

이론적 정밀모형안에 기초한 환산모형안의 광학상수

김상기†

동남보건대학 안경광학과

Ⓣ440-714 경기도 수원시 장안구 정자동 937번지

(2003년 11월 3일 받음, 2004년 4월 6일 수정본 받음)

종광선구면수차를 목표값으로 최적화하여 가변동공을 가지는 정밀모형안을 설계하였다. 설계된 모형안에서 종광선구면수차를 이론적으로 동공직경 1 mm에서 8 mm까지 도식화하고, 다른 모형안의 값들과 비교하였다. 또한 파장에 따른 종광선색수차를 계산하고, 다른 값들과 대조하였다. 정밀모형안에서 얻은 유효초점거리 15.842 mm를 사용하여 환산모형안의 광학상수를 결정하였다. 환산모형안의 광학상수들은 등가굴절능 63.12 *Diopter*, 환산면 곡률반경 5.281 mm, 굴절률 1.33333, 안축길이 21.123 mm이다.

주제어 : reduced eye, finite model eye, longitudinal spherical aberration.

I. 서 론

모형안은 안구의 해부학적 자료를 바탕으로 정시안의 광학상수를 결정한다. 광학상수의 결정은 렌즈설계 기술이 보편화되기 이전에는 여러 사람의 자료를 평균한 값을 사용하였으나, 오늘날에는 기하광학적 최적화를 통하여 결정하게 된다. 사람의 안구를 기하광학적으로 표현한 모형안은 안구의 굴절이상 해석 및 교정, 안광학기기의 개발 등의 표준으로 사용되어진다. 사용 환경에 따라 많은 종류의 모형안이 있다. 그 중 안광학기기 렌즈의 초기 설계 및 굴절이상의 해석 등에 사용되어지는 환산모형안의 광학 상수 결정은 중요하다.

근축모형안 개발 약사는 다음과 같다. 1851년 Listing에 의해 첫 번째 합리적인 3면 모형안이 개발되었다. 1909년 Helmholtz는 Listing의 모형안을 수정하여 단일면 모형안을 개발하였고, 또한 조절모형안에 대해 기술하였다. 1900년 Tscherning은 4 면 모형안을 발표하였다. 1909년 Gullstrand는 해부학에 기초하여 6면 및 3면 모형안을 발표하였고, 이 모형안은 많은 다른 모형안에 지대한 영향을 미쳤다. 이 모형안에 대한 업적으로 Gullstrand는 1911년 노벨 생리학상을 받았다. 1952년 Emsley는 Gullstrand의 3면 모형안을 사용하여 환산모형안을 개발하였다. 1945년 Le Grand는 Gullstrand 모형안을 기초로 4면 모형안을 개발하였다. 1988년 Bennett과 Rabbetts은 Gullstrand-Emsley 모형안을 수정하여 발표하였다.^[1]

모형안은 Le Grand가 주장하듯이 first order, 수차, 상의 품질을 정확히 광학적으로 표현하는 정밀모형안이 필요하다. 하지만 이러한 모형안은 학습의 경계성(즉, 단순성)이 떨어지고, 광학계 초기설계에 적용하여 대체적인 광학적 성질을 예측하기에는 부적합하기 때문에 광학면이 단지 1면인 환산모형안, 즉 first order 값만을 예측할 수 있는 모형안이 필요

하다.

본 논문은 다음과 같은 목적을 가지고 연구되었다.

1. 종광선구면수차를 목표값으로 한국인의 곡률반경 및 중심두께의 측정 범위 안에 드는 광학상수를 가진 정시안 및 가변 동공을 가진 정밀모형안의 최적화 설계.
2. 모형안의 종광선구면수차를 동공크기에 따라 결정.
3. 파장에 따른 모형안의 종광선색수차 결정.
4. 설계된 정밀모형안을 기초로 단일면 환산모형안의 광학상수 결정.

II. 버전스형 굴절 및 이동

안광학에서는 주로 둘 또는 그 이상의 면에서 결상이 이루어질 때, 버전스형 가우스결상식 및 버전스형 이동식에 의하여 광선의 굴절 및 이동이 표현된다. 이번 절은 근축광학을 묘사하는 이론 중 하나인 버전스형 근축광학에 관하여 기술한다.

