

## 구면수차를 이용한 정밀모형안의 최적화

김상기 · 박성찬†

단국대학교 첨단과학대학 전자물리학전공  
 ㉠ 330-714 충남 천안시 안서동 산 29번지

(2002년 1월 29일 받음, 2002년 4월 9일 수정본 받음)

구면수차와 Stiles-Crawford 효과를 기준으로 4개의 굴절비구면을 가지는 모형안을 최적화 기법으로 설계하였다. 구속조건으로는 측정된 안구의 곡률반경, 중심두께, 비구면도, 구면수차를 사용하였다. 또한 동공에서의 Stiles-Crawford 효과를 고려하여 최적화하였다. 최적화의 결과로 얻은 모형안의 근축영역값들은 유효초점거리 20.8169 mm, 상측정점초점거리 15.4820 mm, 물측정점초점거리 -13.8528 mm, 상거리 15.7150 mm이다. 본 논문의 모형안은 한국인 정시 75안을 대상으로 측정되어진 자료를 바탕으로 국내에서 처음으로 제작된 정밀모형안이다.

주제어 : model eye, spherical aberration, optimization.

### I. 서 론

모형안(schematic eye)은 근축모형안(paraxial schematic eye)과 정밀모형안(finite schematic eye)으로 크게 분류한다.

근축모형안은 근축기하광학이 적용되는 모형안이다. 입사각 2°미만의 물체공간과 입사동 0.5 mm 미만인 영역에서 적용되어서, 망막의 위치, 상크기, 안구의 배율, 망막조도, 면반사(Purkinje images), 입사동, 출사동, 굴절이상(refractive error), 수정체가 조절(accommodation)할 때 주요점의 이동 등과 같이 1차량(first orders)을 정의한다.

근축모형안은 1909년 Helmholtz가 Listing의 모형안을 수정하여 조절모형안을 기술하고, 단일면 모형안도 개발하였다. 1900년 Tscherning이 4면 모형안을 발표하였으며, 1909년 Gullstrand는 현재 안광학(visual optics) 교육의 기초로 사용되어지고 있는 Gullstrand 모형안을 발표하였다. 그 후 Emsley가 Gullstrand의 단순모형안을 수정하여 Gullstrand-Emsley 모형안을 제작하였고, 이 단순모형안이 현재 안광학에서 표준으로 널리 사용되어진다.<sup>[1]</sup>

정밀모형안은 4면 이상의 비구면을 가지고, 근축모형안의 광학적인 성질을 포함하고, 근축모형안 보다는 상대적으로 큰 망막상 크기와 수차, 회절, Stiles-Crawford 효과, 그리고 retinal sampling 등에 의한 상의 특성을 예측할 수 있는 모형안이다.

정밀모형안 약사는 1971년 Lotmar, 1983년 Kooijman, 1985년 Navarro가 4면 모형안을 제작하였고, 1997년 Liou와 Brennan이 모형안을 개발하였다. 계속하여서 모형안은 사용 환경에 맞추어져서 개발되고 있다.<sup>[2]</sup>

본 논문에서 연구한 모형안은 한국인 정시 75안을 대상으로 측정되어진 자료를 바탕으로 제작되었으며, 명소시(photopic vision)를 기준으로 동공(pupil) 직경이 4 mm일 때를 기준으로 설계되었다. 또한 비축에 있는 고시점(fixation point)을 보기

위하여는 안구가 회전(rotation)을 하므로, 광축상의 물체점을 기준으로 모형안을 설계하였다.

### II. 모형안 이론

안광학에서 근축기하광학의 가우스 결상식 표현은 대부분 버전스(vergence)에 의하여 표현이 되어진다.

그림 1에서 버전스는

$$S = \frac{n}{s}, S' = \frac{n'}{s'} \quad (1)$$

와 같이 주어지며, 식 (1)은 광선속이 있는 공간에서 축소거리의 역수로 표현된 식이다. 여기서,  $n$ 과  $n'$ 은 각각 물체·상공간의 굴절률,  $s$ 와  $s'$ 은 각각 물체·상거리,  $S$ 와  $S'$ 은 각각 광학면의 입사·출사버전스(광선속의 수렴, 발산에 대한 부호적 표현은 각각 +와 -)이다.

광선속의 버전스 표현을 가지고 가우스 결상식을 표현하면 다음과 같다.

$$S + D' = S' \quad (2)$$

여기서,  $D'$ 은 광학면의 굴절능(power)이다. 또한 횡배율( $M_T$ )은 식 (3)에서 입사·출사버전스에 의해 표현된다.

