



A Simulation Study of Female Schematic Eyes for the Presbyopia Based on the Clinical Data

Mi-Jin Kim and Dal-Young Kim*

Dept. of Optometry, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea
(Received January 7, 2017; Revised March 13, 2017; Accepted March 20, 2017)

Purpose: This study was aimed at simulating the finite schematic eyes adopting age-related clinical data to predict the visual performance of presbyopia. **Methods:** We analysed the clinical data of previous clinical studies which measured age-related changes of human eyes. The data were applied to optical parameters of the female schematic eyes in the age of 40, 50 and 60. The ZEMAX simulation program was used to design and optimize the schematic eyes for presbyopia. **Results:** The designed schematic eyes showed the presbyopic process corresponding to the clinical data of previous studies. Their image qualities gradually decreased with increase of their age. **Conclusions:** It is expected that the designed finite schematic eyes in accordance with real presbyopia will be useful in theoretical analyses of presbyopia and evaluation of the change of visual function when ophthalmic surgical correction is applied.

Key words: Presbyopia, Finite schematic eye, Simulation

서 론

모형안(schematic eye)은 사람의 안광학계의 기하광학적인 모델로 눈의 굴절면과 안매체의 광학적 수치를 도식화한 것이다.^[1] 반복적인 임상 측정을 통해 실안과 유사하게 만들어진 정밀모형안은 사람의 눈에서 일어나는 복잡한 매커니즘을 해석하고 결상 상태를 파악하기에 용이하며,^[2] 광학기구나 렌즈를 설계할 때에도 이용된다.^[3] 대표적인 모형안으로 Gullstrand, Kooijman, Navarro 모형안 등이 있다.

1911년 발표된 Gullstrand 모형안은 근대 모형안의 표준으로 각막의 전면과 후면, 수정체 피질, 수정체 핵질의 전면과 후면을 경계면으로 한 6개의 굴절면으로 구성되어있고, 눈의 상태를 정적굴절상태와 최대동적굴절상태로 나누어 나타냄으로써 조절에 따른 광학적 해석이 가능하도록 하였다.^[2] 하지만 이는 근축모형안으로 3차 수차 이상의 광학적인 특성을 관찰할 수 없으며, 비정시의 종(縱) 초점이동(lateral defocus)값과 망막상의 배율을 예측하는 경우 등에 제한적으로 사용된다. 이 후 발표된 정밀모형안(finite schematic eye)은 굴절면이 4면 이상의 비구면으로 구성되어 있고, 근축모형안의 광학적인 성질을 포함하고 있으며, 근축모형안 보다 상대적으로 큰 망막상의 크기와 수차, 회절, retinal sampling 등에 의한 상의 특성을 예측할 수 있다.^[4,5] 정밀모형안은 1971년 Lotmar가 발표한 이

후 1983년 Kooijman, 1985년 Navarro가 안구의 조절이 표현되는 모형안을 제안하였고, 국내에서는 2004년 김상기^[6]가 한국인의 최적화된 안구 광학상수를 포함한 정시 및 비정시 모형안을 제안하였다.^[7]

최근 의학기술의 발달로 평균수명이 늘어남과 동시에 과도한 디지털기기 사용으로 초기 노안발생 연령이 낮아짐에 따라 노안인구는 계속해서 증가하고 있다.^[8] 노안은 대개 40세 이후로 나타나는 눈의 생리적 현상으로, 조절 기능이 감소하여 근거리 작업 시 어려움을 느끼게 되며 경우에 따라서 원시가 진행되기도 한다.^[9] 노안의 교정을 위해서 과거에는 비수술적 노안교정방법인 근용안경, 이중초점안경, 다초점안경 등을 주로 사용하였으나 최근에는 이중초점 콘택트렌즈, 다초점 콘택트렌즈가 개발되었고, 의료기술이 발전함에 따라 노안교정 각막성형술 등의 수술적 교정방법도 늘어나고 있는 추세이다.^[10]

이러한 다양한 교정방법에 따라 변화되는 안광학계의 광학적 특성은 앞서 언급한 바와 같이 모형안을 이용하여 예측할 수 있다. 특히 광학 프로그램을 이용할 경우 눈의 광학적 형상을 정밀하게 구현할 수 있고, 수차를 비롯한 상의 질을 평가할 수 있는 복잡한 광학적 수치들을 정확하고 신속하게 계산할 수 있다.^[11,12] 그러나 이러한 예측은 목적에 따라 적절한 모형안이 선택되어야 하고, 그 정확성은 모형안이 실안의 해부학적, 광학적 특성에 어느 정도

*Corresponding author: Dal-Young Kim, TEL: +82-2-970-6229, E-mail: dykim@seoultech.ac.kr

부합하는가에 달려있을 것이다.^[13,14] 노안 인구가 늘어남에 따라 노안교정에 대한 관심과 필요성이 증대되고 있고, 교정에 앞서 시기능의 예측이 선행되어야 하기 때문에 노안연구 분야에서도 실안과 근사한 정밀모형안을 구현하는 것이 필수적이다. 노안이 시작되면 안광학계를 구성하는 굴절면과 매체에 여러 가지 변화가 일어나기 때문에 노안 정밀모형안의 광학상수는 연령별로 다르게 적용되어야 한다. 이에 따라 노안에 대한 임상연구를 바탕으로 연령대별 정밀모형안을 구현하고자 하는 연구가 계속 이어지고 있다.^[14-16] 본 연구는 이러한 흐름의 일환으로, 노안의 진행에 따른 안광학계의 변화를 측정할 수 있는 선행 임상연구자료를 면밀히 분석하고, 선행 임상연구의 결과를 반영한 노안정밀모형안을 연령별로 전산 모사하는 것을 목적으로 하였다.

Navarro 모형안을 이용한 노안정밀모형안에 대한 선행 연구^[15]는 남성을 대상으로 한정하였고, 임상자료를 모형안의 변수에 적용함에 있어 통계학적 유의성을 반영하지 않은 경우가 있었다. 본 연구에서는 일반적인 통계적 유의 수준($\alpha=0.05$)을 기준으로 임상자료의 유의확률(p-value)이 0.05 이상인 임상자료를 배제하였으며, 여성을 대상으로 연령별 정밀모형안을 설계한 점에서 선행연구와 차별성을 갖는다.

