

Study of an Aspherical Lens Design Method for Removing the Spherical Aberration of a Human Eye

Ji Sung Kim¹, Dong Min Kim¹, Jong Hyun Jin¹, and Young Chul Kim^{2†}

¹Yongin High School, Yongin 17046, Korea

²Department of Optometry, Eulji University, Seongnam 13135, Korea

(Received October 7, 2015; Revised manuscript November 2, 2015; Accepted November 17, 2015)

Using Snell's Law without approximation, we analyzed focal points for parallel rays incident upon the cornea of a human eye. To calculate a ray's incident angle versus incident height for focusing on the same point, we used the ray reverse tracing method. We derived the theoretical conditions for an aspherical lens to remove the spherical aberration caused by a human eye. In this research, we held the rear surface of the lens to be spherical, for simple calculation, and calculated the lens curvature of the front surface to design an aspherical surface.

Keywords: Gullstrands schematic eye, cornea, retina, aspherical lens, Snell's Law

OCIS codes: (080.0080) Geometrical optics; (080.3630) Lenses; (220.0220) Optical design and fabrication; (220.2740) Geometric optical design

눈의 구면수차 제거를 위한 비구면 렌즈 설계 기법 연구

김지성¹ · 김동민¹ · 진종현¹ · 김영철^{2†}

¹용인고등학교,

Ⓞ 17046 경기도 용인시 처인구 금학로 253번길 20-21

²을지대학교 안경광학과

Ⓞ 13135 경기도 성남시 수정구 산성대로 553

(2015년 10월 7일 받음, 2015년 11월 2일 수정본 받음, 2015년 11월 17일 게재 확정)

사람 눈의 각막에 평행하게 입사하는 광선의 높이에 따른 결상점을 근사 없이 스넬의 법칙으로 분석하였다. 광선들이 망막의 동일한 한 점에 결상하도록 각막에 입사하는 광선들의 높이에 따른 입사각을 계산하기 위하여 결상점으로부터 광선을 역추적하여 각막 전면에 입사하는 광선의 입사각을 계산 하였다. 눈 자체로는 구면수차를 유발할 수밖에 없기 때문에, 구면 수차를 보정할 수 있는 비구면 렌즈 설계에 대한 조건을 유도 하였다. 계산을 쉽게 하기 위하여 렌즈 후면은 구면으로 고정하고 렌즈 전면은 비구면 렌즈 설계를 위하여 높이에 따른 곡률을 계산하였다.

Keywords: 굴스트란드 모형안, 각막, 망막, 비구면렌즈, 스넬법칙

OCIS codes: (080.0080) Geometrical optics; (080.3630) Lenses; (220.0220) Optical design and fabrication; (220.2740) Geometric optical design

I. 서 론

광학계로서 사람 눈은 각막, 수정체, 수정체 핵, 그리고 망막으로 구성되어 있다. 빛이 눈으로 입사하면 각막의 전면과 후면을 차례로 통과하여 수정체의 전면에도달한다. 수정체에 입사한 광선은 수정체 핵 전면과 후면 그리고 수정체 후

면을 순서대로 통과한 후 망막에 이른다. 망막에는 시신경이 위치하고 있어 이곳에 도착한 빛의 정보를 흡수하여 뇌에 전달하게 된다.

이런 과정을 거쳐 사물을 분간하게 되는데, 사물에 대한 정확한 정보를 분석하기 위해서는 눈에 입사한 광선들이 망막의 한 점에 모여서 해상도가 높은 상이 맺혀야 한다. 하지

†E-mail: yckim@eulji.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

만 기본적으로 눈을 구성하는 각각의 광학적 요소들은 구면, 엄격하게는 타원면이어서 각막에 평행광선 또는 한 점에서 방출된 광선 다발이 입사하더라도 망막 주변의 각기 다른 점에 상을 맺게 된다. 이 때문에 완벽한 상을 맺을 수 없고 물체에 대한 정보의 왜곡현상이 발생한다.

본 연구에서는 헬름홀츠의 모형안^[1]을 수정한 굴스트란드 모형안에 대하여 광선추적 방법으로 상이 맺히는 점을 분석하였다. 모든 광선이 한 점에 상을 맺는 경우에 대하여 각막의 전면에 입사하는 광선들의 높이에 따른 입사각을 계산하였으며, 이 결과를 역산하여 비구면 렌즈를 설계하기 위하여 높이에 따른 곡률반경을 분석하였다.

