \frac{k_1 y_1^2}{V_1} + \frac{k_2 y_2^2}{V_2} + \frac{k_3 y_3^2}{V_3} \quad (4)$$

$$Petz = -\left(\frac{k_1}{n_1} + \frac{k_2}{n_2} + \frac{k_3}{n_3}\right) \quad (5)$$

와 같이 된다.^[1,3] 그림 2에서 원편쪽으로부터 렌즈 1, 2 및 3으로 배열한다. 여기서 렌즈 1과 렌즈 3은 동일한 광학유리로 하고 가능하면 Petzval sum과 종색수차를 작게 하려고 crown 계 유리 중에서 굴절률이 높고 Abbe 상수도 큰 것으로 고려하였다. Hoya glass catalogue에서 많이 생산하는 것 중에서 TaC2를 선정하였다. TaC2 광학유리의 굴절률 및 Abbe 상수는 다음과 같다. $n_d = 1.7410$, $n_C = 1.73672$, $n_F = 1.75081$ 그리고 $V_d = 55.5$ 이다. 이것을 식 (4)에 대입하여 몰색화하려면 렌즈 2의 광학유리의 Abbe상수가 35.05가 되어야 한다. 이에 가장 가깝고 Petzval sum을 최소화하려면 굴절률도 낮아야 하므로 flint계 광학유리 중에서 F1을 선택하였다. F1 광학유리의 굴절률 및 Abbe 상수는 다음과 같다. $n_d = 1.62588$, $n_C = 1.62074$, $n_F = 1.63825$ 그리고 $V_d = 35.7$ 이다. 실제 triplet의 유효경을 10.0 mm 초점거리를 50 mm로 하였기 때문에 식 (4) 및 식 (5)에 의해 구한 종색수차는 $C_L = 2.51 \times 10^{-3}$ 그리고 Petzval sum은 $Petz = 2.38 \times 10^{-3}$ 정도이다. 두께를 고려하여 초기 설계를 다음 표 3과 같이 세웠다.

3.2. 최적화 및 성능평가

표 3. 초기 설계 제원 (단위 : mm)

면 번호	곡률반경	굴절률	두께/간격
1	18.825	1.74100	3.0
2	무한대	1.0	3.5
3	-14.419	1.62588	2.5
4	14.419	1.0	3.5
5	무한대	1.74100	3.0
6	-16.6725		

표 4. 최종 설계 제원 (단위 : mm)

면 번호	곡률반경	굴절률	두께/간격
1	37.460	1.74100	3.00
2	-50.295	1.0	2.25
3	-16.730	1.62588	2.50
4	34.880	1.0	3.62
5	-74.800	1.74100	3.00
6	-16.395		

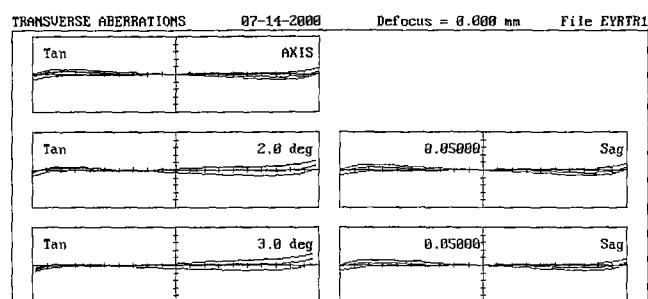


그림 3. Triplet의 ray-fan.

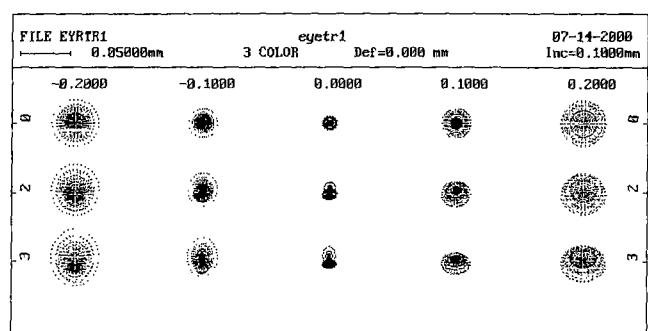


그림 4. Triplet의 spot diagram.

