

## 각막지형검사기의 각막형상을 이용한 각막수차 구현

박성종\* · 김선영\* · 한경수\*\* · 주석희\*\* · 전영윤\*\*\*

\*순천청암대학 시광학연구소, \*\*대불대학교 안경광학과, \*\*\*원광보건대학 안경광학과  
투고일(2009년 4월 29일), 수정일(2009년 5월 26일), 게재확정일(2009년 6월 4일)

**목적:** 본 연구는 각막지형검사기의 각막형상을 이용하여 각막수차를 구현하는 프로그램을 개발하고자 하며, 개발된 프로그램을 이용하여 저니케 다항식(Zernike Polynomial)으로 파면과 각막수차를 구현하고자 한다. **방법:** 각막지형검사기인 ORBSCAN의 각막형상 데이터로부터 각막의 형상을 재구성하기 위해 저니케 다항식을 사용하였으며, 이때 동공의 유효구경은 6 mm를 고려하였다. 구현된 각막형상으로부터 광선추적을 사용하여 동일한 광학적 거리의 파면을 구현하는 프로그램을 개발하였으며, 파면으로부터 6차 28항의 저니케 계수로 각막수차를 구현하였다. **결론:** 본 연구에서는 각막지형검사기의 각막형상으로부터 각막의 수차와 파면을 구현하는 프로그램을 개발하였으며, 이러한 결과는 각막지형검사기 개발과 콘택트렌즈 및 OK렌즈 처방에 유용하게 적용될 수 있으리라 사료된다.

**주제어:** 각막수차, 각막형상, 각막높이, 저니케 다항식, 광선추적

### 서 론

최근 안보건 분야에서도 첨단 광산업의 다양한 광학 기술을 이용한 안광학 기기의 개발이 증가되고 있다. 특히, 라식 수술 및 검안에서 사용되는 눈의 수차분석기, 각막지형검사기, 망막 검사를 위한 안저카메라, 안경 및 콘택트렌즈의 수차를 분석하는 렌즈미터 및 렌즈성능 분석기 등의 안광학 기기에서 적응광학(Adaptive Optics) 기술이 핵심 기술로 사용되고 있다<sup>[1-4]</sup>.

이러한 적응광학 기술을 안광학기에 적용하는 가장 기초적인 핵심 기술은 눈 또는 안광학계의 파면수차를 정확하게 구현하는 기술이며, 본 연구진에서는 적응광학 기술을 이용한 파면수차를 재구성하는 프로그램 개발과 렌즈의 성능 분석프로그램 개발 대한 연구를 수행하여 발표하였다<sup>[5,6]</sup>.

최근 국내·외에서는 적응광학 기술을 적용한 자동굴절 검사기를 비롯하여 콘택트렌즈 및 OK렌즈 처방을 위해 각막지형검사기가 개발되고 있으며, 개발된 안광학기들이 현장에서 사용되고 있다<sup>[7,8]</sup>.

본 연구에서는 콘택트렌즈 처방 시 사용되고 있는 각막지형검사기에 적응광학 기술을 적용하여 각막수차를 구현하는 프로그램을 개발하였으며, 구현된 각막형상에 광선추적 프로그램을 사용하여 파면과 각막수차를 저니케 다항식으로 구현하였다. 이러한 각막수차 구현은 각막지형

검사기 개발과 콘택트렌즈 및 OK렌즈 처방에 유용하게 적용될 수 있으리라 사료된다. 또한 본 연구개발 기술을 국내 각막지형검사기에 적용함으로써 외국 제품들과 기술 경쟁력을 확보할 수 있으리라 사료된다.

### 이 론

#### 1. 각막형상에 따른 광선추적을 통한 파면수차

광선추적은 Fig. 1과 같이 임의의  $j$ 번째 면에서  $j-1$ 번째 구면에 접하는 접평면, 접평면에서  $j$ 번째 구면, 그리고  $j$ 번째 구면에서 비구면까지 순차적으로 진행되며 각 추적과정에서 광선과 면의 교차점과 광선의 진행 방향을 결정하게 된다. 일반적인 각막형상은 회전 비대칭이기 때문에 본 연구에서는 기존의 회전대칭형의 비구면 계수를 대신하여 저니케 다항식(zernike polynomial)을 사용하여 비구면 각막형상을 표현하였다. 이때  $j$ 번째 구면에서 각막전면까지의 광선의 진행을 통해 광선과 각막 전면의 교차점을 결정하기 위해 임의의  $j$ 번째 각막 전면상의 임의의 좌표( $X, Y$ )에 대한  $Z$ 값을 각막높이라 하며, 각막높이는 다음과 같이 표현된다<sup>[9]</sup>.