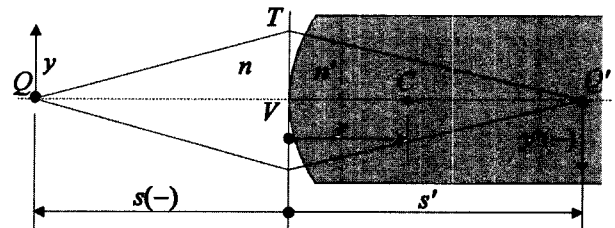


그림 1. 단일면에서 광선속의 굴절. 여기서,  $Q$ : 물체점,  $Q'$ : 공액점,  $V$ : 정점,  $r$ : 곡률반경,  $C$ : 곡률반경중심,  $s, s'$ : 물체 및 상거리,  $y, y'$ : 물체 및 상크기,  $VT$ : 접평면.

†E-mail: scpark@dankook.ac.kr

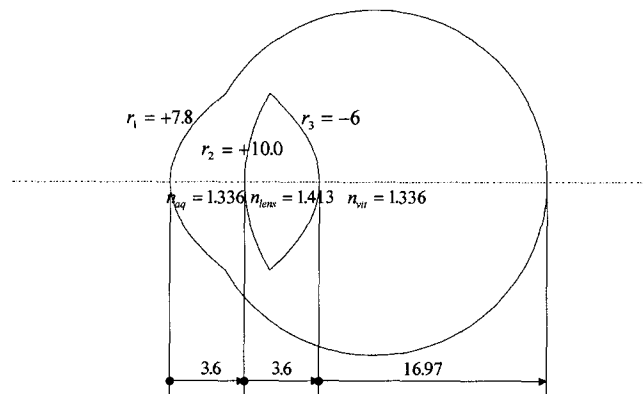


그림 2. Gullstrand 단순 3면 모형안(단위 mm). 여기서,  $r_1$ : 각막의 환산곡률반경,  $r_2$ : 수정체전면곡률반경,  $r_3$ : 수정체후면곡률반경,  $n_{aq}$ : 방수의 굴절률,  $n_{lens}$ : 수정체의 굴절률,  $n_{vit}$ : 초자체의 굴절률.

$$M_T = \frac{y'}{y} = \frac{S}{S'} \quad (3)$$

여기서,  $y$ 는 물체의 횡 크기,  $y'$ 은 상의 횡 크기이다.

근축모형안은 사용환경에 따라 환산모형안(reduced schematic eye), 단순모형안(simplified schematic eye), 가변조절모형안(variable accommodation eye)등으로 분류된다. 그림 2는 Gullstrand 3면 단순모형안이다. 광학요소들에 의해 모형안은 구성되었으나, 모형안 자체가 해부학적인 입장에서 광학요소인 곡률반경과 중심두께가 결정이 되었기 때문에 안구의 3차수차 이상의 광학적인 특성은 모형안에서 관찰할 수 없다. 그러므로, 근축모형안은 비정시(ametropia) 즉, 근시(myopia), 원시(hypermetropia), 난시(astigmatism)와 같은 1차량인 종초점 이동(defocus)값과 망막상의 배율을 예측하는 경우와 같이 제한적으로 사용되어진다. 이러한 예측들은 눈앞에 안경과 같은 렌즈를 배열함으로써 비정시를 가진 안구가 인위적인 정시를 얻는 과정을 설명하는데 사용된다. 또한 광학기기를 개발할 때에도 이용된다.

### III. 정밀모형안 최적화 설계 변수

정밀모형안 설계의 목표는 안구의 시기능을 예측하고, 안광학계 각각의 광학적 요소가 안구 전체의 시기능 변화에 어떠한 영향을 주는지 예상하는데 있다. 시기능을 수행하는 모형안을 만들기 위하여 안광학계는 일반광학계와 동일한 방법으로 다룰 수 있지만 안구는 망막과 시신경을 포함하고 있어 일반광학계와 차이가 있다. 시신경은 수정체를 변화시켜 자동초점을 맺히게 하고, 빛의 밝기에 따라 동공을 조절하며, 시야의 중심을 맞추기 위해 안구를 회전하는 역할을 한다.

시기능은 단색광 수차와 색수차, 광학적 요소의 횡초점 이동, 편심, 곡률이상, 노안에 따른 광학적 요소의 손상(대부분 수정체의 손상), 망막의 위치가 상면 위치에 불일치 되었을 때의 불선명상(즉, 비점으로 인한 혼란, 피로), 불완전하거나 손상을 입은 시신경 등으로 인해 제한되어진다. 평균적으로 측정되

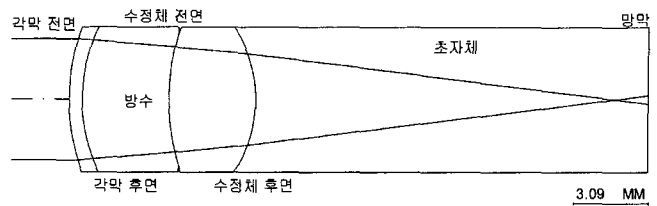


그림 3. 평균측정값을 기준으로 한 정시모형안의 개략도.

