

Navarro 모형을 이용한 노인 정밀모형안의 전산모사

김신화, 김달영*

서울과학기술대학교 안경광학과, 서울 01811

투고일(2015년 7월 24일), 수정일(2015년 9월 3일), 게재확정일(2015년 9월 7일)

목적: 본 연구는 Navarro 정밀모형안을 이용하고 임상데이터를 적용시킨 새로운 노인 모형안을 전산모사하는 것을 목표로 하였다. **방법:** 40세, 50세, 60세 남성을 대상으로 선행연구로부터 광학적 매개변수에 관한 임상데이터를 수집하고, ZEMAX 광학프로그램을 이용하여 노인 정밀모형안을 설계하였다. **결과:** 설계된 노인 정밀모형안들의 노인 진행 과정과 특징들이 선행연구들의 임상데이터들과 잘 일치하였다. **결론:** Navarro 모형안을 기반으로 하여 임상자료와 상응하는 노인 정밀모형안을 새롭게 설계할 수 있었다.

주제어: Navarro 모형안, 노인, ZEMAX, 광선추적

서 론

정밀모형안(schematic eye)은 눈의 굴절기능에 주로 기여하는 각막과 수정체 등의 굴절률과 이들의 곡률, 곡률반경, 비구면 계수, 굴절력 등에 대한 임상에 따른 평균값들을 반영하고 안구의 형상을 광학적 수치로 적용하여 보편적으로 도식화한 인공안(人工眼)을 말한다.^[1] 이러한 모형안을 이용해 시기능을 예측할 수 있으며,^[2] 상의 질에 영향을 미치는 광학적 요인 또는 안과적 수술시 발생하는 다양한 변화들을 파악할 수 있도록 해준다. 그뿐만 아니라, 정밀모형안을 이용하여 망막상의 질을 분석하고 자이델(Seidel) 5수치를 예측하여 이를 안과적 시술계획에 응용할 수 있으며, 이론적 연구에 이용할 수도 있다. 그러므로 실안의 메커니즘에 근사(近似)한 정밀모형안을 구현하는 것은 학술 및 응용 양측면에서 중요한 의미를 갖는다.

모형안은 크게 정밀모형안과 하나의 굴절면으로 단일화시킨 생략안(reduced eye)으로 분류하며, 정밀모형안은 Gullstrand, Koojiman, Navarro 등이 있고, 생략안은 Gullstrand, Amsley, Donders 등이 있다.^[3]

이 중 Gullstrand 정밀모형안은 6개 굴절면(각막, 수정체 피질, 핵질 전 후면)이 구면으로 구성되어 있으며, 조절상태는 최대동적굴절상태와 정적굴절상태의 2가지 단계로 나타낼 수 있다는 특징이 있다.^[4] 이러한 Gullstrand 정밀모형안에 각막과 수정체의 전·후면 비구면계수를 부가한 것이 Koojiman 정밀모형안인데, 이는 Gullstrand 정밀모형

안보다 실안의 형태와 더 유사하다. 이에 비해, Navarro 정밀모형안은 4개 굴절면(각막, 수정체 전·후면)을 비구면으로 설정하고, 물점위치에 따라 수정체 굴절력 변화를 곡률반경과 두께 및 굴절률 및 비구면 계수를 연속적으로 나타낼 수 있으며,^[5] 또한 Navarro 정밀모형안은 다른 정밀모형안 가운데 Koojiman 정밀모형안과 가장 유사한 구조를 지닌 정밀모형안으로써, 굴절면을 구면으로 설정한 Koojiman 정밀모형안보다 실제 안구의 성능을 더 자세하게 구현할 수 있다는 장점이 있다.^[7] 이러한 장점들을 바탕으로 본 연구에서는 Navarro 정밀모형안을 기반으로 하여 노인 정밀모형안의 전산모사를 진행하였다.

한국의 노인인구는 계속 증가하고 있으며,^[8] 노화의 대표적 증상 가운데 한 가지가 바로 노안이다. 노안이란 일반적으로 40대 이후에 나타나는 생리적 현상이며, 나이가 들면서 수정체 경화 및 탄력도 감소, 모양체근 퇴화 등 다양한 원인으로 점차 조절력이 감소되어 근엄시 어려움을 느끼는 현상을 말한다.^[9] 노안을 교정하기 위해 과거에는 근용안경, 이중초점안경, 또는 다초점안경 등 주로 안경에 의존하는 시생활(視生活)을 했었고, 현대에는 안내렌즈(IOL), 맞춤형 누진가입도렌즈, 각막 인레이, CK(conductive keratoplasty), 노인 라식(presbyLASIK), 모노비전(monovision) 등 노안을 위한 광학적 렌즈 설계의 연구가 활발하게 진행되어 보다 더 선명한 상을 볼 수 있게 되었으며, 의료기술이 발전함에 따라 안과적 수술방법 또한 점차 향상되고 있다.^[10]

본 논문에서는 앞서 언급된 대로 Navarro 정밀모형안을

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

바탕으로 하고, 여러 다양한 선행임상연구들로부터 연령 별 노안의 임상데이터를 수집하여, 수집된 임상데이터를 ZEMAX 광학설계 프로그램에 적용한 후에 최적화시켜, 노안 정밀모형안을 새롭게 전산모사하여 보았다. 이와 같이 전산모사된 노안 정밀모형안의 결과들을 다시 선행 임상연구의 결과들과 비교하였으며, 전산모사된 노안 모형안과 임상 측정 데이터들이 편차 범위 내에서 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

대상 및 방법

본 연구에서는 초기 노안인 40세를 시작으로 50세와 60세까지 3가지의 연령을 설정하고, 성별은 남성을 대상으로 ZEMAX 광학설계 프로그램을 이용하여 노안 모형안을 설계하였다. Navarro 정밀모형안에 기반을 두고, 조절에 따라 달라지는 4개의 굴절면인 각막 전·후면, 수정체 전·후면을 비구면으로 설정한 후, 고정변수와 비고정변수를 구분하기 위하여 선행 임상 연구 자료들을 수집하였다.