광선추적법을 이용하여 렌즈 자체가 갖는 구면 수차를 제거하는 연구가 진행되었으며^[2-4], 본 연구에서는 광학계로서 굴스트란드 모형안이 갖은 구면 수차와 안경 렌즈에 내포된 구면 수차를 동시에 보정 할 수 있는 비구면 렌즈 설계를 시도하였다. 일반적으로 상의 위치를 계산하는데 근축근사로 유도한 결상방정식을 사용한다. 하지만 본 연구에서는 근사가 없는 스넬의 법칙^[5-6]을 이용하여 상의 위치를 정확하게 계산하였다.

II. 평행 입사 광선의 결상 점

눈으로부터 먼 곳에 있는 물체로부터 발산된 광선, 즉 평

행광선이 눈에 입사하는 경우에 광선 추적을 통하여 각 광선에 대하여 상이 맺히는 점을 스넬을 법칙에 의한 광선추적법으로 분석하였다. 근축근사는 광축에 가까운 곳으로 입사하는 광선에 한정하여 상의 특징을 연구하는데 유용한 방법이고, 이 경우 광선들 사이 발산각이 작아서 평행광선에 가깝다. 실제로 사람 눈에 의한 결상 현상을 연구하는데 있어 동공의 직경은 수 밀리미터로 작기 때문에 근축근사가 유용하게 사용된다.

Figure 1은 평행광선이 사람눈의 각막에 입사하는 경우 광선의 경로와 결상점을 나타내고 있다. 각막, 수정체 및 수정체핵에 대한 기하학적 수치는 굴스트란드 모형안의 값을 사용하였다. Figure 1(a)의 작은 점들은 광선과 각막 및 수정체, 수정체 핵의 각 면에서의 접점을 나타낸다. 이 점들을 부드럽게 이으면 각막 및 수정체 등의 모양이 되는데, 이는 Fig. 1(b)에 나타내었다.

Figure 2(a)는 각각 평행광선이 입사하는 경우 결상점 주변을 확대한 그림이다. 수직선은 굴스트란드 모형안의 망막의 위치로 각막 전면으로부터 거리가 23.99 mm이다. 광축 근처로 입사하는 광선들은 망막의 뒷쪽에 결상되고, 광축에서 먼 곳으로 입사하는 광선들은 망막의 앞에 결상되는 것을 확인할 수 있다. Figure 2(b)는 각 광선들의 입사 높이에 따른 초점, 즉 결상점을 각막으로부터 거리에 대한 그래프이다. 대

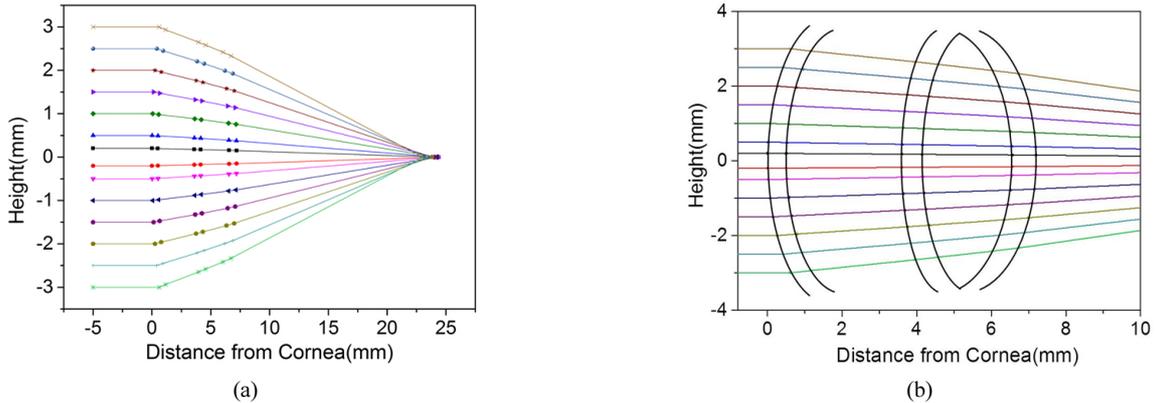


FIG. 1. For parallel ray incident (a) rays inside the human eye (b) cornea, lens, lens core surface.

