

대비감도함수와 변조전달함수를 이용한 시기능 예측

김상기[†]

동남보건대학 안경광학과

Ⓣ 440-714 경기도 수원시 장안구 정자동 937번지

박성찬

단국대학교 첨단과학부 전자물리학과

Ⓣ 330-714 충남 천안시 안서동 산 29번지

(2004년 4월 27일 받음, 2004년 8월 19일 수정본 받음)

본 논문에서 연구된 정밀모형안은 정시안에서 1.2 시력의 적절한 수차를 가진 모형안임을 확인하였다. 망막의 특성을 생략한 안광학계에 광전달함수를 사용하여 망막에서의 광세기 분포를 조사하여 자각식으로 측정된 임상자료와 비교하였다. 망막의 광학적 특성을 나타내는 안구의 수차, 회절, 망막 대비감도, Stiles-Crawford 효과, 동공크기를 포함한 대비감도함수를 계산하였다. 모형안에 동공 직경 1 mm와 8 mm의 범위에서 정시안과 비정시안에 대해 대비감도함수와 변조전달함수를 비교하여 시력을 예측하였다.

주제어 : aberration, contrast sensitivity function, modulation transfer function, visual acuity.

I. 서 론

인간의 안구에서 안광학계로 인한 시기능(visual performance)을 결정하는 요소는 수차, 회절, 안구 내부에서의 산란이고, 망막으로 인한 원인은 유향크기의 광수용체(photoreceptor), 시신경계에서의 혼란(noise) 등이다. 즉, 이러한 요인들이 시력의 특성을 결정한다. 이 외에 이상적인 좋은 눈을 제한하는 요소는 중심와 시력(foveal vision), 조절(accommodation), 동공크기, 순응(adaptation) 등이 있다.^[1]

광학계 성능을 평가하기 위하여 사용되는 분석법은 회절과 수차에 기초한 점퍼짐함수(Point Spread Function)와 광전달함수(Optical Transfer Function)가 있다. 하지만 점퍼짐함수와 광전달함수는 광학계 성능에 대한 자세한 정보를 포함하나, 시기능의 임상측정과는 쉽게 관련시키지 못하는 특성이 있다. 즉, 안광학계에 대하여 기하광학적으로 해석할 수 있으나, 광수용체인 망막의 시기능에 대한 해석은 쉽지가 않다. 시기능에 대한 피검자의 자각적 판단은 시력표 상의 글자를 얼마나 자세히 인지하느냐에 의한 시력으로 결정된다. 안광학계를 통하여 결상되는 시력표의 글자에 대한 상의 품질은 점퍼짐함수, 광전달함수와 같은 수학적함수를 사용하여 이론적으로 해석된다. 반면 광수용체인 망막의 특성은 대비감도함수(Contrast Sensitivity Function)를 이용하여 표현한다.^[2]

본 연구에서 사용된 모형안은 한국인의 안구를 대상으로 측정된 곡률반경 및 중심두께를 가지고 있다. 명소시를 기준으로 한 중심시력에서 설계된 모형안을 기준으로 수차, 회절, Stiles-Crawford 효과를 고려한 점퍼짐함수와 광전달함수를

사용하여 결상특성을 예측하고, 이를 자각적으로 측정된 임상자료와 비교하였다. 그리고 망막과 두뇌의 시기능을 포함한 대비감도함수를 modeling하여 광수용체인 망막의 광학 특성을 결정하였다. 이 대비감도함수와 변조전달함수(Modulation Transfer Function) 특성으로부터 사람의 시력을 예측하였다. 본 논문에서 사용된 *Diopter* 단위는 *D*로 표기하였다.

II. 정밀모형안의 Snellen 시력표 E에 대한 상

2.1. 정밀모형안

본 논문에서 사용된 모형안은 명소시인 상태를 기준으로 그림 1과 같이 망막이 초평면인 정시안으로 구성되었으며, 안광학계는 Navarro 모형안을 기본으로 하여 최적화기법에 의해 설계되었다.^[4] 광학면은 4개의 비구면으로 구성되어 있고, 3면의 위치인 수정체 전면에 stop의 역할을 하는 동공이 위치한다.

최적화 설계에 의하여 얻은 정밀모형안의 광학상수값은 표 1과 같다. 동공직경 2, 4, 6, 8 mm일 때, 모형안의 상공간

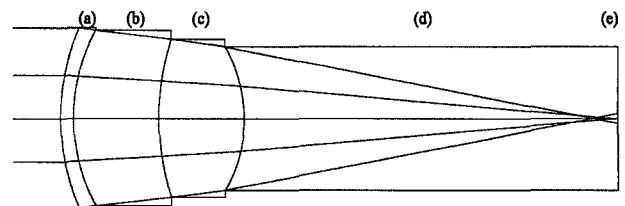


그림 1. 동공직경 6 mm에서 모형안의 구성도. (a) 각막, (b) 방수, (c) 수정체, (d) 초자체, (e) 상측초평면인 망막.

[†]E-mail: koptics@dongnam.ac.kr

F/#는 각각 6.88, 3.44, 2.29, 1.72이다. 망막에서 발생하는 Stiles-Crawford 효과를 광학적으로 표현하기 위해 동공에서 무축화(apodization)를 적용하였으며, 사용된 Stiles-Crawford 계수는 0.12 mm⁻²이다.