2002년 Dubbelman 등^[11]은 나이에 따라 각막의 전면과 후면의 곡률반경은 유의하지 않다고 발표하였고, 2006년 역시 Dubbelman 등^[12]이 또 다른 연구에서 각막전면과 후면의 곡률반경은 일정한 비율로 고정되어 있으며 이 고정된 비율로 각막의 유효굴절률 또한 구할 수 있다고 언급한 바 있다. 이에 따라 본 연구에서는 고정변수를 각막 전면과 후면의 곡률반경과 굴절률로 적용하였고, 이 값들은

Navarro모형안의 기존 값으로 지정하였다. 그 외의 값인 각막 전·후면 비구면 계수, 각막 중심두께, 수정체 전·후면 곡률반경, 수정체 중심두께, 수정체의 등가굴절률, 안축장의 임상 데이터는 Atchison 등의 선행연구^[13]에서 수집하였고, 수정체 전·후면 비구면 계수는 Dubbelman과 Heijde의 연구^[14]에서 데이터를 수집하였으며, 수정체 굴절률과 아베수는 Sivak 등의 연구논문^[15]을 참조하였다.

아래의 Table 1은 이렇게 선행 임상연구들에서 추출한, 연령의 증가에 따른 매개변수들의 변화에 대한 회귀조건식들을 정리한 것이다.

동공크기는 노인성 축동을 고려하여 3 mm로 제한하였고, 파장은 시감도곡선에 따라 470 nm, 510 nm, 555 nm, 610 nm, 650 nm로 설정하였으며, 그 가운데 중심파장을 555 nm로 설정하였고, 이에 따른 파장의 가중치는 CIE1931^[16,17]에 근거하여 각각 0.091, 0.053, 1, 0.053, 0.107로 부여하였다. 설계 필드(field)는 알파각을 고려하여 0 도와 ±5 도로 하였으며, MTF값은 ISO 표준^[18]에 따라 공간주파수의 최대값을 100 cycles/mm로 제한하였다. 또한 목표시력을 1.0으로 하였기 때문에 Snellen의 소수식 시력 공식^[19] 또한 공간주파수의 제한에 적용시킬 수 있다.

$$\text{Snellen 소수식시력} = \frac{\xi}{100} \tag{1}$$

수식 (1)에서 ξ 는 망막 안에서 중심소와의 공간주파수이며, 단위는 cycles/mm이다.

Table 1. Equations collected from the previous studies for calculation of eye medium parameters as a function of age(α) with mm unit

Eye Medium's Parameters		Trend with age	Male
Cornea	Anterior asphericity ^[13]	$-0.0036+0.0038\times\alpha$	-
	Posterior asphericity ^[13]	$1.06-0.016\times\alpha$	-
	Central thickness ^[13]	$0.0567-0.00077\times\alpha$	+0.011~0.005
Crystalline Lens	Anterior radius ^[13]	$12.283-0.0438\times\alpha$	-0.22
	Posterior radius ^[13]	$-7.1857+0.0438\times\alpha$	+0.18
	Anterior asphericity ^[14]	$-5.4(\pm 1.6)+0.03(\pm 0.04)\times\alpha$	-
	Posterior asphericity ^[14]	$-5(\pm 2)+0.07(\pm 0.06)\times\alpha$	-
	Central thickness ^[14]	$3.1267+0.02351\times\alpha$	+0.06
	Equivalent refractive index ^[13]	$1.4506-0.00035\times\alpha$	-0.0070
Axial length ^[13]		$22.984+0.0113\times\alpha$	+0.62
Mean refractive index at four wavelengths ^[15]	440 nm	1.4155	Abbe's number ^[15] 35±6
	486 nm	1.4100	
	590 nm	1.4015	
	650 nm	1.3988	

결과 및 고찰

초기 노안인 40세의 남성 정밀모형안의 전산모사 결과는 Fig. 1(a)와 같다. Fig. 1(a)는 Table 1의 수치들을 토대로 설계하여 최적화한 결과의 단면도이며, 23.82833 mm로 Atchison 등^[13]의 연구에서 제시한 40세 남성의 안축장 길이와 편차 범위 내에서 일치한다.

Fig. 1(b)는 40세 남성 정밀모형안의 spot diagram을 나타낸 그림이다. 상면인 0 μm를 기준으로 광선의 밀집도를 살펴보면, 상면과 +50 μm에서 보다 더 밀집되어 있는 것을 확인할 수 있었고, spot size는 광축을 기준으로 RMS radius와 GEO radius가 각각 4.063 μm, 9.245 μm였으며, ±5도의 spot size는 같은 크기였다. 또한 spot diagram의 형태로 수차의 유형을 파악할 수 있는데, 광축에서는 동심원 모양으로 광선속들이 퍼져 구면수차가 발생한다는 것을 알 수 있고, ±5도에서는 상하 광선속을 기준으로 혜성꼬리 모양으로 퍼져있는 것으로 보아 코마수차가 크게 발생한다는 사실을 알 수 있다.

40세 남성 정밀모형안의 상의 질을 나타내는 MTF(modulation transfer function)의 측면을 보면 Fig. 1(c)와 같

다. 동공직경이 3 mm일 때 광축과 일치하는 0도에서는 tangential과 sagittal의 MTF값이 일치하며, 공간주파수가 0과 100 cycles/mm일 때 각각 1, 0.323의 값을 보였으며, 이는 100%와 32%의 성능을 나타내고 공간주파수가 최대값으로 증가하면서 상의 질이 67%가 감소된 것을 의미한다. ±5도일 때는 tangential과 sagittal의 MTF값은 일치하지 않았으나, 이 값 또한 공간주파수가 0일 때는 100%의 성능을 보였으며, 최대 공간주파수일 때 상의 질은 각각 23%, 28%의 성능을 보여주어 평균 74.5%정도가 감소된 것으로 나타났다.