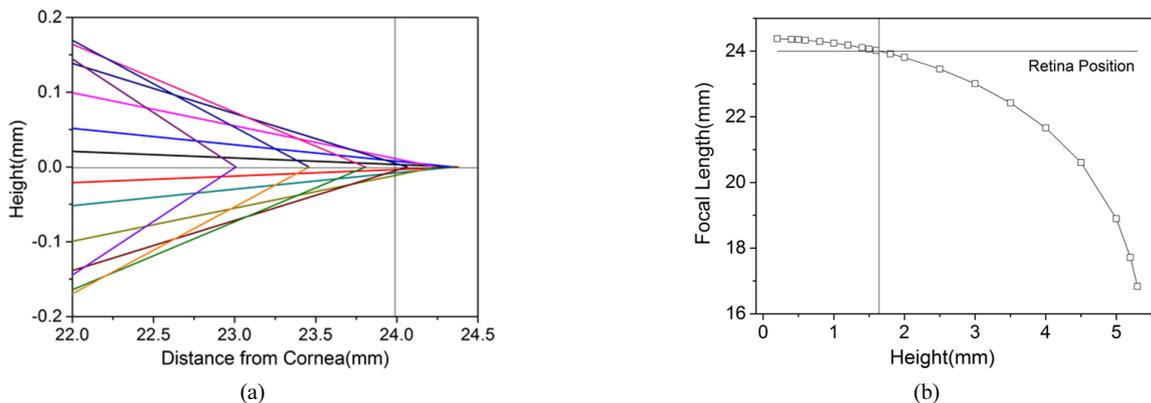


FIG. 2. For parallel ray incident (a) focal point (b) focal length.

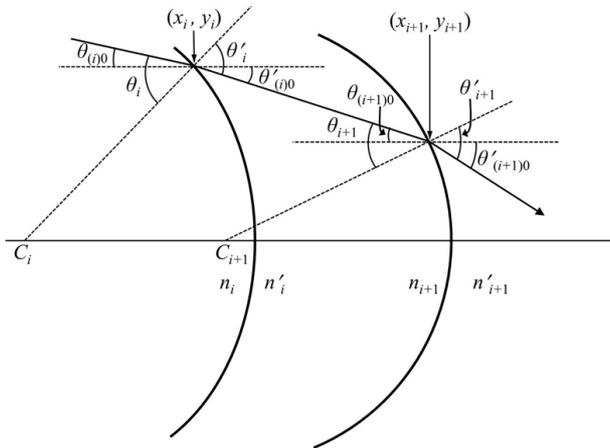


FIG. 3. ray tracing with Snell's law.

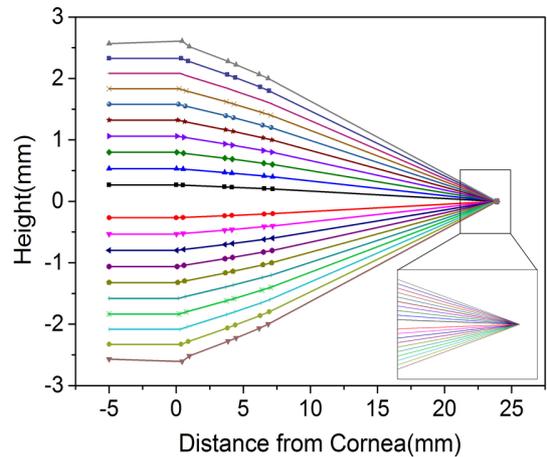


FIG. 4. rays for a single focal point.

약 1.64 mm를 기점으로 그 높이 이상으로 평행하게 입사하는 광선은 망막 앞쪽에 결상되는 것을 확인할 수 있다.

Figure 1과 Fig. 2에 나타난 광선의 경로는 근축근사 없이 스넬의 법칙으로 계산한 것이다. 광선의 경사각, 접점 등은 Fig. 3에 나타내었으며, 이를 계산하기 위한 각 면에서 입사각, 출사각, 경사각에 대한 관계식은

$$\theta_{(i)0} = \theta'_{(i-1)0}, \quad \theta_i = \sin^{-1}\left(\frac{y_i}{R_i}\right) + \theta_{(i)0}, \quad (1)$$

$$\theta'_i = \sin^{-1}\left(\frac{n_i}{n_{i+1}} \sin(\theta_i)\right), \quad \theta'_{(i)0} = \theta'_i - \sin^{-1}\left(\frac{y_i}{R_i}\right) \quad (2)$$

와 같다. 앞 굴절면의 한 점 (x_i, y_i) 에서 굴절된 광선의 굴절각을 계산하여 다음 굴절면까지 진행하는 광선에 대한 직선의 방정식과 굴절면의 원의 방정식의 공통해가 광선이 굴절되는 점 (x_{i+1}, y_{i+1}) 이 되고, 이점에서 스넬의 법칙에 의하여 굴절각을 계산하는 방식을 연속적으로 적용하여 최종 결상점을 찾는다. 즉,

$$y_{i+1} = \alpha_i x_{i+1} + d_i, \quad (x_{i+1} - C_{i+1})^2 + y_{i+1}^2 = R_{i+1}^2. \quad (3)$$

여기서 직선의 방정식의 기울기와 y -절편은 각각

$$\alpha_i = \tan(-\theta_{(i+1)0}), \quad d_i = y_{i+1} - \tan(-\theta_{(i+1)0}) x_{i+1} \quad (4)$$

이다.