본 연구에서 설계된 모형안은 선행 임상연구자료와 상응하는 노안의 진행과정을 보여주었고, 노안이 진행됨에 따라 서서히 상의 질이 감소함을 보여주었다.

대상 및 방법

일반적으로 노안이 시작되는 나이인 40세^[8]를 시작으로 50세와 60세 여성의 정밀모형안을 광선추적방식의 설계프로그램인 ZEMAX™를 이용하여 전산모사하였다. 본 연구에서 설계된 모형안은 각막 전면과 후면, 수정체 전면과 후면으로 구성된 4개의 굴절면과 각막, 방수, 수정체, 유리체로 구성된 4개의 굴절매체, 최종 상면이 되는 망막으로 구성되어 있다. 이하 본 논문에서 각 표면의 비구면도(asphericity)는 코닉비구면계수 Q를 의미한다.

모형안의 변수에 적용된 임상자료는 연령이 증가함에 따라 일어나는 안광학계의 굴절면과 매체를 직접 측정할 수 있는 선행임상연구들에서 수집하였다. 수집된 임상자료들 중 40세 이상의 연령을 대상으로 하고 성별에 따른 차이를 검증한 자료들을 위주로 분석하였으며, 광학적 수치의 차이가 통계학적으로 유의하지 않거나($p>0.05$) 임상자료가 부족한 경우에는 Navarro 정밀모형안^[17]의 값을 적용하였다.

1. 임상자료의 분석

Atchison 등^[18]의 논문(측정대상자 : 106명)을 비롯한 여

러 선행 임상연구들에 따르면, 각막 전후면의 곡률반경은 연령에 따른 차이를 보이지 않는다고 보고되었다.^[18-21] 다만 전면곡률반경은 여성이 남성보다 작은 경향을 보인다고 하였으며,^[9,18-22] 후면곡률반경은 여러 임상자료^[18,19,23]와 정밀모형안의 값이 6.4-6.6 mm로 일치하고 있으므로 본 연구에서 각막의 전면곡률반경은 Atchison 등의 임상자료(7.66±0.26 mm)를, 후면곡률반경은 Navarro 모형안의 수치(6.5 mm)를 적용하였다.

각막의 비구면계수는 Dubbelman 등^[19](측정대상자: 114명)의 임상자료를 전산모사에 적용하였다. Dubblman 등에 의하면 각막 전후면의 비구면계수는 연령의 증가함에 따라 유의한 변화를 보였으나, 성별에 따른 차이는 보이지 않는다고 보고하였다. 전면비구면계수에 적용한 회귀조건식($-0.24+0.003\times\text{Age}$)은 연령이 증가할수록 각막전면 정점의 곡률반경이 감소하면서 비구면계수가 (+)방향으로 증가한다는 Pardhan과 Beesley^[24]의 연구와 같은 경향성을 보였으며, Achison 등^[18]의 임상자료(-0.13 ± 0.14)와 표준편차 범위 내에서 일치하고 있었다. 후면비구면계수에 적용한 회귀조건식($0.01-0.0062\times\text{Age}$)은 Lam 등^[25]의 임상자료(-0.66 ± 0.38)와 표준편차 범위 내에서 일치하고 있었다.

각막의 중심두께의 변화는 연령이 증가함에 따라 나타나는 변화가 인종마다 다르다는 연구결과가 있으며,^[26] Dubbelman 등^[19]은 각막 전후면의 비구면계수가 변하면서 각막의 주변부만 얇아진다고 설명한 바 있다. Altinok 등^[27]과 Atchison 등^[18]의 연구에서도 각막의 중심두께는 연령과 성별에 따른 유의한 차이가 나타나지 않는다고 보고되고 있으므로, 각막 중심두께는 Navarro 모형안의 수치(0.55 mm)를 적용하여 고정변수로 취급하였다.

수정체는 연령이 증가하면서 곡률반경, 중심두께, 굴절률 등의 변화가 일어난다. 노안의 증상이 주로 이와 관련이 있다고 알려져 있으며,^[28] 임상자료에서도 이를 확인할 수 있었다. 임상자료들에 의하면 연령이 증가할수록 수정체의 전면곡률반경은 연간 0.04 mm에서 0.08 mm까지 줄어들어 전면의 형태가 볼록해지는 반면에 후면곡률반경은 변화가 없으며, 수정체의 중심두께는 증가하지만 등가굴절률은 감소하는 것으로 보고되고 있다.^[18,28-30] 수정체 변화에 대한 남녀의 차이는 등가굴절률에서만 의미 있는 차이를 보였고, 여성이 남성에 비해 더 높은 것으로 측정되었다.^[18] 본 연구에서 모형안의 변수 중 수정체 전·후면의 곡률반경과 중심두께, 등가굴절률은 남녀의 차이를 검증한 Atchison 등^[18]의 임상자료를 적용하였다.

수정체 전후면의 비구면계수는 Dubbleman 등^[28](측정대상자: 102명)이 연구한 바에 따르면 연령이 증가할수록 (+)방향으로 증가하였으나 통계학적으로 유의하지 않았으므로 비구면계수는 임상자료의 평균값을 적용하여 고정변

수로 취급하였다.

연령이 증가할수록 수정체의 두께가 증가하고 이에 따라 전안방의 길이가 감소하는 것으로 나타났다.^[18,21,29-32] 본 연구에서 전안방의 길이에 대한 변수는 Atchison 등^[18]의 임상자료를 적용하였으며, 그에 따르면 여성의 경우 남성보다 전안방의 길이와 수정체의 중심두께가 작게 측정되지만 통계적으로 유의하지 않다고 발표하였다.

유리체의 길이는 연령에 따른 유의한 변화는 관찰되지 않으며 성별에 따라 차이가 있다고 여러 선행연구에서 보고되었다.^[18,22] 유리체 길이에 대한 변수는 Atchison 등^[18]의 임상자료를 적용하였으며, 여성이 남성보다 0.51 mm 정도 짧은 것으로 보고되었다. 안구의 대부분을 차지하는 유리체의 길이가 여성의 경우 남성보다 짧기 때문에 일반적으로 여성의 안구가 남성보다 작게 된다.