Fig. 1(d)는 40세 남성 정밀모형안의 자이텔수차를 보여준다. 주파장을 기준으로 총 자이텔수차는 각각 구면수차가 0.000117, 코마수차가 -0.000424, 비점수차가 -0.000022, 상면만곡이 0.000764, 왜곡수차가 0.000205이다.

Fig. 2(a)는 50세 남성 정밀모형안의 설계 단면도를 나타낸 그림이다. 안축장이 23.89770 mm로, Table 1의 공식에서 계산되는 50세 남성의 안축장 길이의 범위인 23.549~24.169 mm 안에 포함되며, 0도와 ±5도의 광선속은 모두 망막에 결상된 것임을 알 수 있다.

Fig. 2(b)는 상면에 도달하는 광선들의 교차점을 나타낸

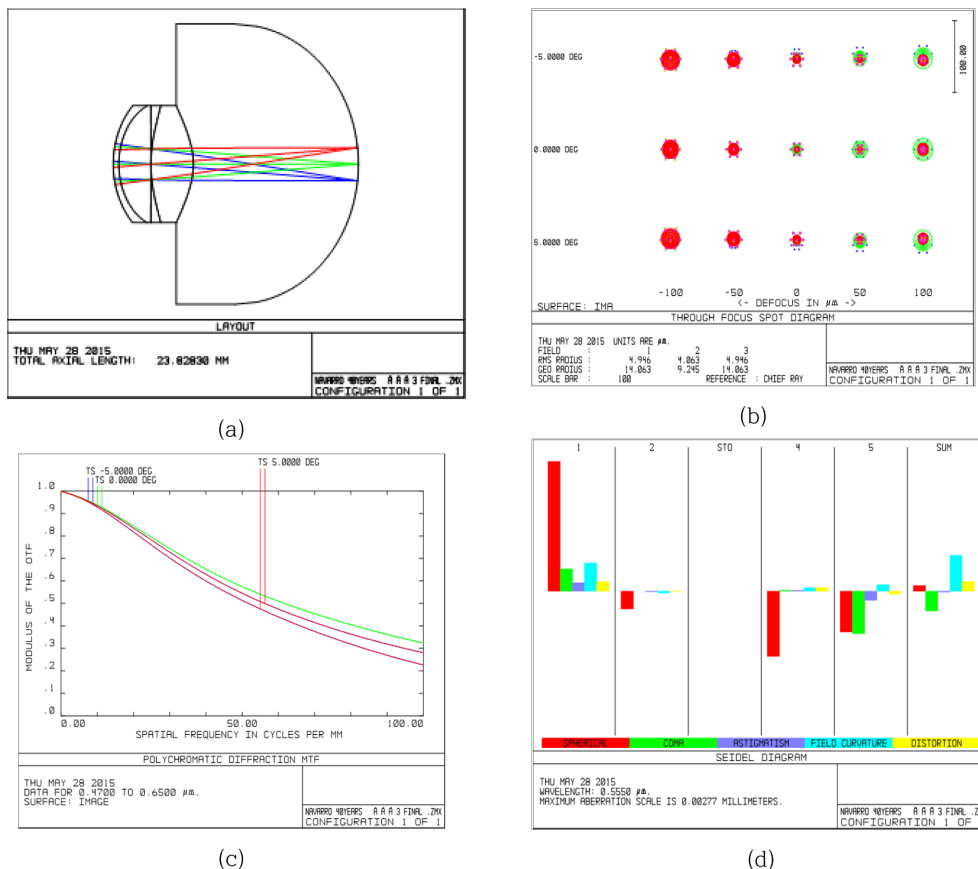


Fig. 1. Performance analysis of the schematic eye designed for initial presbyopia at the age of 40. (a) cross-sectional diagram, (b) spot diagram, (c) MTF, (d) Seidel aberration

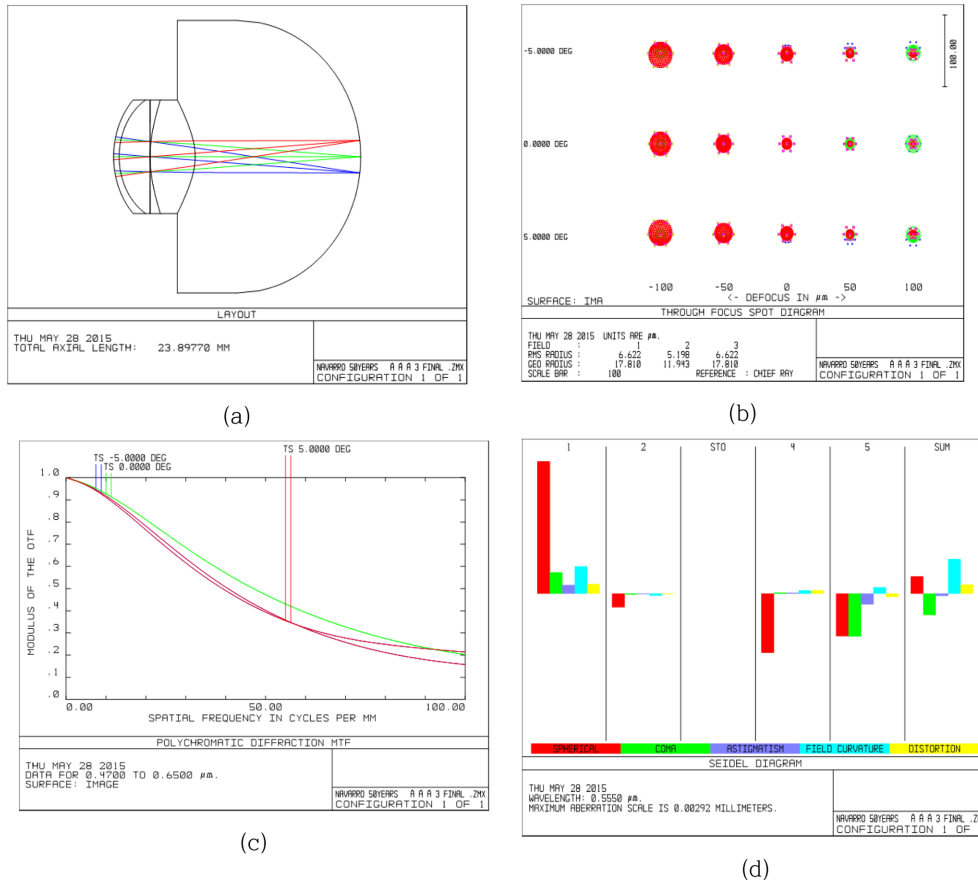


Fig. 2. Performance analysis of the schematic eye designed for presbyopia at the age of 50. (a) cross-sectional diagram, (b) spot diagram, (c) MTF, (d) Seidel aberration