III. 결상점 교정

앞 절에서 광축에서 먼 곳으로 입사하는 광선들은 과굴절되어 망막의 앞에 맺힐 뿐만아니라, 각 광선들의 결상점이 달라서 구면수차가 발생함을 확인하였다. 구면수차를 교정하

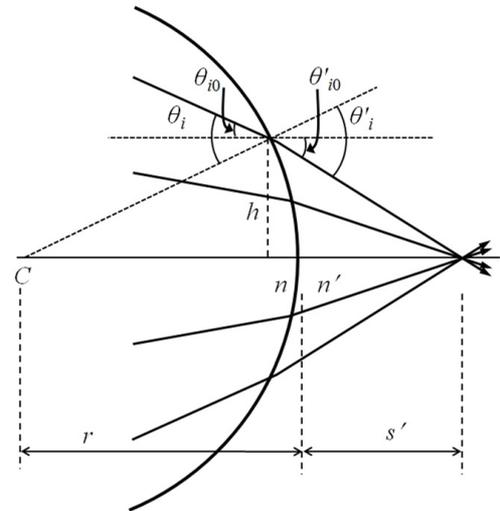


FIG. 5. ray reverse tracing for a single focal point.

기 위하여, 역으로 눈의 한 점, 굴스트란드 모형안에서 망막의 위치에 모든 광선이 모일 수 있는 입사 조건을 계산하고자 한다. 이를 위하여 망막의 한 점으로부터 광선을 역추적하여 망막에 입사하는 각, 즉 높이에 따른 입사각을 계산하고자 시도하였다. Figure 4는 동일한 결상점을 갖도록 광선 추적 법으로 계산된 광선들을 보여주고 있다.

Figure 5는 Fig. 4의 광선추적하기 위한 광선 및 굴절에 의한 각 및 상수들을 그림으로 도식한 것이다. 동일한 결상점으로부터 광선을 역방향으로 그리고, 눈을 구성하는 수정체, 수정체핵 및 각막과 만나는 점을 순차적으로 계산하였다.

Figure 5에 나타내어진 각 사이의 관계식은

$$\theta'_i = \theta'_{i0} + (\theta_i - \theta_{i0}) \quad (5)$$

이 되고, 여기서

$$\theta_i - \theta_{i0} = \sin^{-1}\left(\frac{h}{r}\right), \theta'_{i0} = \tan^{-1}\left(\frac{h}{s' + r(1 - \cos(\theta_i - \theta_{i0}))}\right) \quad (6)$$

입을 이용하면

$$\theta'_i = \sin^{-1}\left(\frac{h}{r}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{h}{s' + r(1 - \cos(\theta_i - \theta_{i0}))}\right) \quad (7)$$

을 얻는다. 평행빔이 입사하여 각기 다른 점에 결상한 경우와 한 점에 결상하도록 교정한 경우의 결과를 비교하기 위하여, 수정체의 후면에서 굴절된 광선의 경사각 θ'_{i0} 을 계산함에 있어 스넬의 법칙 $n \sin \theta_i = n' \sin \theta'_i$ 을 이용한다. 따라서 입사각은

$$\theta_i = \sin^{-1}\left(\frac{n'}{n} \sin \theta'_i\right) \quad (8)$$

이고, 관계식 $\theta'_{i0} = \theta'_i - \sin^{-1}\left(\frac{h}{r}\right)$ 을 이용하면

$$\theta'_{i0} = \sin^{-1}\left(\frac{n'}{n} \sin \theta_i\right) - \sin^{-1}\left(\frac{h}{r}\right) \quad (9)$$

을 얻는다.