이상과 같이 선행연구의 임상자료를 분석하여 모형안의 변수를 설정하였고 Table 1은 이를 정리한 것이다. 연령에 따른 변수는 각막 전·후면의 비구면계수와 전안방의 길이, 수정체의 전면곡률반경, 중심두께, 등가굴절률이고, 고정 변수는 각막의 후면곡률반경과 중심두께, 수정체의 후면곡률반경, 전·후면의 비구면계수, 유리체의 길이이다. 이 중 각막의 전면곡률반경과 수정체의 등가굴절률, 유리체의 길이는 남녀의 차이가 그 값에 반영되었다.

Table 1. Eye medium's parameters of Schematic eye

Eye Medium's Parameters	Value	
Cornea	Anterior radius(mm) ^[18]	7.66±0.26
	Anterior asphericity ^[19]	-0.24+0.003×Age
	Posterior radius(mm) ^[17]	6.5
	Posterior asphericity ^[19]	0.01-0.0062×Age
	Central thickness(mm) ^[17]	0.55
	Index / Abbe's number ^[17]	1.367 / 56.5
Aqueous	Depth ^[18]	3.359-0.0105×Age
	Index / Abbe's number ^[17]	1.3374 / 49.61
Crystalline Lens	Anterior radius(mm) ^[18]	12.283-0.0438×Age
	Anterior asphericity ^[28]	-5±4.7
	Posterior radius(mm) ^[18]	-6.86±0.85
	Anterior asphericity ^[28]	-4±3.6
	Central thickness(mm) ^[16,18]	3.1267+0.02351×Age
	Equivalent Index ^[18] Abbe's number ^[17]	1.4471-0.00035×Age 48
Vitreous	length ^[18]	16.18±0.59
	Index / Abbe's number ^[17]	1.336 / 50.9
Retinal radius(mm) ^[17]	-12	

각각 다른 피검자 집단을 대상으로 이루어진 여러 선행 임상 연구의 결과들을 하나의 모형안에 함께 적용했다는 문제가 있지만, 본 연구에서 인용된 선행 연구들은 모두 동일한 모집단(여성의 안구)을 대상으로 표본집단을 추출하였으므로 그로부터 통계적으로 유의하게 도출된 변수값들은 모두 동일한 모집단의 특성을 공통적으로 반영한다고 할 수 있으며, 또한 혹시 존재할 수도 있는 각 표본집단간의 차이는 광학적 최적화 과정에서 해당 모집단의 이상적인 모형안으로 수렴하게 되기 때문에 최종적인 모형안 설계 결과에는 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다.

2. 설계 조건 및 상의 평가 방법

각 매체의 아베수와 수정체를 제외한 매체의 굴절률은 Navarro 모형안의 수치를 적용하였다. Navarro 모형안에서 각막의 아베수와 굴절률은 56.5와 1.367, 방수의 아베수와 굴절율은 48과 1.3374, 유리체의 아베수와 굴절율은 50.9와 1.336이며, 수정체의 아베수와 굴절율은 49.61과 1.3374이었다.

임상자료를 토대로 설계된 정밀모형안은 각각의 변수가 임상자료의 표준편차범위 내에 있으면서 상의 해상도를 나타내는 MTF(modulation transfer function)가 최상이 되도록 최적화한 후 상의 질을 평가하였다. 전산모사 과정은 ZEMAX 광학프로그램을 이용하여 이루어졌으며 설계 조건은 다음과 같다. 파장은 명소시 조건(photopic vision)인 470 nm, 510 nm, 555 nm, 610 nm, 650 nm로 하였고, 각 파장의 가중치는 시세포의 비시감도 곡선에 따라 0.091, 0.503, 1, 0.503, 0.107로 부여하였다.^[33] 설계 필드(field)는 0°, 알파각을 고려한 5°, 이들 시야각의 중간 값인 3.54°로 설정하였고, 동공의 크기는 노인성 변화^[34]로 인하여 감소하기 때문에 3 mm로 적용하였다.

설계된 모형안의 상에 대한 평가는 MTF와 spot diagram, 수차 등으로 분석하였다. MTF는 물체가 광학계를 통과한 후 상에서 재현되는 정도를 나타내는 것으로 공간주파수가 변함에 따라 변조전달비가 어떻게 변화하는가를 나타내는 수치이다. MTF수치가 높을 경우 해상력이 높은 이미지를 재현한다고 볼 수 있으며, 일반적으로 공간주파수가 증가할수록 그 값이 감소한다. Spot diagram은 상면과 교차하는 광선속을 기하학적으로 나타낸 것으로 spot의 크기는 상의 퍼짐 정도를 나타내기 때문에 크기가 작을수록 상의 질이 우수함을 의미하고, spot의 분포형태로 수차의 종류도 가늠할 수 있다. Spot의 크기를 나타내는 지표는 RMS(root-mean-square) radius와 GEO(geometric) radius로, RMS radius의 크기는 광선의 교차점과 상점사이의 거리의 표준편차를 구한 값이며, GEO radius는 주광선의 spot size를 의미한다.^[35,36]

결과 및 고찰

40세 여성 정밀모형안의 전산모사 결과는 Fig. 1과 같다. Fig. 1(a)는 설계단면도이며 안구의 총 길이가 23.0858 mm이고 모형안의 설계값은 Table 2와 같다. 광학계의 일반적인 해상도를 나타내는 MTF곡선은 Fig. 1(b)에 주어져 있으며, 중심시야의 MTF값은 공간주파수가 0 cpm(cycles/mm)과 100 cpm일 때 각각 1과 0.347573이며, 공간주파수가 증가하면서 상의 해상도가 65.25%감소하는 것을 의미한다. 3.54°와 5°의 시야에서 MTF값은 공간주파수 100 cpm에서 각각 66.08%와 66.94%의 감소를 보였다. Fig. 1(c)는 40세 모형안의 spot diagram으로, 중심시야에서 RMS

radius와 GEO radius의 크기는 각각 3.824 μm, 8.595 μm 이었으며, spot의 모양으로 보았을 때 시야각(3.54°, 5°)이 커질 경우 코마수차가 다소 발생함을 알 수 있었다. Fig. 1(d)는 각각의 굴절면에서 발생하는 자이텔수차를 보여준다. 중심파장 555 nm에서 계산된 각각의 수차량은 구면수차가 -0.000001, 코마수차가 0, 비점수차가 0.000077, 상면만곡이 0.000786, 왜곡수차가 0.000252로 구면수차와 코마수차는 거의 발생하지 않고 있다.