$$Z = \frac{CS^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)C^2S^2}} + Z_{Hzer} \quad (1)$$

여기서

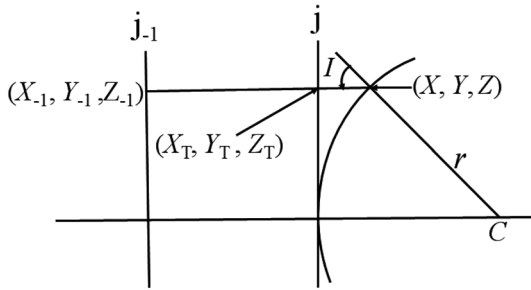


Fig. 1. Ray tracing for corneal surface.

$$S^2 = X^2 + Y^2 \tag{2}$$

이며,  $C$ 는 곡률,  $k$ 는 conic 계수로  $k=0$ 은 구면,  $-1 < k < 0$ 은 긴 타원체면,  $k=-1$ 은 포물면,  $k < -1$ 은 쌍곡면, 그리고  $k > 0$ 은 납작한 타원체면이며,  $Z_{Hzer}$ 은 저니케 다항식으로 각막높이를 표현한 것으로 다음과 같다.

$$Z_{Hzer} = \sum_{i=1}^n C_{Hi} Z_{Hi} \tag{3}$$

이때 광선추적에 의해 각막전면에서 굴절한 후의 광선의 방향( $K, L, M$ )은 다음과 같다<sup>[9,10]</sup>.

$$\begin{aligned} K &= K_{-1} + UP \\ L &= L_{-1} + VP \\ M &= M_{-1} + WP \end{aligned} \tag{4}$$

여기서  $P$ 는

$$P = \frac{n \cos I' - n_1 \cos I}{(U^2 + V^2 + W^2)^{1/2}} \tag{5}$$

이고,  $K_{-1}, L_{-1}, M_{-1}$ 은 각막전면에서 굴절 전의 광선의 방향,  $I$ 는 입사각,  $I'$ 은 굴절각, 그리고  $W, U, V$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} W &= \sqrt{1 - (1+k)C^2 S^2} \\ U &= -X \left( C - \frac{W}{X_n} \frac{\partial(Z_n - Z)}{\partial X} \right) \\ U &= -Y \left( C - \frac{W}{Y_n} \frac{\partial(Z_n - Z)}{\partial Y} \right) \end{aligned} \tag{6}$$

**2. 파면수차**

완벽하게 설계하고 제작한 무수차 광학계의 동에서의 파면을 기준파면이라 하며, 광학계를 통과한 어떤 파면이 기준파면에서 벗어나 왜곡된 파면을 형성할 때 기준파면과 왜곡된 파면사이의 광경로 차를 파면수차라 하며, Fig. 2와 같다.

본 연구에서는 파면수차함수를 modal 방법을 사용하여 표현하였으며, 직각좌표계에서 저니케 다항식을 사용한

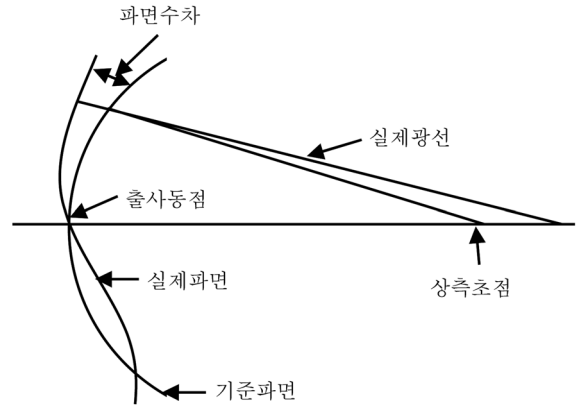


Fig. 2. Wavefront aberration.

파면수차함수  $W(x, y)$ 는 다음과 같이 표현된다<sup>[5]</sup>.

$$W(x, y) = W_R - W_O = \sum_{i=0}^{N-1} C_i Z_i(x, y) \tag{7}$$

여기서  $W_R$ 는 실제 수차가 포함되어있는 파면이고  $W_O$ 는 기준 파면이다. 이 때 파면수차를 표현하는데 필요한 저니케 계수는 pseudo-inverse 행렬을 사용하여 계산하였다.