설계에 사용되어진 파장은 명소시를 기준으로 470, 510, 555, 610, 650 nm이며, 중심파장은 555 nm이다. 공기 중에서 모형안의 유효초점거리는 15.84 mm이고, 광축상의 모형안 전체 길이는 23.39 mm이다.

표 1에서 주어진 곡률반경(R), 비구면도(Q), 각각의 면의 좌표를 나타내는 방정식은 식 (1)과 같다.

$$z = \frac{(x^2 + y^2) \left(\frac{1}{R}\right)^2}{1 + \sqrt{1 - (Q+1)(x^2 + y^2) \left(\frac{1}{R}\right)^2}} \quad (1)$$

여기서, x와 y는 면의 위치좌표이고, z는 면의 sagmentation을 표현한다. 표 1에 주어진 모형안의 자료값을 다른 연구자에 의해 발표된 것과 비교한 결과 대부분 평균측정값 근처에서 최적화되어져 안정화된 모형안을 구성하고 있다.

광학계에서 광선은 면에서 굴절을 하고 면과 면 사이에서 이동을 하여 최종적으로 상면에 도달하게 된다. 안광학은 면에서의 굴절을 가우스 결상식으로, 면과 면 사이 광선 이동을 버전스이동(effectivity)식에 의하여 표현한다. 이상적인 안구는 광수용체인 망막에 퍼짐이 없는 작은 점으로 결상시킬 수 있는 눈, 즉 망막에 불선명상점(blur point)이 없는 눈이다. 하지만 1차 수차인 종초점이동에 의한 근시·원시·난시와 같은 굴절이상(refractive error)은 망막 위에 점대신 원(blur disk) 또는 타원 형태의 일정한 퍼짐을 가지는 결상을 하게 한다.

굴절이상이 존재하면 종초점이동이 발생하여 상측초평면과 망막 사이에는 거리의 차이가 있다. 이러한 거리는 안광학에서 버전스 거리(dioptic length)로 표현되며, 버전스 거리의 안광학적 기준점은 상면인 망막이다. Δk'은 굴절이상을 표현하는 망막에서 상측초점까지의 거리이며 다음 식으로 주어진다.

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

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	-0.6634	-0.2924	-1.1164	-0.1290
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

식 (2)에서 ΔK'은 굴절이상을 표현하는 버전스 거리이고, k'과 n_e는 각각 정시인 상태에서 안축길기와 안구 상공간의 굴절률이다.

일반적인 광학계와 같이 안광학계도 3차 수차를 가지고 있으며, 이는 결상 특성에 영향을 준다. 본 논문에서 사용된 모형안의 종광선구면수차는 중심파장에서 동공직경이 4 mm일 때, 0.63 D이다. Kooijman, Navarro, Liou and Brennan 모형안에서 동공직경이 4 mm일 때 종광선구면수차의 값은 각각 0.58, 0.51, 0.37 D이다. 따라서 사용된 모형안의 종광선구면수차값은 Kooijman, Navarro 모형안과는 유사하며, Liou and Brennan 모형안의 값보다 다소 크다.

파장 470 nm와 650 nm 사이에서 명소시인 모형안에서 종광선색수차는 디오퍼로 환산해서 1.13 D이다. 안구의 색수차에 대하여 Charman은 식 (3)과 같은 환산식으로 표현하였다.^[5]

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

식 (3)에서 LCA는 Diopter 단위의 종광선색수차, λ₁, λ₂은 종광선색수차의 범위를 결정하는 nm 단위의 파장이다. 식 (3)을 사용하여 파장 470 nm와 650 nm 범위에서 계산을 하면 종광선색수차는 1.09 D이다. 또한 Marcos가 파장 450 nm와 650 nm 사이에서 측정된 종광선색수차의 평균값은 1.26 ± 0.16 D이다.^[5] 그러므로 본 논문에서 사용된 모형안의 종광선색수차는 파장의 범위를 같이하여 계산하면, Charman의 값과는 0.04 D의 차이가 있다. 또한 Marcos 등의 측정값과는 파장의 범위가 차이가 있지만 오차범위 이내이다.

수차가 없다고 가정하여도, 회절 효과에 의해 망막에 이상적인 상점은 가능하지 않다. 안광학계에서는 안구의 동공(pupil)에서 회절이 일어나며, 회절에 의해 휘어진 빛들이 다른 빛들과 간섭을 일으켜 상면에 회절 무늬를 발생시킨다. 원형의 동공을 가지는 Fraunhofer 회절 조건에서 수차가 없는 완전한 광학계에서 만들어지는 상점의 형태가 Airy disk이다. Airy disk 직경 주변으로 물결모양으로 퍼져나가는 blob이 형성되어 상의 품질이 나빠지게 된다. 하지만 안광학계에서는 Stiles-Crawford 효과에 의하여 이러한 blob은 무축화가 되어 동공이 커지더라도 무축화가 되지 않았을 때보다 상의 품질은 향상된다.

안광학에서 다루는 광원들은 대부분 비발광체이고, 가간섭성이 없는 백색광을 방출하는 물체들이다. 점퍼짐함수는 하나의 점광원을 광학계가 대응되는 상점으로 만들 때 나타나는 광세기 분포이다. 이러한 점퍼짐함수는 광학계의 구경 크기, 수차, 회절 등에 영향을 받는다. 동공의 크기가 클수록 Airy disk 직경은 작아져서 가능한 최대 분해능이 커진다. 하지만 안광학계에는 회절뿐만 아니라 수차가 존재하기 때문에 동공이 커질수록 Airy disk의 중심에서 광세기는 감소하게 된다.