50세 여성정밀모형안의 전산모사 결과는 Fig. 2과 같다. Fig. 2(a)는 설계단면도이며 안구의 총 길이가 23.18239 mm 이고 모형안의 설계값은 Table 3과 같다. Fig. 2(b)에 주어진 MTF곡선을 보면 공간주파수 100 cpm에서 중심시야의

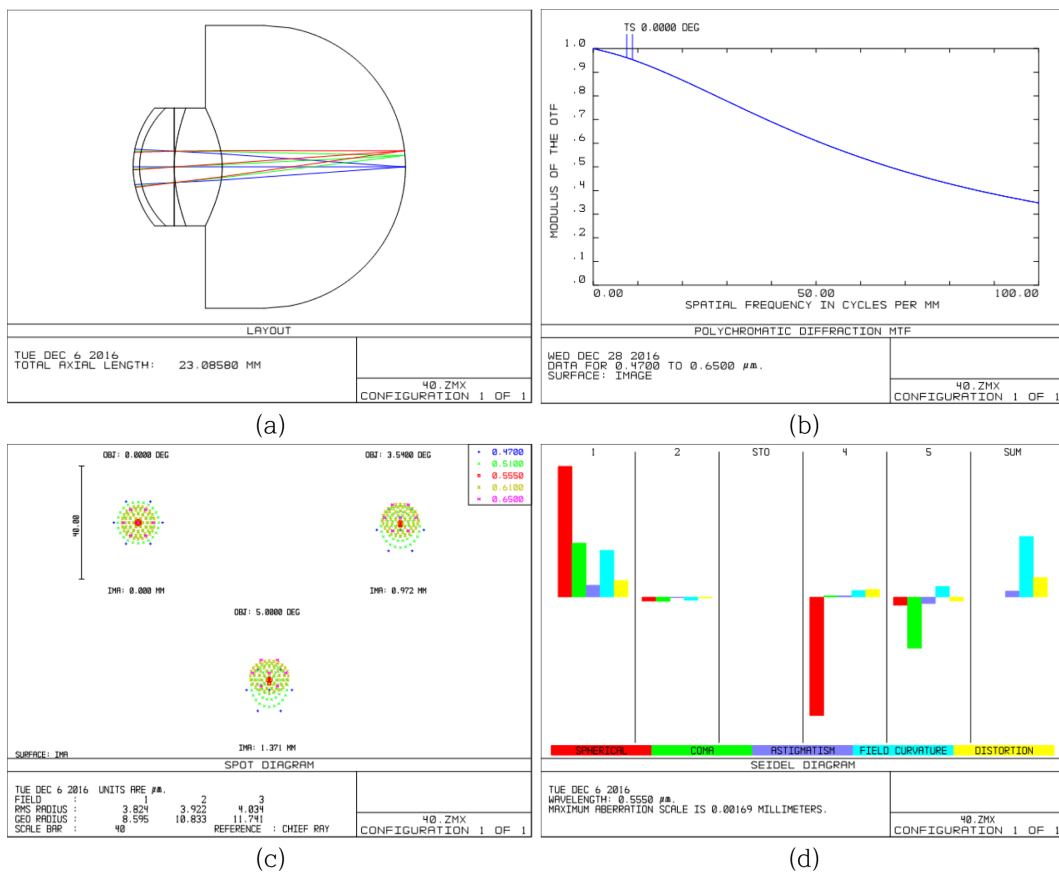


Fig. 1. Simulation of the designed schematic eye at the age of 40. (a) cross-sectional diagram, (b) MTF, (c) Spot diagram, (d) Seidel aberration

Table 2. Optical parameters of schematic eye for ZEMAX simulation at the age of 40

Age	Surface	Radius(mm)	Thickness(mm)	Refractive index	Abbe's number	Asphericity
40	1	7.66	0.55	1.367	56.5	-0.1267
	2	6.5	2.939	1.3374	49.61	-0.226
	stop	infinity	0	1.3374	49.61	0
	4	10.5310	4.0671	1.44003	48	-5.65
	5	-6.86	15.5297	1.336	50.9	-3.65
	IMA	-12	-	-	-	-