spot diagram이다. 광선의 밀집도가 상면보다는 눈 뒤 50 μm 에서 더 밀집되어 있고, RMS radius와 GEO radius는 각각 5.198 μm 와 11.943 μm 였으며, spot size는 광축에서 가장 작게 나타났고, ± 5 도의 spot size는 같은 크기로 보이고 있다. 또한 spot diagram의 형태를 살펴보면 동심원과 한 점으로 치우쳐진 혜성꼬리모양으로 나타난 것으로 보아 구면수차와 코마수차가 존재한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 2(c)는 50세 남성 정밀모형안의 광학적 성능을 의미하는 MTF 그래프이다. 광축을 기준으로 최대 공간주파수에서 MTF 값은 0.20으로 20%의 성능을 나타내고 있으며, tangential과 sagittal에서 동일한 성능을 보였다. ± 5 도에서는 tangential과 sagittal은 각각 21%와 16%로 다른 값을 나타냈다. 최대 공간주파수에서의 MTF값은 광축에서 80%가 감소가 되었고, ± 5 도에서는 평균 약 81.5%가 감소하였다.

Fig. 2(d)는 50세 남성 정밀모형안의 자이텔수차를 나타낸 것이다. Fig. 2(b)에서 spot diagram의 형태를 보면 구면수차와 코마수차가 많다는 것을 예상할 수 있었는데, Fig. 2(d)에서 구면수차와 코마수차, 비점수차, 상면만곡, 왜곡수차의 양이 각각 0.000375, -0.000473, -0.000047,

0.000760, 0.000197로 나타나서 예상과 같이 구면수차와 코마수차가 상당한 양으로 발생함을 확인할 수 있었다.

Fig. 3(a)는 60세 남성 정밀모형안의 단면도를 나타낸 것이다. 광축을 기준으로 0도, ± 5 도의 광선속은 망막에 결상되어 있고, 안축장은 23.90710 mm로 약 24 mm이었다. 이 결과는 Table 1에서 제시한 60세 남성의 평균 안축장 길이의 범위인 23.662 mm~24.282 mm 안에 있으며, 3개의 모형안들 가운데 가장 길다.

Fig. 3(b)는 60세 남성 정밀모형안의 spot diagram이다. 광선속의 밀집도를 보면 +100 μm 에서 가장 밀집되어 있고, spot size는 0도를 기준으로 RMS radius와 GEO radius는 각각 6.989 μm 와 14.535 μm 였으며, 광축과 일치한 광선속인 0도에서 크기가 가장 작게 나타났다. Spot diagram의 형태 역시 상면에서 멀어질수록 구면수차와 코마수차가 증가하는 것을 예상할 수 있다.

Fig. 3(c)는 60세 남성 정밀모형안의 MTF를 나타낸 것이다. 0도에서 MTF값은 다른 두 모형안들과 마찬가지로 tangential과 sagittal의 성능은 일치하였으며, 100 cycles/mm의 공간주파수에서 0.12로 12%의 성능을 가지고 있었다. ± 5 도에서는 tangential과 sagittal 방향에서의 광학적