어진 안구의 각 면의 곡률, 중심두께, 비구면도, 구면수차, Stiles-Crawford 계수 등의 값은 있으나, 시기능의 제한이 상대적으로 큰 표준편차를 가지게 한다. 또한 광학계는 광학요소 간의 종속적인 관계에 의하여 구성이 되어지는 것이어서 독립적으로 측정된 평균값을 가지고 안구 고유의 광학적 특성을 가지는 모형안을 만들 수는 없다. 본 논문에서는 이러한 문제점들을 해결하기 위해 측정값들을 구속조건(constraint)으로 놓고 최적화의 방법을 통하여 정밀모형안을 제작하고자한다.

#### 3.1. 눈의 곡률반경 및 중심두께 측정값

정밀모형안을 제작하기 위하여 눈의 곡률반경 및 중심두께는 한국인 75 정시안(emmetropia)에 대한 평균측정값을 기초 설계값으로 사용하였다. 그림 3은 평균값을 기준으로 만든 모형안의 구성도이고, 표 1은 측정값이다.<sup>[3]</sup>

표 1과 그림 3에서 보듯이 평균측정값의 표준편차가 매우 크다. 안광학의 굴절이상(굴절이상)은 기하광학의 종초점 이동에 해당된다. 평균측정값을 가지고 광학계를 구성하여 계산된 종초점 이동값은 망막을 기준으로 하여  $-0.4938$  mm이다. 이를 평균측정 모형안에서 디옵터 단위로 환산하면  $-1.46$  Diopter인 근시안이 되어 측정된 종초점 이동값(굴절이상)과 일치하지 않는다. 결과적으로 표 1과 그림 3의 정시모형안은 안구 고유의 광학적 특성을 표현하기에는 부적절하며, 따라서 수정설계가 필요하다. 정밀모형안의 최적설계는 측정값과의 조화를 위하여 표준편차의 범위 내에서 하였다.

#### 3.2. 비구면도

그림 4에서 보여진 2차 곡면에 대한 방정식은 다음과 같이 주어진다.

표 1. 75 정시안의 평균측정값과 매개변수(단위는 mm. 단, \*의 단위는 Diopter임)

	평균측정값	표준편차
각막전면 곡률반경	7.829	0.294
각막중심두께	0.54311	0.03143
각막후면 곡률반경	6.346	0.362
방수중심두께	3.574	0.196
수정체전면 곡률반경	8.549	0.566
수정체 중심두께	3.575	0.171
수정체후면 곡률반경	-5.018	0.340
초자체 길이	16.233	0.518
굴절이상(refractive error)*	-0.131	0.216

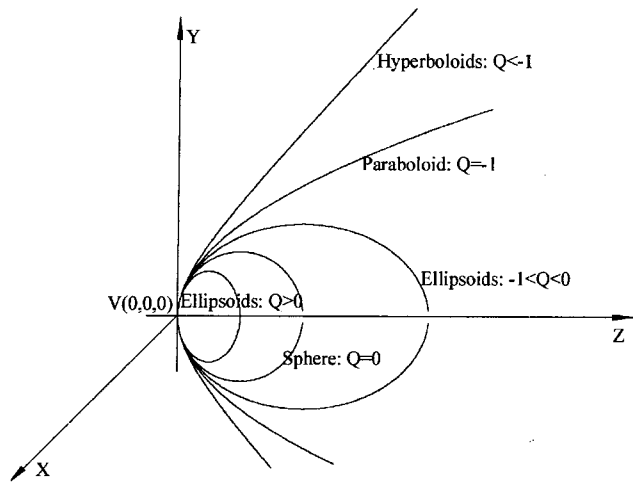


그림 4. 비구면도에 따른 2차 곡면들. 모든 곡면은 같은 정점곡률 반경을 가짐.

$$h^2 + (1 + Q) Z^2 - 2ZR = 0 \tag{4}$$

여기에서 Z축은 광축이고,  $h^2 = X^2 + Y^2$ 의 관계를 가진 상면좌표이고, R은 정점곡률반경이며, Q는 비구면도를 표현한다. 비구면도는  $Q < -1$ 은 쌍곡면,  $Q = -1$ 은 포물면,  $-1 < Q < 0$ 은 장축 타원면,  $Q = 0$ 은 원,  $Q > 0$ 은 단축타원면인 관계가 있다.

