

파장에 따른 개별모형안의 수차변화 분석

김세진 · 임현선* · 김봉환** · 고정휘***

국민대학교 물리학과, *극동정보대학 안경광학과,

춘해보건대학 안경광학과, *국민대학교 물리학과

투고일(2008년 7월 21일), 수정일(2008년 8월 11일), 게재확정일(2008년 9월 10일)

목적: 정시안의 임상자료를 기초로 설계한 개별모형안의 파장에 따른 수차 변화를 분석하였다. **방법:** 측정된 안구의 임상 자료를 기초로 설계한 모형안은 4개의 굴절면과 균일한 굴절률을 갖는 형태로 설계하였다. 설계한 12안의 개별모형안에 대하여 프라운호퍼선 6개의 파장 변화를 주어 그에 따른 수차 변화를 분석하였다. **결과:** 각 모형안에 대하여 파면수차의 파장에 따른 변화를 Zernike 계수로 분석한 결과 파장이 짧을수록 Defocus는 증가하였고 구면수차(spherical aberration)와 RMS는 개별모형안간의 편차가 크게 나타났다. **결론:** 파장의 변화에 따른 Defocus양은 12안의 개별모형안이 비슷한 기울기로 짧을수록 크게 나타났고, 구면수차(spherical aberration)와 RMS는 대부분의 모형안의 경우 변화가 적었으며, 변화가 크게 나타난 일부 모형안은 성능 저하가 발생될 수 있다.

주제어: 개별모형안, Defocus, Zernike, 구면수차, RMS

서 론

사람의 눈은 복잡하고 정밀한 광학 시스템으로 개인별 생리학적 특징을 갖는다. 개개인의 눈들은 각각 다른 파면수차를 가지므로 개별모형안은 그 자체의 광학적 특성을 갖는다. 이러한 개별모형안은 사람 눈을 형성하고 있는 각각의 광학적 요소들이 상의 질적 변화에 어떠한 영향을 주는지, 또는 안구의 수술이나 시력을 교정함에 있어 어떠한 영향을 미치는지 안구의 시성능 변화를 예측하는데 도움을 준다¹.

눈의 안축 길이와 전방 깊이, 초자체 깊이, 각막과 수정체 두께는 Ultrasonic Scanner인 A-scan(Quantel Medical Axis II) 및 Orbscan II(Bausch & Lomb, USA)로 측정하였고, 각막 전후면과 수정체 전후면의 곡률반경은 Manual Keratometer(Topcon OM-4) 및 Orbscan II(Bausch & Lomb, USA)로 측정하였다².

Zhao-Qi Wang은 임상자료를 토대로 설계한 개별모형안의 파면수차와 실제 측정된 사람 눈의 파면수차와 비교하였다³.

본 논문에서는 근축영역으로 들어오는 광선의 수차와 중심시야 30°로 들어오는 광선의 수차를 확인하기 위해 RMS 파면오차를 분석하였다. 개별모형안은 12안의 임상자료를 기초로 하여 O.R.A.사의 Code-V 프로그램을 이용

하였으며 광선 추적은 최대 동공 직경을 8 mm, 일상생활에서 평균 시야각이 30°이므로 중심시야 0°에서 30°까지 측정했다. 가시광선 영역에서 프라운호퍼선(434.05, 486.13, 495.76, 587.56, 589.29, 656.28 nm)의 파장에 따른 모형안의 수차변화를 분석하였다. 이 때 모든 길이의 단위는 mm 이고 굴절력은 Diopter(D)이다.

대상 및 방법

임상 자료중 정시안인 남자 6안, 여자 6안으로 총 12안을 선정하여 전통적인 정밀모형안의 형태로 개별모형안을 설계하였다. 전통적인 모형안인 Le-Grand 모형안과 같이 4개의 굴절면(각막 전후면, 수정체 전후면)과 수정체 매질은 일정한 굴절률로 하였고, 동공 크기는 8 mm, 중심시야(0°~30°)만 고려해서 설계하였다.

모형안 매질의 굴절률(각막, 수정체, 방수, 초자체)은 파장에 따라 변하며, 파장 함수에 따른 굴절률은 다음 식을 사용하여 6개 프라운호퍼 파장에 대한 굴절률을 사용하였다³.