**결과 및 고찰**

**1. 각막지형검사기로부터 각막형상 구현**

본 연구에서는 각막형상에 따른 각막수차를 구현하기 위해 각막지형검사기 중 상용제품인 바슈롭 사의 ORBSCAN에서 제공되는 각막형상 데이터를 이용하였으며, Fig. 3과 같다. ORBSCAN에서 제공되는 데이터로부터 각막형상을 구현하기 위해 주간 동공 크기의 기준인 유효구경 6 mm를 고려하였으며, 저니케 계수는 6차 28개 항을 사용하였다. 또한 프로그램 개발은 MATLAB(Ver 7.0)을 사용하였으며, 유효구경은 사용자가 변경할 수 있

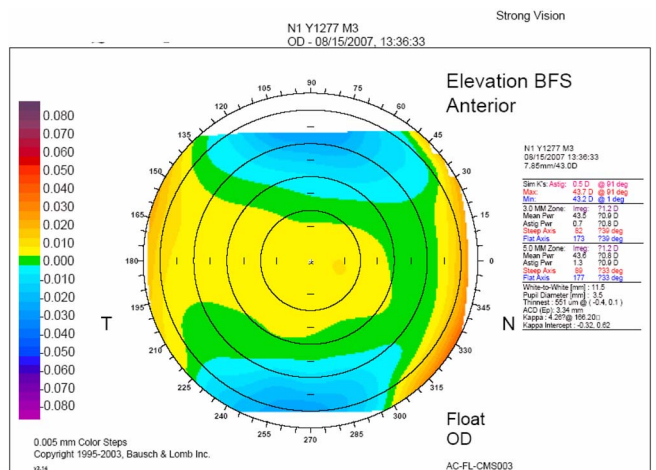


Fig. 3. Topography of ORBSCAN.

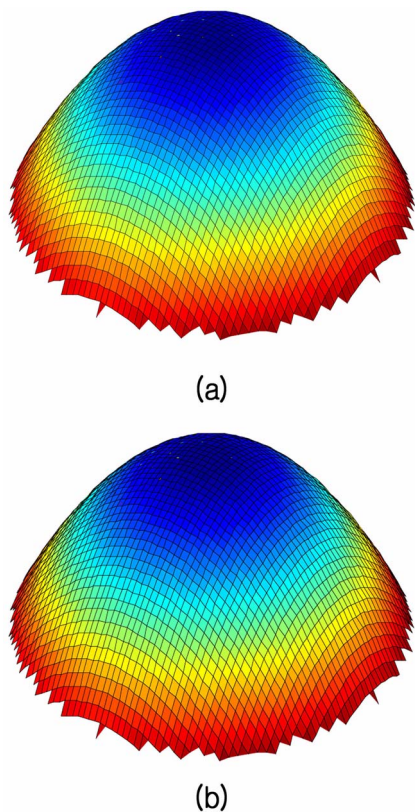


Fig. 4. Corneal Shape; (a) ORBSCAN, (b) Zernike polynomial having 6th order.

도록 하였다. Fig. 4(a)는 ORBSCAN에서 제공하는 데이터로부터 구현한 각막형상이며, Fig. 4(b)는 본 연구에서 개발한 프로그램을 사용하여 저니케 계수를 구한 후 저니케 다항식을 사용하여 구현한 각막형이다. 저니케 계수와 각막형상 구현은 본 연구진에서 2005년에 발표한 파면수차 재구성 프로그램을 사용하여 검증하였으며<sup>[5]</sup>, 또한 ORBSCAN으로부터 61×61개의 각막형상의 높이 데이터와 저니케 다항식에 의한 각막형상의 높이 데이터를 비교한 결과 두 각막형상의 높이 데이터가 잘 일치되고 있음을 알 수 있었다.