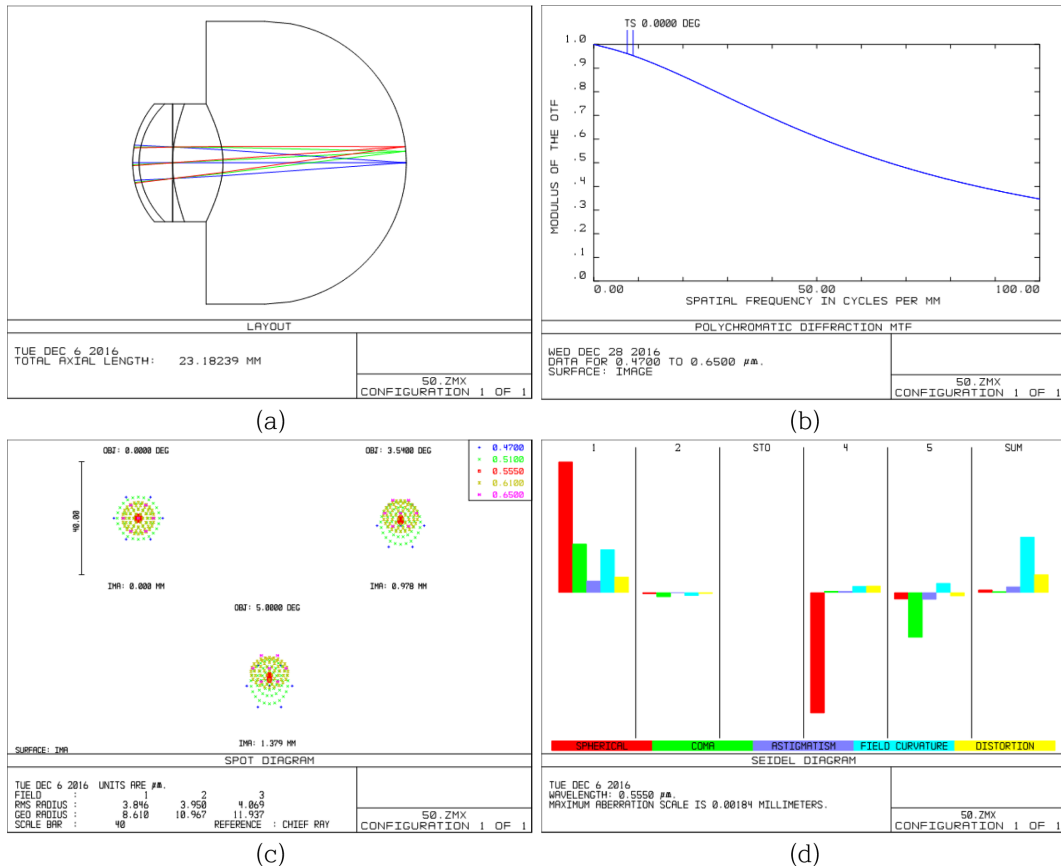


Fig. 2. Simulation of the designed schematic eye at the age of 50. (a) cross-sectional diagram, (b) MTF, (c) Spot diagram, (d) Seidel aberration

Table 3. Optical parameters of schematic eye for ZEMAX simulation at the age of 50

Age	Surface	Radius(mm)	Thickness(mm)s	Refractive index	Abbe's number	Asphericity
50	1	7.66	0.55	1.367	56.5	-0.09
	2	6.5	2.834	1.3374	49.61	-0.3
	stop	infinity	0	1.3374	49.61	0
	4	10.093	4.26869	1.43627	48	-5.65
	5	-6.86	15.5297	1.336	50.9	-3.65
	IMA	-12	-	-	-	-

MTF값은 0.346787로, 상의 해상도가 65.32%의 감소를 보였다. 3.54°와 5°의 시야에서의 MTF값은 100 cpm에서 66.19%, 67.07%의 감소를 보였다. Fig. 2(c)의 spot diagram을 보면 RMS radius의 크기는 3.846 μm이며 GEO radius의 크기는 8.610 μm로 40세에 비해 다소 증가한 수치이다. Fig. 2(d)는 50세 여성정밀모형안의 seidel diagram으로 발생한 총 수차량은 구면수차가 0.000037, 코마수차가 0.000014, 비점수차가 0.000083, 상면만곡이 0.000782, 왜곡수차가 0.000253으로 발생하였다.

60세 여성정밀모형안의 전산모사 결과는 Fig. 3과 같다. Fig. 3(a)는 설계단면도이며 안구의 총 길이가 23.28798 mm

이고 모형안의 설계값은 Table 4와 같다. Fig. 3(b)에 주어진 MTF곡선을 보면 공간주파수가 100 cpm일 때 중심시야에서는 0.345951로 65.4%로 감소하였고, 3.54°와 5°의 시야에서는 각각 66.33%와 67.24%의 감소를 보였다. Fig. 3(c)는 60세 여성정밀모형안의 spot diagram으로 이전 두 모형안과 spot의 모양이 유사하였고, RMS radius의 크기는 3.861 μm, GEO radius의 크기는 8.604 μm로 크기의 변화만 보이고 있었다. 60세 모형안의 자이텔 수차는 Fig. 3(d)와 같으며 각각 구면수차가 0.000056, 코마수차가 0.000035, 비점수차가 0.000087, 상면만곡이 0.000778, 왜곡수차가 0.000255로 발생하였다.

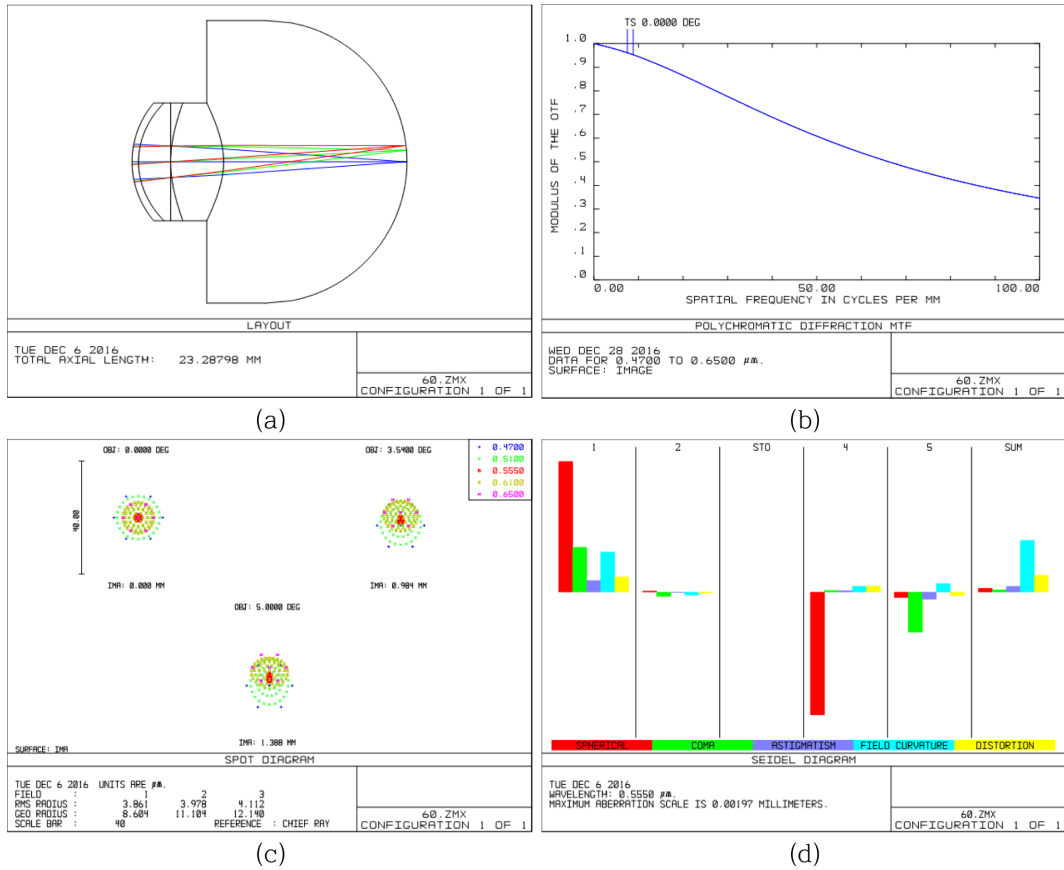


Fig. 3. Simulation of the designed schematic eye at the age 60. (a) cross-sectional diagram, (b) MTF, (c) Spot diagram, (d) Seidel aberration