각막 굴절률

$$n(\lambda) = 1.51167 - 0.000636054\lambda + 1.17 \times 10^{-6} \lambda^2$$

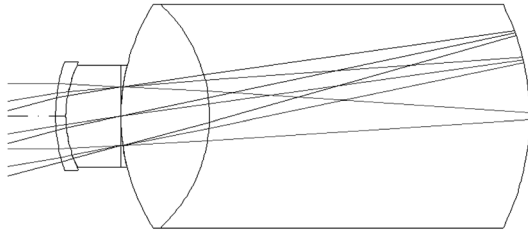


Fig. 1. Individual model eye.

$$-1.01 \times 10^{-9} \lambda^3 + 3.31 \times 10^{-13} \lambda^4$$

방수 굴절률

$$n(\lambda) = 1.49072 - 0.000806138\lambda + 1.68 \times 10^{-6} \lambda^2 - 1.66 \times 10^{-9} \lambda^3 + 6.31 \times 10^{-13} \lambda^4$$

수정체 굴절률

$$n(\lambda) = 1.53808 - 0.000448268\lambda + 5.74 \times 10^{-7} \lambda^2 - 2.61 \times 10^{-10} \lambda^3$$

초자체 굴절률

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

이렇게 얻어진 굴절률을 적용하여 개별모형안을 설계하였으며 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다⁴.

결과 및 고찰

개별모형안에 대해 6개의 파장을 변화시켰을 때 모형안에서 발생하는 수차 중 Defocus와 Zernike 계수를 이용한 파면수차(wavefront aberration) 변화를 검토하였다. 파장이 변화할 때 Defocus(Longitudinal Chromatic Aberration: LCA) 변화를 Fig. 2에 나타냈다⁵. Defocus는 d-line(587.56 nm)설계한 모형안을 기준으로 파장이 변화될 때 망막쪽에서 발생하는 양으로 구하였다. Fig. 2에서 보듯이 Defocus 변화는 12안 모형안이 거의 비슷한 기울기로 파장이 짧을수록 Defocus가 증가하였고, f-line(434.05 nm)파장에서 12개의 모형안들 간의 Defocus 편차가 가장 컸다. Fig. 3은 파장별로 12안 모형안의 평균 Defocus 값을 나타낸 그래프이다. d-line(587.56 nm)파장을 기준으로 하여 Defocus 양은 Diopter 단위로 나타내었다. Defocus 양의 표준편차는 짧은 파장에서 크게 나타났고, 파장이 길어질수록 표준편차가 작게 나타났다.

Fig. 4, 5는 각 모형안에 대하여 파면수차(wavefront

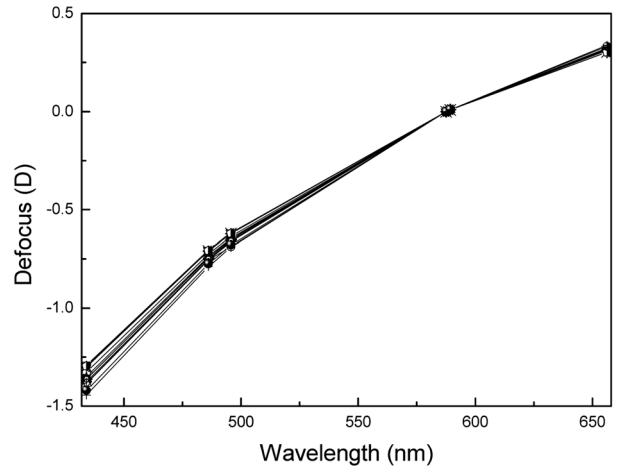


Fig. 2. Change of defocus for all twelve eyes as a function wavelength in the visible range.

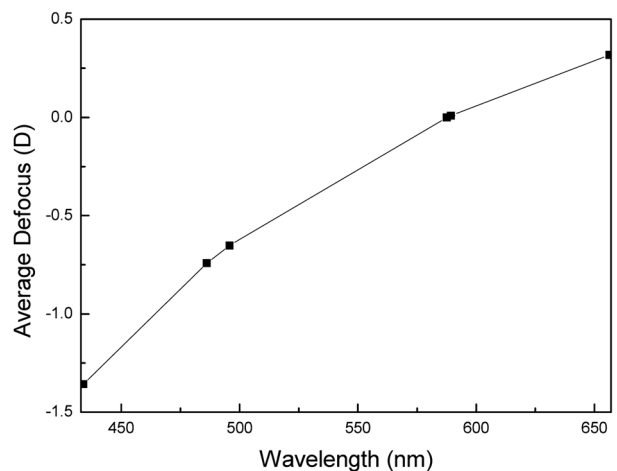


Fig. 3. Average defocus from all the twelve eyes as a function of wavelength in the visible range.

aberration)의 파장에 따른 변화를 Zernike 계수에 의한 수차량으로 나타냈다. 파면수차 $W(\rho, \theta)$ 는 원형 pupil인 경우 다음과 같은 Zernike 다항식 형태로 표현된다.

$$W(\rho, \theta) = \sum_{i=1}^N C_i Z_i(\rho, \theta)$$

여기서 $\rho = \frac{r}{a}$, r 은 극좌표계의 pupil point, a 는 pupil 반경, C_i 는 Zernike 계수, Z_i 는 Zernike 원형 다항식이다.