기하광학에서 무한거리는 광학계에 입사하는 광선속이 평행광선으로 간주될 수 있는 피사체 심도 범위 내에 물체가 놓여 있는 거리로 정의되고, 유한거리는 이 범위 밖에 물체가 놓여 있는 거리로 정의된다. 그러므로 물체의 위치에 따라 광학계는 유한거리광학계와 무한거리광학계로 구분이 된다. 유한거리광학계에서는 광축과 수직인 길이를 물체의 크기로 표현하나, 무한거리광학계에서는 시야각으로 물체의 크기를 표현한다.

2.1. 유한거리광학계

그림 1에서 광학계 굴절은 다음과 같은 가우스 결상식에 의해 표현된다.

$$S_1 + D_1' = S_1' \quad (1)$$

† E-mail: koptics@dongnam.ac.kr

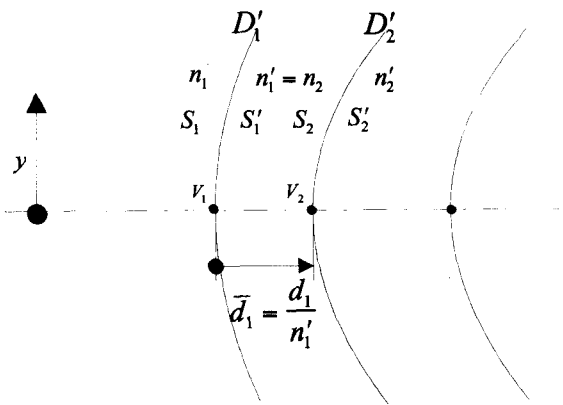


그림 1. 유한거리 물체에 대한 둘 또는 그 이상의 면에서 결상.

여기서, S_1, S_1' 은 각각 1면의 정점 V_1 을 기준한 입·출사 버전스이고, D_1' 은 1면의 면굴절능이다. 면과 면사이 광선 이동에 대하여 표현하는 버전스이동(effectivity)은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$S_2 = \frac{S_1'}{1 - \bar{d}_1 S_1'} \quad (2)$$

식 (2)에서 S_1' 은 1면의 출사버전스, S_2 은 2면의 입사버전스가 되고, $\bar{d}_1 = d_1/n_1'$ 은 버전스 이동거리인 1면과 2면 사이의 정점간 축소거리이다. 또한, 2면에서 가우스 결상식은 다음과 같다.

$$S_2 + D_2' = S_2' \quad (3)$$

여기서, S_2, S_2' 은 각각 2면의 정점 V_2 을 기준한 입·출사 버전스이고, D_2' 은 2면의 면굴절능이다. 식 (1), (2), (3)과 관련되어 도식화한 것이 그림 1이다. 여기서 n_1, n_2 은 1면과 2면의 물체 굴절률, n_1', n_2' 은 1면과 2면의 상측 굴절률이다.

광학계는 굴절과 이동의 반복이 면과 면 사이에서 연속되므로, 2면보다 많은 연속되는 면에서 광선의 굴절 및 이동을 식 (4), (5), (6)을 통하여 표현할 수 있고, 마지막 면에서 상거리가 결정된다.

$$S_i + D_i' = S_i' \quad (4)$$

$$S_{i+1} = \frac{S_i'}{1 - \bar{d}_i S_i'} \quad (5)$$

$$S_{i+1} + D_{i+1}' = S_{i+1}' \quad (6)$$

여기서 i 는 임의의 광학면을 의미한다. 유한거리 물체의 횡배율은 다음과 같이 표현된다.

$$M_T = \frac{y_f'}{y} = \frac{S_1}{S_1'} \times \frac{S_2}{S_2'} \times \dots \times \frac{S_i}{S_i'} \times \dots \times \frac{S_f}{S_f'} \quad (7)$$

