

# 파면굴절력 교정을 위한 자유형상 누진가입도렌즈 개발

## Development of Free-form PALs for Correcting Wavefront Refraction

박상배<sup>1,✉</sup>, 정미숙<sup>1</sup>  
Saang-Bai Baarg<sup>1,✉</sup> and Mee-Suk Jeong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국산업기술대학교 나노-광공학과 (Department of Nano-optical Engineering, Korea Polytechnic Univ.)  
✉ Corresponding author: saangbai@kpu.ac.kr, Tel: 031-8041-0710

Manuscript received: 2009.8.31 / Accepted: 2009.11.26

*In this paper, two kind of free-form progressive addition lenses (PALs) were designed with Zernike polynomial surface and anatomically accurate finite presbyopic schematic eyes which have aspheric cornea, aspheric GRIN crystalline lens, aspheric retina, and Gaussian apodization factor. Geometrical and diffraction MTFs were used for the optimization process in sequence. 5th orders of Zernike polynomials were used for the evaluation of progression zones of the two examples. The target MTF was set as 0.22 at 100 lp/mm which satisfies the standard visual resolution. These examples were fabricated with a CNC diamond turning machine controlled by slow tool servo (STS). After polishing process, the wavefront aberrations were measured with a laser interferometer on the ten test points across the progression zones and then compared with three current commercially available PALs on the optical performance. Astigmatic aberrations of the examples are very lower than the three selected PALs and have more increased stabilized progressive intermediate zones and near zones. It is expected to give better clear and comfortable distance, intermediate and near visions than other conventional PALs and to improve the adaptability of presbyopic patients to PALs.*

Key Words: Wave-front Aberration (파면수차), Wave-front Refraction (파면굴절력), Progressive Addition Lens (누진 가입도 렌즈), Zernike Polynomial Surface (제르니케 다항식 면), Free-form (자유형상)

### 1. 서론

노안이란 연령이 증가함에 따라 조절력이 감소하여 근거리 작업을 수행하는데 어려움을 가진 안굴절상태를 말한다. 노안을 교정하기 위한 안경렌즈는 근거리 주시에서 원거리 교정굴절력보다 좀더 높은 플러스 굴절력을 필요로 한다.<sup>1</sup> 결상 렌즈를 가진 다른 모든 광학기기와 마찬가지로 눈도 역시 그 광학적 성능을 제한하는 광학적인 수차들을 가지고 있다.<sup>2</sup> 실안의 광학계에는 저차 수차와 고차 수차로 구성된 두 가지 종류의 수차들이 있으며, 저차 수차들은 중초점이동수차(defocus)

와 비점수차로 구성된다. 눈의 저차와 고차 수차들은 Zernike 다항식을 이용하여 설명할 수 있다. 파면 분석 기술이 발전되어 오면서, 현재 몇 가지 파면 분석기기인 수차경들이 임상적으로 사용 가능하게 되었다. 파면분석 기술을 이용하여 눈의 고차 수차들을 측정하고 정량화하여 분석하는 것이 가능하게 되었으며, 파면분석 기술은 이러한 수차들을 교정할 수 있는 다양한 형태의 렌즈들을 설계하기 위한 방법으로도 사용될 수 있다. 안광학기에 대한 파면분석 기술의 응용은 초정밀가공기술이 진보함에 따라 점점 더 일반화 되어 가고 있으며, 최근에는 안경렌즈, 콘택트렌즈 또는

안내렌즈와 같은 시력보정용 의료용구의 설계는 물론 가공과 평가에도 접목되고 있다. 본 연구에서는 GRIN 수정체, 편심 동공, 비구면 망막과 같은 해부학적으로 정확한 눈의 특성들을 포함하면서 특히 노안의 안매개변수들을 나타내는 정밀 노안모형안(finite presbyopic schematic eye)을 형상화하여 개별 노안환자의 파면굴절력을 교정하기 위한 두 가지 서로 다른 설계기준에 의한 자유형상 누진가입도렌즈(PAL; progressive addition lens)를 설계하였다. 설계자료들을 바탕으로 STS (slow tool servo)로 제어되며 자유형상면의 형성이 가능한 초정밀 다이아몬드 터닝 가공기(DTM)를 이용하여 직가공방식으로 렌즈를 제작하였으며, 가공된 누진렌즈들에 대해 레이저 광간섭계를 이용하여 파면수차량을 측정하였고, 광학적 성능을 기존의 상용화된 누진렌즈들과 비교 분석하였다.

**2. ZERNIKE 원 다항식**

Zernike 다항식은 20 세기 초에 F. Zernike 에 의해 소개되었으며 후에 수차의 회절 이론을 설명하기 위해 몇몇 연구자들에 의해 개발되었다.<sup>3</sup> Zernike 다항식은 수차 연구를 위해 광학분야에서 광범위하게 사용되고 있으며, 파면수차의 증가를 발생시키는 광학계의 대칭성에 상관없이 수차의 영향을 받는 파면의 특성을 설명할 수 있다. 또한 Zernike 다항식은 몇 가지 유용한 특성들을 가지는데 하나의 완전 집합을 형성하고, 극좌표 함수로 쉽게 분리되며, 개별 다항식들은 전체 단위 원에 걸쳐서 직교하고 고전적인 Seidel 수차들과 관련되어 있다는 것이다.<sup>4</sup> 하나의 원형 출사동을 가진 회전대칭광학계의 수차 함수는 식(1)의 형태로 단위 원에 걸쳐서 직교하는 Zernike 원 다항식,  $R_n^m(\rho)\cos m\theta$  의 완전집합의 항으로 확장될 수 있다.

$$W(\rho, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n c_{nm} Z_n^m(\rho, \theta) \tag{1}$$

여기서  $c_{nm}$  은 점 물체의 위치에 따라 달라지는 전개 계수들이며 n 과 m 은 0 을 포함하는 양의 정수이고  $n-m \geq 0$  이다.  $Z_n^m(\rho, \theta)$  은 식(2)로 표현되는 정규직교화된 Zernike 다항식이며, 여기서  $N_n^m$  는 정규화 인자로 식(3)에 의한다.