각막전면 비구면의 광학적 특성은 구면수차를 감소시키는데 있다. 각막굴절률이 1.376인 Gullstrand 6면 모형안에서 구면수차를 제거하기 위해 요구되는 비구면도는 이론적으로 -0.528인 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 최적화를 위하여 이론적인 값 대신 Lam과 Douthwaite가 60명의 젊은 중화민국 홍콩인에 대해 측정된 값인  $-0.66 \pm 0.38$ 을 사용하였다.<sup>[4]</sup>

각막후면은 각막전면과 비교하여 각막과 방수 굴절면사이의 상대적으로 작은 굴절률 변화로 인해 작은 굴절능(power)을 가지게 된다. 본 논문에서 최적화를 위하여 사용되었던 비구면도 값은 Lam과 Douthwaite의 측정값  $-0.31 \pm 0.13$ 이다.<sup>[4]</sup>

수정체는 나이에 따라 연속적으로 성장되는 비균일 GRIN 렌즈와 같은 굴절률 특성을 가진 렌즈이다. 이로 인해 수정체의 정확한 굴절률을 알 수 없어 곡률반경을 결정하는데 어려움이 있다. 또한 수정체는 탄성 캡슐로 되어져서 안구에서 근거리, 원거리를 볼 수 있는 줌렌즈의 역할을 한다. 수정체의 굴절률 분포는 중심부가 굴절률이 제일 크고 주변부로 갈수록 굴절률이 작아진다. 중심부를 내핵이라 하고 굴절률은 변화가 없는 상수값이다. 전면 피층부터 후면 피층까지 굴절률 변화가 연속적으로 일어나므로, 광학계 전체의 구면수차를 보정하는데 기여한다. 수정체의 굴절률 변화를 표현한 Gullstrand의 분포 방정식은 다음과 같다.<sup>[5]</sup>

$$n(Y, Z) = 1.406 - 0.0062685(Z - Z_0)^2 + 0.0003834(Z - Z_0)^3 - \{0.00052375 + 0.00005735(Z - Z_0) + 0.00027875(Z - Z_0)^2\} Y^2 - 0.000066717 Y^4 \tag{5}$$

여기서 n은 수정체의 굴절률이다. 좌표중심은 수정체 전면 정점이고, Y는 광축과의 횡위치, Z는 광축 방향의 위치이다.  $Z_0$ 는 비조절 수정체의 중심이고, Gullstrand는 1.7 mm를 사용하

였다. 이 방정식에서 굴절률 분포는 내핵 1.406에서 시작하여 피층 끝으로 가면 1.386으로 되어 점진적으로 감소한다. 식 (5)에서 수정체의 중심두께는 3.6 mm이다.

정밀모형안 최적화설계에서 수정체 전면과 후면의 비구면도는 Smith 등이 59안을 가지고 측정한 값인  $-1.08 \pm 9.41$ ,  $-0.12 \pm 1.74$ 를 각각 사용하였다.<sup>[6]</sup> 이 자료는 표준편차를 가지고 있는 최근의 자료이어서 최적화에 사용하였다.

### 3.3. 굴절률

모형안을 제작하려면 눈의 분산(dispersion)을 정의하여야 한다. Le Grand는 다음과 같은 분산방정식을 사용하여 안구 광학 굴절률의 분산을 결정하였다.<sup>[7]</sup>

각막에서의 굴절률;

$$[n(\lambda) \pm 1.08 \times 10^{-3}] = 1.51167 - 0.000636054\lambda + (1.17 \times 10^{-6}\lambda^2) - (1.01 \times 10^{-9}\lambda^3) + (3.31 \times 10^{-13}\lambda^4) \tag{6}$$

방수에서의 굴절률;

$$[n(\lambda) \pm 1.67 \times 10^{-3}] = 1.49072 - 0.000805138\lambda + (1.68 \times 10^{-6}\lambda^2) - (1.66 \times 10^{-9}\lambda^3) + (6.31 \times 10^{-13}\lambda^4) \tag{7}$$

수정체에서의 굴절률;

$$[n(\lambda) \pm 2.18 \times 10^{-4}] = 1.53808 - 0.000448268\lambda + (5.74 \times 10^{-7}\lambda^2) - (2.61 \times 10^{-10}\lambda^3) \tag{8}$$

초자체에서의 굴절률;

$$[n(\lambda) \pm 3.81 \times 10^{-4}] = 1.45634 - 0.000561861\lambda + (1.02 \times 10^{-6}\lambda^2) - (8.70 \times 10^{-10}\lambda^3) + (2.84 \times 10^{-13}\lambda^4) \tag{9}$$

여기서 파장( $\lambda$ )의 단위는 nm이다. 그림 5는 Le Grand의 방정식에 기초하여 작성된 안구 광학재질의 분산 특성이다.

