

노안을 위한 정밀 모형안 설계

박상배[†]

한국산업기술대학교 나노-광공학과
Ⓣ 429-793 경기도 시흥시 정왕동 2121

(2008년 11월 10일 받음, 2008년 12월 3일 수정본 받음, 2008년 12월 4일 게재 확정)

노안환자를 위한 백내장 수술, 노안교정을 위한 각막절제술, 노안교정용 콘택트렌즈 및 안경착용과 같은 다양한 조건하에서 정확하게 시력과 상질을 향상화하는 정밀 노안 모형안이 필요하다. 노안에 대해 최근에 발표된 임상 자료들을 이용하여 광학적, 해부학적으로 실안에 근접하며, 노안을 위한 새로운 정밀 모형안을 설계하였다. 연령의 증가에 따라 달라지는 안 매개변수들을 각각 4개의 연령대별로 다르게 적용하였다. 새 모형안에는 알파각, 편심동공, 비구면 GRIN 수정체 및 비구면 망막 면을 적용하였다. 본 연구에서 제시된 모형안들은 노안을 위한 저시력 보정용구, 누진가입도렌즈, 인공수정체 그리고 콘택트렌즈와 같은 시기광학계의 설계는 물론 임상적으로 망막 상의 질을 평가하는데 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

주제어: Presbyopia, Finite schematic eye, GRIN lens, Retinal image quality, SMTF

I. 서 론

정밀한 눈의 생체 측정과 광범위하고 복잡한 광학적 계산을 신속하게 처리할 수 있는 계산능력이 있어서 최근의 기술적 진보는 눈의 광학적 성능을 정확하게 향상화하는 것이 가능하도록 하였다. 종초점이동(defocus), 대비(contrast) 그리고 동공 크기에 따른 눈의 광학적 상질의 예측은 모형안으로부터 MTF 등의 계산을 통해 예측가능하다. 그러나 이러한 계산을 위한 적절한 모형안의 선택은 실안의 해부학적, 광학적 특성들과의 근접한 유사성에 달려 있다.^[1] 시기광학계의 설계에서 필요한 망막상의 질을 예측하는 이외에 모형안은 임상에서도 유용하게 사용될 수 있다. 안과학 분야에서 최근 노인인구의 증가로 노안(presbyopia)교정에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔는데, 맞춤형 누진가입도렌즈(PALs) 또는 다중초점 콘택트렌즈를 이용한 비수술적 교정 방법 이외에 각막 인레이(inlay), CK(conductive keratoplasty), 노안라식(presbyLASIK), 모노비전(monovision), 다중초점 안내렌즈(IOL)를 이용한 수술적 노안 교정방법들이 적용되고 있으며 향후 좀 더 진보된 방법들이 나타날 것으로 예측된다. 모형안은 이러한 노안에 대한 광학적 교정방법에 있어서 다양한 시기능 예측이 가능하므로 임상에서 매우 유용할 수 있다. 본 논문은 연령의 증가에 따른 다양한 안 매개변수들의 변화를 살펴보고, 최신의 노안에 대한 해부학적 내용들을 포함하여 광학적으로 실안에 매우 근접한 표준적인 노안 모형안을 구현하고자 한다.

II. 방 법

2.1. 임상자료 분석

안구의 생체 측정방법으로는 초음파(A-scan), MRI, Scheimpflug camera, ORBscan 등이 사용되고 있다. 샤임플러그 카메라라는 세극등 현미경 slit lamp)과 연동하여 전안부에 대한 보다 객관적이고 정확한 생체 측정이 가능하다. 안구의 전체 굴절력과 전체 수차의 거의 대부분을 차지하는 전안부의 측정 자료는 상대적으로 후안부의 자료보다 더 중요하므로, 본 연구에서는 전안부에 대한 자료들은 가급적 기존 논문들 중 샤임플러그 측정법에 의한 자료를 우선하여 적용하였다. 다른 매개변수들의 측정 자료는 기존의 A-scan 측정결과들을 이용하였다. 모형안 설계를 위해 분석한 자료는 최근 David A. Atchison 등^[2]에 의해 발표된 정시안의 광학적, 생체학적 특성에 대한 연령의 증가에 따른 변화에 대한 연구, M. Dubbelman 등^[3]에 의한 노안의 매개변수 변화에 관한 연구결과와 David A. Atchison^[4]의 근시안에 대한 광학적 모형에 대한 연구 자료들을 바탕으로 하였다. 위의 측정 자료들과 기존의 고정된 값으로 결정된 측정값들을 바탕으로 하여 노안 연령에 해당하는 40대에서 70대까지의 해부생체학적 그리고 광학적 자료를 대표할 수 있는 연령대별 정시 노안을 모형화 하였다.

2.2. 임상자료 선택

연령에 따른 각막전면과 후면의 곡률반경은 Atchison 등^[2]에 의하면, Scheimpflug 사진촬영법으로 측정된 결과, 통계적으로 유의한 값을 구할 수 없었다. 대신 평균 각막전면 곡률반경 값인 7.79±0.24 mm와 각막후면의 평균 곡률반경 값인 6.50±0.25 mm를 새 모형안에 적용하였다.

일반적으로 각막의 곡률반경은 정점에서부터 멀어질수록

[†]E-mail: saangbai@kpu.ac.kr

증가하며 이런 의미에서 각막은 비구면성을 가진다. 각막면은 3차원에서는 2차 곡면(conicoid) 형태로, 2차원에서는 원추(conic)형으로 설명된다. 2차 곡면은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서 Z 는 시선(line of sight)이 지나가는 광축이며, $X^2 + Y^2$ 은 상면 좌표, R 은 곡률 정점반경, Q 는 각막의 비구면도이다. 비구면도는 $Q < -1$ 은 쌍곡면, $Q = -1$ 은 포물면, $-1 < Q < 0$ 은 Z 축(장축)이 주요축인 타원체면, $Q > 0$ 이면 $X - Y$ 면에서 주요축을 가지는 단축 타원체면이며 $Q = 0$ 이면 구면을 의미한다.^[6] 그림 1은 비구면도 Q 값에 따른 2차 곡면의 형상을 나타낸 것이다.