$$Z_n^m(\rho, \theta) = N_n^m R_n^m(\rho) \cos(m\theta) \tag{2}$$

$$N_n^m = \sqrt{\frac{2(n+1)}{1+\delta_{m0}}} \tag{3}$$

여기서  $\delta_{m0}$  는 Kronecker 델타 함수이다(즉,  $m=0$  에 대해  $\delta_{m0}=1$  이고,  $m \neq 0$  에 대해  $\delta_{m0}=0$ ). Zernike 다항식의 방사상 의존 성분 다항식은 다음 식(4)에 의해 주어진다.

$$R_n^m(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} (-1)^s \frac{(n-s)!}{s! (\frac{n+m}{2}-s)! (\frac{n-m}{2}-s)!} \rho^{n-2s} \tag{4}$$

Zernike 다항식은 자유형상 광학에서 면의 보간을 위해 사용될 수 있으며, 임의의 기본 비구면 상수 값에 추가되는 표준 Zernike 다항식 면의 표현은 식(5)의 형태로 나타낼 수 있다.<sup>5</sup>

$$Z(\rho, \theta) = \frac{c\rho^2}{1+\sqrt{1-(1+k)c^2\rho^2}} + \sum_{i=1}^M \alpha_i r^{2i} + \sum_{i=1}^N a_i Z_i(\rho, \theta) \tag{5}$$

여기서  $Z(\rho, \theta)$  는 z 축에 평행한 면의 sag 값이며, k 는 비구면 상수, c 는 면의 정점 곡률, r 은 렌즈 단위로 나타낸 방사상 광선 좌표(즉, 광축 위의 높이)이며,  $r^2 = x^2 + y^2$ ,  $a_i$  는 짝수 비구면의 계수,  $\alpha_i$  는 i 번째 다항식에 대한 계수, M 과 N 은 각각 급수로 나타낸 짝수 비구면 계수와 Zernike 계수의 숫자들이고,  $\rho$  는 정규화된 방사상 광선 좌표이고,  $\theta$  는 극 광선 좌표이다. 이 면은 회전 대칭 또는 회전 비대칭 면의 형상을 지정하기 위해 사용될 수 있다.

**3. 자유형상 누진렌즈 설계**

Zernike 다항식은 지난 70 년 이상 동안 광학, 광공학 그리고 천문학 분야에서 성공적으로 적용되어 왔다. 비록 Zernike 다항식이 실안의 광학 수차들에 대한 표현에는 좀 더 최근에 적용되어 왔지만, 또한 안광학 분야에서도 하나의 표준이 되어 가고 있다.<sup>6</sup> 누진가입도렌즈는 노안의 교정을 위한 일반적이고 유용한 해결 방법이며, 1950 년대에 처음 소개되어 상업적으로 사용 가능하게 된 이후 많은 다양한 형태의 누진가입도렌즈들이 개

발되어 왔다. 누진가입도렌즈는 자유형상 광학의 특유한 경우이며, 기존의 광학계에 비교하여 설계와 분석에 다른 방법들을 필요로 한다. 3 차원 자유형상 면을 형성하기 위한 유용한 형태들에는 x-y 다항식, NURBS, 그리고 Zernike 다항식을 포함한다. 본 논문에서는 파면굴절력 교정을 위한 누진가입도렌즈의 최적 설계를 위해 Zernike 다항식이 사용되었다.

Fig. 1 은 파면굴절력 교정을 위한 누진가입도렌즈 설계의 전체적인 흐름을 나타낸 것이다. 먼저, 표준적인 연령대별 정밀 노안 모형안을 형상화한 후 측정된 환자의 파면 수차를 피팅한다. 그런 다음, 전안부의 생리학적인 조건을 고려한 누진렌즈의 환경을 설정하는데 이 때 개별 환자의 시 조건 (visual requirements)에 맞는 안면각과 경사각, 누진대 길이 등을 적용할 수 있다.

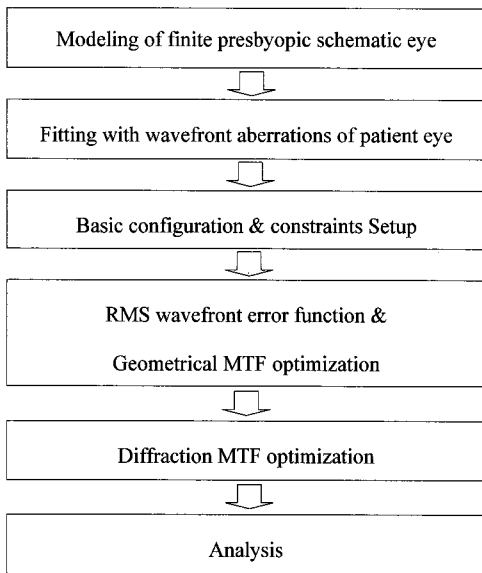


Fig. 1 Procedure of wavefront free form PAL design with presbyopic schematic eye

**3.1 설계 조건**

Table 2 는 누진렌즈 설계의 기준과 설계를 위한 누진렌즈의 기초 매개변수들 및 환자의 동공간 거리(PD), 각막정점에서부터 누진렌즈의 후면 정점까지의 거리(vertex distance), 경사각(pantoscopic tilt), 그리고 안면각(face-form tilt)등을 포함하는 해부학적으로 고려된 내용들을 나타낸 것이다.

Example 누진렌즈들은 렌즈 주변부의 비점수차

를 줄이고 환자의 적응성을 높이기 위한 소프트 디자인과 비대칭의 전면 누진 설계에 기반을 두었고, 특히 누진렌즈의 주변부에서 발생하는 흔들림 현상을 최소화하고 선명하게 보이는 근거리부와 중간거리부의 폭을 넓게 하는 와이드 디자인을 기본 개념으로 하여 설계하였다. 현재 주요 렌즈 제조사들에서는 수차를 줄이기 위해 전면 누진설계 이외에 후면누진설계나 양면누진설계가 접목된 다양한 형태의 누진렌즈들이 출시되어 임상에서 적용되고 있으나, 본 연구에서는 수차의 양이 가장 많이 발생하며 제어하기 어려운 전면누진형태에 일반적인 누진대길이와 이보다 짧은 누진대 길이를 가지는 디자인을 적용해 봄으로서 본 연구의 설계 방법에 대한 적합성과 그 임상적 효용성을 예측해 보고자 하였다.