본 논문은 안구 광학 재질의 굴절률과 아베수에 대하여는 식 (6)~(9)와 그림 5에서 계산된 값을 사용하여 정밀모형안을 설계하였다.

### 3.4. 구면수차 측정

회전대칭체에 대한 광축상의 물체점에서는 3차 수차들 중

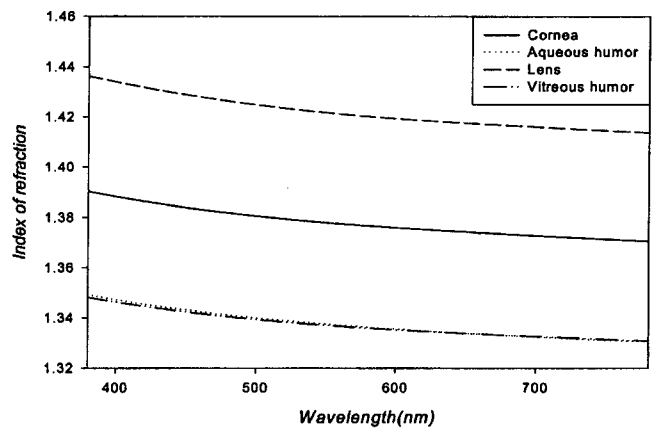


그림 5. Le Grand에 의한 안구 광학 재질의 분산.

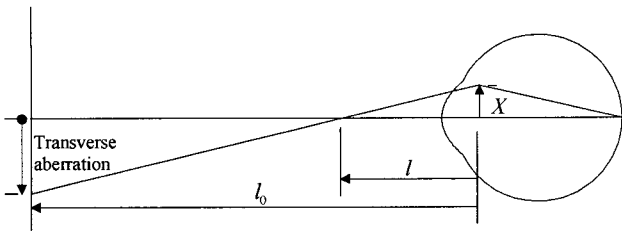


그림 6. 횡광선수차에서부터 종광선수차의 결정.

구면수차만이 존재하고, 코미수차, 비점수차, 상면만곡수차, 왜곡수차들은 비축물상점에 대하여만 존재한다. 시야각이 커질수록 비축점에 대한 수차가 포함되어져 수차량은 커진다. 하지만, 안구는 회전대칭체가 아니어서 수차계수들을 근사적으로 측정할 수밖에 없고, 이에 따라 측정표준편차가 크다.

안구의 수차는 Tomas Young부터 측정되고 기록되기 시작하였다. 구면수차계수를 측정하는 방법으로는 광선수차인 횡광선수차(transverse ray aberration)를 측정 후 종광선수차와 파면수차를 유도하여 값을 결정하는 방법을 사용한다.

자각적(subjective) 수차측정 방법인 vernier alignment<sup>[8]</sup>는 광축상의 점의 물체에서 상공간이 아닌 역으로 물체공간의 횡광선수차를 측정하고, fitting을 통하여 수차계수를 결정한다. fitting에 사용되어진 기본식은 식 (10)이다.

$$TA(X) = A_0 + A_1X + A_2X^2 + A_3X^3 + A_4X^4 + A_5X^5 \quad (10)$$

여기서,  $TA(X)$ 는 횡광선수차이고,  $X$ 는 입사동에서 수평선 위치이다. 단위는 mm이다. 경선을 따라 측정된 횡광선수차는 종광선수차  $LA(X)$ 로 변환이 가능하다.  $l_0$ 는 눈의 입사동에서 목표점까지의 거리이고, 실험에서는 4 m를 사용하였다.  $l$ 은 입사동에서 기준축과 시험광선의 교차점까지의 거리이다. 따라서 변수들 간의 관계는 다음의 식으로 주어진다.

$$\frac{TA(X)}{X} = \frac{l - l_0}{l} \quad (11)$$

물체공간에서 파면수차와 횡광선수차의 관계는 식 (12)로 표현된다.

$$TA(X) = -l_0 \frac{dW(X)}{dX} \quad (12)$$

식 (10)을 식 (12)에 대입하면 파면수차는 식 (13)로 주어진다.

$$W(X) = -\frac{\left(A_0X + \frac{A_1}{2}X^2 + \frac{A_2}{3}X^3 + \frac{A_3}{4}X^4 + \text{higher order terms}\right)}{l_0} \quad (13)$$

fitting을 통하여 얻은 횡광선수차(TA)는 정시일 때,

$$TA(X) = -0.860 - 0.595X^2 + 0.501X^3 \quad (14)$$

이고, -2 Diopter 만큼 중초점이동될 때,

$$TA(X) = -4.357 - 7.024X - 0.411X^2 + 0.513X^3 \quad (15)$$

이다.