각막전면의 비구면도는 연령이 증가함에 따라 좀 더 플러스 값을 가지며, 각막후면의 비구면도는 대부분의 경우 플러스 값을 가지나 연령이 증가함에 따라 마이너스 값의 방향으로 변한다.^[2] 식 (2), (3)은 각각 연령의 증가에 따른 각막 전후면의 비구면도 변화에 대한 회귀식이며, 설계에 적용된 값은 표 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{각막 전면 비구면도} &= -0.0036 + 0.0038 \times \text{age} & (2) \\ (R^2 = 0.030, t = 2.03, n = 97, p = 0.045) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{각막 후면 비구면도} &= 1.06 - 0.016 \times \text{age} & (3) \\ (R^2 = 0.022, t = -5.55, p < 0.001) \end{aligned}$$

여기서 R^2 은 결정계수, t 는 검정통계량, p 는 유의확률이다. 각막의 중심두께는 초음파측정법과 Scheimpflug 측정법 사이에 차이를 나타내며, 새 모형안에는 Scheimpflug의 값을 적용하였다. 연령에 따른 유의한 변화는 없으며, 평균 각막의 두께는 0.540 ± 0.035 mm를 적용하였다. 한편 각막의 전면과 후면은 모두 토릭면으로 구성되어 있다. Atchison 등^[2]에 의하면 각막 전면의 수평과 수직경선의 평균 곡률반경은 각각 7.80 mm, 7.70 mm이고 대응하는 각막 후면의 곡률반경은 각각 6.58 mm, 6.24 mm이며, 전면의 토릭성이 후면보다 약 3배 큰 것을 알 수 있다. 각막의 굴절률을 1.376과 방수의 굴절률을 1.336을 적용하면 전면과 후면의 평균 난시량은 각

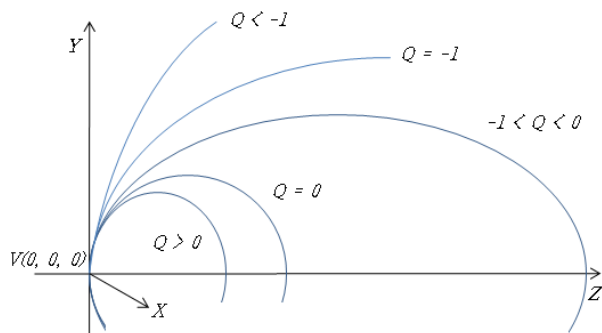


그림 1. 2차 곡면의 형상에 대한 비구면도의 영향.

각 $+0.80 \pm 4.10$ D $\times 8.8^\circ$ 와 $-0.33 \pm 0.12 \times 3.9^\circ$ 이다. 그러나 전면과 후면의 난시가 합성될 경우 각막의 전체 난시량은 약 +0.50 D 이하로 연령의 증가에 따른 유의한 변화량을 찾을 수 없어 새 모형안에 각막의 토릭성은 적용하지 않았다. 전방깊이(anterior chamber depth)는 각막두께를 포함한 거리이며, 전방깊이는 연령이 증가함에 따라 0.011 mm/year의 비율로 감소한다. Scheimpflug에 의한 측정값의 회귀식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{전방 깊이} &= 3.909 - 0.0105 \times \text{age} & (4) \\ (\text{adjusted } R^2 = 0.219, t = -5.433, n = 97, p < 0.001) \end{aligned}$$

Atchison 등^[2]은 수정체의 곡률반경에 대하여 4개의 면을 가지는 모형안을 이용한 Purkinje 상과 MRI 측정법을 비교하였는데 Purkinje 상의 경우 연령의 증가와 함께 수정체 전면의 곡률반경이 0.0438 mm/year 로 유의하게 감소하였으며, 후면의 경우는 유의한 차이가 없다고 하였다. 4개의 면으로 구성된 모형안에 대한 Purkinje 상에 대한 수정체 전면과 후면의 회귀식은 식(5), (6)과 같고 후면의 평균값은 -6.86 ± 0.85 mm이다. 수정체 전면과 후면에 대한 각각의 비구면도는 Dubbelman 등^[3]이 제시한 회귀식인 식 (7), (8)을 이용하였다.

$$\begin{aligned} \text{수정체 전면 곡률반경} &= 12.283 - 0.0438 \times \text{age} & (5) \\ (\text{adjusted } R^2 = 0.192, t = 4.05, n = 66, p < 0.001) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{수정체 후면 곡률반경} &= -7.1857 + 0.0076 \times \text{age} & (6) \\ (\text{adjusted } R^2 = 0.0012, t = 1.04, p = 0.30) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{수정체 전면 비구면도} &= -6.4 + 0.03 \times \text{age} & (7) \\ (n = 90, R^2 = 0.006, p = 0.44) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{수정체 후면 비구면도} &= -6 + 0.07 \times \text{age} & (8) \\ (n = 41, R^2 = 0.04, p = 0.21) \end{aligned}$$

수정체 중심부의 두께는 초음파 측정과 MRI를 이용하여 비교하였는데 연령의 증가에 따른 초음파 결과값을 적용하였으며 회귀식은 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} \text{수정체 중심부 두께} &= 3.1267 + 0.02351 \times \text{age} & (9) \\ (\text{adjusted } R^2 = 0.63, t = 12.91, n = 102, p < 0.001) \end{aligned}$$

Jones 등^[5]은 수정체의 굴절률이 주변부에서 1.371에서부터 중심부 1.418로 다양하며 연령에 따라 크게 다르지 않다고 하였다. Liou & Brennan^[1]과 일치하는 다음 식과 같은 굴절률을 표현하는 포물 방정식을 사용하였다.

$$n(r) = c_0 + c_1 r^2 \tag{10}$$

여기서 r 은 수정체의 중심으로부터 에지부까지의 상대적 거리이고, c_0 와 c_1 은 계수들이다. c_0 는 수정체 중심에서의 굴절률(1.418)이고 $c_0 + c_1$ 은 수정체의 에지부의 굴절률(1.371)이다. 광선추적을 위하여 이 방정식은 식 (11)과 같이 $N(z, y, z)$ 계수로 변환될 수 있으며, 계수 N_i, j 는 식 (12), (13), (14)와

같이 주어진다.