여기서 M_T 는 횡배율, y 는 물체의 크기, y_f' 은 상면에 있는 최종상의 크기이고, S_f, S_f' 은 광학계 최종면에서 각각 입·

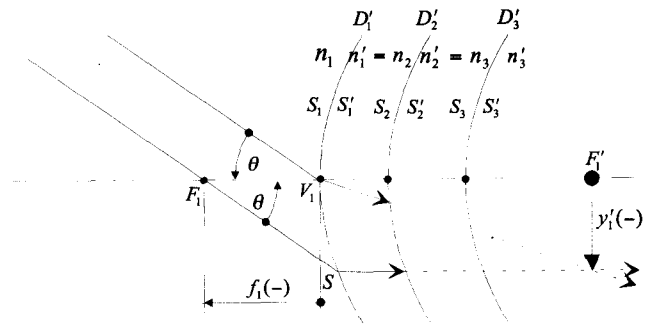


그림 2. 무한거리 물체에 대한 둘 또는 그 이상의 면에서 결상.

출사 버전스이다.

2.2. 무한거리광학계

물체가 면이 여러 개인 광학계 앞 무한거리에 위치하였을 때, 최종상의 위치는 상측초점을 포함하는 상측초평면이 된다. 최종상의 크기는 식 (7)의 횡배율에 의하여 정의 할 수 없기에 식 (8)에 의하여 다시 정의된다.

$$y_f' = f_1 \tan \theta \times \frac{S_2}{S_2'} \times \dots \times \frac{S_i}{S_i'} \times \dots \times \frac{S_f}{S_f'} \quad (8)$$

여기서, y_f' 은 광학계 전체에 대한 상측초평면에서 최종상의 크기, f_1 은 1면의 물체초점거리, θ 는 무한거리 물체의 크기를 나타내는 시야각을 의미한다. 식 (8)을 도식화하여 나타낸 것이 그림 2이다. 여기서 F_1, F_1' 은 1면의 물·상측 초점, V_1 은 1면의 정점, $y_f'(-)$ 은 1면 상측초평면에서 상크기이다.

상측주점에서 상측초점까지의 거리에 해당하는 버전스가 되는 상측주점굴절능을 표현하는 식은 다음과 같다.

$$D' = \frac{n_f'}{f'} = D_1' \times \frac{S_2'}{S_2} \times \frac{S_3'}{S_3} \times \dots \times \frac{S_i'}{S_i} \times \dots \times \frac{S_f'}{S_f} \quad (9)$$

이 식에서 D' 은 등가굴절능(상측주점굴절능), n_f' 은 마지막 면의 상공간 굴절률, f' 은 유효초점거리이다. 식 (9)를 통하여 초점을 기준으로 주점의 위치를 결정할 수 있다.

III. 굴절이상(refractive error)

인간의 안구는 굴절이상의 유무에 의해 정시(emmetropia)와 비정시(ametropia)로 구분된다. 안구에서 비정시는 굴절이상을 가지게 된다. 굴절이상은 1차 수차의 범위에서 광수용체인 망막에 물체점이 점으로 결상하지 않고, 원 또는 타원으로 결상하는 것을 의미한다. 이러한 결상의 모양에 따라 각각 구면굴절이상과 비점굴절이상으로 구분한다. 구면굴절이상의 종류는 근시·원시가 있고, 비점굴절이상은 난시가 있다. 굴절이상을 기하광학 이론으로는 1차 수차인 종초점이동(defocus)으로 설명한다.

3.1. 굴절이상과 안축거리와의 관계

그림 3에서 굴절이상이 존재하면 종초점이동이 발생을 하여 상축초평면과 상면인 망막 사이에는 거리의 차이가 있다. 이러한 거리는 안광학에서 버전스 거리(dioptic length)로 표현된다. 이 경우 보통 기하광학에서는 광학계의 기준점은 정점, 주점과 같은 입사광선속과 출사광선속의 기준점이 되는 것이 일반이나, 버전스 길이의 안광학적 기준점은 상면인 망막이다. 표현식은 다음과 같다.

$$\Delta k' = -\frac{(k')^2}{n_e} \times \Delta K' \quad (10)$$

식 (10)에서 $\Delta k'$ 은 굴절이상을 표현하는 망막에서 상축초점까지의 거리이고, $\Delta K'$ 은 굴절이상을 표현하는 버전스 거리이다. k' 과 n_e 는 각각 정시인 상태에서 안축길이와 안구 굴절률이 된다. 그러므로 안축거리의 결정은 안구의 굴절이상을 버전스 거리로 표현하는데 중요한 역할을 한다.