Figure 6은 입사 높이에 따라 수정체 후면에서 경사각을 나타낸 것이다. 동그라미는 한 점에 결상하도록 교정된 경우의 계산 값이고, 사각형은 Fig. 1에서 계산된 구면수차를 동반한 값이다. 입사 높이가 작을 때는 두 값들에 차이가 적지만, 입사 높이가 높아지면 점차 그 차이가 커짐을 볼 수 있다. 이는 입사 높이가 높아짐에 따라 과굴절되어 구면수차가 커지기 때문에 이를 교정하기 위하여 그 차이가 점차 증가하

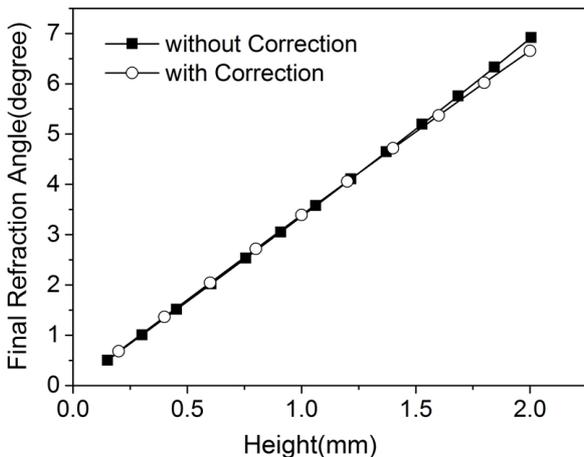


FIG. 6. Angle of inclination of the refracted ray at the lens rear surface as the height.

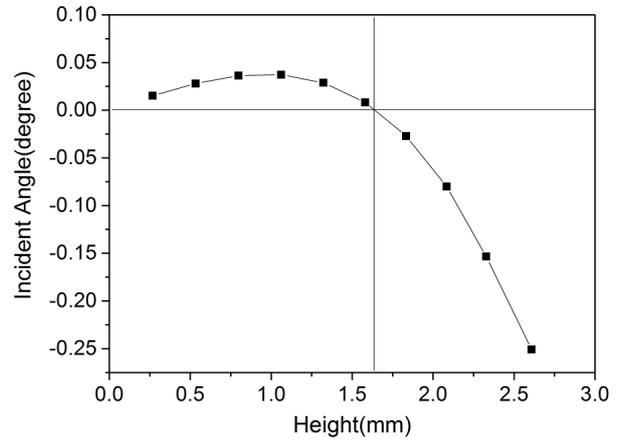


FIG. 7. Angle of inclination of the incident ray at the cornea front surface as the height.

는 것을 의미한다.

Fig. 7은 모든 광선이 망막의 한 점에 결상하기 위하여 눈의 각막전면에서의 입사각이다. 광축 근처로 입사하는 광선들은 높이에 따라 입사각이 증가하다가 다시 입사각이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이 현상은 Fig. 2(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 평행하게 입사한 광선들의 결상점은 망막 뒤에 결상하다가 광축에서 높게 입사하는 광선들은 점차 결상점이 망막 앞에 맺히게 된다. 따라서 망막 위치에 정확하게 결상하기 위해서는 광축으로부터 낮은 높이로 입사하는 광선들은 결상점을 망막위치로 끌어 당겨야 하고, 반대로 광축으로부터 높은 곳으로 입사하는 광선들은 뒤쪽으로 결상점을 밀어주어야 한다.

Figure 7에서 입사각이 0이 되는 높이는 대략 1.64이고, 이는 이 높이로 평행하게 입사하는 광선은 굴스트란드 모형안에서 정확히 망막 위치에 상을 맺히는 것을 의미한다. 또한 Fig. 2(b)에서 평행하게 입사하여 망막의 위치에 상을 맺히는 입사 높이와 일치한다.

IV. 비구면렌즈 설계

Figure 7에서와 같이 각막에 입사하는 광선의 높이에 따른 입사각을 이용하여 광선을 앞쪽으로 연장하여 비구면 안경렌즈를 설계하고자 한다. 비구면 안경렌즈는 앞면과 뒷면 모두 비구면으로 가공할 수 있지만 본 연구에서는 논의를 쉽게 하기 위해서 렌즈 후면은 구면으로 고정하고 전면의 곡률을 조정하기로 한다. 즉 Fig. 7의 높이에 따른 입사각을 만족할 수 있는 안경렌즈 전면의 곡률을 계산하고자 한다.

비구면 렌즈를 설계하기 위하여, Fig. 5의 한 점에 결상하는 광선들을 역추적하여 각막의 전면에서의 입사각(Fig. 7)을 계산한 다음, 이를 역추적하여 안경렌즈의 후면에서 굴절된 광선을 비구면 가공하고자 하는 전면을 역방향으로 연장하여 높이에 따른 각 점에서의 곡률을 계산하였다. 즉 Fig. 7의 높이에 따른 직선의 방정식을 연장하여 안경렌즈 전면

서 굴절한 광선에 대한 직선의 방정식과 스넬의 법칙을 만족시키는 곡률을 찾아야 한다.