$$N(x, y, z) = N_0(z) + N_1(z)(x^2 + y^2) + N_2(z)(x^2 + y^2)^2 + \dots \quad (11)$$

$$N_0(z) = N_{0,0} + N_{0,1}z + N_{0,2}z^2 + \dots \quad (12)$$

$$N_1(z) = N_{1,0} + N_{1,1}z + N_{1,2}z^2 + \dots \quad (13)$$

$$N_2(z) = N_{2,0} + N_{2,1}z + N_{2,2}z^2 + \dots \quad (14)$$

포물 모형화(parabolic model)에 있어서, 수정체의 전면부(front half of lens)의 N_{ij} 계수들은 식 (15)-(18)과 같이 주어지며, 수정체 후면부의 계수들은 식 (19)-(21)과 같이 주어지고, 다른 모든 계수들은 0이 된다.

$$N_{0,0} = c_0 + c_1, \quad (15)$$

$$N_{0,1} = -2c_1/d_{L1}, \quad (16)$$

$$N_{0,2} = c_1/d_{L2}^2, \quad (17)$$

$$N_{1,0} = c_1/b^2. \quad (18)$$

$$N_{0,0} = c_0, \quad (19)$$

$$N_{0,2} = c_1/d_{L2}^2, \quad (20)$$

$$N_{1,0} = c_1/b^2. \quad (21)$$

여기서 b 는 수정체의 반경이며, d_{L1} 과 d_{L2} 는 각각 수정체 전면부와 후면부의 두께를 나타낸다(그림 2). 각 연령대별 GRIN 수정체 구현을 위한 포물 방정식의 계수는 표 2와 같다.

Atchison 등^[2]에 의하면 Purkinje 상과 네 개의 면을 가지는 모형안을 이용한 연령에 따른 수정체 등가 굴절력은 연령이 증가함에 따라 감소하며 회귀식은 다음과 같다(표 1).

$$\text{수정체 등가 굴절력} = 25.35 - 0.033 \times \text{age} \quad (22)$$

$$(\text{adjusted } R^2 = 0.029, t = -2.19, n = 66, p < 0.001)$$

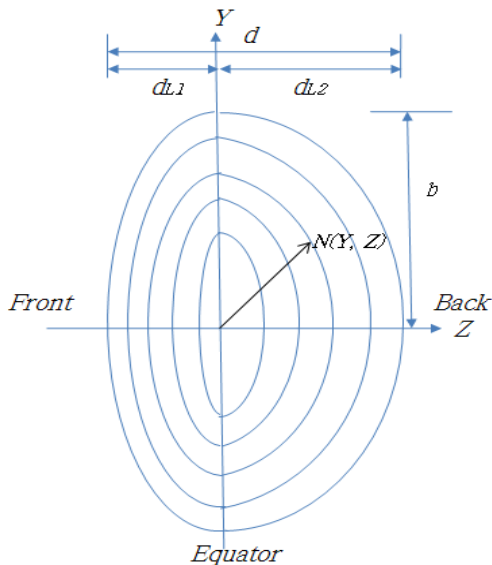


그림 2. 적도부(equator)에서 결합된 두 개의 반타원(half ellipses)으로서 모형화된 수정체의 saggital 단면도.

수정체의 직경은 연령의 증가와 함께 커진다($p < 0.02$). 19-28세와 61-69세의 수정체의 평균값은 각각 9.11 ± 34 mm 와 9.41 ± 27 mm이다. 새 모형안에는 이 값들의 평균 값인 9.26 ± 31 mm를 적용하였으며, 수정체의 직경은 광선추적에 이용되지 않았다. MTF 계산을 위해, 알파(alpha)각을 광축으로부터 비측(nodal)으로 5° 의 각에서 입사동의 중심으로 향하는 광선속을 사용하여 적용하였다. 광축의 비측부분을 양의 값으로 정의하였기 때문에 알파각 $= +5^\circ$ 이고 동공은 수정체의 전면 정점을 통과하는 수직인 면에 위치한다. 동공 편심량은 $= +0.5$ mm를 적용하였다.^[6] 한편 동공의 크기는 Winn 등^[7]에 의한 명소시(photopic vision)의 두 휘도 조건인 밝은 4400 cd/m^2 와 상대적으로 어두운 명소시 조건인 9 cd/m^2 에서의 동공크기에 대한 회귀식은 다음과 같다.

$$\text{동공직경: } y_{(9\text{cd/m}^2)} = 8.046 - 0.043x \quad (r^2 = 0.557) \quad (23)$$

$$y_{(400\text{cd/m}^2)} = 4.070 - 0.015x \quad (r^2 = 0.214) \quad (24)$$

초자체 길이(vitreous length)는 연령의 증가에 따른 유의한 차이는 없고 평균값은 15.92 ± 0.70 mm이며,^[2] 이 값을 새 모형안에 적용하였다. A-scan을 이용한 안축장은 연령의 증가에 따라 유의하게 0.0113 mm/year 크기로 증가하며, 회귀식은 다음과 같다.^[2]

$$\text{안축장} = 22.984 + 0.0113 \times \text{age} \quad (25)$$

$$(\text{adjusted } R^2 = 0.04, t = 2.32, n = 102, p = 0.02)$$

Atchison 등^[2]은 망막의 형상을 회전비대칭의 타원면으로 설명하고 망막의 곡률 반경에 대한 회귀식을 제시하였으나, 연령의 증가에 따른 망막 곡률반경의 유의한 변화에 대한 자료를 찾을 수 없어, 본 논문에서는 이를 적용하지 않고, Navarro 모형안^[8]에 적용된 -12.00 mm의 망막곡률 반경을 이용하였으며, 망막의 비구면도는 Kooijman이 -14.1 mm 망막곡률반경에 대해 0.346 의 값을 제시하였으나, 본 연구에서는 Atchison 등^[4]이 발표한 망막 비구면도의 평균값인 0.26 을 이용하였다.^[2] 망막의 스타일스-크로포드(Stiles-Crawford) 효과를 구현하기 위해 동공에서 가우스 함수의 형태로 광선속을 제어하였다.^[9] 스타일스-크로포드 효과 함수는 식 (26)과 같다.