2.2. Snellen 시력표 E에 대한 상

물체는 무수히 많은 점들의 집합으로 구성되어 있다. 이러한 점에 대응하는 점퍼집합수들은 역상관관계(convolution)을 통하여 상면을 구성하게 된다. 이 때 점퍼집합수들이 겹쳐지는 크기와 넓이가 상의 불선명도를 결정하는 요인이 된다. 그림 2는 구면수차, 색수차, Stiles-Crawford 효과를 포함하고, 동공크기가 4 mm인 정밀모형안에서 (a)는 정시안, (b)는 -0.50 D 근시안, (c)는 -1.00 D 근시안의 점퍼집합수를 규격화(normalization)하여 나타낸 것이다. 굴절이상에 따른 종 초점이동이 커지면서 Airy disk 직경의 크기가 커짐을 알 수 있다. 즉, 근시의 굴절이상이 커질수록 분해능은 나빠진다.

광전달함수의 개념은 광학계가 물체공간에 존재하는 2차원의 공간주파수에 대한 능동적 선형 필터로 고려될 수 있다는 점에 기초한다. 광학계의 광전달함수는 점퍼집합수의 푸리에 변환이어서 복소수함수로 표현된다. 광전달함수의 실수 부분은 변조전달함수(Modulation Transfer Function)이고, 허수 부분은 위상전달함수(Phase Transfer Function)이다. 변조전달함수는 물체공간의 공간주파수가 상공간의 공간주파수로 어떻게 변환되는지를 표현하고, 위상전달함수는 spurious resolution과 같은 음의 수로 위상이 전이됨을 표현한다.⁶⁾

점퍼집합수와 광전달함수를 알게 되면, 물체공간에 대응되는 상공간의 조도형태를 결정할 수 있다. 각 함수간의 상호관계는 그림 3에 정리되어 있다. 그림 3에서 첫 번째 방법은 점퍼집합수를 사용하여 물체에 대한 역상관관계를 하는 것

이다. 다른 방법은 점퍼집합수를 푸리에변환하여 광전달함수를 얻고, 물체 푸리에 스펙트럼을 구한다. 그 다음 광전달함수와 물체 푸리에 스펙트럼을 곱하여 상 푸리에 스펙트럼을 얻는다. 마지막으로 상 푸리에 스펙트럼을 역푸리에 변환을 하여 상의 형태를 구한다.

임상적으로 구면비정시인 근시에서 자각식 점안으로 Snellen 시력표를 사용하여 안경을 착용하지 않은 상태의 시력인 나안시력을 결정하였을 때, 비정시의 정도를 나타내는 굴절이상과 Snellen 분수식을 소수로 시력을 표현한 나안시력 사이의 관계는 표 2와 같음이 알려져 있다.¹⁷⁾

물체에 대응되는 상의 품질과 시력을 예측하기 위하여 상의 변조(modulation)가 어떻게 되었는지 살펴보아야 한다. 변조는 상의 품질을 직접적으로 결정하는데 좋은 지표가 된다. 상의 변조 M은 다음과 같은 식에 의하여 정의된다.

$$M = \frac{I_{MAX} - I_{MIN}}{I_{MAX} + I_{MIN}} \quad (4)$$

여기서, $I_{MAX} \cdot I_{MIN}$ 은 상면에서 최대 · 최소 광세기이다. 시력표의 세로 줄 방향으로 있는 소수로 표현한 시력에 대응하는 문자 E의 크기는 다르기 때문에 각각 다른 공간주파수를 가지고 있다. 그림 4(c), 그림 5(c), 그림 6(c)는 망막에서 글자 E의 변조된 상의 사인함수 패턴을 보여준다.

그림 4는 동공직경 4 mm인 정시안일 때, 정밀모형안인 Snellen 시력표 문자 E를 망막에 결상하는 형태이다. 그림 4(a)는 망막에서의 상크기를 나타내는 분각(minute of arc)의 역수인 시력을 나타내는 소수, 그림 4(b)는 그림 4(a)의 분각을 가지는 물체 크기에 대한 광전달함수에 의한 결상, 그림 4(c)는 그림 4(b)에 대한 변조된 상의 광세기를 표현한 것이다. 그림 4에서 보았을 때 수차 및 회절의 영향으로 분각이 작을수록 상의 분해가 덜 됨을 알 수 있다. 프린터의 분해능 한계로 정확한 수치의 결정이 어려우나 상의 변조를 표현한 그림 4(c)로부터 안광학계만의 결상특성으로 판단할 때, 시력 2.0도 가능함을 알 수 있다. 하지만 retinal sampling 및 대

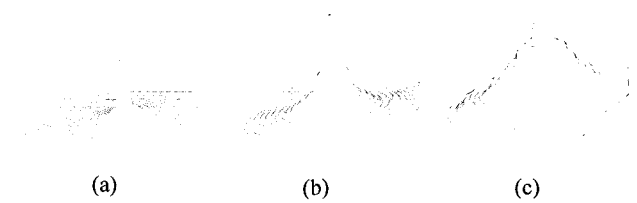


그림 2. 동공크기 4 mm에서 (a) 정시안, (b) -0.50 D 근시안, (c) -1.00 D 근시안의 점퍼집합수. 옆면의 가로×세로 크기는 63.53 μm×63.53 μm이다.