3.2. Emsley 모형안

안구의 굴절은 눈 안으로 들어오는 빛의 버전스를 변화시켜 광수용체인 망막(retina)에 결상하는 것이다. 망막에는 황반(macula)이 있고, 황반 중심에는 약 0.3 mm의 직경을 가지는 중심소와(foveola)가 있어 이 곳에서 최대 시력을 제공한다. 안구의 굴절은 정적굴절(또는 굴절)과 동적굴절(또는 조절)로 나눈다. 정적굴절은 눈이 가장 약한 굴절능을 가진 상태(조절 휴지)에서 굴절을 의미하며, 동적굴절은 수정체의 굴절능의 변화로 인한 안광학계 전체의 굴절능이 변화되어 결상하는 것이다. 전자는 무한거리광학계로, 후자는 유한거리광학계로 해석된다. 단일면 모형안에서 조절할 때는 환산면굴절능이 변화한다고 고려된다.

정적굴절을 표현한 잘 알려진 Emsley 환산모형안을 기술하면 그림 3과 같다. 여기서 F_e , F'_e 는 각각 물·상축초점, P 는 주점, N 은 절점, D'_e 은 환산면굴절능, $n \cdot n'$ 은 각각 물·상축 굴절률, n_e 는 안구 내부의 굴절률이다. 거리의 단위는 mm이다. 하지만 이 모형안은 안축길이가 동양인 보다 긴 서양인을 기준으로 설계되었기 때문에 동양인에 맞추어 수정

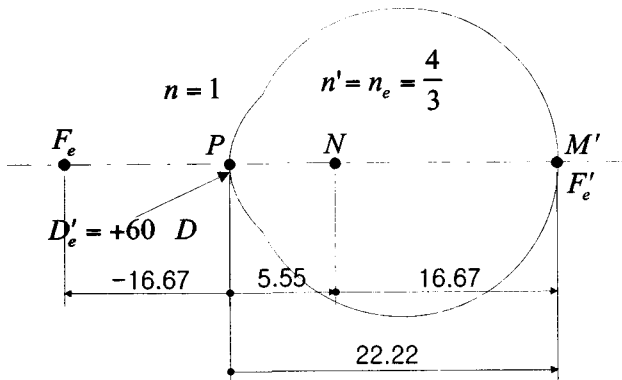


그림 3. Emsley 환산모형안. 거리의 단위는 mm.

할 필요성이 있다. Emsley 모형안의 광학상수는 그림 3에 기술하였다. Emsley 모형안에서 망막을 기준으로 약 0.37 mm는 1 Diopter의 굴절이상에 해당이 된다.

IV. 정밀모형안(finite model eye)

정밀모형안은 4개의 비구면으로 구성되어 있고, 근축모형안의 광학적인 성질을 포함하고, 근축모형안 보다는 상대적으로 큰 망막상 크기와 수차, 회절, Stiles-Crawford 효과, 그리고 retinal sampling 등에 의해 상의 특성을 예측할 수 있는 모형안이다. 실제의 안구와는 달리 모형안의 모든 굴절면은 공축인 비구면계라 가정되어 설계된다.

모형안은 명소시인 상태에서 그림 4와 같이 망막이 초평면인 정시안으로 설계되었다. 그림 4에서 오른쪽 원안은 망막 앞에서 구면수차가 형성됨을 보여준다. 광학계는 동공 직경 8 mm인 Navarro eye의 종광선구면수차 2.04 Diopter를 목표값으로 하여 최적화되어졌다.^[2] 최적화를 위하여 사용되어진 프로그램은 ZEMAX이다. 사용된 한국인의 곡률반경 및 중심두께의 기초자료는 마기중 등에 의하여 측정된 평균값을 사용하였다.^[3] Lam과 Douthwaite가 측정한 각막의 비구면도 -0.66 ± 0.38 , -0.31 ± 0.13 을 각각 각막 전·후면의 최적화에 사용하였다.^[4] 수정체의 비구면도는 Smith 등이 측정한 자료를 사용하였고, 최적화에 사용한 전·후면 각각의 값은 -1.08 ± 9.41 , -0.12 ± 1.74 이다.^[5] 광학면은 4개의 면으로 구성이 되어있고, 3면의 위치인 수정체 전면에 stop의 역할을 하는 동공이 위치한다.

