

## 실안의 수정체 굴절을 분포를 갖는 정밀모형안 설계

김봉환<sup>†</sup>

경북과학기술대학교 안경광학과

☎ 718-851 경북 칠곡군 기산면 봉산리 159

(2007년 2월 21일 받음, 2007년 3월 29일 수정본 받음)

젊은 한국인 정시안에 대한 임상 자료를 가지고 구면수차 이외에 비축수차인 비점수차, 상면만곡과 왜곡수차들을 포함하는 실안의 광학적 성능과 유사한 정밀모형안을 설계하였다. 또한 수정체가 갖는 Gradient index 형태의 매질을 광학적으로 조사하였고, GRIN 매질을 수정체에 도입하여 정밀모형안을 설계하였다.

주제어 : Gradient index, Schematic eye, Crystalline lens, Aberration

### I 서 론

모형안은 사람 눈의 여러 가지 광학상수, 즉 굴절기능에 관여하는 각막, 수정체, 방수, 초자체 등의 굴절률과 각막과 수정체의 곡률, 비구면계수, 굴절능, 그리고 렌즈계로서 특이점(cardinal point)의 위치 등에 대한 평균값을 적용하여 사람 눈의 형상을 광학적 수치로 정리한 것으로, 눈을 광학계로 간주하여 이론적인 연구를 할 수 있도록 기초적인 자료를 제공한다.<sup>[1]</sup>

본 논문에서는 젊은 한국인의 정시안 임상자료를 이용하여 굴절면과 그것과 관계되는 각종 계측치를 근거로 해서 가능한 한 실제의 눈에 맞도록 광학적 입장에서 수치화하여 정밀모형안을 설계하였다. 광선 추적과 성능 분석은 Optical Research Associates(ORA)의 Code V 프로그램을 이용하였고 광선추적은 홍채 직경을 최대 8 mm, 60°의 각도로 하였다.

### II 정밀모형안 설계를 위한 임상 자료 및 설계 조건

#### 1. 임상자료

사람의 눈과 유사한 광학적 성능을 갖는 모형안을 설계하기 위하여 참고한 한국인 안구의 임상자료는 기 발표된 마기중<sup>[2]</sup>(57안), 김상기<sup>[3]</sup>(75안)의 정시안으로, 두 임상자료의 평균값을 기초 설계 제원으로 삼았다. 마기중의 임상자료는 조절마비제를 투여하지 않은 상태에서 자각식 굴절검사로 측정된 등가구면 굴절이상도가 0D인 젊은(평균 연령 21.3±2.4세) 한국인을 대상으로 얻은 57안(남성 20안, 여성 37안)이고, 김상기의 임상자료는 한국인 정시 75안으로 측정되어진 것이다. 표 1은 두 임상자료의 평균치이고, 단위는 mm이다. 한편 각막과 방수, 초자체의 굴절률은 Gullstrand No. 1 eye의 수치이고, 수정체의 굴절률은 두 임상자료의 평균치이다.

#### 2. 설계 조건

임상자료로부터 계산한 모형안의 평균 유효초점거리는 21.320 mm이다. 따라서 모형안의 전체 굴절능은 62.664D를 만족하여야 한다. 한편 모형안의 광학적 성능이 실안의 광학적 성능과 유사하게 하기 위하여 구면수차, 비점수차, 상면만곡, 왜곡수차가 실안의 수차량과 근접되도록 구속조건을 주었다. 설계 시 안광학계가 회전대칭계라는 가정 하에 공축광학계로 설계를 하였고, 587.6 nm의 단일파장을 사용하였으며 색수차는 고려하지 않았다.

설계 변수로는 각 면의 곡률반경과 굴절면 사이의 간격, 비구면 계수인 원추계수(conic constant)를 표준편차 범위 내에서 변화도록 하였다. 또한 수정체의 굴절률을 실안에서와 같이 균일하지 않은 매질로 설정하였다. 굴절면에 대한 원추계수(conic constant) Q는 각막 전면과 후면에 대하여 Lam과 Douthwaite<sup>[4]</sup>(1997)가 60명의 동양계의 젊은 중화민국 홍콩인에 대해 측정된 값인 -0.31±0.13과 -0.66±0.38을 각각 사용하였고, 수정체 전면과 후면은 Smith 등<sup>[5]</sup>(1991)이 59안을 가지고 측정된 -1.08±9.41, -0.12±1.74를 각각 사용하였다. 망막의 곡률반경은 Drasdo와 Fowler<sup>[6]</sup>(1974)가 주장한 -12 mm의 곡률반경을 갖는 구면으로 가정하였다.