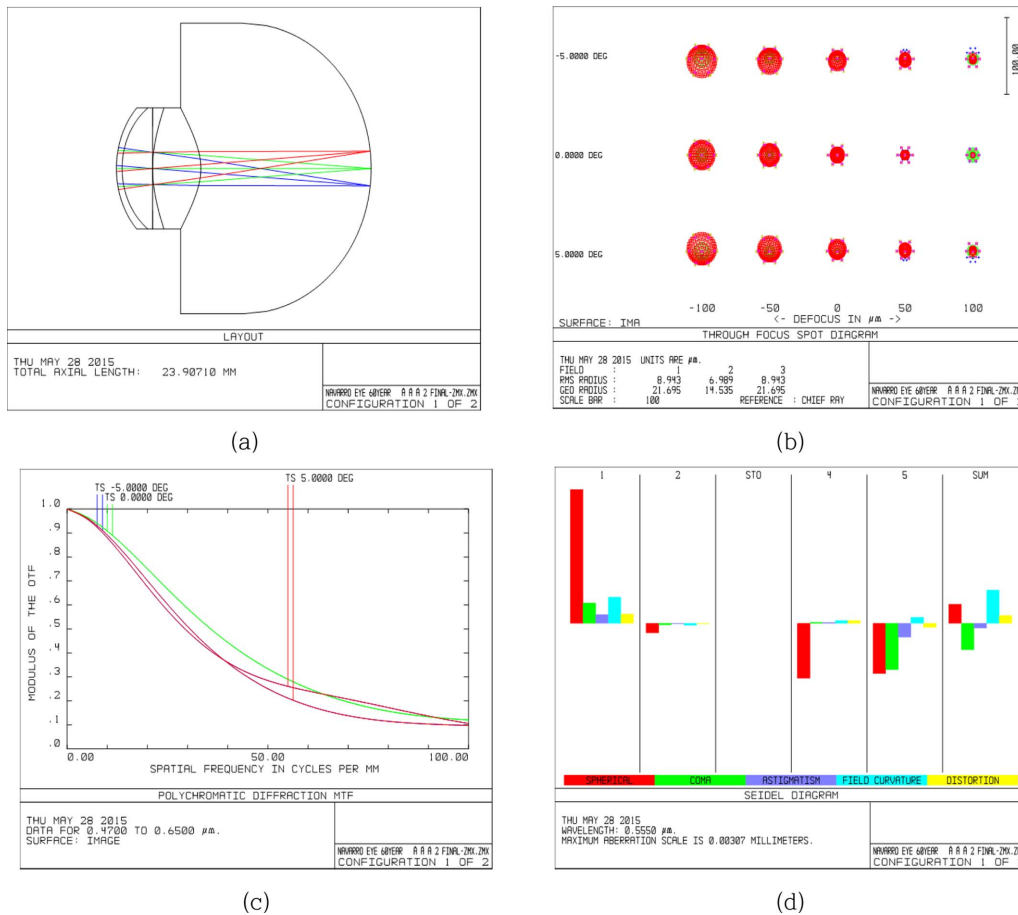


Fig. 3. Performance analysis of the schematic eye designed for presbyopia at the age of 60. (a) cross-sectional diagram, (b) spot diagram, (c) MTF, (d) Seidel aberration.

Table 2. Optical parameters for Zemax simulation with mm unit

age	Surface	Radius	Thickness	Conic
40	1	7.72	0.5472	0.1484
	2	6.50	3.12	0.42
	3	infinity	0	0
	4	10.311	4.1271	-6.5
	5	-5.2537	16.034	-3.7
50	1	7.72	0.5395	0.1864
	2	6.50	2.99	0.26
	3	infinity	0	0
	4	10.093	4.3622	-6.00
	5	-4.9957	16.0060	-3.6
60	1	7.72	0.5318	0.2244
	2	6.50	2.86	0.10
	3	infinity	0	0
	4	9.4350	4.5373	-5.30
	5	-4.3777	15.9780	-3.30

Table 3. Eye-optical parameters resulted by Zemax simulation with mm unit

	40	50	60
Total track	23.82830	23.89770	23.90710
Index, Abbe's number	1.415 40.5	1.410 40.8	1.4015 41.0
Effective Focal Length	16.35914	16.46244	16.50738
Back Focal Length	0.04470791	0.1026494	0.1435389
Entrance Pupil Diameter	3	3	3
Angular Magnification	0.6257048	0.6143087	0.604104

성능이 일치하지 않았고, 최대 공간주파수에서는 각각 0.105과 0.097이였으며, 대략 10.5%와 9.7%의 성능을 보였다. 감소율은 광축에서는 88%가 감소하였으며, ±5도에서는 tangential과 sagittal에서 각각 89.5%와 90.3%의 성능이 감소하였다.

Fig. 3(d)는 60세 정밀모형안의 수차를 나타낸 그래프이다. Spot diagram의 형태로부터 예상할 수 있듯이, 구면수

차와 코마수차가 상당히 큰 것을 알 수 있다. 구면수차, 코마수차, 비점수차, 상면만곡, 왜곡수차의 크기는 각각 0.000438, -0.000607, -0.000107, 0.000759, 0.000178인 것으로 나타났다.

앞서 언급한 대로, 본 연구에서는 선행 임상연구들의 데이터를 바탕으로 40, 50, 60세 연령의 남성 정밀모형안을 전산모사 하였다. 설계된 정밀모형안들의 광학변수 값들은 Table 2에 나타냈으며, 설계 결과에서 추출되는 노안의 해부학적 변수들인 안축장, 수정체의 두께, 곡률반경, 굴절률, 각막과 수정체의 전·후면 비구면 계수, 유리체의 깊이 등은 Table 3에 제시되어 있다. 또한 망막상의 질은 결과 부분에서 제시된 spot diagram, MTF, 그리고 각종 수차들을 근거로 비교할 수 있다.

40, 50, 60세의 연령에서 설계된 정밀모형안의 안축장을 비교하여 보면, 40세 모형안의 안축장보다 60세 모형안의 안축장이 서서히 증가함을 알 수 있다. 이러한 전산모사의 결과는 Atchison 등^[13]의 연구에서 안축장의 길이가 노화에 따라 증가한다는 결과와 잘 일치한다.

전산모사된 모형안과 선행임상연구들의 수정체 두께를 비교하여 보면, Weale 등^[9]의 연구에서 70세 이상의 노안은 15~20세의 안구보다 수정체 두께가 약 28%정도 증가한다고 보고된 바 있다. Table 2의 전산모사 결과를 보면, 60세 노안의 수정체 두께는 40세 노안의 수정체 두께보다 9.94% 증가하여 선행임상연구의 데이터와 일치하는 경향성을 나타내고 있다.

수정체의 전·후면 곡률반경을 살펴보면, 본 연구에서 전산모사된 노안 정밀모형안의 수정체 전면곡률반경은 40, 50, 60세에서 각각 10.311 mm, 10.093 mm, 9.4350 mm이고, 후면곡률반경은 각각 -5.2537 mm, -4.9957 mm, -4.3777 mm이다. 60세의 전면곡률반경은 40세의 전면곡률반경보다 8.5% 감소되고, 후면곡률반경의 경우에는 60세가 40세보다 16.67% 감소한다. Atchison 등^[13]은 수정체의 전면곡률반경은 눈이 노화됨에 따라 0.044 mm/year의 속도로 감소하지만, 후면곡률반경은 나이에 따른 유의한 변화가 없이 평균 -6.9 mm로 일정하다고 보고한 바 있다. Koretz 등^[20]의 연구에서도 수정체의 전면곡률반경은 $13.4-0.08 \times \text{age}$ 로 나이에 따라 유의한 변화가 관찰되는 반면, 후면곡률반경은 평균 -0.436 ± 0.137 mm로 나이에 따른 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과들과 비교하여 볼 때, 전산모사된 수정체의 전면곡률반경은 실안의 해부학적 데이터와 잘 부합된다고 할 수 있다. 그러나 후면곡률반경의 경우에는, 전산모사의 결과가 나이에 따라 반경에 감소하는 것으로 나타난 것과 비교하여, 실제 임상데이터는 나이에 따른 변화가 없는 것으로 보고되었기 때문에, 전산모사의 결과와 해부학적 결과가 다른 경향성을 보이

고 있다.