설계된 정밀모형안은 다음과 같은 광학상수를 가지고있다. 동공직경 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm일 때, 모형안의 상공간 F/#는 각각 6.8843, 3.4422, 2.2948, 1.7211이다. 망막에서 발생하는 Stiles-Crawford 효과를 광학적으로 표현하기 위해 동공에서 apodization을 사용하였고, Stiles-Crawford 계수는 본 논문에서 Applegate와 Lakshminarayanan의 평균 자료인 0.12 mm^{-2} 를 사용하였다.^[6]

설계에 사용되어진 파장은 명소시를 기준으로 470 nm, 510 nm, 555 nm, 610 nm, 650 nm이고, 각각의 가중값은 0.091, 0.503, 1.000, 0.503, 0.107로 하여 555 nm를 중심파장으로 모형안이 설계되었다. 공기중 중심파장에서 유효초점거리는 15.842 mm이다. 모형안의 전체 중심길이는 23.390 mm이다. 동공직경 4 mm에서 입·출사동의 크기는 각각 4.602 mm, 4.178 mm이다. 입사동의 위치는 1면 기준으로 3.524 mm이고, 출사동의 위치는

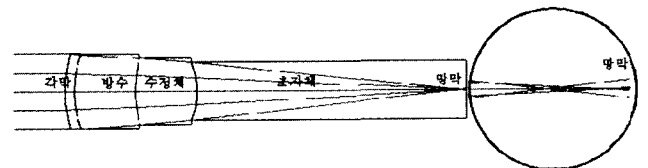


그림 4. 동공직경 4 mm에서 정밀모형안의 개략도.

표 1. 최적화 설계에 의하여 얻은 정밀모형안의 광학상수값

면	각막 전면	각막 후면	수정체 전면	수정체 후면
곡률반경(mm)	7.831	6.339	8.582	-5.013
비구면도 Q	-0.66344	-0.29240	-1.11642	-0.12895
비구면 형태	장축타원면	장축타원면	쌍곡면	장축타원면
중심두께(mm)	0.536	3.568	3.570	15.715
굴절률(555 nm)	1.37773	1.33765	1.42157	1.33652
아베수	45.73	41.17	45.18	49.59

표 2. 정밀모형안에서 주요점 위치 (단위: mm)

	물체공간			상공간		
	470 nm	555 nm	650 nm	470 nm	555 nm	650 nm
주점초점 거리	-15.637	-15.842	-15.997	15.637	15.842	15.997
정점초점 거리	-13.723	-13.927	-14.078	-0.158	0.000	0.120
주점	1.913	1.915	1.919	-15.795	-15.842	-15.877
부주점	-29.360	-29.769	-30.075	15.479	15.842	16.116
절점	1.913	1.915	1.919	-15.795	-15.842	-15.877
부절점	-29.360	-29.769	-30.075	15.479	15.842	16.116

상면 기준으로 -14.382 mm이다.

최적화 설계에 의하여 얻은 정밀모형안의 광학상수값은 표 1과 같다. 표 1을 보았을 때, 광학상수들이 각각 다른 연구자에 의해 측정되어졌다 할지라도 대부분 평균측정값 근처에서 최적화되어져 안정화된 광학계가 구성됨을 알 수 있다.

주요점의 종류는 초점(focal point) · 주점(principal point) · 부주점(anti-principal point) · 절점(nodal point) · 부절점(anti-nodal point)이 있다. 주점은 황배율이 +1인 공액점에서 정의되고, 부주점은 황배율이 -1인 공액점에서 정의된다. 절점은 각배율이 +1인 공액점에서 정의되고, 부절점은 각배율이 -1인 공액점에서 정의된다. 상축초점은 황배율이 0인 곳에서 정의되고, 물축초점은 황배율이 무한대인 곳에서 정의된다. 설계된 정밀모형안의 주요점들은 표 2에 기술한다. 주점초점거리의 기준은 물 · 상축 주점이고, 정점초점거리 · 주점거리 · 부주점거리 · 절점거리 · 부절점거리의 물체공간 기준은 1면, 상공간 기준은 상축초평면이다. 거리의 값은 전부 공기 중의 값이며, 단위는 mm이다.