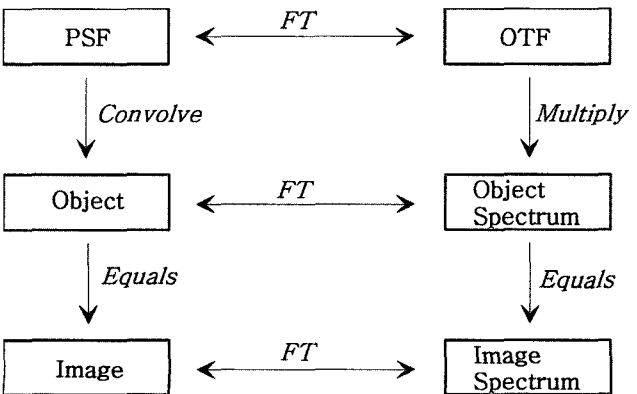


그림 3. 점퍼집합수와 광전달함수로부터 주어진 물체에 대한 상을 계산하는 방법. 여기서, FT는 Fourier Transform을 의미함.

표 2. 근시의 비정시 정도와 나안시력과의 관계

근시(D)	나안시력
약간	1.0
-0.50	0.67
-0.75	0.5
-1.00	0.33
-1.50	0.25
-2.00	0.17
-3.00 ~ -2.00	0.1

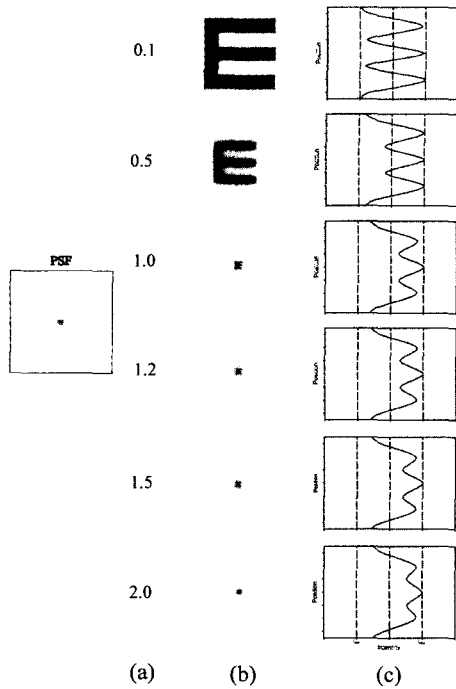


그림 4. Snellen 시력표 문자 E의 결상 특성. 모형안은 동공직경이 4 mm이고, 굴절이상 없는 정상안이다. (a) 소수로 표현한 시력, (b) 광전달함수에 의한 망막에서 결상형태, (c) 망막 결상 형태 (b)에 대한 광세기 분포.

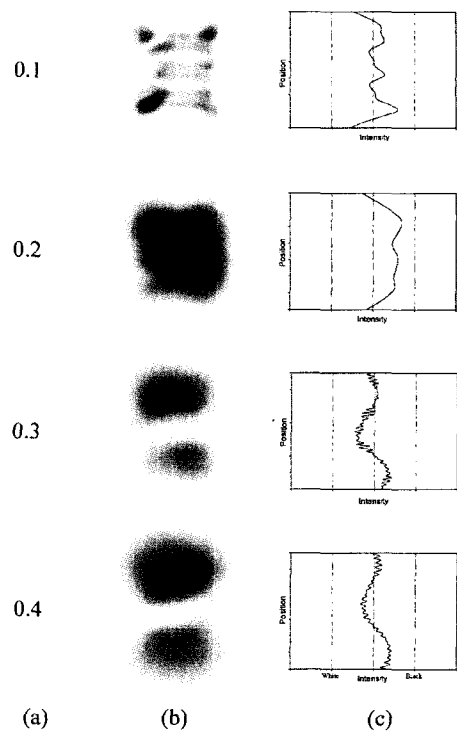


그림 6. -2.00 D 근시를 가진 모형안에서 망막에 결상되는 Snellen 시력표 문자 E들의 결상 형태. 모형안의 동공직경은 4 mm 이고, (a) 소수로 표현된 시력, (b) 광전달함수에 의한 망막에서 결상형태, (c) 그림 (b)에 대한 광세기 분포.

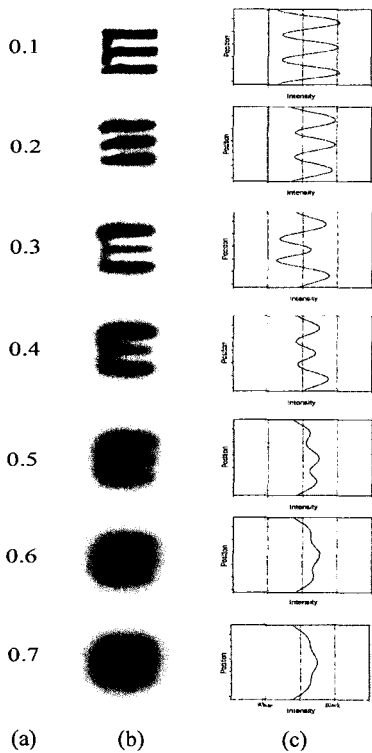


그림 5. -0.75 D 근시를 가진 모형안에서 망막에 결상되는 Snellen 시력표 문자 E들의 결상 형태. 모형안의 동공직경은 4 mm 이고, (a) 소수로 표현된 시력, (b) 광전달함수에 의한 망막에서 결상형태, (c) 그림 (b)에 대한 광세기 분포.