$$L_e(r) = \exp(-\beta r^2) \quad (26)$$

여기서 r 은 함수의 최댓값으로부터 동공 내에서 거리이며, 최댓값에서 1의 값을 가지는 것으로 정규화 된다. β 는 스타일스-크로포드 계수로서 함수의 가파른 정도를 나타내며, 이 효과에 대한 많은 연구들을 통해 평균 β 계수의 값은 0.12 이다.^[10] DeLint 등^[11]에 의하면 정상인 눈에서 β 계수는 연령의 증가에 따른 영향을 거의 받지 않는다고 하였다. 본 연구에서는 각 연령대별 모형안에 대한 β 계수 값으로 0.12 mm^{-2} 을 동일하게 적용하였다. 방수(aqueous humor)와 초자

표 1. 연령대별 정시 노안 모형안에 적용된 매개변수

Parameters		Age group				
		40-49	50-59	60-69	70-79	
Cornea	Anterior radius (mm)	7.79±0.24	7.79±0.24	7.79±0.24	7.79±0.24	
	Anterior asphericity	-0.1674	-0.2054	-0.2434	-0.2814	
	Thickness (mm)	0.54±0.035	0.54±0.035	0.54±0.035	0.54±0.035	
	Posterior radius (mm)	6.50±0.25	6.50±0.25	6.50±0.25	6.50±0.25	
	posterior asphericity	+0.34	+0.18	+0.02	-0.14	
Anterior chamber depth (including cornea thickness) (mm)		3.4365	3.3315	3.2265	3.1215	
Pupil	Gaussian apodization factor (mm ⁻²)	0.12	0.12	0.12	0.12	
	Decentration (mm)	+0.5(nasal)	+0.5	+0.5	+0.5	
	Size (mm)	9 cd/m ²	6.111	5.681	5.251	4.821
		4400 cd/m ²	3.395	3.245	3.095	2.945
α angle	Decentration (°)	+5(nasal)	+5	+5	+5	
Crystalline Lens	Anterior radius (mm)	10.312	9.874	9.436	8.998	
	Anterior asphericity	-5.05	-4.75	-4.45	-4.15	
	Thickness (mm)	4.18465	4.41975	4.65485	4.88995	
	Posterior radius (mm)	-6.86±0.85	-6.86±0.85	-6.86±0.85	-6.86±0.85	
	Posterior asphericity	-2.85	-2.15	-1.45	-0.75	
	Anterior section index	L1(45)	L1(55)	L1(65)	L1(75)	
	Posterior section index	L2(45)	L2(55)	L2(65)	L2(75)	
	Thickness of d_{L1} (mm)	1.67386	1.7679	1.86194	1.95598	
	Thickness of d_{L2} (mm)	2.51079	2.65185	2.79291	2.93397	
Vitreous length (mm)		15.92±0.70	15.92±0.70	15.92±0.70	15.92±0.70	
Retina	Radius (mm)	-12.00	-12.00	-12.00	-12.00	
	Asphericity	0.26	0.26	0.26	0.26	

체(vitreous humor)의 굴절률은 Navarro^[8] 모형안의 값 $n_v = 1.336$ 을 사용하였다. 눈의 색수차량을 예측하기 위해, 안구 매질을 물과 비슷한 분산특성을 가지는 것으로 가정하였다.

2.3. 광선추적 및 최적화

모든 광학적 계산은 ZEMAX-EE(ZEMAX Corporation, San Diego, version June 24 2008) 소프트웨어를 이용하여 진행하였다. 40-70대의 각 연령대를 대표하는 45, 55, 65, 75세의 4가지 모형안의 설계 조건으로는 각막 전후면의 곡률반경과 비구면도, 전방깊이, 초자체 길이, 안축장, 망막 비구면도 등을 고정값으로 하였다(표 1). 수차분석과 상질 평가를 위한 동공의 크기는 각 연령대별 대표모형안에 대하여 명소시의 동공크기 값 중 고 휘도(4400 cd/m²)에서의 동공 크기를 각각 적용하였다. 파장은 470, 510, 555, 610 및 650 nm의 명소시 파장에 대하여 시감도 곡선에 따라 중심파장을 555 nm로 하고, 각기 다른 0.091, 0.503, 1, 0.053, 0.107의 가중치(weights)를 적용하여 최적화 하였다.

III. 결 과

3.1. 기초 성능

그림 3은 정시를 기준으로 설계한 정밀 노안 모형안(finite presbyopic schematic eye)의 단면도를 나타낸 것이다. 표 2는 555 nm 기준파장에 대한 연령대별 노안 모형안들의 GRIN 수정체의 계수 값들을 나타낸 것이다. 표 3은 각기 다른 연령대의 4가지 모형안에 대하여 명소시를 기준으로 한 등가 굴절력과 안축장의 길이를 나타낸 것이다.

3.2. 단색광 수차

그림 2는 동공크기에 따른 종구면수차량에 대하여 설계된 노안 모형안을 Liou & Brennan 모형안과 비교하여 나타낸 것이다. 4 mm 동공 크기에서 45세에서 75세 모형안 각각의 구면수차량은 $W_{40} = 4.741 \mu\text{m}, 5.524 \mu\text{m}, 6.125 \mu\text{m}, 5.767 \mu\text{m}$ 이었다. 코마수차량은 $W_{31} = 0.829 \mu\text{m}, 1.162 \mu\text{m}, 1.517 \mu\text{m}, 1.903 \mu\text{m}$ 의 값을 보였고, 비점수차량은 각각 $W_{22} = 0.245 \mu\text{m}, 0.260 \mu\text{m}, 0.286 \mu\text{m}, 0.361 \mu\text{m}$ 이었다. 그림 4는 설계된 45세 노안모형안의 자이텔 다이어그램을 나타낸 것이다.