수정체의 증가굴절률을 비교하여 보면 전산모사된 40, 50, 60세 노안 정밀모형안의 수정체 증가굴절률은 각각 1.415, 1.410, 1.4015이며, 60세 노안 수정체의 증가굴절률은 40세 노안 수정체보다 0.95% 감소한다. Dubbelman과 Heijde^[14]의 연구에서 수정체의 증가굴절률은 노화가 진행됨에 따라 감소하는 것으로 보고되었다. 본 연구의 결과인 노안 정밀모형안의 굴절률은 Dubbelman과 Heijde의 선행임상연구^[14]와 유사한 추세를 보였으며, 본 정밀모형안에 노안의 특징이 적절히 반영되었음을 의미한다고 할 수 있다.

40, 50, 60세 노안 모형안의 각막과 수정체의 전·후면 비구면 계수를 살펴보면, 각막 전면의 비구면 계수는 나이에 따라 각각 0.1484, 0.1864, 0.2244이며, 후면의 비구면 계수는 각각 0.42, 0.26, 0.10이다. 60세 노안은 40세 노안보다 각막의 전면 비구면 계수가 51.21% 증가하였고, 후면의 비구면 계수는 76.2%만큼 감소함을 알 수 있다. 수정체의 경우에 전면의 비구면 계수는 각각 -6.5, -6.00, -5.30이었고, 후면의 비구면계 수는 각각 -3.7, -3.6, -3.30으로 전산모사 되었다. 60세 노안 모형안의 수정체의 전면 비구면 계수는 40세 노안 모형안보다 22.65% 증가하였으며, 후면 비구면 계수는 12.12% 증가하는 것으로 나타난다. Dubbelman 등^[12]의 연구에 따르면, 각막 전·후면의 비구면 계수는 둘 다 나이에 따라 유의한 차이를 나타내며, 나이가 증가하면 전면의 비구면 계수는 증가하고 후면의 비구면 계수는 반대로 감소하는 경향을 띤다. 수정체 전·후면 비구면 계수의 경우, Dubbelman 등^[14]의 또 다른 연구에서 각막의 경우와 유사하게, 통계적으로 유의한 차이를 보이면서 나이에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 선행임상연구들과 본 연구에서 전산모사된 노안 모형안의 각막과 수정체의 전·후면 비구면 계수를 비교하여 보면 편차 범위 내에서 서로 잘 일치하며, 노안에 따라 변화하는 비구면 계수의 추이가 본 연구의 노안 모형안에 적절히 반영되었음을 알 수 있다.

전산모사된 모형안과 실안의 유리체 깊이를 비교하여 보면, Table 2에서 40세, 50세, 60세 노안 모형안의 유리체 깊이는 각각 16.034 mm, 16.0060 mm, 15.9780 mm이며, 눈의 노화에 따라 유리체 깊이가 감소하는 것으로 나타난다. Wong 등^[21]의 임상선행연구에서 40대 피검자들의 유리체 깊이는 60대 피검자들의 유리체 깊이보다 더 긴 것으로 나타나서, 본 연구의 전산모사 결과와 서로 상응하는 것을 알 수 있다.

전산모사 과정에서 광학적으로 최적화된 모형안들의 설계값들은 Table 1에 인용된 선행임상연구들의 해부학적 수치와 편차 범위 내에서 모두 일치하며, 이는 본 연구의 결과인 노안 정밀모형안들이 실제 안구의 나이에 따른 노

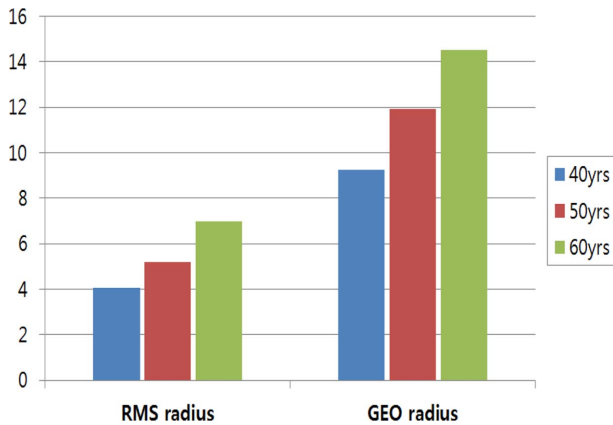


Fig. 4. Comparison of spot sizes as a function of age.

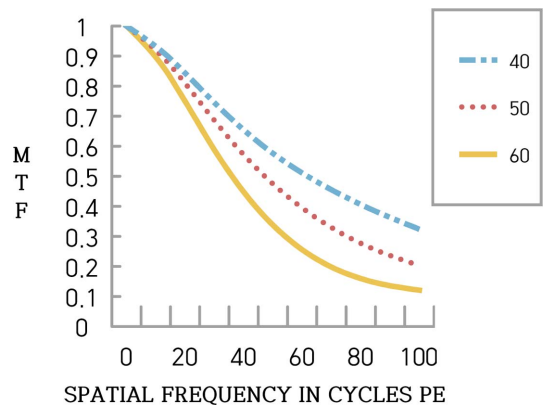


Fig. 5. Comparison of MTF as a function of age.

화 과정을 잘 반영하였음을 나타낸다고 할 수 있다.

Fig. 1(b), 2(b), 3(b)에 제시된, 3가지 노안 정밀모형안의 망막상의 spot diagram들을 비교하여 보면, 40세에서는 상면과 +50 μm에서 가장 밀집되어 있고, 50세는 +50 μm에서 더 밀집되어 있으며, 60세는 +50 μm보다 +100 μm에서 더욱 밀집되어 있음을 알 수 있다. Glasser과 Campbell^[22]은 청년층의 수정체가 노년층의 수정체보다 더 짧은 초점거리를 가지고 있다는 것을 발견하였는데, 이는 나이가 들수록 모양소대의 긴장도가 부재되어 조절력이 급감하는 것을 나타내며, 점차 초점이 길어져서 원시화 되는 것이라고 해석한 바 있다.