표 1. 젊은 한국인 안구의 임상자료

임상자료(mm)		평균 측정값	표준편차	굴절률
각막	전면 곡률반경	7.8463	±0.2616	1.376
	두께	0.5445	±0.0309	
	후면 곡률반경	6.3628	±0.3503	
방수	두께	3.3646	±0.2077	1.336
	전면 곡률반경	10.3782	±0.6027	1.43779
수정체	두께	3.556	±0.1533	
	후면 곡률반경	-6.2085	±0.3707	
초자체	두께	16.423	±0.5020	1.336

<sup>†</sup> E-mail: mrbong@hanmir.com

### III. GRIN 수정체를 갖는 정밀모형안 설계

GRIN이란 굴절률 변화(Gradient Index; GRIN)란 용어의 약자로서 균일한 전파 매질과 반대되는 굴절률의 공간적 변화를 나타낸다. 이는 수정체에서도 발생하는데 굴절률이 중심부에서 1.406이고 가장자리로 갈수록 점차 감소하여 1.386의 분포를 갖는다. 두께는 총 3.6 mm이고 직경은 평균 9.2 mm이다.<sup>[7]</sup>

GRIN의 종류는 굴절률이 변하는 형태에 따라서 크게 네 가지 형태로 나눌 수가 있다. 첫 번째는 굴절률이 일정한 면들이 광축에 수직인 평면을 이루고 광축에 따른 거리의 함수로 변하는 axial GRIN 형태이다. 두 번째는 굴절률이 일정한 면들이 광축에 수평인 평면을 이루고 광축에 수직인 거리의 함수로 변하는 radial GRIN 형태이다. 세 번째는 axial과 radial GRIN 형태가 결합된 University of Rochester GRIN 형태이다. 네 번째는 굴절률이 일정한 면들이 구면을 이루고 임의 한 점에 대하여 대칭적으로 변하는 spherical GRIN 형태이다.<sup>[8]</sup> 이 중에서 앞의 설계 조건을 만족하는 radial과 spherical GRIN 형태를 정밀모형안의 수정체 GRIN 형태로 설정하였고 나머지 axial과 University of Rochester GRIN은 설계 조건을 만족하지 않아서 제외하였다.<sup>[9]</sup>

Radial GRIN의 수식은 다음과 같다.

$$n(d) = n_0 [1 - \{Sqrt(A) \times d\}^2 / 2] \quad (1)$$

여기서  $n(d)$ 은 위치에 따른 굴절률,  $n_0$ 은 기준 굴절률,  $d$ 은 광축으로부터의 거리로서  $d^2 = x^2 + y^2$ 이고  $Sqrt(A)$ 는 2차 방정식 상수( $mm^{-1}$ 의 단위)이다.

Spherical GRIN의 수식은 여러 수식들 중에서 Maxwell's Fisheye의 수식을 사용하였다.

표 2. Radial GRIN의 정밀모형안 제원

면	1	2	3	4	5
r	7.585	6.153		9.886	-6.579
Q	-0.274	-1.040	0.000	-1.100	-0.675
n	1.376	1.336	1.336	GRIN*	1.336
t	0.575	3.219	0.000	3.460	15.924

\* $n_0=1.406, A=0.036667$

표 3. Spherical GRIN의 정밀모형안 제원

면	1	2	3	4	5
r	7.782	6.713		9.776	-5.838
Q	-0.180	-1.040	0.000	-0.128	-1.650
n	1.376	1.336	1.336	GRIN*	1.336
t	0.575	3.157	0.000	3.600	15.941

\* $n_0=1.406, a=\pm 38.293, d=1.7$

$$n(p) = \frac{n_0}{(1 + \frac{p^2}{a^2})} \quad (2)$$

여기서  $n(p)$ 는 위치에 따른 굴절률,  $n_0$ 은 기준 굴절률,  $a$ 는 계수,  $p$ 는  $p^2 = x^2 + y^2 + (z-d)^2$ 이고, 여기서  $d$ 은 면 정점에서부터 GRIN의 대칭 중심까지의 간격이다.

설계한 정밀모형안의 제원은 표 2, 3과 같고  $r$ 은 곡률반경,  $Q$ 는 원추계수,  $n$ 은 굴절률,  $t$ 는 면간 거리를 나타내며, 단위는 mm이다. 1면과 2면은 각막을, 3면은 홍채, 4면과 5면은 수정체를 나타낸다. 이 수치들은 임상자료의 편차 이내의 값을 만족하고 있다.