Table 1 Principal parameters and physiological considerations used for the design of example PALs

Parameters	Values	
	Example 1	Example 2
Design criteria	Soft design General corridor Wide near zone	Soft design Short corridor Wide near zone
Surface type	Front	Zernike standard sag surface
	Back	Spherical surface
Lens material	Polycarbonate, $n_d = 1.586, v_d = 32.00$	
Lens diameter	65 mm	
Nominal base curve	6.00 C	4.00 C
True curve	6.163 C	4.059 C
Radius of curvature	95.078 mm	144.365 mm
Optical height	16 mm	12 mm
Inset	2.5 mm	2 mm
Prescriptions	Sph. plano, Add +1.00D	Sph. +2.00, Add +1.00D
Physiological considerations		
Face-form tilt	0°	
Pupillary distance	64mm	
Pantoscopic tilt	7°	
Eye rotation angle	Within ±30°	
Vertex distance	14 mm	

Fig. 2 는 설계변수인 정점간거리, 경사각과 안면각을 나타낸 것이다. 경사각은 누진렌즈의 x 축을 기준으로 7° 로 주어졌으며 안면각은 0° 로 설정하였다. 렌즈의 후면 정점으로부터 눈의 각막 정점까지의 거리인 정점간 거리는 14mm 로 정의하였다. 상하방 주시와 좌우 주시에 대한 시야각은 ±30°의 범위로 하였다. 명소시(photopic vision) 조건하의 백색 가시광선이 최적화를 위해 사용되었으며 0.470 μm에서 0.650 μm까지의 파장대 범위에 걸쳐서 각기 다른 스펙트럼 가중치 값이 사용되었다. 여기서 Example 1 누진렌즈의 경우에는 원용 Sph. 0.00D, 가입도 +1.00D 의 누진대 길이 16mm 의 일반적인 형태의 누진렌즈이며, Example 2 누진렌즈는 원용 Sph. +2.00D, 가입도 +1.00D 이며 12mm 의 보다 짧은 누진대 길이를 가지는 형태로 설계되었다.

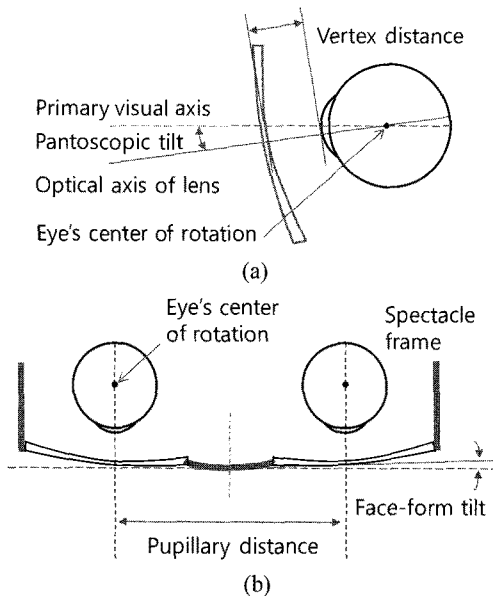


Fig. 2 (a) Vertical centration of spectacle lenses, the pantoscopic tilt, vertex distance (b) Pupillary distance and face-form tilt

### 3.2 정밀 노안 모형안 모델링

시력 보정용 의료용구와 안저 촬영기, 검안경 등과 같은 안광학기기의 설계에는 일반적으로 모형안을 이용하는 설계방법이 이용되며, 현재 다양한 형태의 모형안들이 개발되어 사용되고 있다. 본 연구의 누진가입도렌즈 설계에는 유한 정밀 노안모형안을 사용하였다.<sup>7</sup> 이 모형안들은 비구면 형태의 각막면, 편심 동공, 알파 각과 비구면 GRIN

수정체, 비구면 망막과 같은 해부학적으로 정확한 눈의 특성을 반영하고 있다. GRIN 형태의 수정체는 전반부 절단면  $L_1$  과 후반부 절단면  $L_2$  를 가지고 있으며, GRIN 수정체의 포물 모형의 계수들은 Table 2 에서 나타내었다.

Table 3 은 본 연구의 설계에 사용된 50 세와 60 세 노안의 정밀모형안에 대한 매개변수들을 나타낸 것이다. 비록 실안의 동공 직경은 주위의 조명도 수준에 따라 달라지지만, 4 mm 의 고정된 동공 직경이 설계에 사용되었다. 설계된 두 가지 종류의 모형안들은 각각 Example 1 과 2 의 누진렌즈 설계에 이용되었다.

Table 2 Coefficients of parabolic model of GRIN crystalline lens of model eye 1 and 2 (Where  $n_0$ ,  $n_r$ ,  $n_{r1}$ , and  $n_{r2}$  are base, radial and axial index coefficients, respectively)

GRIN		Coefficients of Parabolic Model			
		$n_0$	$n_r$	$n_{r1}$	$n_{r2}$
Model Eye 1	$L_1$	1.371	$-1.686689 \times 10^{-3}$	0.089423	-0.113366
	$L_2$	1.418	$-1.686689 \times 10^{-3}$	0.000000	$-5.851649 \times 10^{-3}$
Model Eye 2	$L_1$	1.371	$-1.163000 \times 10^{-3}$	-0.017643	-0.112381
	$L_2$	1.418	$-1.163000 \times 10^{-3}$	0.000000	$-4.890141 \times 10^{-3}$