여기서 비구면의 곡률은 구면의 곡률에 비해 작아야하기 때문에 반지름은 $r \geq r_b$ 이어야 한다. Fig. 8의 전면 점선은 구면이고, 실선은 설계하고자 하는 비구면이다. 비구면의 높이에 따른 각 점은 각각의 곡률을 갖게 되고 이는 광선들이 망막의 동일한 점에 상을 맺도록 곡률이 계산되어야 한다.

Figure 9의 첫 번째와 두 번째 곡선은 각각 안경렌즈의 전면과 후면을 나타낸다. 그리고 마지막 세 번째 곡선이 각막의 전면을 의미한다.

렌즈 후면은 일정한 곡률을 갖는 구면으로 두고, 렌즈의 후면에서의 굴절된 광선을 렌즈 전면으로 연장하여 렌즈의 전면에서 굴절한 후 평행광선이 되도록 한다. 즉 평행광선이 입사하도록 높이에 따른 곡률을 계산하여 전면을 비구면으로 설계 하고자 한다.

렌즈 후면의 반지름을 r_b 로 고정하고 높이에 의존하는 전면의 반지름을 계산하기 위하여 후면에서 굴절 관계식은 $n_L \sin \theta_b = 1 \sin \theta'_b$ 이고, 굴절각과 입사각(각막에서 렌즈 후면

으로 입사하는 광선)은 각각

$$\theta'_b = \theta'_{b0} + \sin^{-1}\left(\frac{y_b}{r_b}\right) = \theta_{10} + \sin^{-1}\left(\frac{y_b}{r_b}\right) \quad (10)$$

$$\theta_b = \sin^{-1}\left(\frac{1}{n_L} \sin(\theta'_b)\right) \quad (11)$$

이다. 그리고

$$\theta'_{b0} = \theta_{10}, \theta_{b0} = -\theta_b + \sin^{-1}\left(\frac{y_b}{r_b}\right). \quad (12)$$

여기서 아래첨자 “b”는 렌즈의 후면을 의미한다. 이제 광선을 역방향으로 연장하여 렌즈의 전면에서의 굴절 방정식으로 부터 전면의 높이에 따른 곡률반경을 계산한다.

광선이 렌즈의 전면으로 평행하게 입사한다고 가정하자. 이 경우

$$\theta_a = \theta_{a0} = \sin^{-1}\left(\frac{y_a}{r}\right), \quad (13)$$

$$\theta'_a = \theta_a - \theta'_{a0} = \theta_a - \theta_{b0}. \quad (14)$$

여기서 아래첨자 “a”는 비구면으로 가공되는 렌즈의 전면을 의미하고, 렌즈 전면에서의 스넬의 법칙 $1 \sin \theta_a = n_L \sin \theta'_a$ 과 $\theta'_a = \theta_a - \theta_{b0}$ 그리고 사인함수 공식을 이용하면

$$1 \sin \theta_a = n_L (\sin \theta_a \cos \theta_{b0} - \cos \theta_a \sin \theta_{b0}) \quad (15)$$

이 되고, 이를 정리하면

$$\tan \theta_a = \frac{n_L \sin \theta_{b0}}{n_L \cos \theta_{b0} - 1} \quad (16)$$

이 된다. 식 (13)과 식 (16)으로부터

$$\theta_a = \sin^{-1}\left(\frac{y_a}{r}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{n_L \sin \theta_{b0}}{n_L \cos \theta_{b0} - 1}\right) \quad (17)$$

이다. 따라서 높이와 곡률반경 사이의 관계식은

$$y = \sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{n_L \sin \theta_{b0}}{n_L \cos \theta_{b0} - 1}\right)\right) r \quad (18)$$

와 같다. 위 식과 렌즈 내부에서의 직선의 방정식, 그리고 안경렌즈 전면의 원의 방정식은

$$x^2 + y^2 = r^2$$

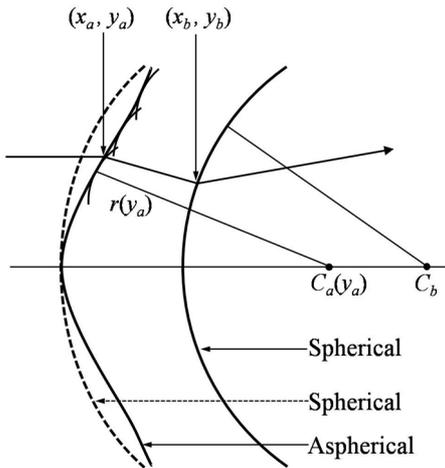


FIG. 8. Basic concept for an aspherical lens design.