Table 4. Optical parameters of schematic eye for ZEMAX simulation at the age of 60

Age	Surface	Radius(mm)	Thickness(mm)	Refractive index	Abbe's number	Asphericity
60	1	7.66	0.55	1.367	56.5	-0.06
	2	6.5	2.718	1.3374	49.61	-0.362
	stop	infinity	0	1.3374	49.61	0
	4	9.7426	4.49028	1.43275	48	-5.65
	5	-6.86	15.5297	1.336	50.9	-3.65
	IMA	-12	-	-	-	-

Table 5. Age-related eye medium's parameters

Eye Medium's Parameters		Trend with age	40	50	60
Cornea	Anterior asphericity	$-0.24 + 0.003 \times A$	-0.1267	-0.0900	-0.0600
	Posterior asphericity	$0.01 - 0.0062 \times A$	-0.226	-0.300	-0.362
Anterior chamber Depth(mm)		$3.359 - 0.0105 \times A$	2.939	2.834	2.718
Crystalline Lens	Anterior radius(mm)	$12.283 - 0.0438 \times A$	10.531	10.093	9.7426
	Central thickness(mm)	$3.1267 + 0.02351 \times A$	4.06710	4.26869	4.49028
	Equivalent Index	$1.4541 - 0.00035 \times A$	1.44003	1.43627	1.43275

이상의 각 연령별 정밀모형안의 전산모사 결과를 비교해보면 노안의 진행과정과 그에 따른 시기능의 감소가 적

절히 반영되었음을 알 수 있다. 노안의 진행으로 나타나는 해부학적 변화 양상은 임상자료의 회귀조건설과 연령대별

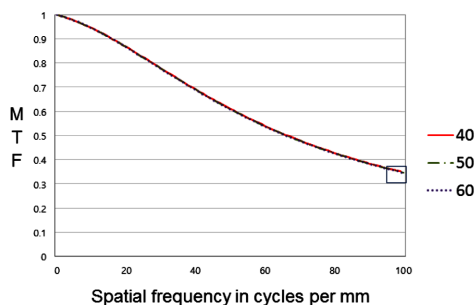
Table 6. Comparison of general performance with age

Parameters	Age		
	40	50	60
Axial Length(mm)	23.0858	23.1824	23.2880
Effective Focal Length(mm)	15.7475	15.8454	15.9502
Equivalent Power(D)	63.50	63.11	62.70

로 적용한 설계값을 명시하여 Table 5에 나타내었고, 명소시를 기준으로 한 모형안의 기본적인 성능은 Table 6에 주어졌다. 연령 증가에 따른 망막상의 질적 변화는 각 연령별 모형안의 MTF, spot sizes, 수차들을 비교하여 분석하였으며, 노안에 대한 선행 임상연구들과도 상응하는 결과를 보여주고 있다.

Table 5에서 보는 바와 같이 연령이 증가하면서 나타나는 눈의 해부학적인 변화는 각막 및 수정체를 중심으로 일어난다. 각막의 경우 전후면의 비구면계수가 변하면서 중심두께의 변화 없이 주변부 두께만 얇아지는 경향을 보이고, 수정체의 경우 전면곡률과 중심두께 및 굴절률이 변하면서 수정체의 전체 굴절력이 감소함을 보여주고 있다. 이러한 노안의 해부학적 변화를 바탕으로 설계된 모형안의 기본성능을 비교해보면, Table 6과 같이 연령이 증가할수록 안구의 총 길이는 길어지고 안광학계의 전체 굴절력은 감소하게 됨을 알 수 있었다. 이것은 임상적인 측정을 통해 수정체의 해부학적 변화가 안광학계에 미치는 영향에 대해 연구한 Glasser와 Campbell^[37,38]의 연구와도 상응하는 결과이며, 이들의 연구에서도 연령이 증가할수록 수정체의 초점거리가 길어지면서 안광학계의 전체 굴절력이 낮아진다고 주장한 바 있다.

Fig. 4는 각 연령별 MTF를 비교한 것으로 연령이 증가할수록 상의 질이 서서히 저하되고 있음을 보여주고 있다. MTF곡선의 연령별 차이가 미미하므로 공간주파수 94~100 cpm에서의 MTF곡선에 해당하는 Fig. 4(a)의 사각형부분은 Fig. 4(b)에서 자세히 나타내었다. 공간주파수 100 cpm에서의 MTF값은 40세가 0.347573, 50세가 0.346787,



(a)

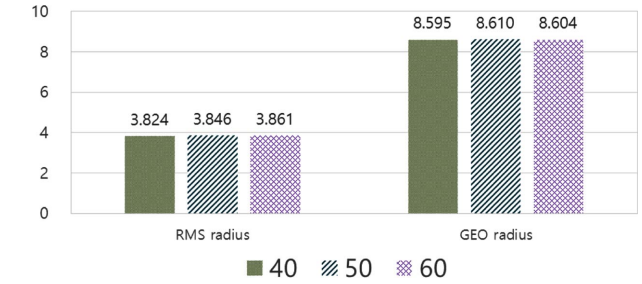


Fig. 5. Comparison of spot sizes as a function of age.