설계한 모형안들 중에서 spherical GRIN 형태의 단면도를 그림 1에 제시하였다.

설계한 정밀모형안들의 기초 성능을 표 4에 제시하였다. EFL은 유효초점거리를 나타내며 21.32 mm로 전체 굴절능 62.66D에 만족하는 것을 볼 수 있다. BFL은 후초점거리, FFL은 앞초점거리를 의미한다. FNO는 광학계의 밝기로서 F number를 의미하고 홍채 직경 8 mm일 때의 값이다. 설계한 두 GRIN 형태 모두 유사한 기초성능을 나타내고 있다.

### IV. 실안과 설계된 모형안들과의 광학적 성능 비교

설계한 모형안들의 성능을 실안과 기존에 설계된 외국 모

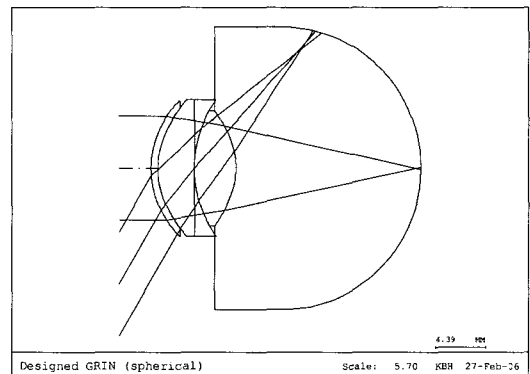


그림 1. 설계한 정밀모형안의 단면도.

표 4. 설계한 정밀모형안들의 기초성능

기초성능(mm)	Radial GRIN Type	Spherical GRIN Type
EFL	21.32	21.32
BFL	15.92	15.94
FFL	-14.37	-14.29
FNO	1.82	1.82
입사동 위치	3.24	3.17
출사동 위치	-3.39	-3.55
안축장	23.18	23.27
전체 굴절능	62.66D	62.66D

형안과 비교하기 위하여 구면수차, 주변부 굴절능 이상, 비점수차, 상면만곡, 왜곡수차를 그림 2~6에 제시하였다. 기존에 설계된 외국 모형안들은 Gullstrand<sup>[10]</sup>, Lotmar<sup>[11]</sup>, Kooijman<sup>[12]</sup>, Navarro<sup>[13]</sup> 등을 선택하여 분석하였다. 설계한 모형안들은 등가굴절률의 수정체를 갖는 모형안<sup>[14]</sup>과 radial GRIN, spherical GRIN 수정체를 갖는 정밀모형안이다.

실안의 광학적 성능은 구면수차  $\Delta F(r)$ , 구절(sagittal)면의 수차  $L_s(\theta)$ 와 자오(tangential)면의 수차  $L_t(\theta)$ 로 표현된 주변부 굴절능 이상, 비점수차  $AS(\theta)$ , 상면만곡  $FC(\theta)$  그리고 왜곡수차  $\theta'$ 로 제시하였고 이때 왜곡수차는 공기 중에서의 입사각과 눈에서의 각도의 상관관계로 제시하였다.<sup>[15]</sup>