비감도 특성에 의하여 망막에서 안광학계의 분해능은 제한된다.

그림 5와 6은 동공 크기 4 mm인 모형안에 인위적으로 -0.75 D, -2.00 D만큼의 축성근시를 만들었을 때 상의 형태를 보여준다. 임상적으로 -0.75 D 근시일 때 나안시력은 0.5로 알려져 있다. 즉 Snellen 시력표의 0.5 가로선상을 포함한 위에 있는 글자까지를 읽을 수 있으며, 그림 5에서 이를 확인할 수 있다. 또한 -2.00 D 근시일 때, 나안시력은 0.17 정도임을 그림 6으로부터 추정할 수 있다. 그림 6에서 시력 0.3과 0.4에서 글자 E의 중간 가로 선이 검정색에서 흰색으로 바뀌어 지는 spurious resolution이 발생하여 글자가 구분되지 않음을 알 수 있다.

III. 대비감도함수에 대한 modeling

시력표를 본다는 의미는 안구의 망막으로 문자의 결상 형태를 확인하고, 이를 두뇌가 인지한다는 의미이다. 그러므로 망막과 두뇌의 광수용능력을 함수화하여 결정하는 것은 매우 중요하다.

일반적으로 시력의 임상적인 측정은 Snellen 시력표를 사용한다. Snellen 시력표는 세로 줄을 기준으로 연속하여 아래 방향으로 글자의 크기가 분각 크기 순서로 작아지게 구성되어 있다. 피검자가 시력표를 보게 될 때 아래 방향으로 연속

적으로 있는 글자들은 작아지므로 어느 순간 글자가 인지가 되지 않는다. 망막에 결상되는 문자의 크기에 대응하는 공간 주파수의 변조한계(modulation threshold)보다 작은 값으로 변조된 글자는 보이지 않는다. 그러므로 망막에서 상의 변조한계 이상의 글자 크기가 시력으로 결정된다. 따라서 시력 예측을 위한 대비감도함수 모형은 주어진 동공 크기와 근시 정도에 대해 임상결과를 해석적 분석하기 위해 필요하다.

상의 변조로부터 정확한 시기능을 예측하기 위하여 망막과 두뇌의 기능이 결합된 함수가 포함된 모형이 필요하다. 이러한 함수를 구축 가능하게 하는 것이 대비감도함수이다. 대비감도함수는 눈으로 볼 수 있는 특정 공간주파수에 대해 요구되는 최소 상변조를 말한다. 이러한 망막의 대비감도(contrast sensitivity)를 임상적으로 측정하고 분석한 연구 결과들이 꾸준히 발표되고 있다.^[8-12]

본 논문은 대비감도함수를 modeling하기 위하여 Campbell과 Green의 결과를 사용하여 설계된 모형안에 적절히 맞추어 대비감도함수를 수정 설계하였다.^[8] 이 함수에 대한 modeling을 하는 과정에서 각각의 공간주파수에 대해 굴절이상을 포함하는 1차 수차를 무시하였다. 즉, 정시안을 기준으로 대비감도함수를 modeling 하였다. 가간섭성이 아닌 균일한 빛의 세기를 변화시킴에 따라 사인함수 형태의 공간주파수는 변조된다. 여러 개의 공간주파수에 대한 최소 관측가능성을 판단함에 의해 망막 대비감도함수는 결정된다. 망막에서 물체를 인지하는데 필요한 최소의 상 대비를 변조한계(modulation threshold)라 하며, 이 한계는 망막이 요구하는 일정 크기의 공간주파수를 관측할 수 있는 최소 경계를 표현하는 대비감도함수의 역수이다.^[2]

그림 7은 Campbell과 Green의 결과를 이용하여 modeling한 것을 기준으로 Rovamo와 Kukkonen의 결과를 본 연구의 모형안에 적용하여 동공크기에 따른 변조한계를 표현한 것이다.^[11] 그림 7에서 망막에서 상의 modulation 값이 각각의 공간 주파수에 대해 변조한계 값보다 크면 망막에서 물체에

대한 구별이 가능하다. 회절에 의해 크게 영향을 받는 동공 크기 1, 1.5, 2 mm는 유사한 형태의 변조한계를 가지고 있다. 또한 수차에 의해 크게 영향을 받는 6, 8 mm도 비슷한 변조한계를 갖고 있다. 그러므로 그림 7은 크게 3개의 군을 가진 변조한계의 특성을 보여준다.

모형안을 이용하여 계산된 불선명한 글자 E의 망막에서 변조값을 망막의 변조 한계와 비교하여 상의 변조가 Campbell과 Green에 의해 측정된 변조한계와 같아 질 때 눈으로 볼 수 있는 글자 E의 최소 크기가 결정된다. 이러한 변조한계에 의하여 결정된 인식 가능한 최소 크기 글자 E의 공간주파수는 Snellen 시력표 상의 시력을 나타내는 임의의 가로줄의 숫자와 대응된다. 이러한 변조한계는 굴절이상을 제외하고 안구의 구면수차, 색수차, 회절, 망막 대비감도, Stiles-Crawford 효과, 동공크기를 포함하여 결정하였다.