### 3.3 최적화 설계

최적화 설계의 방법으로는 누진렌즈가 기본적으로 수차량이 큰 광학계이므로 RMS 파면 오차합수와 기하학적 MTF 최적화를 먼저 실시하여 오차함수(Merit function)의 양을 줄인 다음, 다시 회절 MTF 최적화로 설계를 진행하였다. 누진렌즈의 초기 단계에서 제한된 누진대 범위 내에서 다중의 렌즈 굴절력 변화를 만들기 위한 복잡한 환경설정으로 인해 상당한 양의 수차들이 존재하였다. 초기 최적화 단계에서는 RMS 파면 오차합수 최적화를 사용하여 실행하였고, 그런 다음 Example 렌즈들에 대해 원거리부에서 근거리부까지의 상하 ± 30° 에 해당하는 시야 범위에 대해 기하학적 MTF 최적화와 회절 MTF 최적화를 순차적으로 실시하였다. 감쇠최소자승법의 알고리즘을 이용하였고, 망막상의 평가를 위한 기준 MTF 값은 노안의 생리학적 특성을 고려하여 0.22 로 하였다.<sup>8</sup>

Table 3 Parameters of finite presbyopic schematic eye

Parameter		Measurement	Regression	Values of Model eye 1 and 2	
				50 year old	60 year old
Cornea	Anterior radius (mm)	Pentacam (Atchison et al., 2008)	N.S. <sup>1)</sup>	7.79	7.79
	Anterior asphericity	Pentacam (Atchison et al., 2008)	-0.0036+0.0038 x age	0.1864	0.2244
	Thickness (mm)	Pentacam (Atchison et al., 2008)	N.S	0.54	0.54
	Posterior radius (mm)	Pentacam (Atchison et al., 2008)	N.S	6.50	6.50
	posterior asphericity	Pentacam (Atchison et al., 2008)	1.06-0.016 x age	0.26	0.1
Anterior chamber depth (including corneal thickness) (mm)		Pentacam (Atchison et al., 2008)	3.909-0.0105 x age	3.384	3.279
Pupil	Decentration (mm)	-	-	+0.5 (nasal)	+0.5 (nasal)
	Size(mm) 9cd/m <sup>2</sup> 4400 cd/m <sup>2</sup>	(Winn et al., 1994) (Winn et al., 1994)	8.046-0.043 x age 4.070-0.015 x age	5.896 3.32	5.466 3.17
$\alpha$ angle	Decentration (°)	-	-	+5(nasal)	+5(nasal)
Lens	Anterior radius (mm)	Scheimpflug (Dubbelman et al., 2001)	12.9-0.057 x age	10.05	9.48
	Anterior asphericity	Scheimpflug (Dubbelman et al., 2001)	N.S	-5 (hyperbola)	-5
	Posterior radius (mm)	Scheimpflug (Dubbelman et al., 2001)	-6.2+0.012 x age	-5.60	-5.48
	Posterior asphericity	(Atchison, 2006) <sup>2)</sup>	N.S	-2 (hyperbola)	-2
	Lens diameter	MRI of older group <sup>3)</sup> (Atchison et al., 2008)	N.S	9.41	9.41
	Central thickness (mm)	Ultrasonography (Atchison et al., 2008)	3.1267+0.02351 x age	4.3022	4.5373
	Thickness of $L_a$ (mm) <sup>4)</sup>	-	C.T x 0.4	1.72088	1.81492
	Thickness of $L_p$ (mm)	-	C.T x 0.6	2.58132	2.72238
	Central refractive index	MRI (C.E. Jones et al., 2005)	-	1.4204	1.4204
Peripheral refractive index	MRI (C.E. Jones et al., 2005)	-	1.3709	1.3709	
Retina	Radius (mm)	(Navarro et al., 1985)	-	-12.00	-12.00
	Asphericity	(Atchison, 2006)	-	0.26	0.26
	Gaussian apodization factor (mm <sup>-2</sup> )	(DeLint e al, 1997)	-	0.12	0.12
Vitreous length (mm)		Ultrasonography (Atchison et al., 2008)	N.S	15.925	15.925
Internal diameter (mm)		MRI of older group (Atchison et al., 2008)	N.S	22.855	22.855
Anterior segment length (mm)		-	-	7.6862	7.8163
Axial eye length (mm)		-	-	23.6112	23.7363

1)N.S: not significant with age, 2): D.A. Atchison used -2 of posterior asphericity to ensure that the model has Zernike spherical aberration consistent with the literature of about 0.10  $\mu$ m for a 6 mm entrance pupil, at least for emmetropic eyes. 3): The older group means 61-69 years of age. 4): Crystalline lens was divided into anterior and posterior sections with the anterior section having 40% of the central thickness of the lens, as used by Liou & Brennan (1997). LA and LP are anterior and posterior section of the lens, respectively

#### 4. 자유형상(Free-form)면 가공

자유형상의 누진면 가공은 먼저 설계 자료들을 바탕으로 CAM 프로그램(Power-MILL, 9.003, USA)을 이용하여 가공을 위한 sag 자료를 계산한 후, 3축 정밀 수직 고속가공기(UVM450C, Toshiba, Japan)를 이용하여 기본 곡면(base curve surface)을 형성하기 위해 황삭가공을 실시하였다. 이후 다이아몬드

터닝 2 축(x, z) CNC 초정밀 가공기(Nanoform350A, Precitech, USA)<sup>9)</sup>와 자유형상면 가공을 위한 가공기 제어에 이용되는 STS(slow tool servo)를 이용하여 다시 정밀 황삭 및 정삭가공을 실시하였으며, 직가공의 형태로 제작하였다.

Table 4 는 누진렌즈 직가공에 적용된 황삭 및 정삭 조건을 나타낸 것이다. STS 를 이용한 가공은 일반적으로 0.25  $\mu$ m 의 형상 정밀도와 5nm 의 표면

조도 구현이 가능하지만 최적의 가공을 위해서는 적합한 work rpm 과 x-increments 설정이 중요하다. 본연구에서 사용한 폴리카보네이트 소재를 이용한 누진렌즈 가공에 적합한 work rpm 과 x-increments 값은 렌즈의 수직경선 및 수평 경선의 에지부의 sag 값과 렌즈의 소재를 고려하여 결정하였다.