파면수차 함수에서 구면수차계수  ${}_0W_{4,0}$ 은 축에 관련된 항이다. 하지만 안구는 양안시(stereopsis)를 고려하여 최적화되어 있어, 중심와(fovea)가 비축에 있기 때문에 측정되는 구면수차는 상면위치에 종속하는 값들(field dependent values)을 포함한다. 그러므로, 구면수차계수를  ${}_0W_{4,0}$  대신  $W_{4,0}$ 으로 표현하고자 한다. 식 (14)에서 측정된 구면수차계수는 정시일 때, 식 (16)과 같다.

$$W_{4,0} = -\frac{A_3}{4l_0} = -0.0313 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-3} \quad (16)$$

식 (15)에서 -2 Diopter 만큼 중초점이동 되었을 때는 식 (17)과 같이 주어진다.

$$W_{4,0} = -\frac{A_3}{4l_0} = -0.0321 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-3} \quad (17)$$

하지만, 이러한 측정은 상공간에서 측정이 아니라 물체공간에서 측정하는 것이고, 또한 사람의 눈의 감각에 의지하는 자각적 측정방법이기 때문에 오차를 포함하게 된다.

구면수차계수를 측정한 자료 중 가장 최근에 발표되어진 구면수차계수 값은 Tomlinson 등이 발표한  $-0.020(\pm 0.020) \times 10^{-3} \text{ mm}^{-3}$ 이다. 이 값은 1993년도에 측정이 되었으나 2001년 Smith 등에 의해 계산되어져서 구면수차계수가 결정이 되어진 것이다. 본 논문은 Tomlinson 등의 자료와 비교하여 기대 범위의 중심값과 근접한 Liou와 Brennan의 모형안에서의 구면수차계수 값인  $-0.023 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-3}$ 을 구속조건으로 설정하여 모형안을 설계하고자한다.<sup>[9]</sup>

### 3.5. Stiles-Crawford 효과

Stiles-Crawford 효과는 동공을 통과하는 광선속이 입사위치에서 갖는 명도와 비교하여 주어진 수용체를 자극하는 광선속의 명도가 변하는 효과이다. 동공중심을 통과하며 축을 따라서 수용체를 자극하는 광선속의 명도가 최대가 된다. 이러한 현상은 망막 안의 추세포(cone cell)가 특정한 모양을 갖는 점이 원인이며, 명소시 상태에서에서만 나타난다. 이러한 효과는 수차와 회절에 의해 광선속의 주변부가 구면파에서 변형이 되어지는 것을 고려한다면, 이러한 광선속의 flare와 blob을 상대적으로 적게 시신경이 인식하게 되어 안구에 상의 품질을 높이는 효과를 가져오게 된다.

Stiles-Crawford 효과는 망막에 관련되어진 효과이나, 이를 구현하기 위하여 동공에서 가우스 함수의 형태로 광선속을 제어함으로 이를 표현하고자 한다. 동공에서 투과율 함수는 식 (18)와 같이 주어진다.

$$T(\rho) = e^{-\alpha\rho^2} \quad (18)$$

여기서  $T(\rho)$ 는 Stiles-Crawford 함수이며, 동공중심에서 1로 규격화가 되어졌다.  $\rho$ 는 동공 중심점을 기준으로 한 동공면을 통과하는 광선의 위치이며, 단위는 mm이다.  $\alpha$ 는 Stiles-Crawford 계수이며, 광선속의 투과 경향을 나타낸다. 본 논문에서는  $\alpha$ 값으로 Applegate와 Lakshminarayanan의 평균 자료인  $0.12 \text{ mm}^{-2}$ 를 사용하였다.<sup>[11]</sup>

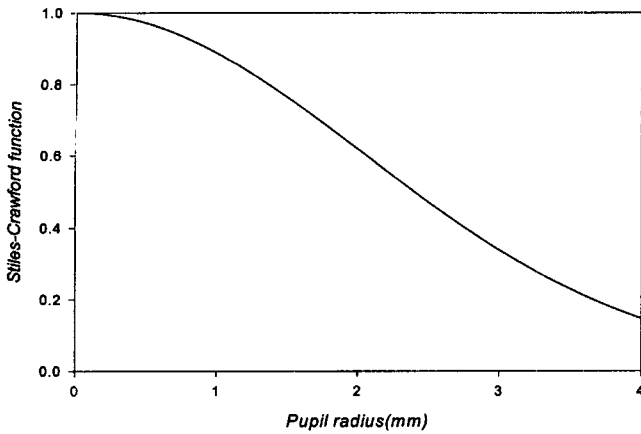


그림 7. Stiles-Crawford 계수가 0.12일 때의 Stiles-Crawford 투과율 함수.