IV. 변조전달함수를 이용한 시력 예측

망막의 변조한계와 모형안의 변조전달함수가 같은 그래프 안에 그려지면, 서로 일치하는 공간주파수에서 사람이 관측할 수 있는 최대 공간주파수를 결정할 수 있다. 사인파(sine-wave) 변조전달함수와 사각파(square-wave) 변조전달함수는 공간주파수의 표현에서 차이가 있다. 시력을 측정하기 위하여 사용하는 시력표는 검정과 하얀색의 대비를 사용하는 binary target이다. 이러한 특성을 고려하여 시력 예측을 위하여 사용한 변조전달함수는 사각파 변조전달함수를 사용하였다. 주기적인 막대기 모양의 물체들은 여러 개의 고차 홀수 조화주파수들을 가진 사인함수의 합과 비슷한 주파수 특성을 가진다. 간격을 가지는 막대기 모양의 물체는 광학계의 광전달함수에 의해 공간주파수에 따라 다르게 변조되어 결정된다. 수학적으로 사각파 변조전달함수(SMTF)는 다음 방정식으로 표현된다.^[2]

$$SMTF(\xi) = \frac{4}{\pi} \left[MTF(\xi) - \frac{MTF(3\xi)}{3} + \frac{MTF(5\xi)}{5} - \frac{MTF(7\xi)}{7} + \dots \right] \quad (5)$$

여기서, ξ 는 공간주파수, MTF 는 사인파 변조전달함수, $SMTF$ 는 사각파 변조전달함수이다. 시력표에서 글자 E의 크기의 역수는 전형적인 사각파 공간주파수에 대응된다. Snellen 시력표를 사용한 시력의 측정은 밝고 어두운 글자의 경계를 가지는 글자의 최소 크기를 인식하는 한계를 측정하는 것이기 때문에 사각파 변조전달함수를 사용하여 시력을 결정하는 것이 타당하다. 그림 8은 동공 직경을 각각 1 mm, 1.5 mm, 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm로 변화를 주었을 때, 모형안의 SMTF 특성과 망막의 변조한계를 비교하여 정시안의 시력을 예측하는 방법을 보여주고 있다. 또한 그림 9는 동공 직경 4 mm에서 -0.75 D의 근시를 가진 비정시의 시력을 예측한다. 일반적으로 시력을 공간주파수로 표현하지 않는다. Snellen

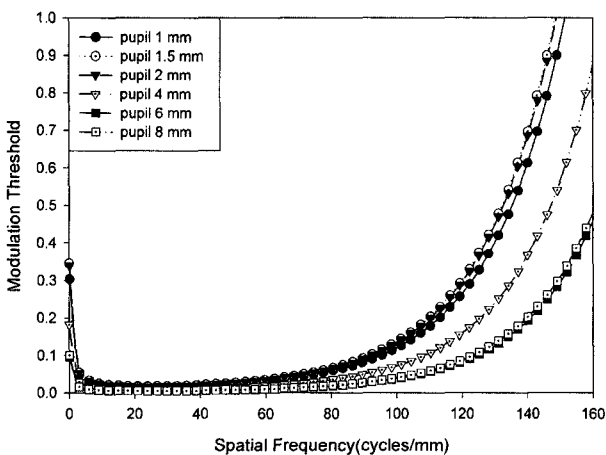


그림 7. 동공 크기의 변화에 대해 대비감도함수를 이용하여 얻은 변조한계의 modeling.