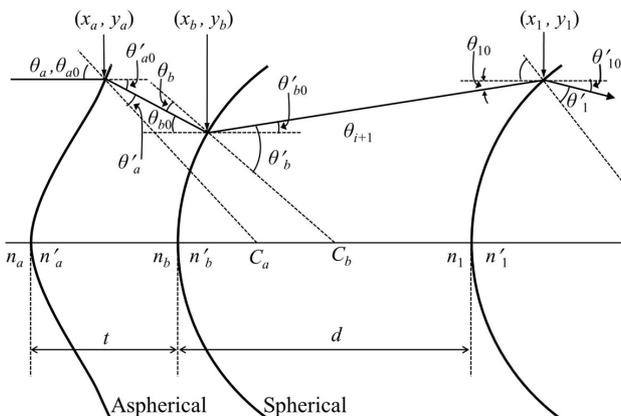


FIG. 9. Parameters for an aspherical lens design.

$$y = \tan(-\theta_{i0})x + (y_b - \tan(-\theta_{i0})x_b) \quad (19)$$

$$r \geq r_b$$

으로부터 구해지는 해는 비구면에 대한 좌표와 반지름은 각각 (x_a, y_a) 와 $r(y_a)$ 이고, 높이에 따른 반지름 값으로 비구면을 설계할 수 있다.

Figure 10은 구면렌즈와 비구면 렌즈에 대한 굴절광선의 경사각을 보여준다. 즉 평행광선이 입사하는 경우, 구면렌즈(4.5D)에 의한 굴절 광선과 한 구면수차가 보정된 비구면 렌즈의 전면에 의한 굴절광선의 경사각을 비교한 것이다. 구면 렌즈의 경우, 입사 높이에 따라 경사각은 선형적으로 증가하는 반면 구면수차가 교정된 비구면렌즈의 경우 증가 비율도 상대적으로 매우 작고 완만한 곡선을 이룬다.

Figure 11은 굴절률이 1.52인 렌즈를 비구면으로 설계하는 경우 광선의 입사 높이에 따른 전면의 반경이다. 구면렌즈의 경우 입사 높이에 상관없이 반경이 일정한 값을 갖지만 비구면렌즈의 반경과 굴절력은 입사 높이에 따라 변하는 것을 확인할 수 있다. 물론 실제 설계하고자하는 렌즈의 굴절률 등

광학 상수에 따라 반경이 달라지기 때문에 Fig. 11에 나타는 값은 절대적인 값이 아니다. 다만 앞에서 비구면 렌즈 설계 기법에 의하여 광선들이 한 점에 상을 맺을 수 있도록 높이에 따른 반경을 계산하는 방법이 잘 작동하는 것을 확인할 수 있는 결과이다.

V. 결 론

눈을 구성하는 광학요소를 포함하여 흔히 쓰는 구면렌즈는 구면수차를 동반한다. 광선이 입사하는 높이에 따라 구면렌즈의 굴절력이 다르고, 이에 따라 광축으로부터 입사 높이가 높아질수록 망막 앞에 상을 맺게 된다. 이를 해소하기 위하여 비구면 렌즈를 설계할 때 근축근사를 보정한 고위차수를 계산에 포함시킨다. 보다 높은 고위차수를 포함시킴에 따라 보정효과의 정밀도를 높일 수 있다.^[7-9]

본 연구에서는 고위차수를 사용하지 않고 근본적으로 오차가 없는 스넬의 법칙을 사용하여 구면수차를 보정한 비구면 렌즈 설계를 시도하였다. 이를 위하여 우선 스넬의 법칙을 이용하여 평행광선이 각막에 입사하는 입사 높이에 따른 상의 위치를 계산하여 구면수차를 확인하였다. 구면수차를 보정하기 위하여 굴스트란드 모형안에서 제시하는 망막위치에 모든 광선이 결상하는 것을 가정하여 이 점으로부터 반대방향으로 광선을 추적하여 망막에 입사하는 광선의 입사각을 계산하였다.

또한 이 광선들을 역추적하여 비구면 렌즈를 설계하였다. 이때 렌즈의 후면은 구면으로 고정하고, 렌즈 전면을 비구면으로 설계하는 방식을 채택하였다. 즉, 망막의 한 점으로부터 광선을 역추적하여 비구면인 렌즈의 전면에서 굴절하여 평행광선이 되도록 렌즈 전면의 각 점(입사 높이)에 대한 각각의 반지름을 계산하였다.