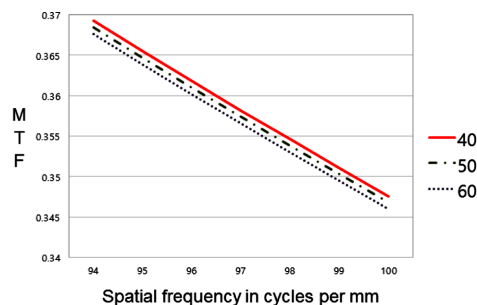
60세가 0.345951로, 망막상의 질이 40세에 비해 50세는 0.23%감소하였으며 60세는 0.47%감소하였다.

Fig. 5는 각 연령별 모형안의 spot diagram에서 보여주는 spot size를 비교한 그래프이다. 40세, 50세, 60세의 RMS radius는 각각 3.824 μm , 3.846 μm , 3.861 μm 로 40세에 비해 50세는 0.022 μm (0.58%)증가하였고 60세는 0.037 μm (0.97%) 증가하였다. GEO radius는 각각 8.595 μm , 8.610 μm , 8.604 μm 로 40세에 비해 50세는 0.015 μm (0.17%) 증가하였고 60세는 0.009 μm (0.10%)증가하였다. spot size가 증가하는 것은 연령이 증가함에 따라 광선의 결집도가 서서히 떨어지는 것을 의미하며 상의 질이 저하됨을 암시한다고 볼 수 있다.

Table 7은 각 연령별 모형안에서 발생하는 단색수차들의 총량을 정리한 것이다. 상면만곡을 제외한 4개의 수차에서 연령이 높을수록 수차량이 증가하고 있으며, 이 중 구면수차와 코미수차의 경우 40세 모형안에서는 거의 발생

Table 7. Comparison of aberrations calculated by ZEMAX as a function of age

	40	50	60
Spherical	-0.000001	0.000037	0.000056
Coma	0.000000	0.000014	0.000035
Astigmatism	0.000077	0.000083	0.000087
Field Curvature	0.000786	0.000782	0.000778
Distortion	0.000252	0.000253	0.000255



(b)

Fig. 4. Comparison of MTF as a function of age.

하지 않고 있으나 50세, 60세가 되면 현저히 그 값이 증가됨을 볼 수 있다. 이러한 경향은 선행임상연구의 결과와 잘 일치한다. 노안에 따른 망막상의 질을 실제로 측정된 McLellan 등^[40]의 연구에서 연령이 많을수록 MTF값이 낮게 측정되었으며, 구면수차, 코마수차 등의 수차는 증가하는 것으로 보고된 바 있다.

이상과 같이 연령에 따른 눈의 해부학적 변화를 반영하여 노안모형안을 설계하고 전산모사를 통해 안광학계의 성능을 비교분석해 봄으로써 노안의 진행과정과 그에 따른 시능의 변화를 예측할 수 있었다. 연령이 증가할수록 망막상의 질이 저하되고 있음을 확인할 수 있었고 선행임상연구와도 부합하는 결과를 보여주었다.

결 론

노안인구가 늘어남에 따라 노안교정에 대한 관심과 필요성이 증대되고 있으며, 노안의 시기능 예측을 위해서는 실안과 근사한 정밀모형안이 필요하다. 노안의 발생으로 안광학계를 구성하는 굴절매체에 여러 가지 변화가 일어나기 때문에 노안정밀모형안에는 기존 모형안과 다른 광학상수를 적용하여야한다. 본 연구는 연령이 증가함에 따라 나타나는 안구의 해부학적 변화와 관련된 선행임상연구들을 바탕으로 40세, 50세, 60세 여성의 노안정밀모형안을 전산모사 방법으로 설계하였다. 설계된 모형안을 통하여 노안의 진행과정과 그에 따른 시기능의 변화를 예측하였고, 연령이 증가할수록 망막상의 질이 감소하고 있음을 확인할 수 있었다. 실제 노안에 부합하는 정밀모형안의 설계는 노안에 관한 학술적 연구와 교정에 따른 시기능의 변화를 평가하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구는 현재까지 실측된 임상자료들만으로 설계되었기 때문에 모형안의 구현에 한계가 있었으며, 추후 임상자료가 보강된다면 실안과 더 근사한 노안모형안을 설계할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] Kang HS. Introduction to Optometry, 2nd Ed. Seoul: Shinkwang Publishing Company, 2004;129-137.
- [2] Sung PJ. Optometry, 8rd Ed. Seoul: Daihak Publishing Company, 2013;37-41.
- [3] Lim HS, Ji TS, Kim BH, Kim SJ, Yoon SR. The optical properties on the human model eye. J Korean Ophthalmic Opt Soc. 2002;7(2):203-207.
- [4] Gross H, Blechinger F, Ahtner B. Handbook of optical systems: survey of optical instruments, 1st Ed. Wiley-VCH, 2008:25-39.
- [5] Greivenkamp JE, Schwiegerling J, Miller JM, Mellinger MD. Visual acuity modeling using optical raytracing of schematic eyes. Am J Ophthalmol. 1995;120(2):227-240.
- [6] Kim SG. Optical constant of the reduced eye based on theoretical finite model eye. Korean J Opt Photon. 2004; 15(3):268-273.
- [7] Kim SG, Park SC. Basic theory and understanding of ophthalmic optics. Optical Science and Technology. 2008; 12(2):5-13.
- [8] Holden BA, Fricke TR, Ho SM, Wong R, Schlenker G, Cronjé S et al. Global vision impairment due to uncorrected presbyopia. Arch Ophthalmol. 2008;126(12):1731-1739.
- [9] Lam CS, Goh WS, Tang YK, Tsui KK, Wong WC, Man TC. Changes in refractive trends and optical components of Hong Kong Chinese aged over 40 years. Ophthalmic Physiol Opt. 1994;14(4):383-388.
- [10] Kim TJ. Presbyopia and contact lenses. J Korean Med Assoc. 2013;56(4):303-309.
- [11] Lee JH. An introduction to ZEMAX, an optical design and analysis program. Optical Science and Technology. 2006;10(4):25-29.
- [12] Lim HS, Kim SJ, Kim MS, Kim JH. Practical optical design using ZEMAX, 1st Ed. Seoul: Daihak Publishing Company, 2012;163-179.
- [13] Liou HL, Brennan NA. Anatomically accurate, finite model eye for optical modeling. J Opt Soc Am A. 1997; 14(8):1684-1695.
- [14] Park SB. Optical models of the finite schematic eyes for presbyopia. Korean J Opt Photon. 2008;19(6):439-447.
- [15] Kim SH, Kim DY. Simulations of finite schematic eyes for presbyopia using the Navarro eye model. J Korean Ophthalmic Opt Soc. 2015;20(3):301-309.
- [16] Atchison DA. Age-related paraxial schematic emmetropic eyes. Ophthalmic Physiol Opt. 2009;29(1):58-64.
- [17] Navarro R, Santamaría J, Bescós J. Accommodation-dependent model of the human eye with aspherics. J Opt Soc Am A. 1985;2(8):1273-1280.
- [18] Atchison DA, Markwell EL, Kasthurirangan S, Pope JM, Smith G, Swann PG. Age-related changes in optical and biometric characteristics of emmetropic eyes. J Vis. 2008; 8(4):29.
- [19] Dubbelman M, Sicam VA, Van der Heijde GL. The shape of the anterior and posterior surface of the aging human cornea. Vision Res. 2006;46(6):993-1001.
- [20] Douthwaite WA, Hough T, Edwards K, Notay H. The EyeSys videokeratoscopic assessment of apical radius and p-value in the normal human cornea. Ophthalmic Physiol