$$\Delta F(r) \approx br^2 = 0.076 \times 10^{-3} r^2$$

$$L_s(\theta) = 6.31 \times 10^{-4} \theta^2 + 7.64 \times 10^{-8} \theta^4$$

$$L_t(\theta) = -2.03 \times 10^{-3} \theta^2 + 2.86 \times 10^{-7} \theta^4$$

$$AS(\theta) = L_s(\theta) - L_t(\theta)$$

$$AS(\theta) = 2.66 \times 10^{-3} \theta^2 - 2.09 \times 10^{-7} \theta^4$$

$$FC(\theta) = \frac{[L_s(\theta) + L_t(\theta)]}{2}$$

$$FC(\theta) = -7.00 \times 10^{-4} \theta^2 + 1.81 \times 10^{-7} \theta^4$$

$$\theta' = 0.823085\theta - 0.000753260\theta^2$$

그림 2에서 설계한 모형안들은 다른 모형안들에 비하여 실안과 매우 근접한 구면수차를 나타내고 있고, 비구면을 사용한 다른 모형안들에 비해 구면으로 이뤄진 Gullstrand 모형안은 실안에 비하여 큰 차이를 나타내고 있다. 그림 3에서는 설계한 모형안들과 다른 모형안들은 실안과 유사한 수차 분포를 나타내고 있으며, Kooijman의 모형안은 실안과 큰 차이를 나타내고 있다. 그림 4에서 설계한 모형안들의 비점수차는 다른 모형안들과 유사한 분포를 보이며 실안과 약간의 차이를 보이고 있다. 그림 5에서 상면만곡은 Gullstrand 모형안을 제외하고 실안과 반대의 수차 분포를 나타내고 있다. 그림 6에서 보는 바와 같이 왜곡수차는 설계한 모형안들과 다른 모형안들 모두가 실안과 유사한 성능을 나타내고 있다. 따라서 설계한 모형안들은 실안의 구면수차와 매우 근접한 성능을 가지며 다른 수차들에서도 실안과 유사한 성능을 갖는다.

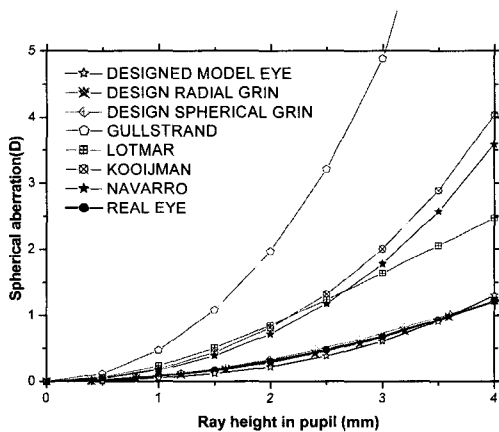


그림 2. 구면수차 비교.

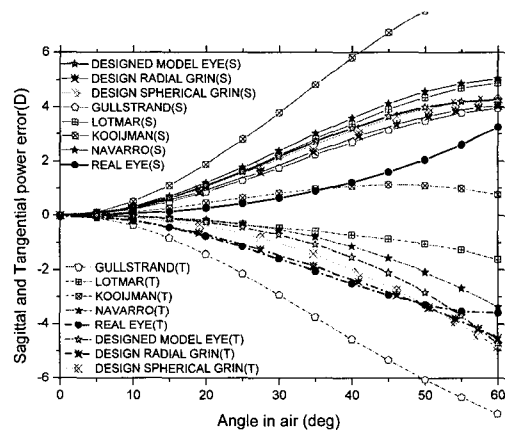


그림 3. 주변부 굴절능 이상 비교.

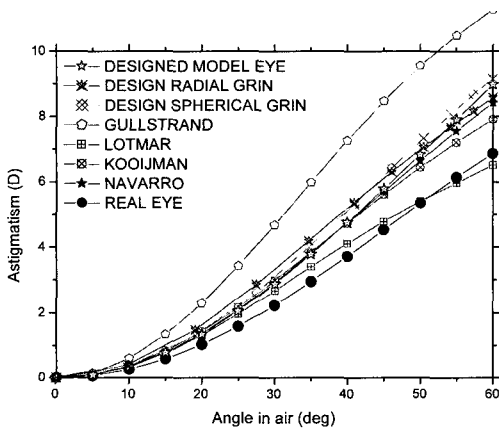


그림 4. 비점수차 비교.

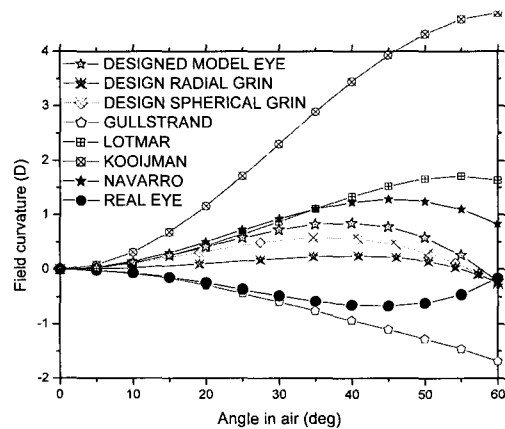


그림 5. 상면만곡 비교.

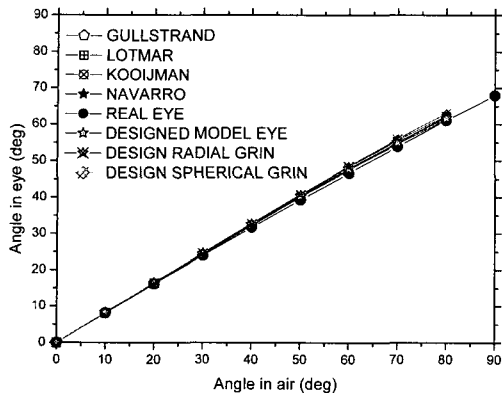


그림 6. 왜곡수차 비교.