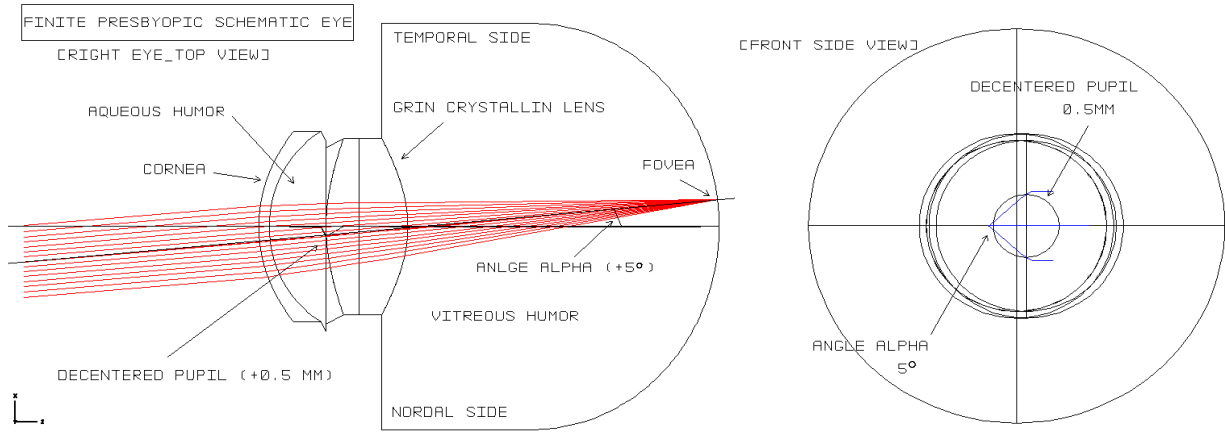


그림 3. 모형안의 단면도.

표 2. 설계된 모형안의 GRIN 수정체의 계수 값

GRIN	Coefficients of Parabolic Model		
	$N_{0,1}$	$N_{0,2}$	$N_{1,0}$
L1(45)	0.089423	-0.113366	-1.686689×10^{-3}
L2(45)	0	-5.851649×10^{-3}	-1.686689×10^{-3}
L1(55)	0.076164	-0.124975	-1.332793×10^{-3}
L2(55)	0	-3.307007×10^{-3}	-1.332793×10^{-3}
L1(65)	0.068921	-0.141784	-1.039961×10^{-3}
L2(65)	0	-1.628178×10^{-3}	-1.039961×10^{-3}
L1(75)	0.089244	-0.153892	-1.329959×10^{-3}
L2(75)	0	-5.913814×10^{-3}	-1.329959×10^{-3}

L_1 : 수정체 전면부의 굴절률, L_2 : 수정체 후면부의 굴절률

표 3. 연령대별 모형안의 Gaussian 특성

Parameters	Age group			
	40-49	50-59	60-69	70-79
Equivalent Power (D)	61.55	61.21	60.74	59.55
Effective Focal Length (mm)	16.2463	16.3385	16.4628	16.7934
Axial length (mm)	23.5412	23.6713	23.8013	23.9314

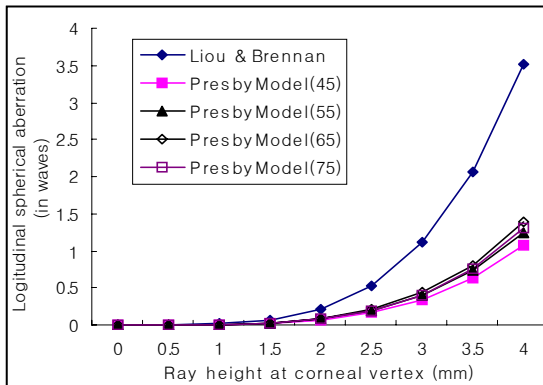


그림 4. 노안 모형안과 Liou & Brennan 모형안의 종구면수차 비교.

3.3. 색수차

단색광 수차와 달리 중심좌에서 측정된 종색수차(LCA)는 안구매질의 분산특성에 의한다. 종색수차는 백색광내에서 명소시에는 거의 영향을 주지 않으나, 횡색수차(TCA)는 망막상의 배울색수차로서 알파각이 있는 경우 또는 편심동공이 적용되는 경우 어느 정도 증가될 수도 있다.^[12] 파장 470-650 nm 사이의 명소시 파장으로 설계된 45세 노안 모형안의 종색수차는 $\delta W_{20} = 1.648 \mu\text{m}$ 로 주로 GRIN 수정체에 의해 발생하였다. 횡색수차는 $\delta W_{11} = 0.058 \mu\text{m}$ 의 값을 보였다(그림 5).

3.4. MTF 및 회절 상 분석

MTF는 광학계가 공간주파수를 얼마나 잘 통과시켜 상면

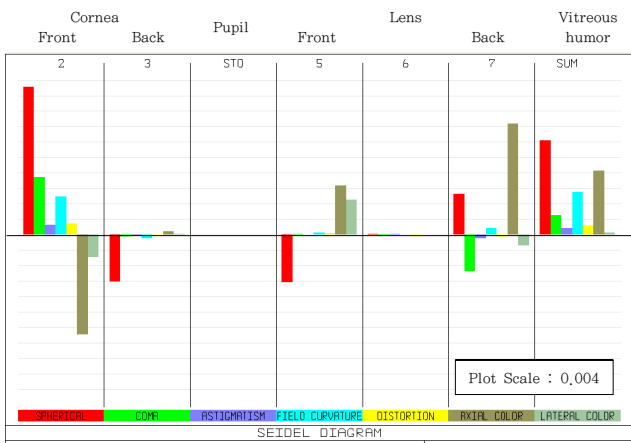


그림 5. 노안 모형안(45세)의 Seidel 다이어그램(unit: mm).

으로 전달하는지를 나타내는 함수로서 물체의 변조도와 상의 변조도의 비로서 표현된다(식 (27)). 실안의 분해능은 정상시력 기준인 6 m의 거리에서 약 1분각 이며, LogMAR 0.0 시력의 Snellen ‘E’시력표에 대한 망막상의 크기는 약 0.025 mm 이고 100 cycles/mm를 가진다. 시각성능을 예측하기 위