이를 유한광선 추적하여 Fraunhofer C, d 및 F line에 대한 색수차 보정과 광선수차를 이용하여 최적화 기법으로 수정한 결과 표 4와 같이 되었다. 시야를 2°와 3°까지 고려하여 광선수차를 나타내는 ray-fan과 spot diagram을 계산한 결과가 그림 3 및 그림 4와 같다. 그림 3에서 가로축은 동의 상대적 좌표이고 세로축은 광선수차이며 단위는 mm이다. 왼쪽 부분은 위에서부터 시야가 0°, 2° 및 3°에 대한 tangential ray-fan이며, 오른쪽은 왼쪽과 같은 시야에서의 sagittal ray-fan이다. 그림 4에서 중앙은 Gauss 상점이고 좌우로 초점이동을 mm 단위로 나타내었으며 위에서부터 시야가 0°, 2° 및 3°이다.

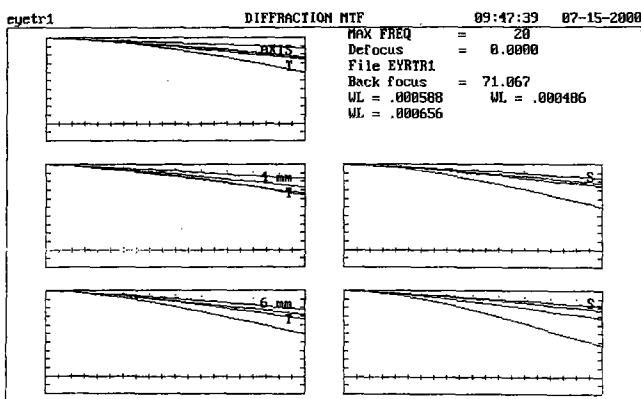


그림 9. 홍채인식용 광학계의 MTF.

야에 대해 직경 0.05 mm 이내에 모든 spot가 들어오고 있다. 그러나 상면 앞과 뒤로 초점이동 0.2 mm일 경우에는 spot가 일부 직경 0.05 mm 이내에 들어오지 못하는 것을 볼 수 있다. 그렇지만 대부분의 빛이 직경 0.05 mm 이내에 들어오고 있어서 충분한 분해능을 가진다. 그림 9는 홍채인식 광학계의 회절광학적 MTF를 계산한 결과이며 물체 높이 6 mm에 대한 파장 486 nm에 대한 MTF 값이 가장 낮게 나타나서 0.4이하가 된 것을 제외하고는 20 line/mm에서 최소한 50% 이상의 값을 보여주고 있으므로 홍채 유형인식에는 아무 문제가 없다고 판단된다.

배율이 약 1/2이므로 홍채의 직경이 약 1/2 inch이니까 상의 크기는 약 1/4 inch의 직경이 되므로 검출기의 크기는 1/3 inch × 1/3 inch의 크기이면 충분하다. 눈으로부터 200 mm 떨어진 곳에 triplet를 위치하면 150 mm 떨어진 곳에 triplet를 위치하는 경우와 수차특성은 매우 유사하며 spot 크기가 더욱 줄어든다. 따라서 검출기의 크기는 1/3 inch × 1/3 inch의 크기이면 충분하다. 이 정도면 실용적으로 충분히 사용 가능한 훌륭한 광학계가 될 것으로 판단된다.

V. 결 론

홍채 인식용 광학계를 단순한 triplet형으로 설계하였다. 설계제원으로부터 성능을 평가한 결과 충분히 실용적인 가치가 있다고 판단된다.

참고문헌

- [1] R. E. Hopkins, "Visual Optics" in *Optical Design (MIL-HDBK-14)*, Washington D.C. Standardization Division. U. S. Defence Supply Agency, 1962.
- [2] J. G. Westheimer, "The Eye" in Vernon B. Mountcastle Ed. *Medical Physiology* 12th ed., pp. 1532-1553, St. Louis : C. V. Mosby, 1968.
- [3] 홍경희, 캠코더 렌즈개발을 위한 광계통 설계 및 성능평가 기술개발(1차년도 중간보고서), 통상산업부, 1995.

Optical system design for recognition of human iris

Kyung Hee Hong[†]

Dept. of Physics, Korea Military Academy, Seoul 139-799, KOREA

[†]E-mail: khong@kma.ac.kr

(Received July 28, 2000 ; Revised manuscript received November 20, 2000)

An optical system for iris pattern recognition of the human eye is designed. The lens system is triplet type, and characterized to minimize longitudinal chromatic aberration and Petzval sum. The distance from object to image is 200 mm~300 mm and the effective focal length is 50 mm. Performance of the imaging system is assessed by calculating the ray-fan and spot diagram for Fraunhofer C, d and F line for object height 0 mm, 4 mm and 6 mm. Furthermore, MTFs are calculated. All of the spot sizes are less than 0.05 mm in diameter. The MTF values are higher than 0.5 in the spatial frequency range up to 20 lines/mm for all of the object heights.

OCIS code : 220.0220.