Table 4 Conditions for free form grinding examples

	Rough cut	Finish cut
Material	Polycarbonate	
Tool radius	1.0mm(diamond)	
Work	30 rpm	30 rpm
Round cut feedrate	1.8 mm/min	0.18 mm/min
Minimum cut depth	40 $\mu$ m	40 $\mu$ m
X-increments	0.06 mm	0.006 mm
C angle	1.1 $^{\circ}$	1.1 $^{\circ}$

직가공된 누진 면에 대해 가공상의 틀 마크를 최소화하고 표면조도를 향상시키기 위해 연마액을 이용한 패드방식의 연삭가공을 실시하였다. 폴리싱 재료로는 석질의 크기가 2 $\mu$ m 인 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 을 이용하였고 CMP(chemical mechanical polishing) 패드(MIPOX, Japan)를 사용하였다. 연마 면의 해상도는 가공물의 소재에 따라 그 목표 값이 달라지며, 본 연구에서는 면 거칠기 Ra =0.1 을 기준으로 하였다. 연삭된 누진 면의 표면 조도는 바이올렛 레이저를 이용하는 컬러 3 차원 공초점 컬러현미경(VK-9510, Keyence, Japan)을 이용하여 평가하였으며, 50X 배율로 반경 약 280  $\mu$ m x 280  $\mu$ m 의 범위에 대해 표면 거칠기(Ra), 10 점 거칠기(Rz)를 측정하였다.

5. 광학측정 평가

자유형상면 누진렌즈의 광학적 성능 분석은 비접촉 방식의 레이저 광간섭계(KIF-202L, OLYMPUS, Japan)를 이용하였으며, 주요 측정 부분들에 대한 파면수차량을 측정한 후 이를 기존의 상용화된 전면 누진으로 설계된 렌즈들과 비교 분석하였다.

비교를 위해 선택된 상용렌즈들은 해외의 N (Nikon Presio Classic 1.5HCC) 누진렌즈, CZ(Carl Zeiss CLET GRAD HS HA) 누진렌즈, 그리고 국내의 C(CHEMIPRO 1.50S) 누진렌즈이며, 각각의 렌즈들은 설계 내용에 일정부분 차이가 있으나 누진 대径이가 15~18mm 이고, example 1 렌즈와 동일한

치방의 원거리 굴절력과 가입도를 가지는 것으로 선정하였다.

Fig. 3 은 측정에 사용된 파면수차 측정 시스템을 나타낸 것이다. 기준파장은 가시광선 레이저 0.6328  $\mu$ m이며, 참조구면은  $\lambda/20$ , F# 1.0,  $\Phi$  50mm 를 이용하였다. PBS(polarized beam splitter)와 참조렌즈를 통과한 레이저 빛은 측정 마스크와 example 누진렌즈를 통과한 후 오목면( $f$ =-27.758mm,  $\lambda/10$ ,  $\Phi$  210mm)에서 반사되도록 하였다. 측정 마스크는 Fig. 4 의 형태를 가지면서 3 축(x, y,  $\theta_x$ ) 스테이지 상에서 example 누진렌즈와 연동하여 측정하고자 하는 부분을 중심으로 이동시킬 수 있도록 하였다. 참조 오목렌즈는 5 축(x, y, z,  $\theta_x, \theta_y$ ) 스테이지에

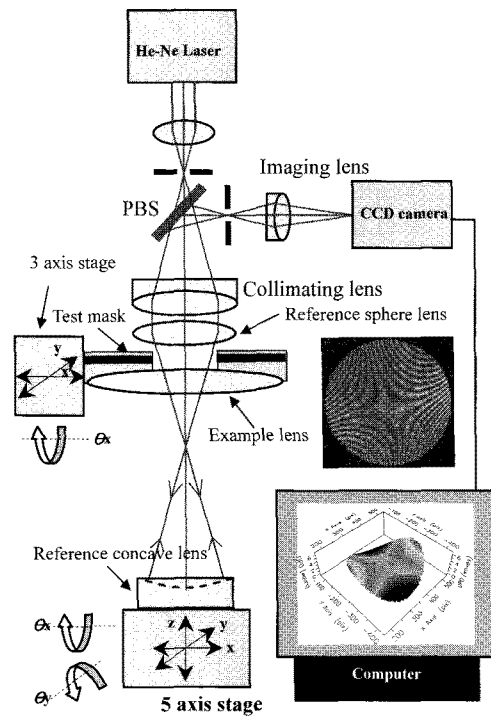


Fig. 3 Optical layout of Laser interferometer for measuring wavefront aberrations in the PALs. Interferometer system; Fizeau type, Frame grabber Type; Matrox meter II 8.0, Video signal digitalization level; white 128, CCD camera; Standard black and white video format RS170, Resolution; 640x480., Reference sphere lens :  $\lambda/15$ , F#1.0(R45), Reference concave lens: $\lambda/10$ , radius=27.35mm,  $\Phi$ =50mm, Test mask: aperture diameter =5mm

장착하여 누진렌즈를 통과한 레이저 빛이 반사되어 간섭되도록 하였다. 파면수차의 분석을 위한 프로그램은 Zernike 다항식 기반의 분석 소프트웨어(Inetlliwave, ver. LE-2, USA)를 이용하였다.

Fig. 4 는 16mm 누진대길이를 가지는 example 1 누진렌즈와 상용 누진렌즈들 사이의 광학적 성능을 비교 평가하기 위해 측정에 사용된 시험 마스크를 나타낸 것으로 마스크 상의 각 구경의 직경은 5mm 이며, 측정후 분석 범위는 직경 4mm 에 대해 실시하였다. example 2 누진렌즈는 보다 더 짧은 12mm 의 누진대를 가지는 마스크를 사용하여 측정하였고, 비교렌즈들은 제조사들 각각의 누진설계 차트의 위치대로 하였다.