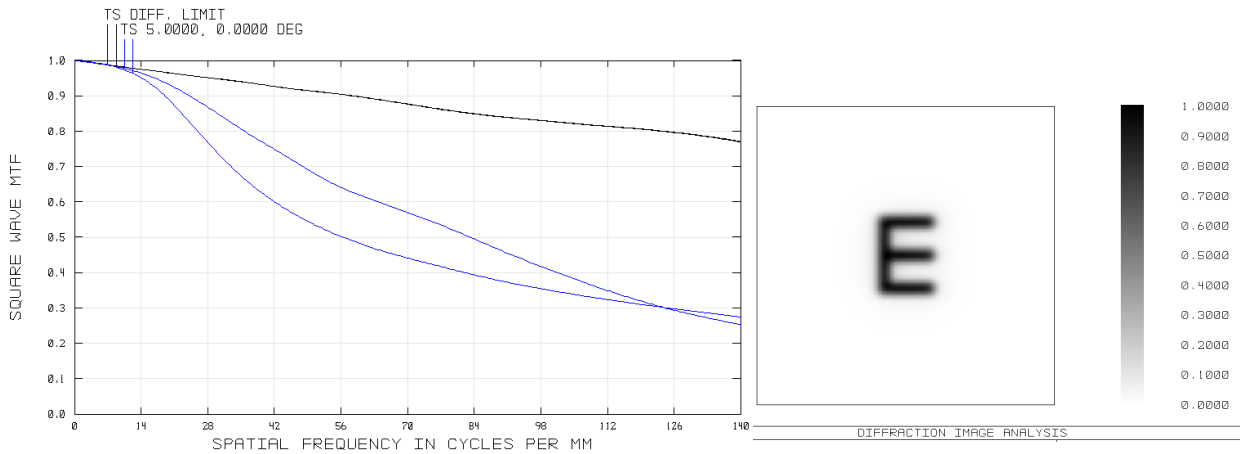
해 사각파(square-wave) MTF를 사용하였으며,^[13] 사각파 변조전달함수는 식 (28)과 같이 표현된다.

$$MTF = \frac{\text{Image Modulation}}{\text{Object Modulation}} \quad (\text{cycles/mm}) \quad (27)$$

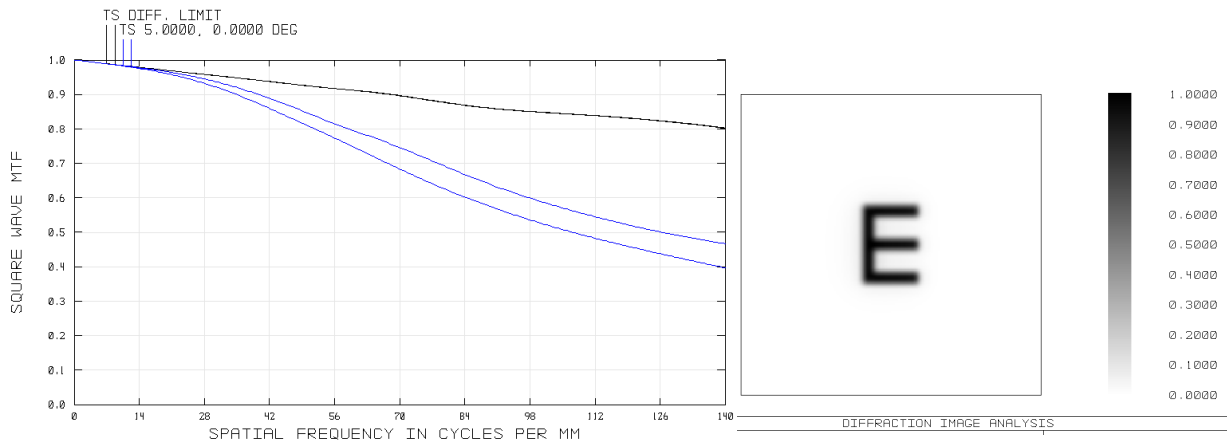
여기서 $\text{Modulation} = \frac{(I_{\max} - I_{\min})}{(I_{\max} + I_{\min})}$, I_{\max} 는 밝은 바탕에서 반사된 세기(watt/cm²)이고 I_{\min} 은 검정 막대에서 반사된 세기를 나타낸다.

$$SMTF(\xi) = \frac{4}{\pi} [MTF(\xi) - \frac{MTF(3\xi)}{3} + \frac{MTF(5\xi)}{5} - \frac{MTF(7\xi)}{7} + \dots] \quad (28)$$

여기서, ξ 는 공간주파수, MTF 는 사인파(sine wave) 변조전달함수, $SMTF$ 는 사각파 변조전달함수이다. 망막의 상질(retinal image quality)은 고주파로 갈수록, 동공의 크기가 커질수록 그리고 수차의 양이 많아질수록 저하된다. 그림 6은 SMTF와 Snellen 소수식 1.0 시력표를 이용하여 Liou & Brennan 모형안과 45세 노안 모형안의 망막 상의 질을 비교하여 나타



(a) Liou & Brennan 모형안(45세)



(b) 노안 모형안(45세)

그림 6. 설계된 노안 모형안과 Liou & Brennan 모형안의 SMTF와 회절 이미지 분석 비교.

낸 것이다. 동공 직경 4 mm일 때, Tangential과 Sagittal의 평균 SMTF는 두 모형안에서 각각 0.38과 0.55의 값을 보이고 있다. 45세 노안 모형안에서 100 cycles/mm에 대해 55% 이상의 성능을 나타내고 있다.