2. 각막지형검사기로부터 각막형상 구현

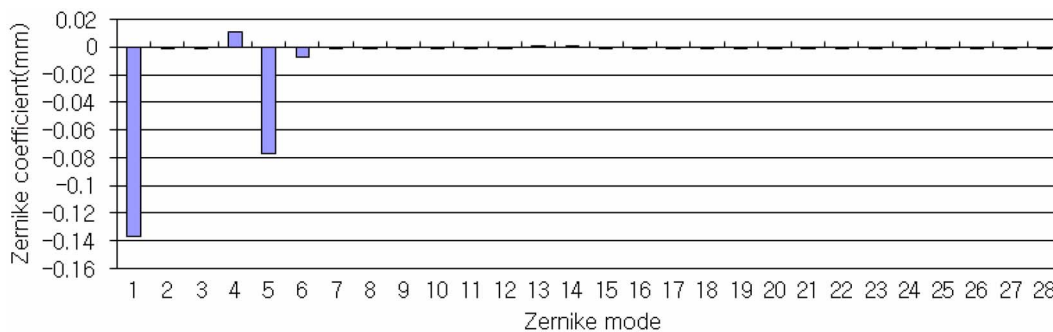


Fig. 5. Corneal aberrations of with zernike polynomial with 6th order.

본 연구에서는 각막형상에 따른 파면수차를 구현하기 위해 OPD(Optical Path Difference)를 사용하였으며, 각막에 입사되는 광선으로부터 동일한 광학적 거리([L])에 있는 파면상의 점( $X_f, Y_f, Z_f$ )을 식 (1)에서 식 (6)을 사용하여 개발한 광선추적 프로그램을 사용하여 구한 후 그 점들로부터 파면을 구현하였다. 이 때 입사광과 각막전면이 만나는 점( $X, Y, Z$ )에서 파면 상의 점( $X_f, Y_f, Z_f$ )까지의 거리는 다음과 같이 표현된다.

$$R_w = \frac{[L]-Z-t_0}{n_c} \tag{8}$$

여기서  $t_0$ 는 입사광원에서 각막정점까지의 거리,  $n_c$ 는 각막의 굴절률로 1.376이다. 각막형상에 따른 파면상의 점은 식 (4)와 식 (8)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} X_f &= R_w K \\ Y_f &= R_w L \\ Z_f &= R_w M \end{aligned} \tag{9}$$

입사광의 진행에 대한 파면의 저니케 계수와 파면형상은 본 연구에서 개발된 프로그램을 이용하여 파면상의 점 ( $X_f, Y_f, Z_f$ ) 데이터를 사용하여 구현하였다. 이 때 파면수

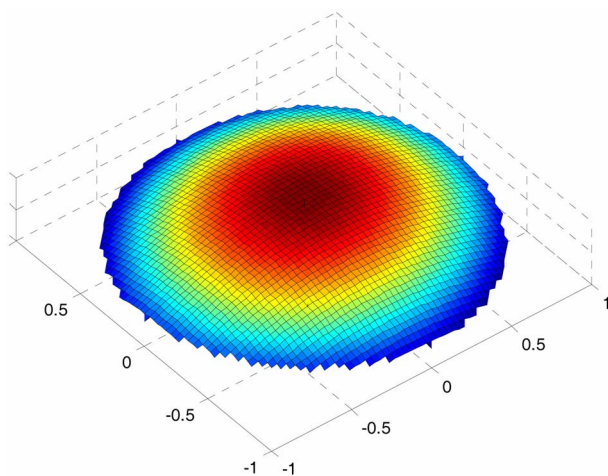


Fig. 6. Corneal wavefront of with zernike polynomial with 6th order.

Table 1. Zernike coefficients upto 6th degree of corneal aberration

$i$	$n$	$C_i$
0	0	-0.13634840
1	1	-0.00006123
2	1	-0.00008482
3	2	0.01057789
4	2	-0.07698916
5	2	-0.00758312
6	3	0.00000881
7	3	0.00001613
8	3	0.00000086
9	3	0.00000800
10	4	0.00008022
11	4	-0.00064701
12	4	0.00127633
13	4	0.00049061
14	4	-0.00008155
15	5	-0.00000413
16	5	-0.00001240
17	5	0.00002831
18	5	0.00004015
19	5	-0.00002775
20	5	-0.00001373
21	6	-0.00000916
22	6	0.00000384
23	6	0.00003108
24	6	-0.00005286
25	6	-0.00002281
26	6	0.00002032
27	6	-0.00003340

차의 저니케 계수는 6차 28항으로 Table 1과 Fig. 5와 같다. Table 1과 Fig. 5에서는 각막 전면에서 굴절한 후의 각막수차를 저니케 다항식으로 표현하고 있으며, 이 때 저위수차를 나타내는  $n=2$ 인 경우 즉 굴절이상도 값이 상대적으로 각막수차에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 저니케 다항식을 사용하여 각막전면을 통과 후의 파면의 형상으로 각막에 입사하기 전의 입사광의 파면은 평면파이지만 각막전면을 파면이 통과하는 과정에서 파면의 형상은 각막전면의 형상에 따라 변화된다. 이 때 각막전면을 통과 한 후의 파면은 평면파에서 왜곡된 새로운 형태의 파면으로 Fig. 6과 같이 구현되며, 왜곡된 새로운 파면은 각막수차로 표현된다.