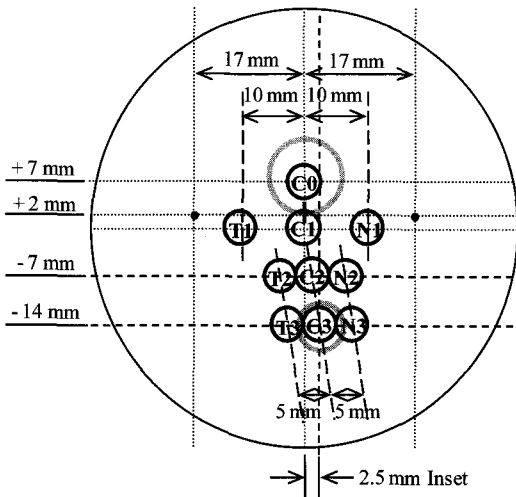


Fig. 4 Measurement zones of example 1 and conventional PALs, where C0, C1, C2 and C3 are central zones, T1, T2 and T3 are temporal zones and N1, N2 and N3 are for nodal zones

C0 은 원용부 굴절력 측정점(DRP; distance reference point), C1 는 프리즘 측정점(PRP; prism reference point)이며, C2 는 누진대 중간 위치, C3 은 근용부 굴절력 측정점(NRP; near reference point)이다. T1, T2, T3 은 이측부 측정점들이며 N1, N2 및 N3 는 비측부 측정점들이다. T1 과 N1 은 PRP 로부터 좌우로 각각 10 mm 떨어진 위치이며, 원용부와 누진대의 이행부에 대한 파면수차량의 확인 위치로 하였다. 누진대 중심위치인 C2 와 근용부의 C3 로부터 좌우로 5 mm 떨어진 지점들인 T2, T3, N2 및 N3 는 각각 누진대의 중간거리부와 근거리 부분의 이행부에 대한 파면수차량을 확인하는 위치로 설

정하였다. Zernike 다항식에서 처음 4 개의 항들인 piston, Tilt-x, Tilt-y 및 defocus 수차는 계통오차들이 포함되며 분석대상에서 제외하였고, Z5 부터 5 차까지인 Z21 항까지 분석하였다.<sup>10</sup> 분석항목은 렌즈 가공상태에 대한 Ra, Rz, 및 RMS 와 투과파면수차의 Zernike 각 항들의 계수 값 및 Seidel 수차 중 누진렌즈의 성능과 환자의 적응도를 좌우하는 유발비점수차량의 분포로 하였다.

Zernike 계수값들을 식(6), (7), (8)을 이용하여 Thibos 굴절력 벡터들로 변환한 후 식(9), (10), (11)을 이용하여 파면굴절력을 Seidel 굴절력으로 변환하였다.

$$M = \left(\frac{-4\sqrt{3}}{r^2}\right)C_2^0, \tag{6}$$

$$J_{45} = \left(\frac{-2\sqrt{6}}{r^2}\right)C_2^{-2}, \tag{7}$$

$$J_{180} = \left(\frac{-2\sqrt{6}}{r^2}\right)C_2^2 \tag{8}$$

여기서 벡터성분  $J_{45}$  는 45/135° 축을 가진 잭슨교차원주(Jackson cross cylinder)굴절력,  $M$  은 등가구면(Spherical equivalent)굴절력,  $J_{180}$  은 90/180° 축에서의 크로스실린더 굴절력을 나타낸다. 디오퍼터(D) 단위로 벡터 성분들을 계산하기 위해서는 동공직경과 Zernike 계수는 반드시 미터(m) 단위여야 한다.

$$Cyl. = -2\sqrt{(J_{45})^2 + (J_{180})^2}, \tag{9}$$

$$Sph. = M - \frac{Cyl.}{2}, \tag{10}$$

$$Cyl.Axis = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{J_{45}}{J_{180}}\right) \tag{11}$$

여기서 원주굴절력의 부호는 마이너스(-)여야 하며, 축은 0°와 180° 사이의 값을 가진다.

6. 결과 및 고찰

Fig. 5 는 연삭 가공 후의 각 Example 1 과 2 의 누진렌즈들에 대한 기하학적 중심 부분인 PRP 지점의 측정부분 C1 에 대해 측정한 3 차원 컬러 형상을 나타낸 것으로, 수직과 수평방향에 대해 세

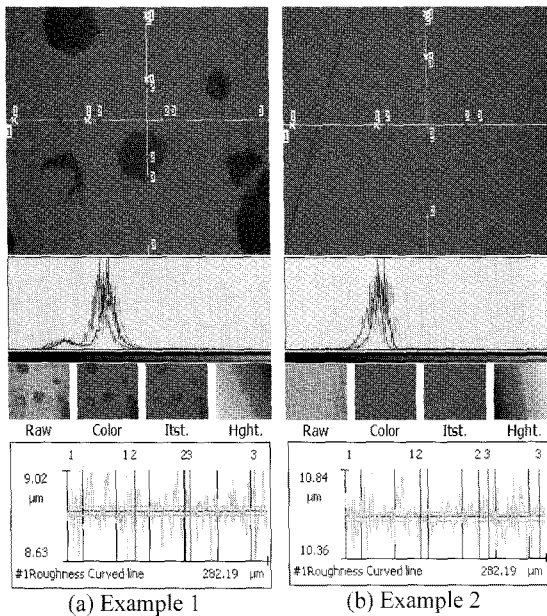


Fig. 5 Color 3D profiles of the Examples

부분으로 나누어 측정하였고 tilt 를 보정한 후 측정 값을 Table 5 에서 평균한 값으로 나타내었다.

Table 5 는 C1 의 측정 부분에 대한 표면조도 측정 결과값을 선거칠기와 면 거칠기에 대한 중심선 평균조도(Ra), 10 점 평균조도(Rz) 및 제곱평균 Rq (RMS)에 대하여 나타낸 것이다. 선거칠기 Ra 의 값은 두 Example 렌즈들에서 모두 0.05 μm 의 값을 보였고, 면 거칠기 Ra 의 경우 각각 0.09 μm와 0.10 μm이었으며, Rz 의 값은 2.77 μm와 2.49 μm의 값으로 나타났다.

Table 5 Roughness of sample PALs after polishing

Roughness		Example 1	Example 2
Line	Ra	0.05 μm	0.05 μm
	Rz	0.35 μm	0.38 μm
Surface	Ra	0.09 μm	0.10 μm
	Rz	2.77 μm	2.49 μm
	Rq	0.12 μm	0.13 μm

Fig. 6 은 각기 다른 제조사들의 기존의 상용화된 3 가지 누진렌즈들과 본 연구에서 개발한 Example 렌즈들의 각 측정 부분들에 대한 정규화된 Zernike 계수 값들을 나타낸 것이다.