IV. 고 찰

연령의 증가와 함께 안구의 모든 조직에서 변화가 발생하며, 광학적 매개 변수들인 각막, 수정체, 동공, 안축장 및 망막의 변화는 노안환자의 굴절상태를 변화시키게 된다. 연령 증가에 따른 각막 두께의 변화에 대해 다양한 연구가 진행되었으나 각막의 두께 변화에 대한 뚜렷한 경향은 없는 것으로 보이며, 수직경선에서 보다 수평경선에서 곡률이 좀 더 커지면서, 각막전면의 곡률반경은 연령이 증가함에 따라 감소하며,^[14] 평균적인 각막전면의 비구면도는 약간 편원의 형태를 가지게 하는 -0.20 ± 0.20 이며, 이 비구면도는 거의 변하지 않고 연령이 증가하여도 감소하지 않는다. 또한 각막후면의 곡률반경은 연령이 증가함에 따라 감소하며 비구면도는 좀 더 마이너스 값을 가지게 된다.^[3] Oshika 등^[15]은 각막에 의해 발생하는 수차들은 연령이 증가함에 따라 함께 증가하며 이는 구면수차에 의한 것보다는 코마수차와 같은 요인에 의한 것이라고 하였다. 설계결과 그림 3에서 보는 바와 같이 각막전면의 코마수차량이 다른 면들에서 보다 가장 높다는 것을 알 수 있다. 눈에 있어서 가장 극적인 연령 관련 광학적 변화들은 수정체에서 발생하는데, 수정체의 모양, 크기 및 질량은 현저하게 변하며 수정체와 수정체낭의 탄력성의 저하로 인해 조절능력이 상실되고 빛의 투과율은 특히 자외선과 가시광선 파장대의 투과율은 더욱 감소한다.^[16] 수정체는 일생에 걸쳐 부피와 질량이 증가하며 대부분 수정체 피질의 축상 두께에 기인하여 정적굴절상태의 수정체의 중심 두께가 증가한다. Koretz 등^[17]은 연간 13 μm 의 길이로 축상 두께가 증가하는 것을 발견하였고, 전방깊이는 일생동안 렌즈의 축상 두께가 증가하는 비율과 거의 같은 비율로서 감소한다고 하였다. 정적굴절상태의 수정체 면의 곡률반경은 감소하며 특히 수정체전면의 감소량이 더 크며, 광학적 활성(optically active)범위에 국한된 측정값으로 본 수정체 전면과 후면의 평균 비구면도는 각각 -5와 -4로 매우 높은 값을 나타내며 연령에 따른 유의한 변화는 없다.^[3] Brown^[18]은 연령이 증가함에 따라 정시이며 비조절상태의 눈에서 수정체의 전방 중심부의 곡률 반경에 선형적인 감소가 있음을 발견하였는데, 그 변화량은 8세에 16.0 mm에서 82세에 8.3 mm로 변하며, 수정체의 후방의 곡률 반경의 변화는 8세에 8.6 mm에서 82세에 7.5 mm로 변화량이 상대적으로 매우 적다고 하였다. 전술한 사실에 통해보면 연령이 증가함에 따라 수정체의 두께와 곡률이 증가하므로, 눈은 좀 더 근시화 될 것으로 예상할 수 있으나 30세에서 60세 사이에 평균 2 D의 원시화를 발견할 수 있는데 이를 '수정체 역설(lens paradox)'이라 하며^[19] 그 발생 원인에 대해서는 아직까지 정확하게 밝혀지지

않았지만 대개 Pierscionek이 주장하는 연령의 증가에 따른 굴절률 양상의 변화가 가장 일반적으로 받아들여지고 있다. Smith 등^[20]은 이 굴절률 양상의 변화를 근거로 하여 수정체의 중심부 근처에는 좀 더 평평한 경사굴절률(GRIN)을 가지면서 주변부 쪽으로는 급격한 굴절률 변화를 가지는 수정체를 모형화 하였는데 일부 임상적인 지지를 받고 있다. Grosvenor^[21]는 정시안의 평균 안축장 길이는 대략 20세 이후 감소했으며 20-29세 집단과 50세 이상 집단 사이에 0.6 mm의 차이가 있음을 발견하였다. 그러나 Koretz 등^[17]은 나이에 따른 정시안의 안축장 길이 변화를 확인할 수 없었으며, 또한 Ooi와 Grosvenor^[21]도 성별과 굴절이상분포가 일치하는 두 집단에 대한 연구에서, 중년층과 노년층 사이에 유의한 차이를 발견할 수 없다고 하였다. 동공의 크기는 연령이 증가함에 따라 감소한다(senile miosis)는 사실은 여러 논문을 통해 확인되었다. 수차경(aberroscope) 검사법을 이용하여 Calver 등^[22]은 특정 동공 크기에 있어서 젊은 집단에서 보다 노인 집단에서 MTF 값이 더 낮음을 발견하였지만 노인성 축동은 노인들의 눈을 자연스런 동공 크기에서 좀 더 낮은 수차를 가지도록 하는 것으로 밝혀졌다. 본 연구에서는 이러한 연령에 따른 동공크기의 변화를 고려하였다. 수차의 발생량에는 각막과 수정체에 의한 영향 이외에 동공의 직경이 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다. 절대 값이 증가하는 수차들에 대한 다양한 연구결과들이 발표되었는데 특히 구면수차의 경우 좀 더 플러스 값으로 증가하는 것으로 밝혀졌다. 전면 각막과 내부 수차량의 변화는 연령의 증가와 관련이 있으며, 내부수차는 전체 수차와 각막수차 사이의 차이로서 계산된다.^[16] Artal 등^[23]은 연령이 증가함에 따라 MTF 값이 떨어진다고 하였다. 전술한 바와 같이 많은 모형안들의 안광학 요소들의 치수가 연령과 관련하여 달라진다는 것을 알 수 있다. 그러나 대부분의 모형안 설계자들은 설계된 모형안의 나이 대에 대해서는 특별한 언급이 없는 경우가 대부분이다. 예외적으로 Liou & Brennan 정밀모형안^[1]은 45세 근처의 변수값들을 포함하고 있으며, Smith 등^[20]과 Smith & Pierscionek^[24] 등이 연령에 따른 모형안을 발표하였다. 본 연구는 노안 안구의 생체학적 임상자료를 최대한 유지하기 위해 기존의 최적화 방법인 실안에 대한 단색광 수차와 색수차를 최적화의 조건 값으로 하지 않았기 때문에 SMTF에 의한 시각성능이 좀 더 좋은 값을 나타내고 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 최근 발표된 Scheimpflug 카메라에 의한 정밀한 노안의 임상자료를 바탕으로 표준적인 정시 노안을 대표하는 모형안을 각 연령대별로 설계하였다. 의학의 발달로 노인인구의 증가와 더불어 노안에 대한 다양한 의광학적 처치 방법들에 대한 다양한 연구들이 진행되어왔는데, 시력보정용구를 포함하는 시시광학계의 설계는 물론, 특히 안과학 분야에 있어서 노안라식과 같은 적극적 노안교정 수술과 다