**IV. 정밀모형안 최적화 설계 및 결과**

일반적인 최적화는 안구 광학면의 곡률, 두께, 비구면도들이 광학계에 최적의 성능을 주기 위해 조정되어진다. 그러나 본 연구에서는 광학계 성능의 목표값이 정해진 상태에서 안구 광학면의 곡률, 두께, 비구면도들을 결정하게 된다. 이 목표값으로 3.4절의 구면수차와 3.5절의 Stiles-Crawford 효과를 사용하였다. 최적화를 위하여 사용되어진 소프트웨어는 Optical Research Associates사의 Code-V이다.

모형안을 최적화 설계할 때 기준파장은 656.3 nm, 587.6 nm, 486.1 nm이고, 파장의 가중치는 순서에 따라 1:2:1로 하였고, 최적화의 중심파장은 587.6 nm이다. 그림 8은 최적화 설계로 얻은 모형안의 구성도이다. 설계된 모형안의 근축영역 수치들은 유효초점거리 20.8169 mm, 상측정점초점거리 15.4820 mm, 물측정점초점거리 -13.8528 mm, 상거리 15.7150 mm이다. 또한 stop의 역할을 하는 동공의 직경이 4 mm 일 때 입사동의 직경은 4.6919 mm이고, 출사동의 직경은 4.2395 mm이다.

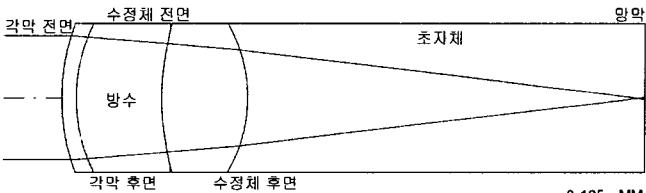


그림 8. 최적화 설계에 의한 모형안의 구성도.

표 2. 최적화 설계로부터 얻은 모형안의 설계데이터

면	각막 전면	각막 후면	수정체 전면	수정체 후면
곡률반경(mm)	7.53500	5.98400	7.98300	-5.35800
비구면도 Q	-0.28000	-0.18000	-4.02366	-1.86000
비구면 형태	장축타원면	장축타원면	쌍곡면	쌍곡면
중심두께(mm)	0.57454	3.37800	3.40400	15.71500
굴절률(d-line)	1.37638	1.33605	1.41984	1.33566
아베수	51.27	47.10	49.44	51.81

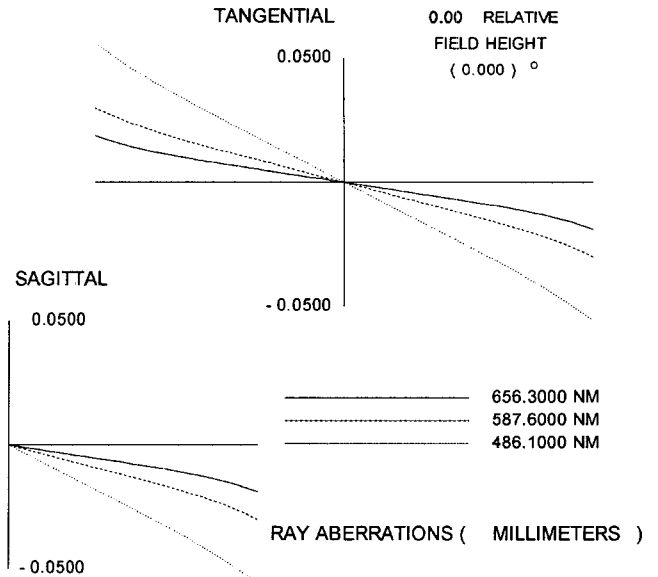


그림 9. 최적화 설계에 의한 모형안의 횡광선수차특성.

표 2는 최적화의 설계로부터 얻은 모형안의 설계데이터이다. 본 모형안은 Navarro의 정밀모형안에 비해 각막전면과 후면의 곡률반경이 작고, 수정체 전면과 후면의 곡률반경의 절대값 또한 작다. 곡률반경과 중심두께가 한국인 75 정시안을 기초로 하여 최적화가 되어졌음을 고려하면, 한국인의 유효초점거리와 안축길이는 외국인의 것들보다는 더 짧음을 알 수 있다. 비구면도는 Navarro의 모형안과 비교하여 각막전면은 장축타원, 수정체 전면이 쌍곡면임이 일치하였다. 하지만, 각막후면은 장축타원면, 수정체 후면은 쌍곡면이어서 일치하지 않았다.<sup>[10]</sup>