- Opt. 1999;19(6):467-474.
- [21] Koretz JF, Kaufman PL, Neider MW, Goeckner PA. Accommodation and presbyopia in the human eye—aging of the anterior segment. *Vision Res.* 1989;29(12):1685-1692.
- [22] Mallen EA, Gammoh Y, Al-Bdour M, Sayegh FN. Refractive error and ocular biometry in Jordanian adults. *Ophthalmic Physiol Opt.* 2005;25(4):302-309.
- [23] Dubbelman M, Weeber HA, Van der Heijde GL, Völker-Dieben HJ. Radius and asphericity of the posterior corneal surface determined by corrected Scheimpflug photography. *Acta Ophthalmol Scand.* 2002;80(4):379-383.
- [24] Pardhan S, Beesley J. Measurement of corneal curvature in young and older normal subjects. *J Refract Surg.* 1999;15(4):469-474.
- [25] Lam AK, Douthwaite WA. Measurement of posterior corneal asphericity on Hong Kong Chinese: A pilot study. *Ophthalmic Physiol Opt.* 1997;17(4):348-356.
- [26] Doughty MJ, Zaman ML. Human corneal thickness and its impact on intraocular pressure measures: a review and meta-analysis approach. *Surv Ophthalmol.* 2000;44(5):367-408.
- [27] Altinok A, Sen E, Yazici A, Aksakal FN, Oncul H, Koklu G. Factors influencing central corneal thickness in a Turkish population. *Curr Eye Res.* 2007;32(5):413-419.
- [28] Dubbelman M, Van der Heijde GL. The shape of the aging human lens: curvature, equivalent refractive index and the lens paradox. *Vision Res.* 2001;41(14):1867-1877.
- [29] Koretz JF, Strenk SA, Strenk LM, Semmlow JL. Scheimpflug and high-resolution magnetic resonance imaging of the anterior segment: a comparative study. *J Opt Soc Am A.* 2004;21(3):346-354.
- [30] Richdale K, Bullimore MA, Sinnott LT, Zadnik K. The effect of age, accommodation, and refractive error on the adult human eye. *Optom Vis Sci.* 2016;93(1):3-11.
- [31] Dubbelman M, Van der Heijde GL, Weeber HA. The thickness of the aging human lens obtained from corrected Scheimpflug images. *Optom Vis Sci.* 2001;78(6):411-416.
- [32] Allouch C, Touzeau O, Kopito R, Borderie V, Laroche L. Crystalline lens biometry using A-scan ultrasound and the Orbscan device. *J Fr Ophtalmol.* 2005;28(9):925-932.
- [33] Smith WJ. *Modern optical engineering*, 3rd Ed. Seoul: Bookshill, 2007;164-168.
- [34] Kim JS, Shin JA, Lee OJ. *Ocular anatomy*, 1st Ed. Seoul: Chenggumunhwasa, 2011;81-82.
- [35] Smith WJ. *ibid*;400-419.
- [36] Smith WJ. *Modern lens design*, 2nd Ed. Seoul: Bookshill, 2008;65-76.
- [37] Glasser A, Campbell MC. Presbyopia and the optical changes in the human crystalline lens with age. *Vision Res.* 1998;38(2):209-229.
- [38] Glasser A, Campbell MC. Biometric, optical and physical changes in the isolated human crystalline lens with age in relation to presbyopia. *Vision Res.* 1999;39(11):1991-2015.
- [39] Artal P, Ferro M, Miranda I, Navarro R. Effects of aging in retinal image quality. *J Opt Soc Am A.* 1993;10(7):1656-1662.
- [40] McLellan JS, Marcos S, Burns SA. Age-related changes in monochromatic wave aberrations of the human eye. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2001;42(6):1390-1395.

임상데이터에 근거한 여성 노안 모형안의 전산모사 연구

김미진, 김달영*

서울과학기술대학교 안경광학과, 서울 01811

투고일(2017년 01월 15일), 수정일(2017년 03월 20일), 게재확정일(2017년 03월 21일)

목적: 본 연구는 노안의 시기능 예측을 위하여 연령에 따라 임상자료를 적용한 노안 정밀모형안의 전산모사설계를 목적으로 하였다. **방법:** 40세, 50세, 60세 여성을 대상으로 안광학계의 변화를 측정된 선행연구의 임상자료를 분석하여 모형안의 변수에 적용하고, 광학설계프로그램인 ZEMAX를 이용하여 정밀모형안을 설계하여 최적화하였다. **결과:** 설계된 모형안은 임상자료와 상응하는 노안의 진행과정을 보여 주었고, 연령이 증가할수록 상의 질이 감소하였다. **결론:** 노안에 부합하는 정밀모형안의 설계는 노안의 이론적 연구와, 교정에 따른 시기능의 변화를 평가하는데 유용하게 응용될 것으로 기대된다.

주제어: 노안, 정밀모형안, 전산모사