중초점 안내렌즈 삽입수술 등의 경우 진단과 처방에 있어서 환자의 시기능 예측이 매우 중요하다. 그러므로 실안에 가까운 생체학적 매개변수들을 포함하는 정밀 노안 모형안들은 이러한 목적을 위한 망막상의 질과 시각 기능에 대한 예측이 가능하므로 시기광학계 설계자 또는 안과 임상가의 필요에 따라 다양한 조건하에서 사용이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] H. L. Liou and N. A. Brennan, "Anatomically accurate, finite model eye for optical modeling," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 14, no. 88, pp. 1684-1695, 1997.
- [2] D. A. Atchison, E. L. Markwell, S. Kasthurirangan, J. M. Pope, G. Smith, and P. G. Swann, "Age-related changes in optical and biometric characteristics of emmetropic eyes," *Journal of Vision*, vol. 8, no. 4, pp. 1-20, 2008.
- [3] M. Dubbelman and G. L. Van der Heijde, "The shape of the aging human lens: curvature, equivalent refractive index and the lens paradox," *Vision Res.*, vol. 41, no. 14, pp. 1867-1877, 2001.
- [4] D. A. Atchison, "Optical models for human myopic eyes," *Vision Res.*, vol. 46, no. 14, pp. 2236-2250, 2006.
- [5] C. E. Jones, D. A. Atchison, R. Meder, and J. M. Pope, "Refractive index distribution and optical properties of the isolated human lens measured using magnetic resonance imaging(MRI)," *Vision Res.*, vol. 45, no. 18, pp. 2352-2366, 2005.
- [6] D. A. Atchison and G. Smith, *Optics of the human eye* (Butterworth-Heinemann, Oxford, 2002), pp. 3-38.
- [7] B. Winn, D. Whitaker, D. B. Elliot, and N. J. Phillips, "Factors affecting light-adapted pupil size in normal human subjects," *Invest. Ophthalm. Vis. Sci.*, vol. 35, no. 33, pp. 1132-1137, 1994.
- [8] R. Navarro, J. Santamaria, and J. Bescos, "Accommodation dependent model of the human eye with aspherics," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 2, no. 8, pp. 1273-1281, 1985.
- [9] 김상기, *구면수차를 이용한 정밀모형안의 최적화 설계*(단국대학교, 박사학위논문, 2002), pp. 92-94.
- [10] R. A. Applegate and V. Lakshminarayanan, "Parametric representation of Stiles-Crawford functions: normal variation of peak location and directionality," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 10, no. 7, pp. 1611-1623, 1993.
- [11] P. J. DeLint, J. J. Vos, T. T. J. M. Berendschot, and D. van Norren, "On the Stiles-Crawford effect with age," *Invest. Ophthalm. Vis. Sci.*, vol. 38, no. 6, pp. 1271-1274, 1997.
- [12] C. Pask and A. Stacey, "Optical properties of retinal photoreceptors and the Campbell effect," *Vision Res.*, vol. 38, no. 7, pp. 953-961, 1998.
- [13] 김상기, 박성찬, "대비감도함수와 변조전달함수를 이용한 시기능 예측," *한국광학회지*, 제15권, 제5호, pp. 461-468, 2004.
- [14] K. Hayashi, H. Hayashi, and F. Hayashi, "Topographic analysis of the changes in corneal shape due to aging," *Invest. Ophthalm. Vis. Sci.*, vol. 14, no. 5, pp. 527-532, 1995.
- [15] T. Oshika, S. D. Klyce, R. A. Applegate, and H. C. Howland, "Changes in corneal wavefront aberrations with aging," *Invest. Ophthalm. Vis. Sci.*, vol. 40, no. 7, pp. 1351-1355, 1999.
- [16] D. A. Atchison and G. Smith, *Optics of the human eye* (Butterworth-Heinemann, Oxford, 2002), pp. 213-230.
- [17] K. F. Koretz, P. L. Kaufman, M. W. Neider, and P. A. Goeckner, "Accommodation and presbyopia in the human eye - aging of the anterior segment," *Vision Res.*, vol. 29, no. 12, pp. 1685-1692, 1989.
- [18] N. Brown, *Lens changes with age and cataract; slit-image photography. In The Human Lens in relation to Cataract* (Elsviser, CIBA Symposium Foundation, 1973), pp. 65-78.
- [19] H. Saunders, "A longitudinal study of the age dependence of human ocular refraction 1. Age-dependent changes in the equivalent sphere," *Ophthalm. Physiol. Opt.*, vol. 6, no. 1, pp. 39-46, 1986.
- [20] G. Smith, D. A. Atchison, and B. K. Pierscionek, "Modeling the power of the aging human eye," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 9, no. 22, pp. 2111-2117, 1992.
- [21] T. Grosvenor, *Changes in spherical refraction during the adult years. In Refractive anomalies. Research and clinical applications* (T. Grosvenor and M. C. Flom, eds) (Butterworth-Heinemann, Oxford, 1991), pp. 131-45.
- [22] R. I. Calver, M. J. Cox, and D. B. Elliot, "Effect of aging on the monochromatic aberrations of the human eye," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 16, no. 9, pp. 2069-2078, 1999.
- [23] P. Artal, M. Ferro, I. Miranda, and R. Navarro, "Effects of aging in retinal image quality," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 10, no. 7, pp. 1656-1662, 1993.
- [24] G. Smith, B. K. Pierscionek, and D. A. Atchison, "The optical modelling of the human lens," *Ophthalmic and Physiological Optics*, vol. 11, no. 4, pp. 359-369, 1991.

Optical Models of the Finite Schematic Eyes for Presbyopia

Saang-Bai Baarg[†]

Department of Nano-optical Engineering, Korea Polytechnic University, Gyeonggi, Korea

[†]*E-mail: saangbai@kpu.ac.kr*

(Received November 10, 2008; Revised manuscript December 3, 2008; Accepted December 4, 2008)

There is a need for a finite schematic presbyopic eye that models vision and image quality under various conditions such as cataract or refractive surgery, as well as near vision corrections with an ophthalmic lens or contact lens. Using recently measured biometric data of presbyopic eyes, new model eyes were designed that are optically and anatomically close to real eyes. The parameters changing significantly with age were incorporated into models for four different age groups. The new model eyes have alpha angle, decentered pupil, aspheric GRIN lens and aspheric retinal surface. It is likely that the new finite presbyopic model eyes will be useful for designing visual instruments such as low vision aids, PALs, IOL and contact lenses, and for the clinical prediction of the retinal image quality of a presbyopic patient.

OCIS codes: (330.4460) Ophthalmic optics; (110.3000) Image quality assessment; (080.2740) Geometrical optics, optical design; (110.2760) Gradient-index lenses.