그림 9는 광선이 입사동 좌표 위치를 지남에 따른 상면에서의 횡광선수차 특성이다. 광학계 전체의 구면수차의 횡광선수차는 파장 기준으로 486.1 nm에서 0.002351 mm, 587.6 nm에서 0.002780 mm, 656.3 nm에서 0.002957 mm이다. 중심파장인 d-line에서 동공직경이 4 mm 일 때, 종광선구면수차를 디오프터로 환산하면 0.08 Diopter이다. 또한 중심파장 587.6 nm에서 종광선중색수차의 값을 디오프터로 환산을 하면 0.97 Diopter가 된다. 이 값은 Marcos 등에 의한 측정값 1.20±0.16 Diopter 보다는 다소 작은 값이다.<sup>[11]</sup>

**V. 결 론**

최적화 기법으로 안구의 곡률반경, 중심두께, 비구면도의 측정값 범위 내에서 구면수차와 Stiles-Crawford 효과를 기준으로 4개의 굴절비구면을 갖는 정밀모형안으로 설계하였다. 이는 한국인 정시 75안을 대상으로 측정되어진 자료를 바탕으로 국내에서 처음으로 정밀모형안을 제작하였다는데 의미가 있다. 향후 제작되어진 모형안은 실제 안구의 시기능 특성을 기준으로 모형안의 Modulation Transfer Function(MTF)을 연구하여 비정시 교정에 사용될 것이다. 본 연구의 결과는 한국인의 안구특성에 적합한 Head Mounted Display(HMD)와 같은 광학 기기의 개발에 기반기술이 되리라 기대된다.<sup>[12]</sup>

### 감사의 글

이 연구는 2001학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

### 참고문헌

- [1] D. A. Atchison and G. Smith, *Optics of the Human Eye* (Butterworth -Heinemann, 2000), Chapter 5.
- [2] D. A. Atchison and G. Smith, *Optics of the Human Eye* (Butterworth -Heinemann, 2000), Appendices A3.
- [3] 마기중, 이군자, 이동희, 이명하, “4개의 굴절면을 갖는 모형안 설계,” *대한시과학회지*, 제1권, 제1호, pp. 67-79, 1999.
- [4] A. K. C. Lam and W. A. Douthwaite, “Measurement of posterior corneal asphericity on Hong Kong Chinese: A pilot study,” *Ophthalm. Physiol. Opt.*, vol. 17, no. 4, pp. 348-356, 1997.
- [5] D. A. Atchison and G. Smith, *Optics of the Human Eye* (Butterworth -Heinemann, 2000), Chapter 2.
- [6] G. Smith, B. K. Pierscionek, and D. A. Atchison, “The optical modelling of the human lens,” *Ophthalm. Physiol. Opt.*, vol. 11, pp. 359-369, 1991.
- [7] E. R. Villegas, L. Carretero, and A. Fimia, “Le Grand eye for the study of ocular chromatic aberration,” *Ophthalm. Physiol. Opt.*, vol. 16, no. 6, pp. 528-531, 1996.
- [8] R. L. Woods, A. Bradley, and A. A. Atchison, “Monocular diplopia caused by ocular aberrations and hyperopic defocus,” *Vision Research*, vol. 36, no. 22, pp. 3597-3606, 1996.
- [9] G. Smith and D. A. Atchison, “The gradient index and spherical aberration of the lens of the human eye,” *Ophthalm. Physiol. Opt.*, vol. 21, no. 4, pp. 317-326, 2001.
- [10] J. T. Schwiegerling, *Visual Performance Prediction Using Schematic Eye Models* (The University of Arizona, 1995).
- [11] S. Marcos, S. A. Burns, E. Moreno-Barriusop, and R. Navarro, “A new approach to the study of ocular chromatic aberrations,” *Vision Research*, vol. 39, no. 26, pp. 4309-4323, 1999.
- [12] 박성찬, “회절광학소자를 이용한 Head Mounted Display-용 광학계 설계,” *한국광학회지*, vol. 12, no. 6, pp. 512-518, 2001.

## Optimum design of the finite schematic eye using spherical aberration

Sang Gee Kim and Sung Chan Park<sup>†</sup>

Department of Electronic Physics, School of Advanced Sciences, Dankook University, Cheonan 330-714, KOREA

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

(Received January 29, 2002 ; revised manuscript received April 9, 2002)

The finite schematic eye based on spherical aberration and Stiles-Crawford effect is designed by an optimization method. It consists of four aspherical surfaces. The radius of curvature, thickness, asphericity, and spherical aberration are used as constraints in the optimization process. Stiles-Crawford effect in the pupil is considered as a weighting value for optimum design. The designed schematic eye has effective focal length of 20.8169 mm, back focal length of 15.4820 mm, front focal length of -13.8528 mm, and image distance of 15.7150 mm. When the pupil diameter is 4 mm, the diameter of entrance pupil and exit pupil are 4.6919 mm and 4.2395 mm, respectively. From the data of 75 measured Korean emmetropic eyes, this finite schematic eye is designed first in Korea.

Classification codes : SM.010, MO.010.