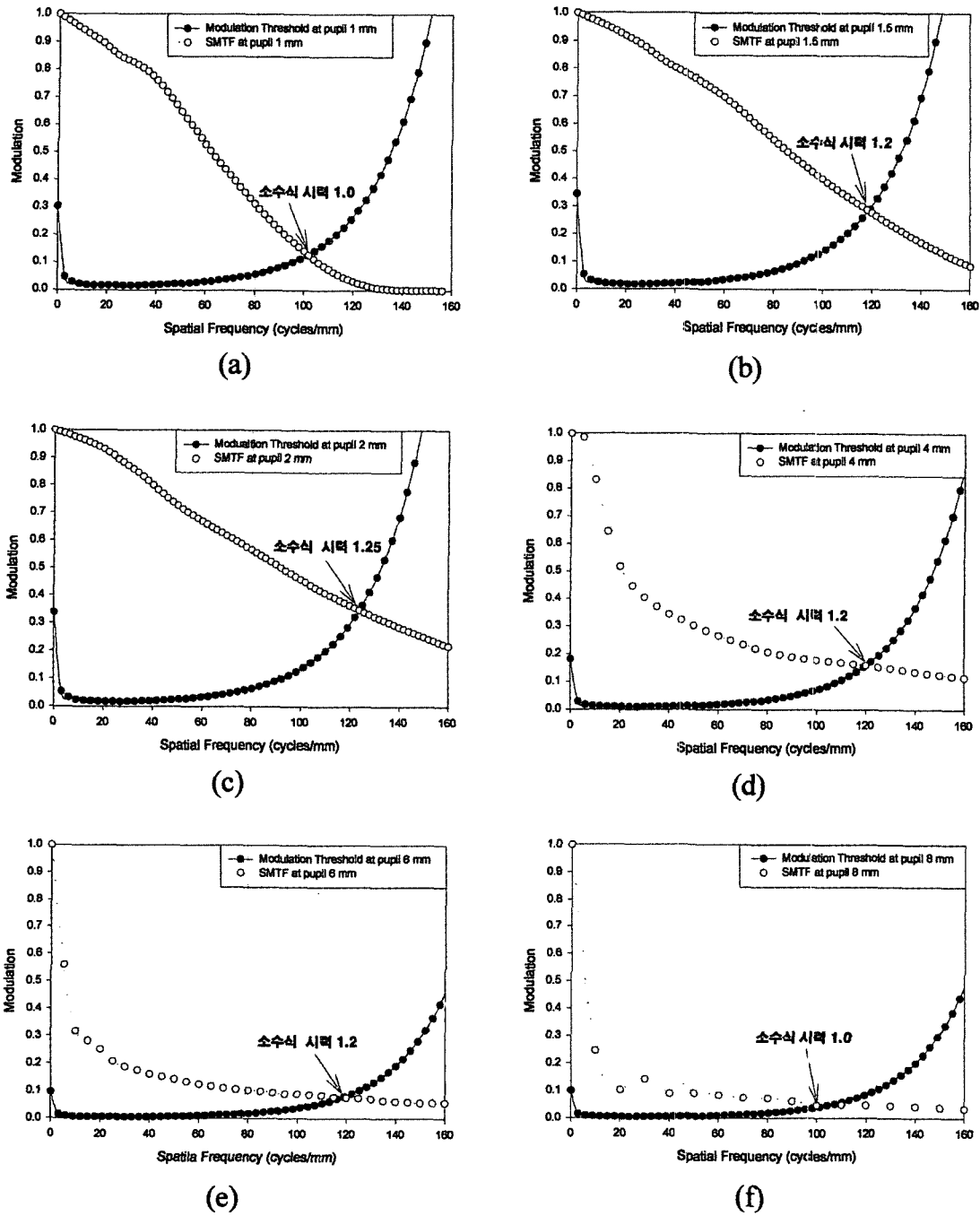


그림 8. 사각파 변조전달함수(SMTF)를 사용한 정시안의 시력 결정.
 사각파 변조전달함수와 변조한계를 동공크기 별로 일치하는 공간주파수를 찾아 소수식 시력을 결정.
 동공직경 (a) 1 mm, (b) 1.5 mm, (c) 2 mm, (d) 4 mm, (e) 6 mm, (f) 8 mm.

글자 E는 세로 방향으로 2.5 cycles을 가지며, 시력표의 일정한 줄에 대하여 글자 E는 망막 위에 대응되는 상 크기를 가지게 된다. 만일 2.5 cycles을 망막에 결상된 글자 E의 크기로 나누면, 글자 E에 대한 공간주파수가 얻어진다. Snellen 시력표의 시력을 나타내는 소수식은 다음과 같은 방정식에 의하여 환산된다.^[2]

$$\text{Snellen 소수식 시력} = \frac{\xi}{100} \quad (6)$$

여기서 ξ 는 단위가 cycles/mm이며, 망막안의 중심소와(foveola)에서 공간주파수이다. 이 식을 사용하여 그림 8에서 회절에 의해 크게 영향을 받는 동공직경 1 mm와 수차에 의해 크게 영향을 받는 동공직경 8 mm를 제외하고는 대부분의 동공직경에서 소수식 시력 1.2가 결정됨을 알 수 있다.

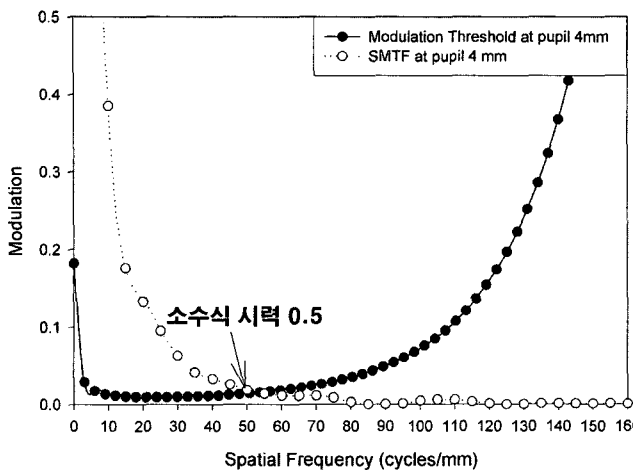


그림 9. 사각파 변조전달함수(SMTF)를 사용한 $-0.75 D$ 근시안의 시력 결정. 동공직경 4 mm일 때, 사각파 변조전달함수와 대비감도함수의 역수인 변조한계값이 일치하는 공간주파수를 찾아 소수식 시력을 결정.

그림 7과 8에서 망막의 변조한계를 modeling할 때, 굴절이상으로 인한 대비감도함수의 특성변화를 고려하지 않았다. 그러나 이러한 접근 방법은 비정시의 시력을 결정하는데 영향을 작게 미친다는 사실을 그림 9로부터 알 수 있다. 시력을 자각식으로 측정된 결과인 표 2를 참고하여 보았을 때, $-0.75 D$ 의 굴절이상을 가지는 근시안은 시력이 0.5임을 알 수 있다. 이는 모형안의 SMTF값과 망막의 변조한계값을 비교하여 얻은 그림 9의 결과와 일치한다.