근축동광선각비(paraxial pupil ray angle ratio)는 입 · 출사 동점에서 광축과 근축 동광선이 이루는 각의 비이다. 이 각 비는 다음 식에 의해 정의된다.

$$\bar{m} = \frac{n}{n' M_{EE}} \quad (11)$$

여기서, \bar{m} 은 근축동광선각비, n 과 n' 은 각각 물체 · 상공간의 굴절률이고, M_{EE} 은 동배율(pupil magnification)이다. 설계된 정밀모형안에서 계산된 근축동광선각비는 0.824199이

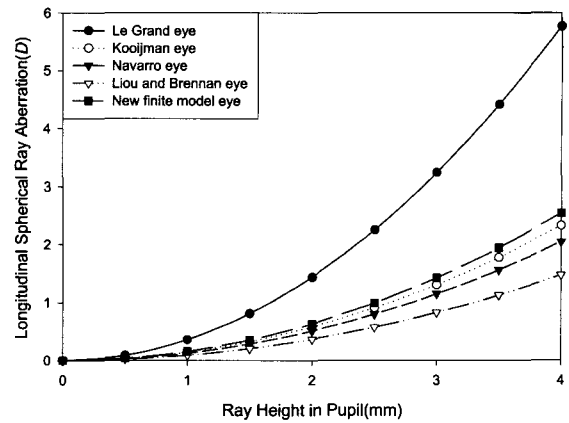


그림 5. 동공에서 광선의 입사고에 따른 여러 종류의 모형안의 횡광선구면수차값들(단위는 Diopter). Le Grand eye(●), Kooijman eye(○), Navarro eye(▼), Liou and Brennan eye(▽), 본 논문에서 설계된 모형안(■).

다. Gullstrand 6면 모형안, Le Grand 모형안, Bennett and Rabbetts 단순모형안, Emsley 환산모형안에서 근축동광선각 비는 각각 0.823085, 0.813243, 0.817532, 0.750000이다.^[1]

본 논문에서 설계된 광학계 전체 종광선구면수차는 중심과장에서 동공직경이 4 mm일 때, 0.63 Diopter이다. Le Grand eye, Kooijman eye, Navarro eye, Liou and Brennan eye에서 동공직경 4 mm 일 때 종광선구면수차의 값은 각각 1.44 Diopter, 0.58 Diopter, 0.51 Diopter, 0.37 Diopter이다.^[7] 그러므로 설계된 모형안의 종광선구면수차값은 Le Grand eye보다 작고, Kooijman eye, Navarro eye와는 유사성을 가지며, Liou and Brennan eye의 값보다 다소 크다. 그림 5는 동공의 크기에 따른 여러 종류의 모형안 및 실제 안구에서 측정된 횡광선구면수차값들을 동공의 반경에 따라 도식화한 것이다. 본 논문에서 설계된 모형안의 종광선구면수차값은 ■로 표시한다.

파장 470 nm와 650 nm 사이에서 명소시로 설계된 본 논문의 모형안에서 종광선색수차 값은 디오퍼터로 환산해서 1.13 Diopter이다. Charman의 환산식은 식 (12)와 같이 표현된다.

$$LCA = 0.0853(\lambda_1 - \lambda_2) - 1.21 \times 10^{-4}(\lambda_1^2 - \lambda_2^2) + 5.93 \times 10^{-8}(\lambda_1^3 - \lambda_2^3) \quad (12)$$

식 (12)에서 LCA는 Diopter 단위의 종광선색수차, λ_1 , λ_2 은 종광선색수차의 범위를 결정하는 nm 단위의 파장들이다. 식 (12)를 사용하여 파장 470 nm와 650 nm 범위에서 계산을 하면 종광선색수차는 1.09 Diopter가 계산된다.^[8] Marcos 등에 의한 파장 450 nm와 650 nm 사이에서 측정된 종광선색수차의 평균값은 1.26 ± 0.16 Diopter이다.^[8] 그러므로 본 논문에서 계산한 종광선색수차는 파장의 범위를 같이하여 계산한 Charman의 값과는 0.04 Diopter의 차이가 있고, Marcos 등의 측정값과는 오차범위 내에 들어가나 파장의 범위에서 차이가 난다. 종광선색수차의 값은 기본적으로 안구 내부 매질들의 굴절률과 면굴절능들에 의하여 영향을 받는다. 본 논