### V. 결 론

본 논문에서는 마기중과 김상기의 한국인 눈에 대한 임상 자료를 가지고 구면수차이외에 비축수차인 비점수차, 상면만곡과 왜곡수차들을 포함하는 실안의 광학적 성능과 유사한 정밀모형안을 설계하였다. 또한 실제 수정체가 갖는 GRIN 형태의 매질을 광학적으로 조사하였고, GRIN 매질을 수정체에 도입하여 정밀모형안을 설계하였다. 이는 실안의 성능과 유사한 GRIN 수정체를 갖는 정밀모형안을 설계한 것으로서 실안과 매우 근접한 모형안을 설계한 것에 의의가 있다. 설계한 정밀모형안의 광학적 성능은 실안과 기 설계된 외국 모형안에 대하여 각종 수차로서 비교 평가하였다.

### 참고문헌

[1] 강현식, “안경학개론”, 신광출판사, pp. 155-167, 2005.  
 [2] 마기중, “한국인 눈의 광학상수 측정 및 모형안 설계”, 성균관대학교 박사학위 논문, pp. 120-148, 2002.

[3] 김상기, “구면수차를 이용한 정밀모형안의 최적화 설계”, 단국대학교 박사학위 논문, pp. 78-94, 2002.  
 [4] A. K. C. Lam and W. A. Douthwaite, “Measurement of posterior corneal asphericity on Hong Kong Chinese: A pilot study,” *Ophthal. Physiol. Opt.*, vol. 17, no. 4, pp. 348-356, 1997.  
 [5] G. Smith, B. K. Pierscionek, and D. A. Atchison, “The optical modelling of the human lens,” *Ophthal. Physiol. Opt.*, vol. 11, pp. 359-369, 1991.  
 [6] Drasdo, N. and Fowler, C. W. “Non-linear projection of the retinal image in a wide-angle schematic eye”, *Br. J. Ophthal.*, 58, pp.709-714, 1974.  
 [7] David A. Atchison, George Smith, “Optics of th Human Eye,” *Butterworth Heinemann*, pp. 16-19, 2000.  
 [8] Code V, “Prompting Guide,” version 9.6, *Optical Research Associates*, pp. 5.44-68, 2005.  
 [9] 김봉환, “GRIN 수정체를 갖는 정밀모형안 설계”, 국민대학교 대학원 박사학위논문, pp. 104-114, 2005.  
 [10] Gullstrand, A. Appendix II: “Procedure of rays in the eye. Imagery-laws of the first order,” *In Helmholtz’s Handbuch der Physiologischen Optik*, vol. 1, 3rd edn (J. P. Southall, Optical Society of America, 1924), 1909.  
 [11] Lotmar, W., “Theoretical eye model with aspheric surfaces,” *J. Opt. Soc. Am.*, 61, pp. 1522-9, 1971.  
 [12] Kooijman, A. C., “Light distribution on the retina of a wide-angle theoretical eye,” *J. Opt. Soc. Am.*, 73, pp. 1544-50, 1983.  
 [13] Navarro, R., Santamaria, J., and Bescos, J., “Accommodation dependent model of the human eye with aspherics,” *J. Opt. Soc. Am. A.*, 2, pp. 1273-81, 1985.  
 [14] 윤성로, 김봉환, “눈의 광학적 성능과 유사한 모형안 설계,” 국민대학교 기초논총, 제24집, pp. 103-117, 2005.  
 [15] D. A. Atchison, G. Smith, “Optics of the Human Eye,” *Butterworth Heinemann*, pp. 137-151, 2000.

## Design of the Finite Schematic Eye with the Crystalline Lens with GRIN Index

BongHwan Kim<sup>†</sup>

Dept. of Ophthalmic Optics, Kyongbuk College of Science, San 159, Bongsan-ri, Kisan-nyun, Chilgok-gun, Kyongbuk 718-851, Korea

<sup>†</sup>E-mail: mrbong@hanmir.com

(Received February 21, 2007, Revised manuscript March 29, 2007)

In this study, clinical data for emmetopia in young Koreans was taken in order to design the finite schematic eye, which had optical properties of real eyes including spherical aberration, astigmatism, field curvature and distortion. Furthermore, the crystalline lens with GRIN medium was optically analyzed, and the finite schematic eye with the GRIN crystalline lens was designed.