V. 결론

본 논문에서 사용된 모형안은 시력 예측이 가능하고 대한민국형 안구에 적합한 정밀모형안임을 확인하였다. 이 모형안은 Kooijman 모형안에 비하여 구면수차가 약간 커서 Kooijman 모형안에 비해 설계된 모형안의 시력은 조금 떨어진다. Kooijman 모형안에 기초하여 Greivenkamp 등에 의하여 예측된 시력이 1.54인 반면, 본 논문에서 사용된 정시인 모형안의 시력은 1.2임을 확인하였다. 한편 실제로 정시안에서 임상적으로 측정된 시력은 대부분 1.2 정도이고, 이 값은 본 연구에서 얻은 시력과 오차 범위 내에서 일치하므로 적정한 수차와 회절 특성을 가진 안광학계가 결정되었음을 알 수 있다.

안광학계의 광전달함수를 사용하여 망막에 결상되어지는 광세기 분포를 조사하였다. 소수식 시력에 따라 글자 E의 크기에 맞추어 정시안, $-0.75 D$ 근시, $-2.00 D$ 근시에서 광세기 분포를 조사하여 자각식으로 측정된 임상자료와 비교한 결과 잘 일치함을 알 수 있었다. 안광학계의 성능만을 나타내는 정시안의 광세기 분포를 보았을 때 최대시력은 2.0 정도가 되지만, 망막에서 retinal sampling과 시신경에 의한 혼란 등이 발생하여 실제 시력은 2.0보다 작게 된다.

현재까지 발표된 연구에서 대비감도함수의 역수인 변조한

계는 동공직경을 무시하고 설계되었지만 본 논문에서는 동공직경을 고려하였으며, 그 결과 대비감도함수가 정상안에서 3가지 군을 가짐을 보였다. 이러한 대비감도함수들을 사용하여 정시안에서 명소시의 범위인 동공직경 2 mm와 6 mm 사이에서는 동공직경에 관계없이 시력이 1.2임을 알 수 있었다. 이러한 경향은 자각식으로 측정된 임상결과와 일치함을 보여준다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 동남보건대학 연구비 지원에 의하여 수행된 것임.

참고문헌

- [1] J. Schwiegerling, "Theoretical Limits to Visual Performance," *Surv. Ophthalmol.*, vol. 45, no. 2, pp. 139-146, 2000.
- [2] J. E. Greivenkamp, J. Schwiegerling, J. M. Miller, M. D. Mellinger, "Visual Acuity Modeling Using Optical Raytracing of Schematic Eyes," *Am. J. Ophthalmol.*, vol. 120, no. 2, pp. 227-240, 1995.
- [3] J. T. Holladay, M. J. Lynn, G. O. Waring, M. Gemmill, G. C. Keehn, B. Fielding, "The Relationship of Visual Acuity, Refractive Error, and Pupil Size After Radial Keratotomy," *Arch. Ophthalmol.*, vol. 109, 1991.
- [4] 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.
- [5] S. Marcos, S. A. Burns, E. Moreno-Barriusop, R. Navarro, "A new approach to the study of ocular chromatic aberrations," *Vision Research*, vol. 39, no. 26, pp. 4309-4323, 1999.
- [6] R. A. Applegate, L. N. Thibos, G. Hilmantel, "Optics of aberroscopy and super vision," *J. Cataract Refract. Surg.*, vol. 27, pp. 1093-1107, 2001.
- [7] R. B. Rabbetts, *Clinical visual optics*(Butterworth-Heinemann, 1998), pp. 91-112.
- [8] F. W. Campbel, D. G. Green, "Optical and retinal factors affecting visual resolution," *J. Physiol.*, vol. 181, pp. 576-593, 1965.
- [9] F. W. Campbel, R. W. Gubisch, "Optical quality of the human eye," *J. Physiol.*, vol. 186, pp. 558-578, 1966.
- [10] E. Peli, "Contrast Sensitivity Function and Image Discrimination," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 18, no. 2, pp. 283-293, 2001.
- [11] J. Rovamo, H. Kukkonen, J. Mustonen, "Foveal Optical Modulation Transfer Function of the Human eye at various pupil sizes," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 15, no. 9, pp. 2504-2513, 1998.
- [12] D. R. Williams, "Visibility of Interference Fringes near the Resolution Limit," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 2, no. 7, pp. 1087-1093, 1985.

Prediction of visual performance using contrast sensitivity function and modulation transfer function

Sang Gee Kim[†]

Optometry & vision science, Dongnam Health College, Suwon 440-714, KOREA

E-mail: koptics@dongnam.ac.kr

Sung Chan Park

Electro Physics Major, School of Advanced Science, Dankook University, Cheonan 330-714, KOREA

(Received April 27, 2004, Revised manuscript August 19, 2004)

A finite model eye of visual acuity 24/20 in emmetropia was presented. We determined the image intensity profile on retina using optical transfer function of model eye, and compared with clinical data. The retinal contrast sensitivity function based on the Stiles-Crawford effect, photopic response, diffraction, aberration, retinal contrast sensitivity, and pupil size is calculated. Visual acuity for human eye could be predicted by examining the modulation transfer function of a bar target and retinal contrast sensitivity function. This visual acuity was evaluated for pupil diameters ranging from 1 to 8 mm.

OCIS Codes : 220.4830, 220.4840.