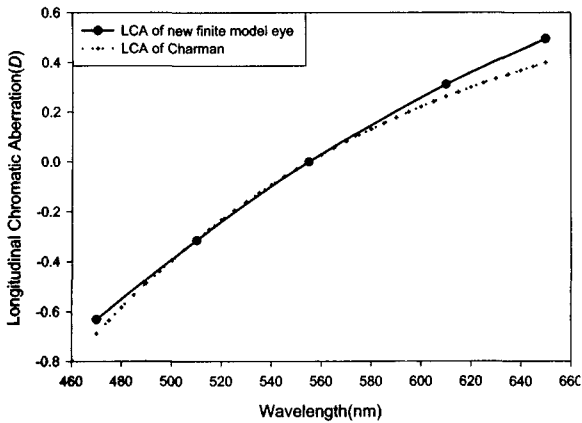


그림 6. 설계된 정밀모형안의 종광선색수차. 점선은 Charman의 환산식을 사용하여 얻은 종광선색수차(종광선색수차의 단위는 Diopter).

문에서 설계된 모형안은 한국인의 평균곡률반경을 사용하여 최적화하였기 때문에 면굴절능이 서양인의 안구와 차이가 난다. 이러한 이유로 본 논문의 종광선색수차는 Charman과 Marcos 등의 결과와 차이가 있다 사료된다. 그림 6은 설계된 정밀모형안과 Charman의 종광선색수차를 Diopter 단위로 환산하여 도식화한 것이다.

V. 환산모형안(reduced eye)

환산모형안은 사람의 안구를 등가구면렌즈 이론으로 설계한 단일 환산면을 갖는 모형안이다. 또한 환산모형안은 근축광학이 적용되는 모형안이다. 그러므로 수차나 비축광선에 대하여는 정확한 광학적 예측이 불가능하고, 단지 시야각이 2° 미만, 입사동 직경 0.5 mm 미만인 영역에서 기하광학적으로 기술된다. 환산모형안은 상거리(망막의 위치) · 상크기 같은 기초적인 first order 값을 알게 하여, 정시와 비정시의 망막상 크기 · 굴절이상 · 입사동 · 출사동 · 안경배율 등과 같은 안구의 광학상수를 알게 한다.

정시안인 환산모형안은 환산면굴절능과 안축길이의 버전스 길이가 같은 모형안이다. 정밀모형안을 기초로 하여 등가굴절능과 주요점들을 결정하면 다음과 같다. 정밀모형안에서 유효초점거리가 중심파장에서 15.842 mm이기 때문에 공기중 초점거리 및 등가굴절능(D_e')은 각각

$$F_e P = NF_e' = 15.842 \text{ mm} \tag{12}$$

$$D_e' = -\frac{n}{PF_e} = \frac{n_e}{PF_e'} = 63.12 \text{ D} \tag{13}$$

이다. 환산모형안은 단일면 모형안이어서 주점에서 곡률반경 중심의 거리와 주점에서 절점까지의 거리가 같게 된다. 또한 물 · 상측 절점의 위치는 같다. 그러므로 주점과 곡률반경 사이의 거리는

$$PN = \frac{n - n_e}{D_e'} = 5.281 \text{ mm} \tag{14}$$

이다. 환산모형안 내부의 굴절률(n_e)은 Listing, Donders, Emsley 환산모형안 등에서 사용되어진 물의 굴절률 1.33333을 사용하였다.^[9] 이와 같이 본 환산모형안에서도 물의 굴절률을 사용하여 안축길이는

$$PF_e' = NF_e' \times n_e = 21.123 \text{ mm} \tag{15}$$

와 같이 결정한다. 식 (12), (13), (14), (15)에서 사용한 기호는 그림 3에서 정의되었다. Stop, 입사동, 출사동은 환산면에 일치한다. 기술된 환산모형안에서 굴절이상의 정도를 버전스 거리로 계산을 하면, 광축인 z-축상의 거리 약 0.335 mm가 1 Diopter의 중초점이동에 해당된다.