Fig. 4는 40세, 50세, 60세 노안 정밀모형안의 가우스 상면에서의 spot size를 비교한 그래프이다. RMS radius와 GEO radius는 각각 40세 노안에서 4.063 μm와 9.245 μm이고, 50세 노안에서는 각각 5.198 μm와 11.943 μm이며, 60세 노안에서는 각각 6.989 μm와 14.535 μm이다. RMS radius는 60세 노안에서 40세 노안보다 약 72%, GEO radius는 60세 노안에서 40세 노안보다 약 57% 증가되고, 이러한 결과는 나이가 증가할수록 상면에서 빛이 결상되지 않고 분산된다는 사실을 나타내며, 수차 또한 증가된다는 것을 암시한다. Spot의 형태에 따라 수차의 유형도 예측할 수 있는데, 40세, 50세, 60세의 그래프에서 모두 광축에서 구면수차가 발생한다는 것을 예측할 수 있고, ±5도에서는 상하 광선속을 기준으로 코마수차가 크게 나타난다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 광축을 기준으로 나이에 따른 주어진 공간주파수당 상의 질을, ISO 표준^[18-19]에 근거하여 공간주파수를 100 cycles/mm로 제한하면서, 3가지 연령의 정밀모형안에 대하여 비교한 그림이다. 2점 쇄선은 공간주파수에 대한 40세 노안의 MTF이고, 점선은 50세 노안의 MTF이며, 실선은 60세 노안의 MTF를 표현한 것이다. 0도에서 공간주파수가 100 cycles/mm일 때 망막에 결상되는 상의 질은

Table 4. Comparison of aberrations of the schematic eyes designed by Zemax as a function of age

	40	50	60
Spherical	0.000117	0.000375	0.000438
Coma	-0.000424	-0.000473	-0.000607
Astigmatism	-0.000022	-0.000047	-0.000107
FCUR	0.000764	0.00076	0.000759
DIST	0.000205	0.000197	0.000178

40세가 0.323625이고, 50세가 0.202450, 60세가 0.120603이다. 50세 노안에서는 40세 노안보다 상의 질이 37.4% 정도 감소하며, 60세 노안에서는 40세 노안보다 62.7%가 감소한다.

Table 4는 전산모사된 노안 모형안들의 단색수차 값들을 나이에 따라 정리한 것이다. 구면수차는 40세, 50세, 60세에서 각각 0.000117, 0.000375, 0.000438으로 60세 노안 모형안이 40세 노안 모형안보다 3.7배 가량 높은 수차량을 보였고, 코마수차는 -0.000424, -0.000473, -0.000607로 나타나 40세 노안 모형안보다 60세 노안 모형안이 43.7% 만큼 높은 수치를 나타냈으며, 비점수차 또한 -0.000022, -0.000047, -0.000107로 60세 노안 모형안이 40세 노안 모형안 보다 3.8배 높게 나타났다. 상면만곡의 경우에는 40세, 50세, 60세에서 각각 0.000764, 0.000760, 0.000759로 비슷하게 나타나서 노화에 따른 변화가 명확하게 드러나지 않았다. 왜곡수차는 각각 0.000205, 0.000197, 0.000178로 나이가 증가하면서 감소하는 경향을 보였다.

각 면에서 측정된 구면수차를 살펴보면, 각막전면에서 양(+)의 구면수차가 측정되었고, 이러한 각막 전면에서 발생된 구면수차를 수정체의 전면, 후면에서 상쇄시켜 총 구면수차의 양은 감소되었다. Artal^[23]의 연구에 따르면, 나이가 증가함에 따라 각막의 형태가 변화하게 되고, 곡률반경이 감소하게 되며, 비구면성이 감소하여 구면수차는 증

가하게 된다. 이러한 각막수차를 수정체가 보완해줌으로써 안구의 전체 구면수차량은 감소하게 된다. 그러나 노화가 시작되는 45세 이후 수정체의 이러한 구면수차 감소 능력은 소실되어 각막의 수차를 충분히 보완하지 못하게 되고, 오히려 수정체의 수차까지 누적되어 눈의 전체수차는 증가하게 된다. Glasser과 Campbell^[22]의 연구에서는 청년층의 수정체에서는 음(-)의 구면수차가 측정되는 반면에 노년층의 수정체에서는 양(+)의 구면수차가 측정된다고 하였다. 본 연구에서 전산모사된 모형안들은 나이에 따라 증가하는 양(+)의 구면수차 값들을 나타내어 선행임상 연구들의 결과들과 잘 일치하는 경향성을 보이고 있다.

본 연구는 임상연구에 근거하여 평소시의 동공크기에 따라 연령별로 4그룹으로 나누어 새로운 노안 정밀모형안을 설계한 선행연구^[10]와는 달리, 실안과 유사하다고 발표된 Navarro 정밀모형안의 구조 내에서 주 굴절매체인 각막과 수정체에 대한 매개변수들을 40, 50, 60세의 남성을 기준으로 하여 전산모사하였다. 앞서 언급한 선행연구^[10]에서는 구면수차, 코마수차, 비점수차 및 색수차를 위주로 분석하였고, 각 연령별로 회절상을 나타내었다. 이에 비해 본 연구는 광학프로그램을 이용하여 연령에 따른 상의 질(MTF, Spot diagram)과 자이텔 5수차의 결과를 분석하여 변화를 예측하였고, 예측된 결과를 선행임상연구들과 비교하여 일치여부를 알 수 있었다.