## 결 론

본 연구에서는 콘택트렌즈 처방 시 사용되고 있는 각막 지형검사기에 적응광학 기술을 적용하여 각막형상을 재구성하였으며, 각막전면에서 굴절한 후의 파면과 각막수차를 저니케 다항식으로 구현하는 프로그램을 개발하였다. 본 연구결과는 각막수차를 제공하는 기능을 탑재한 각막 지형검사기 개발을 통해 외국 제품들과 기술 경쟁력을 확보할 수 있으리라 사료된다. 또한 OK렌즈 처방시 각막형상에 따른 OK렌즈의 역설계에서 유용하게 적용될 수 있으리라 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 2008년도 원광보건대학 교내연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] Yoon G. Y. and Williams D. R., "Visual performance after correcting the monochromatic and chromatic aberrations of the eye", *J. Opt. Soc. Am. A.* 19(2):266-275(2002).
- [2] Navarro R. and Moreno-Barriuso E., "Laser ray-tracing method for optical testing", *OPTICS LETTERS*, 24(14): 951-953(1999).
- [3] Liang J., Williams D. R., and Miller D. T., "Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics", *J. Opt. Soc. Am. A.* 14(11):2884-2892(1997).
- [4] Norberto L. G., *et al.*, "Aberration Generation by Contact Lenses With Aspheric and Asymmetric Surfaces", *Journal of Refractive Surgery*, 18:603-609(2002).
- [5] 박성종, 김성균, 주석희, "광학계의 파면수차 재구성에 대한 연구", *한국안광학회지*, 10(4):357-364(2005).
- [6] 김성균, 정창섭, 박성종, 주석희, "마이크로렌즈 어레이를 이용한 렌즈의 수차측정 시스템에 대한 연구", *새물리*, 52(2):174-179(2006).
- [7] Schwiegerling J. and Greivenkamp J. H., "Using corneal hight maps and polynomial decomposition to determine corneal aberrations", *Optometry and Vision Science*, 74(11):906-916(1997).
- [8] Schwiegerling J., Greivenkamp J. H., and Miller J. E., "Representations of videokeratoscopic hight data with zernike polynomials", *J. Opt. Soc. Am. A.* 12:2105-2113 (1995).
- [9] Park S. J. *et al.*, "The Influence of the secondary mirror position and the light weight primary mirror on optical performances", *Proc. of SPIE.*, 6034:60341A1-60341A8 (2006).
- [10] 박성종, 주석희, 심상현, "전면의 conic계수 변화가 착각 원에 크기에 미치는 영향", *한국안광학회지*, 8(2):77-83(2003).

## Determination of Corneal Aberrations Using Corneal Shape of Topographer

Seong-Jong Park\*, Sun-Young Kim\*, Kyung-Soo Han\*\*, Seok-Hee Joo\*\* and Young-Yun Chun\*\*\*

\*Vision Optics Lab., Sunchon Chongam College

\*\*Department of Optometry and Vision Science, Daebul University

\*\*\*Department of Ophthalmic Optics, Wonkwang Health Science College

(Received April 29, 2009; Revised May 26, 2009; Accepted June 4, 2009)

**Purpose:** In this study a program was developed to determine corneal aberrations using corneal shape of topographer and represented a wavefront and corneal aberrations using zernike polynomial. **Methods:** When the pupil size was 6 mm, we calculated new corneal shape data with zernike polynomials using corneal shape data of ORBSCAN topographer. We programmed the wavefront construction using ray tracing for corneal shape, then represented corneal aberrations having zernike polynomial with 6th order and 28 terms. **Conclusions:** We developed programs to determine a wavefront and corneal aberrations using corneal shape of ORBSCAN topographer. These results will be applied to a development of new topographer and prescription of contact lens and OK lens.

**Key words:** Corneal Aberration, Corneal Shape, Corneal Height, Zernike Polynomial, Ray Tracing