원거리 굴절력 측정부분인 C0 의 경우 Example 렌즈 모두에서 고차 수차가 상대적으로 다른 비교

누진렌즈들에 비해 높은 값을 나타내고 있다. 이는 상용화된 렌즈들이 사출 방식으로 제작된 반면, Example 렌즈들은 직가공 방식으로 가공되었고, Table 5 에서 알 수 있듯이 폴리카보네이트 소재에 대한 불완전한 폴리싱으로 인해 가공상의 틀 마크를 완전히 제거하지 못하여 면거칠기의 Rz 값이 각각 2.77 μm와 2.49 μm로 기준 해상도보다 높으며, 정화막코팅이나 반사방지막코팅 처리를 하지 않았기 때문으로 보인다. 이 부분은 Fig. 6 에서 나타낸 그래프 상의 거의 모든 측정 부분들에서도 Example 렌즈들의 고차수차량이 비교 누진렌즈들에 비해 상대적으로 다소 높게 나타나는 것으로서 확인할 수 있다.

프리즘 참조 점 PRP 지점인 C1 에서는 대부분의 렌즈들에서 고차수차의 양은 큰 차이를 보이지 않으며, 비점수차의 양이 상대적으로 높게 나타나고 있다. 이측부의 T1 은 CZ 의 누진렌즈를 제외하고 대부분의 계수 값들이 ±0.3 μm 이내의 값을 가진다. 비측부 N1 은 원용부와 누진대가 비측부에서 만나는 이행부로 누진렌즈 N, CZ 그리고 C 에서 비점수차계수 Z6 의 값이 약 1~2 μm 의 큰 값을 나타내고 있으며, 이 부분은 비점수차의 양이 측정 부분들 중 가장 높은 곳임을 알 수 있다.

누진대의 중심부 C2 와 근거리 굴절력 측정부인 C3 의 경우 거의 모든 렌즈들에서 다른 측정 위치들에 비해 고위수차인 코마수차(Z7, Z8)와 삼각 비점수차(Z9, Z10)의 양이 좀 더 높은 값을 보이고 있으며, 이 결과는 비점수차 이외에 작은 양의 코마수차와 고차 수차들도 PALs 의 관련된 범위들 내에 역시 존재하고 있다는 최근의 연구결과와 일치한다.<sup>11</sup>

비측부의 N1, N2, N3 의 경우에는 대부분의 경우 고차수차량이 상대적으로 높은 반면, 이측부의 T1, T2 및 T3 의 경우에는 고차수차에 비해 저차의 일차 비점수차량이 큰 것으로 나타났다. Example 1 과 2 는 모두 다른 상용렌즈들에 비해 상대적으로 매우 낮은 비점수차 계수 값을 가지며, 이것은 누진대와 근거리부에서 기존의 다른 비교누진렌즈들에서보다 더 넓고 선명한 시야를 제공할 수 있다는 것을 의미한다.

Fig. 7 은 측정된 누진렌즈별로 각 측정부분들에 대하여 디오퍼터(D) 단위로 표현한 저차의 일차 비점수차량을 나타낸 것이다. 두 Example 렌즈의 경우 모두 모든 측정 부분들에서 -0.50 D 이하의 원주굴절력을 나타내고 있다.