Fig. 4에는 0°로 입사하는 파장에 대한 구면수차를 나타냈다. 12안의 개별모형안은 파장이 길어질수록 수차가 작아지는 형태로 나타났고, d-line(587.56 nm)파장에서 구면수차는 최대값 -0.0734 mm, 최소값 -0.0220 mm로 나타났다. 개별모형안 중 하단 세개를 제외한 다른 모형안은 $-0.02 \sim -0.05$ mm 사이에서 구면수차가 변화였다. 가장 큰 편차를 갖는 최하단의 모형안은 f-line(434.05 nm)에서 최

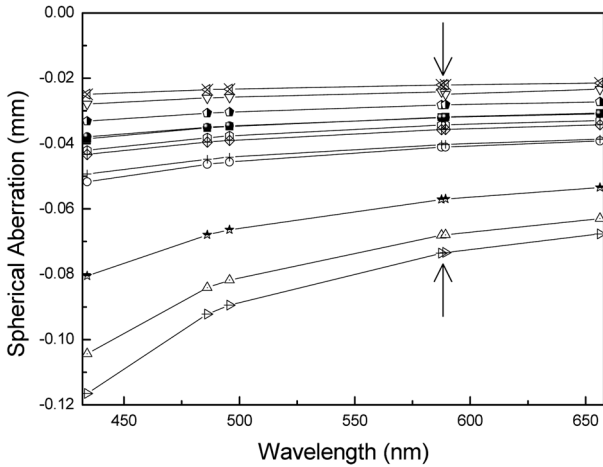


Fig. 4. Change of spherical aberration for all twelve eyes as a function of wavelength in the visible range.

대값 -0.1165 mm, C-line(656.29 nm)에서 최소값 -0.0677 mm로 그 차이는 0.0488 mm이고, 두 번째로 큰 차이값을 갖는 모형안은 f-line(434.05 nm)에서 최대값 -0.1044 mm, C-line(656.29 nm)에서 최소값 -0.0629 mm로 그 차이는 0.0415 mm, 세 번째로 큰 차이값을 갖는 모형안은 f-line(434.05 nm)에서 최대값 -0.0805 mm, C-line(656.29 nm)에서 최소값 -0.0534 mm로 그 차이는 0.0271 mm로 나타났다. 최상단의 모형안은 f-line(434.05 nm)에서 최대값 -0.0249 mm, C-line(656.29 nm)에서 최소값 -0.0214 mm로 그 차이가 0.0035 mm로 가장 편차가 작게 나타났다.

Fig. 5는 30° 로 입사하는 과장에 대한 RMS(root mean square) 파면오차(wavefront error)값을 Zernike 계수에 의한 수차량으로 나타내었다. Fig. 4에서 큰 편차를 갖았던 세 개의 모형안이 RMS(root mean square) 파면오차(wavefront error)에서도 큰 변화를 갖는 것으로 나타났다. d-line(587.56 nm)과장에서 RMS(root mean square) 파면오차(wavefront error)는 최대값 -0.5717 mm, 최소값 -0.5598

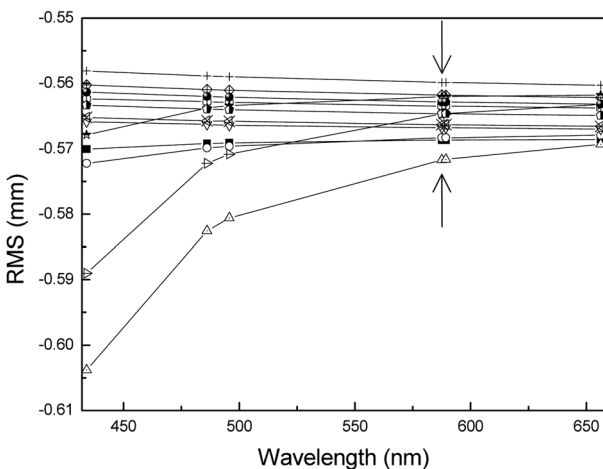


Fig. 5. Change in RMS wavefront error with wavelength for all the twelve eye.