구면인 경우 입사 높이에 상관없이 같은 반지름을 갖지만, 본 연구에서 계산한 비구면 렌즈는 광선의 입사 높이에 따라 반지름이 달리 계산되는 것을 확인하였으며, 이에 따라 본 계산법이 비구면 설계에 적절한 방법임을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 앞에서 언급한 바와 같이 근축근사나 고위차수를 도입하는 것이 아니라, 오차가 없는 스넬 법칙만을 이용하였다는 데 의미가 있다.

향 후 이 방법을 사용하여 실제 환자의 눈 굴절력 상태에 대한 정보를 적용하여 비구면을 설계하는데 활용 될 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부지정 을지대학교 바이오-메디테크 산업화 지역혁신센터의 지원에 의한 것입니다.(제2015-02-05)

Reference

1. Helmholtz H: Treatise on Physiological Optics. Vol. 1. New

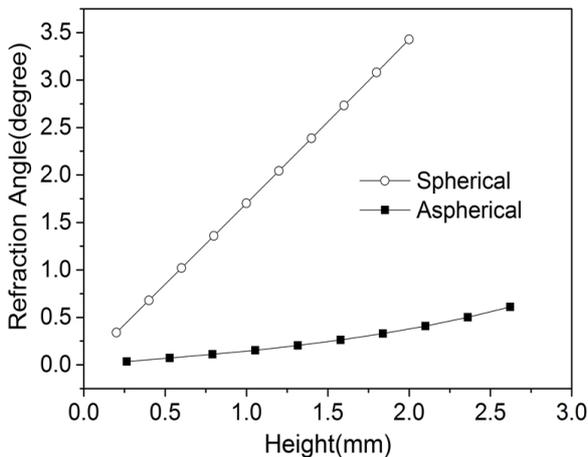


FIG. 10. Refraction angle at a lens surface for an aspherical surface and a spherical surface of 4.5D.

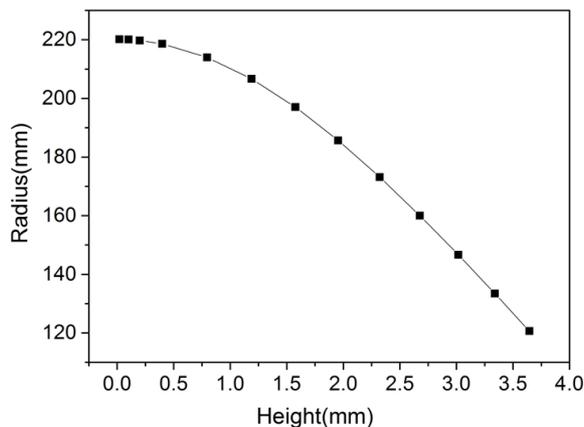


FIG. 11. Radius of a calculated aspherical lens.

- York: Dover, (1924).
2. H. S. Kim, K. Y. Park, W. K. Lee, and J. U. Jeon, “Design of Spherical Aberration Free Aspherical Lens by Use of Ray Reverse Tracing Method”, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, **20**, 191-198 (2003).
 3. S. Y. Kim, M. S. Han, T. H. Kim, J. W. Park, M. J. Kim, and E. C. Jeon, “Design of Aspheric Lens by using Ray Tracing Method”, *J. of the Korean Soc. of Manufacturing Process Wng.* **6**, 7-12 (2007).
 4. G. I. Kweon and C. H. Kim, “Aspherical Lens Design by Using a Numerical Analysis”, *J. of the Korean Phy. Soc.* **51**, 93-103 (2007).
 5. K. B. Wolf and G. Krotzsch, “Geometry and dynamics in refracting systems”, *European Journal of Physics*, **16**, 14-20 (1995).
 6. R. Rashed, “A pioneer in anacalistics: Ibn Sahl on burning mirrors and lenses”, *Isis*, **81**, 464-491 (1990).
 7. C. Pruss, E. Garbusi, and W. Osten, “Testing aspheres”, *Optics & Photonics News* **19**, 26 (2008).
 8. Y.-W. Lee, I. K. Moon, Hagyong Kihm, and Ho0Soon Yang, “Large Aspheric Optics and Its Applications”, *Korean Journal of Optics and Photonics*, **24**, 111-119 (2013)
 9. Doocheol Kim, Sanghoon Shin, and Younghun Yu, “Aspheric Lens Measurements by Digital Holographic Microscopy and Liquid”, *Korean Journal of Optics and Photonics*, **24**, 318-323 (2013)