결 론

Navarro 정밀모형안을 이용하여 선행 임상연구들^[13-15]을 바탕으로 노안의 해부학적 특징과 광학적 메커니즘을 반영한 40, 50, 60세 남성의 노안 정밀모형안을 전산모사하고, 이 모형안을 이용하여 망막상의 질과 수차들을 분석하였다. 그 결과 나이에 따른 해부학적·광학적 변화들을 반영한 노안 정밀모형안을 새롭게 구현할 수 있었다. 설계된 노안 정밀모형안들에서 나타나는 노화의 특징들이 관련 임상연구들과 잘 일치하므로, 본 연구의 결과가 실제 노안과 근사하게 설계되었음을 알 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] Kim BH, Kim SJ, Lim HS, Ji TS. Design of the schematic eye of Koreans using the clinical data. *J Korean Ophthalmic Opt Soc.* 2004;9(1):117-124.
- [2] Kim SG, Park SC. Prediction of visual performance using contrast sensitivity function and modulation transfer function. *J Korean Ophthalmic Opt Soc.* 2004;15(5):461-468.
- [3] Sturzu A, Luca-Motoc D. Theoretical eye models comparison based on MTF evolution. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov SeriesI: Engineering Sciences.* 2011;4(53):33-38.
- [4] Sung PJ. *Optometry*, 5th Ed. Seoul: Daihakseorim, 2005; 33-40.
- [5] Kang EK, Park SC, Kim JJ, Hwangbo CK. Analysis and design of an accommodation-dependent eye model based on Navarro model. *J Korean Ophthalmic Opt Soc.* 2010; 15(3):235-240.
- [6] Kim SG, Choi KU. Analysis of accommodation error at the Navarro eye. *Korean J Vis Sci.* 2007;9(1):43-51.
- [7] Navarro R, Santamaria J, Bescos J. Accommodation-dependent model of the human eye with aspherics. *J Opt Soc Am A.* 1985;2(8):1273-1281.
- [8] Statistics Korea. The population ratio of the aged people and the aging index, 2015. [http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=113&tblId=DT_113_STBL_1015552&vw_cd=MT_ZTITLE&list_id=113_11314_02&seqNo=&lang_mode=ko&language=kor&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=E1\(20 July 2015\).](http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=113&tblId=DT_113_STBL_1015552&vw_cd=MT_ZTITLE&list_id=113_11314_02&seqNo=&lang_mode=ko&language=kor&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=E1(20 July 2015).)
- [9] Weale RA. Presbyopia. *Brit J Ophthalmol.* 1962;46:660-668.
- [10] Baarg SB. Optical models of the finite schematic eyes for presbyopia. *J Korean Ophthalmic Opt Soc.* 2008;19(6): 439-447.
- [11] Dubbelman M, Weeber HA, van der Heijde RGL, Vlker-Dieben HJ. Radius and asphericity of the posterior corneal surface determined by corrected Scheimpflug photography. *Acta Ophthalmol Scand.* 2002;80(4):379-383.
- [12] Dubbelman M, Sicam VA, Van der Heijde GL. The shape of the anterior and posterior surface of the aging human cornea. *Vis Res.* 2006;46(6):993-1001.
- [13] 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):1-20.
- [14] Dubbelman M, Van der Heijde GL. The shape of the aging human lens: curvature, equivalent refractive index and paradox. *Vis Res.* 2001;41(14):1867-1877.
- [15] Sivak JG, Mandelman T. Chromatic dispersion of the ocular media. *Vis Res.* 1982;22(8):997-1003.
- [16] Wikipedia. CIE 1931 color space, 2015. [https://en.wikipedia.org/wiki/CIE_1931_color_space\(5 June 2015\).](https://en.wikipedia.org/wiki/CIE_1931_color_space(5 June 2015).)
- [17] Alessi PJ. CIE technical report calorimetry, 2004. https://www.google.co.kr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0CCwQFjACahUKEwi0-qrAou7GAhUWW4gKHcuyD_o&url=http%3A%2F%2Fwww.cdvplus.cz%2Ffile%2F3-publikace-cie15-2004%2F&ei=e02vVftQIpa2oQTL5b7QDw&usq=AFQjCNEJEKGrJDBpo7hVn0Z_T_AYs9

- a24Q&sig2=GhvSv1yIL02qYVOCXzBHVQ&bvm=bv.98197061,d.dGY(22 July 2015).
- [18] International Organization for Standardization (ISO). Ophthalmic implants intraocular lenses - part 2: Optical properties and test methods, 2014. http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=55682(22 July 2015).
- [19] Kim SG, Park SC. Prediction of visual performance using contrast sensitivity function and modulation transfer function. *J Korean Ophthalmic Opt Soc.* 2004;15(5):461-468.
- [20] Koretz JE, Strenk SA, Strenk LM, Semmlow JL. Schemplung and high-resolution magnetic resonance imaging of the anterior segment: A comparative study. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis.* 2004;21(3):346-354.
- [21] Wong TY, Foster PJ, Ng TP, Tielsch JM, Johnson GJ, Seah SK. Variations in ocular biometry in an adult Chinese population in Singapore: The Tanjong Pagar Survey. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2001;42(1):73-80.
- [22] Glasser A, Campbell MC. Presbyopia and the optical changes in the human crystalline lens with age. *Vis Res.* 1998;38(2):209-229.
- [23] Cavallotti CAP, Cerulli A. Age-related changes of the human eye (Chap. 3. Aging effects on the optics of the eye written by Artal P.), 1st Ed. New York: Humana Press, 2008: 35-44.

Simulations of Finite Schematic Eyes for Presbyopia Using the Navarro Eye Model

Shin-Hwa Kim and Dal-Young Kim*

Dept. of Optometry, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea
(Received July 24, 2015: Revised September 3, 2015: Accepted September 7, 2015)

Purpose: This study was aimed to design new schematic eyes for presbyopia using the Navarro eye model and clinical data. **Methods:** We collected clinical data of eye-optical parameters of males in their age of 40, 50, and 60 from previous studies, and designed schematic eyes for presbyopia using the ZEMAX program. **Results:** The presbyopic process and features of the designed schematic eyes well accorded with the clinical data of previous studies. **Conclusions:** On the basis of the Navarro eye model, a finite schematic eyes for presbyopia were newly designed corresponding with clinical data.

Key words: Navarro model eye, Presbyopia, ZEMAX, Ray tracing