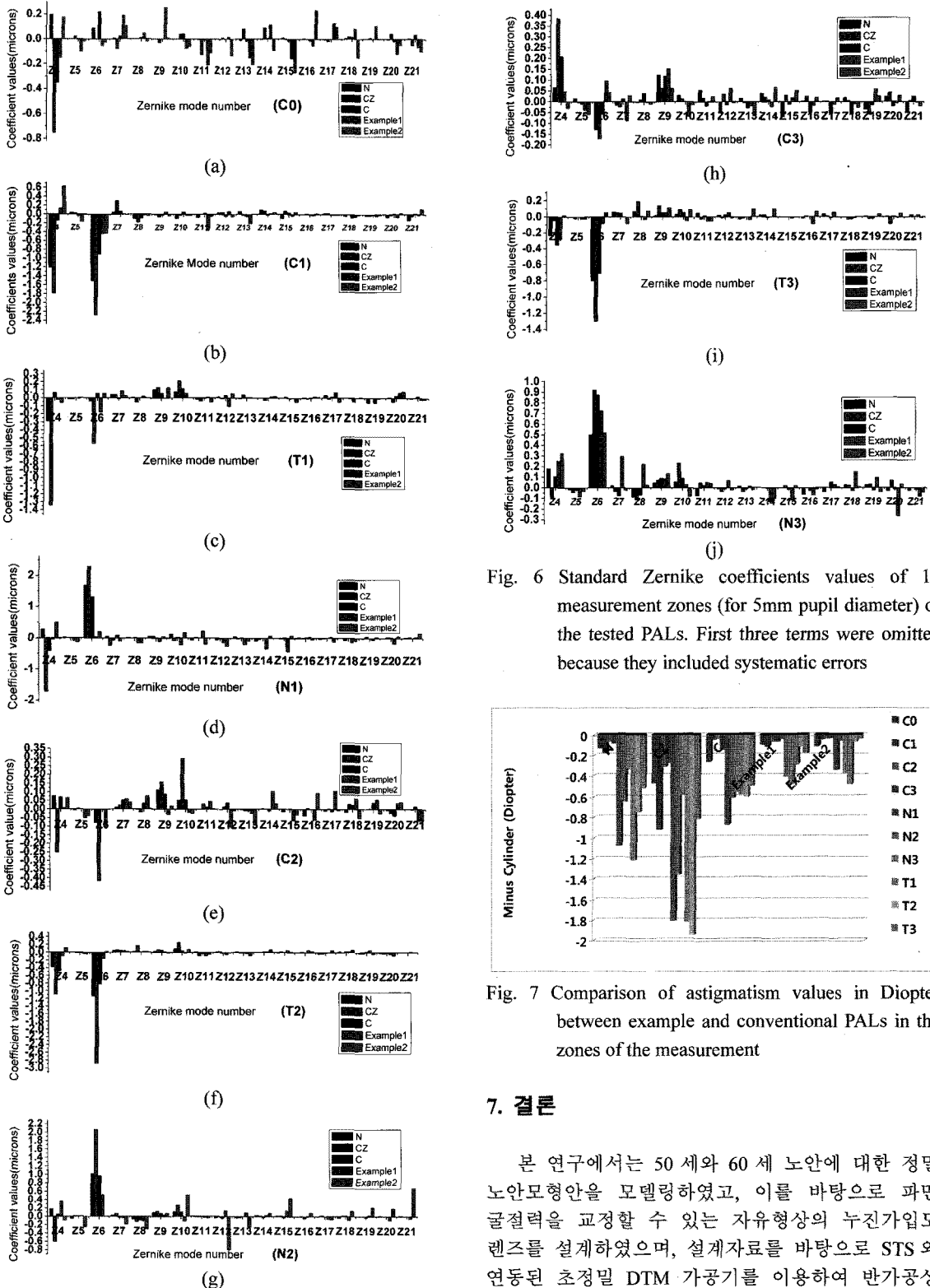


Fig. 6 Standard Zernike coefficients values of 10 measurement zones (for 5mm pupil diameter) of the tested PALs. First three terms were omitted because they included systematic errors

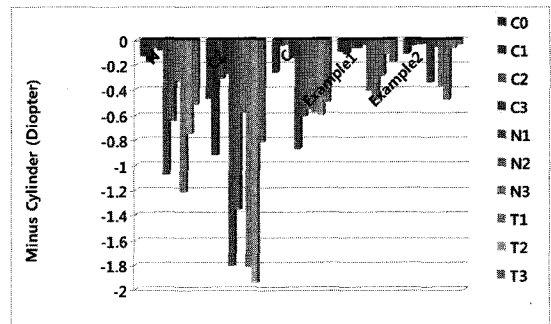


Fig. 7 Comparison of astigmatism values in Diopter between example and conventional PALs in the zones of the measurement

### 7. 결론

본 연구에서는 50 세와 60 세 노안에 대한 정밀 노안모형안을 모델링하였고, 이를 바탕으로 파면 필절력을 교정할 수 있는 자유형상의 누진가립도 렌즈를 설계하였으며, 설계자료를 바탕으로 STS 와 연동된 초정밀 DTM 가공기를 이용하여 반가공상

태인 두 개의 Example 누진렌즈를 제작하였다. Zernike sag 다항식 면이 자유형상의 누진면을 구현하기 위해 사용되었으며, 가공된 Example 렌즈들에 대해 레이저 광간섭계를 이용하여 파면수차량을 측정하였고 기존의 상용화된 세 가지 서로 다른 제조사들의 누진렌즈들과 비교 분석하였다. 또한 폴리카보네이트 렌즈의 직가공에 필요한 최적의 Work rpm 과 x-increments 를 렌즈 소재의 특성과 주요 경선에 따른 PV sag 값을 고려하여 찾을 수 있었다.

설계에서 주요하게 고려된 것은 기존의 누진렌즈가 가지고 있는 좁은 누진대의 좌우 폭과 이로 인한 렌즈 주변부의 흔들림 현상을 최소화 하면서, 동시에 연령의 증가로 인한 증가된 파면수차를 효과적으로 줄일 수 있도록 하는 것이었다. 폴리싱 가공 후의 측정결과 Example 렌즈들은 이측부와 비측부 측정 부위들에서 원주 굴절력의 평균값이 각각 -0.20D 및 -0.28D 로 비교를 위해 측정된 기존 누진렌즈들 보다 각각 약 70%와 58% 적은 량의 유발비점수차량을 가지고 있고, 원용부에서 근용부에 이르는 누진대내의 각 측정 부위들에서도 유발비점수차량이 무시할 만큼 작은 값을 가지고 있는 것으로 나타났다. 이것은 기존의 상용화된 누진렌즈들에 비해 노안의 시력교정 효과 및 누진렌즈에 대한 환자 적응도를 크게 향상시킬 수 있을 것으로서 기대된다.

## 후 기

본 연구는 한국산업기술대학교 초정밀광학클러스터기반구축센터의 가공 및 측정 장비의 일부 지원으로 진행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Atchison, D. A. and Smith, G., "Optics of the Human Eye," Butterworth-Heinemann, pp. 221-233, 2002.
2. Liang, J. and Williams, D. R., "Aberrations and Retinal Image Quality of the Normal Human Eye," J. Opt. Soc. Am. A., Vol. 14, No. 11, pp. 2873-2883, 1997.
3. Born, M. and Wolf, E., "Principles of Optics," Cambridge University Press, pp. 767-772, 1999.
4. Malacara, D., "Optical Shop Testing," A John Wiley

& Sons, Inc., pp. 498-546, 2007.

5. Zheng, Z., Sun, X., Liu, X. and Gu, P., "Design of reflective projection lens with Zernike polynomials surfaces," Displays, Vol. 29, No. 4, pp. 412-417, 2008.
6. Carvalho, L. A., "Accuracy of Zernike Polynomials in Characterizing Optical Aberrations and the Corneal Surface of the Eye," Invest. Ophthalmol. & Vis. Sci., Vol. 46, No. 6, pp. 1915-1926, 2005.
7. Baarg, S. B., "Optical Models of the Finite Schematic Eyes for Presbyopia," Hankook Kwanghak Hoeji, Vol. 19, No. 6, pp. 439-447, 2008.
8. Walker, B. H., "OPTICAL DESIGN for VISUAL SYSTEMS," SPIE Press, pp. 15-28, 2000.
9. Kim, G.-H., Yang, S.-C., Kim, H.-S., Kook, M.-H. and Lee, D.-H., "Ultra Precision Machining of Infrared Optics for CIBER," J. of the KSPE, Vol. 24, No. 10, pp. 7-12, 2007.
10. Artal, P., Berrio, E., Guirao, A. and Piers, P., "Contribution of the cornea and internal surfaces to the change of ocular aberrations with age," J. Opt. Soc. Am., Vol. 19, No.1, pp. 137-143, 2002.
11. Villegas, E. A. and Artal, P., "Visual acuity and Optical Parameters in Progressive-Power Lenses," Optometry and Vision Science, Vol. 83, No. 9, pp. 672-682, 2006.