VI. 결 론

종광선구면수차의 값을 목표값으로 사용하여 최적화 기법으로 동공직경 1 mm에서 8 mm의 가변 stop을 가지는 이론적인 정밀모형안을 설계하였다. 이를 기초로 종광선구면수차를 결정하고, 다른 모형안의 값들과 비교하였다. 또한 종광선색수차를 계산하고, 다른 이론값 및 측정값과 대조하였다. 동광선각비, 종광선구면수차, 종광선색수차의 결과값을 검토한 결과 정밀모형안이 적절히 구성되었음을 알 수 있었다. 또한, 이 정밀모형안을 가지고 환산모형안의 광학상수 값을 결정하였다. Emsley 모형안에서 안축길이는 22.222 mm인데 반하여 설계된 환산모형안은 21.123 mm의 값을 가져서 서양인의 안구보다는 작음을 알 수 있다. 이는 곡률반경과 중심두께 측정값을 한국인의 평균값을 사용하여 모형안을 설계한 이유라 사료된다.

향후 설계되어진 정밀모형안은 실제 안구의 시기능 특성을 기준으로 모형안의 Contrast Sensitivity Function(CSF)과 Modulation Transfer Function(MTF)을 연구하여 이론적으로 정시와 Snellen 시력표와의 관계를 규명하는데 사용될 것이다. 모형안의 한계 중의 하나는 공축계로 광학계가 구성이 된다는데 있다. 하지만 실제의 안구는 양안시를 구축하기 위하여 공축계로 광학계가 구성이 되지는 않는다. 그러므로 앞으로는 각막, 동공, 수정체의 tilt를 고려하여 광학계를 재구성할 것이다. 또한 안구의 광학계는 근거리 물체를 볼 때, 조절 · 폭주 · 축동의 현상이 동시에 일어난다. 이를 고려하여 안구의 유한거리광학계를 구성하고자 한다.

참고문헌

[1] D. A. Atchison and G. Smith, Optics of the Human Eye(Butterworth-Heinemann, 2000), pp. 39-50.
 [2] R. Navarro, J. Santamaria, J. Bescos, "Accommodation-dependent model of the human eye with aspherics," J. Opt. Soc. Am. A, vol. 2, no. 8, pp. 1273-1281, 1985.

- [3] 김상기, 박성찬, "구면수차를 이용한 정밀모형안의 최적화," *한국광학회지*, 제13권 3호, pp. 266-271, 2002.
- [4] A. K. C. Lam and W. A. Douthwaite, "Measurement of posterior corneal asphericity on Hong Kong Chinese: A pilot study," *Ophthalm. 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," *Ophthalm. Physiol. Opt.*, vol. 11, pp. 359-369, 1991.
- [6] J. T. Schwiegerling, *Visual Performance Prediction Using Schematic Eye Models*(The University of Arizona, 1995), pp. 17-21.
- [7] D. A. Atchison, G. Smith, *Optics of the Human Eye* (Butterworth-Heinemann, 2000), pp. 160-179.
- [8] S. Marcos, S. A. Burns, E. Moreno-Barriuso, R. Navarro, "A new approach to the study of ocular chromatic aberrations," *Vision Research*, vol. 39, no. 26, pp. 4309-4323, 1999.
- [9] 성풍주, *안경광학*(대학서림, 2002), pp. 33-40.

Optical constant of the reduced eye based on theoretical finite model eye

Sang Gee Kim[†]

Optometry and Vision Science, Dongnam Health College, Suwon 440-714, KOREA

[†]*E-mail: koptics@dongnam.ac.kr*

(Received November 3, 2003, Revised manuscript April 6, 2004)

A finite model eye based on longitudinal spherical aberration is designed by an optimization method. Longitudinal spherical aberration for pupil diameter between 1 mm and 8 mm is graphed theoretically and compared with other model eyes. The chromatic dispersions are adjusted to fit the experimentally observed chromatic aberration of the eye. This is a finite model eye with four aspheric refracting surfaces. It has an effective focal length of 15.842 mm. A designed reduced eye has an equivalent power of 63.12 *Diopter*, curvature radius of 5.281 mm, index of 1.33333, and axial length of 21.123 mm.

OCIS Codes : 170.4460, 220.4830, 220.1010.