mm로 나타났고, 세 모형안을 제외한 다른 모형안은 $-0.55 \sim -0.58$ mm 사이에서 과장에 따른 변화가 거의 나타나지 않았다. 가장 큰 편차를 갖는 모형안은 f-line(434.05 nm)에서 최대값 -0.6038 mm, C-line(656.29 nm)에서 최소값 -0.5693 mm로 그 차이는 0.0345 mm 나타났다. 두 번째로 큰 편차를 갖는 모형안은 f-line(434.05 nm)에서 최대값 -0.5890 mm, C-line(656.29 nm)에서 최소값 -0.5632 mm로 그 차이는 0.0258 mm, 세 번째로 큰 편차를 갖는 모형안은 f-line(434.05 nm)에서 최대값 -0.5679 mm, C-line(656.29 nm)에서 최소값 -0.5618 mm로 그 차이는 0.0061 mm로 나타났다. 최상단 모형안은 C-line(656.29 nm)에서 최대값 -0.5603 mm, f-line(434.05 nm)에서 최소값 -0.5581 mm로 그 차이는 0.0022 mm로 가장 편차가 작게 나타났다.

결론

정시안의 임상 자료(남자 6안, 여자 6안)를 이용하여 12안의 개별모형안을 설계하였다.

설계한 12안의 개별모형안으로 프라운호퍼선 6개의 과장에 따른 수차변화를 분석하였다. 과장이 짧을수록 Defocus가 커지는 것을 확인하였고, f-line(434.05 nm) 과장에서 12안의 모형안들 간의 Defocus 편차가 가장 컸다. Zernike 계수로 파면수차(wavefront aberration)를 분석한 결과 0° 로 입사하는 과장에 대한 구면수차에서 12안의 개별모형안은 과장이 길어질수록 작아지는 형태로 나타났다. 30° 로 입사하는 과장에 대한 RMS(root mean square) 파면오차(wavefront error)는 대부분의 모형안의 경우 변화가 적었으며, 변화가 크게 나타난 일부 모형안은 성능저하가 발생할 수 있다.

참고문헌

1. 최가을, 송석호 외, “안구의 굴절능 조절을 고려한 수정된 Navarro 정밀모형안의 시성능 분석”, 한국광학회지, 18(5):337-344(2007).
2. 임현선, “Orbscan II system을 이용한 한국인 정시안 각막의 최적구면 분석”, 한국안광학회지, 12(2):61-66(2007).
3. Ming Liu and Zhao-Qi Wang, “The Study of Wavelength-dependent wavefront aberrations based on individual eye model”, Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 199(8):383-387(2007).
4. David A. Atchison and George Smith, “Optics of th Human Eye”, Butterworth Heinemann, pp. 16-19(2000).
5. Huanqing Guo, Zhaoqi Wang, Qiuling Zhao, Wei Quan, and Yan Wang, “Individual eye model based on wavefront aberration”, Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 116(2):80-85(2005).

According to the Wavelength, the Analysis of Individual Eye Model's Aberration Change

Se-Jin Kim, Hyeon-Seon Lim*, Bong-Hwan Kim** and Jeong-hwi Kouh***

Department of Physics, Kookmin University

*Department of Ophthalmic Optics, Keukdong College

**Department of Ophthalmic Optics, Choonhae College of Health Science

***Department of Physics, Kookmin University

(Received July 21, 2008: Revised August 11, 2008: Accepted September 10, 2008)

Purpose: The analysis of individual eye model designed from clinical demonstration about emmetropia shows that the aberration would be changed by the wave change. **Method:** The model on the basis of clinical demonstration of eye ball is designed in a form of having 4 refraction surfaces and a constant refractive index. We analyzed designed twelve individual eye model into aberrations changes, as giving changes Fraunhofer lines's six wavelengths. **Result:** About individual eye model, change in the wavelength of the wavefront aberrations analysis using the Zernike coefficient. This data indicate that the shorter wave is, the more defocus increases and the deviation value of spherical aberration and RMS are widened. **Conclusion:** As quantity of defocus according to result wavelength change is shorter and shorter, inclination which is similar twelve individual eye model is bigger and bigger and individual eye model majority of cases, little change, and change is shown in part individual eye model is a significant performance degradation can be raised.

Key words: Individual eye model, Defocus, Zernike, Spherical aberration, RMS